

黄希元 唐怡生 编

# 小型水电站 机电设计手册

## 金属结构

水利电力出版社

新

TV 734-62

78

C.1

# 小型水电站机电设计手册

---

金 属 结 构

---

黄希元 唐怡生 编

水利电力出版社

1985

## 内 容 提 要

本手册根据《水利水电工程钢闸门设计规范》(SDJ13-78)及《水电站压力钢管设计规范》(SD144-85),介绍了广泛应用于小型水电站建设中的平面、弧形钢闸门的结构形式,设计原理,计算原则和方法;拦污栅结构原理及设计、计算方法;介绍了小型钢闸门、拦污栅启闭设备的系列资料、设备选择方法;压力钢管布置,钢管各组成部分较详细的设计计算方法,钢管支承结构工作原理和详细的计算方法,多种镇、支墩结构图形;列出了可供查用或参考的常用计算数据、图表和一些计算辅助曲线。

本手册是一部国内各地区、县级设计小水电工程金属结构专业人员手边常备的工具书,也可供从事小水电金属结构安装、运行、检修人员参考,或用作大、专院校从事此部分内容教学设计的师生教学参考资料。

## 小型水电站机电设计手册

金 属 结 构

黄希元 唐怡生 编

\*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 32.5印张 744千字

1991年8月第一版 1991年8月北京第一次印刷

印数0001—3105册

ISBN 7-120-01199-5/TV·397

精装定价25.15元

## 前 言

发展小水电站和地方电站事业是我国能源建设的重要组成部分。为适应建设的需要,在收集和总结国内这方面实践经验的基础上,编写了这套《小型水电站机电设计手册》。全书包括四个分册,分别介绍小 I、II 型水电建设中水力机械、电气一次、电气二次和金属结构方面的设计知识和资料,供从事水利水电设计工作的技术人员使用、参考,也可以供安装、运行单位以及有关院校师生教学参考。

本分册为金属结构部分,主要内容介绍小水电的水工钢闸门、拦污栅、启闭设备的构造、选型、布置、设计计算的原则和方法;介绍压力明管的构造、布置、设计计算的原则和方法。书中水工钢闸门系指小水电建设中应用最普遍的平面钢闸门和弧形钢闸门,并列入与之配套的启闭设备产品系列资料和有关图、表。

目前设计工作可遵循水电部颁发的有关设计规范,如《水利水电工程钢闸门设计规范》(SDJ13-78 试行)、《水电站压力钢管设计规范》(SD144-85 试行)、《水工建筑物金属结构制造、安装及验收规范》(SLJ201-80 DLJ201-80)、《小型水力发电站设计规范》、《水工钢筋混凝土结构规范》(SDJ20-78 试行)、《水工建筑物抗震设计规范》(SDJ10-78)等。本分册编写以上述规范为依据,参照其它有关规范,并收入了有关小水电金属结构设计方面的经验资料和一些单位的研究成果或交流资料。

本分册共十七章。第一至九章为水工钢闸门、拦污栅及启闭设备系列资料,由广东省水电厅第三工程局黄希元编写,第十至十七章为压力明管的管身、附件及支承结构等组成部分的布置、构造形式、结构组成及设计计算方法,由成都科技大学唐怡生编写。全书分别由浙江省水利水电设计院刘国英同志、广州市水利水电设计院姚廉华同志、水电部昆明勘测设计院金章瑄同志审阅。四川、贵州、云南、湖南、湖北、福建、浙江、新疆等省、自治区的水利水电勘测设计院,河海大学、陕西机械学院水利系、水电部华东勘测设计院等单位提出许多宝贵意见并提供资料。在此,编者对所有提供支持和帮助的同志表示衷心感谢。

由于编写者水平的限制,资料收集不够充分,书中错误一定不少,恳请广大读者指正,以求完善。

编 者

1990年1月



# 目 录

## 前 言

第一章 闸门概述 .....	1
第一节 闸门的分类及用途 .....	1
第二节 闸门系统的组成 .....	18
第三节 闸门的总体布置 .....	21
第四节 闸门设计的内容及设计的若干原则 .....	29
第二章 荷载计算 .....	36
第一节 荷载的分类 .....	36
第二节 荷载的计算 .....	36
第三章 材料与容许应力 .....	47
第一节 材料 .....	47
第二节 容许应力 .....	85
第四章 平面钢闸门的设计与计算 .....	90
第一节 结构布置与计算的一般规定 .....	90
第二节 按平面体系的计算方法 .....	97
第五章 弧形钢闸门的设计与计算 .....	145
第一节 弧形钢闸门的结构与布置 .....	145
第二节 弧形钢闸门的荷载 .....	149
第三节 主横梁框架的设计 .....	151
第六章 零部件设计 .....	166
第一节 平面钢闸门的行走支承装置 .....	166
第二节 弧形闸门的支铰装置 .....	186
第三节 充水设备 .....	193
第四节 止水装置 .....	197
第五节 焊接和螺栓连接 .....	204
第七章 闸槽与埋设件 .....	214
第一节 平面闸门门槽型式的选择 .....	214
第二节 闸槽埋设件的一般规定与要求 .....	216
第三节 埋设件设计 .....	223
第八章 拦污栅 .....	229
第一节 拦污栅的用途及布置型式 .....	229
第二节 拦污栅的结构 .....	230
第三节 拦污栅的水头损失及容许流速 .....	234
第四节 拦污栅的结构计算 .....	236

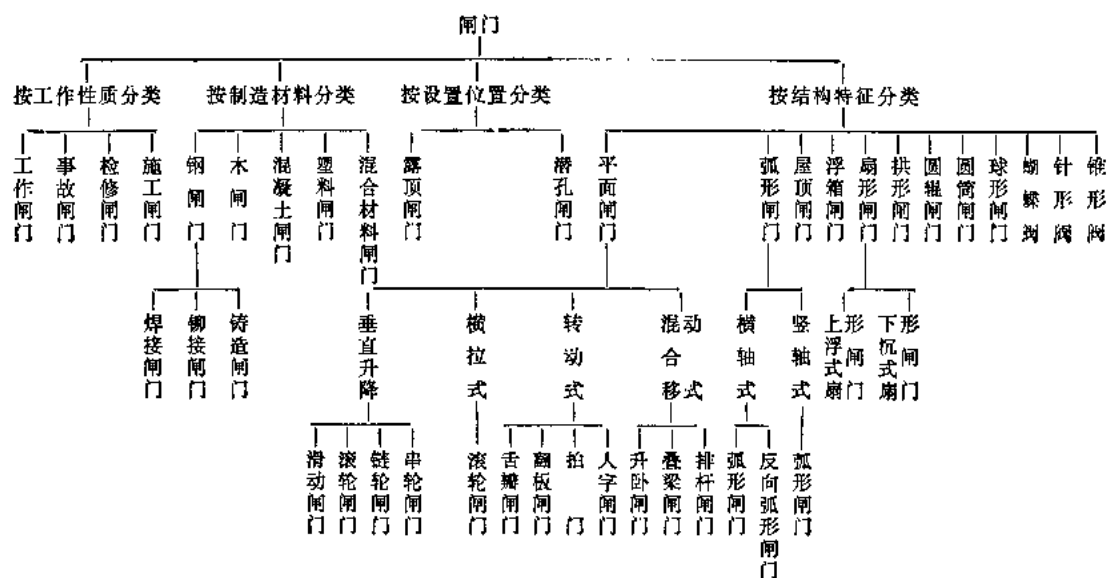
第五节 拦污栅的清污 .....	238
第九章 启闭力计算与启闭机选择 .....	239
第一节 概述 .....	239
第二节 平面闸门启闭力的计算 .....	241
第三节 弧形闸门启闭力的计算 .....	244
第四节 拦污栅启吊力的计算 .....	244
第五节 启闭机的选择及几种常用启闭设备 .....	246
第六节 起吊零部件的设计计算 .....	266
第七节 自动挂钩梁 .....	275
第十章 钢管的构造和布置 .....	278
第一节 钢管的构造、材料选择和焊接 .....	278
第二节 钢管的设计内容及设计基本资料 .....	282
第三节 钢管布置 .....	285
第十一章 钢管的直径和管壁厚度 .....	294
第一节 钢管直径选择 .....	294
第二节 钢管管壁厚度 .....	298
第十二章 钢管管体结构设计 .....	302
第一节 钢管材料的容许应力 .....	302
第二节 钢管荷载及荷载组合 .....	303
第三节 直管段强度校核 .....	311
第四节 管壳外压稳定校核 .....	324
第五节 锥管、弯管的强度校核 .....	328
第十三章 压力岔管设计 .....	335
第一节 岔管的类型及选择 .....	335
第二节 岔管体形拟定 .....	338
第三节 岔管的荷载及材料容许应力 .....	339
第四节 三梁岔管的简化设计 .....	340
第五节 内加强月牙肋岔管设计 .....	356
第六节 卜形贴边岔管设计 .....	368
第十四章 钢管附件结构 .....	374
第一节 管法蓝 .....	374
第二节 伸缩节 .....	389
第三节 钢管检修孔 .....	399
第四节 闷头 .....	403
第五节 通气孔及补气阀 .....	408
第十五章 钢管支承结构 .....	411
第一节 镇墩 .....	411
第二节 支墩 .....	434
第三节 支承结构设计 .....	417
第十六章 异形管节展开计算 .....	467

第一节	概述 .....	467
第二节	直管及锥管斜切展开计算原理 .....	468
第三节	弯管设计及其展开 .....	471
第四节	锥管展开 .....	473
第五节	对称三等径圆管分岔 .....	475
第六节	圆管接对称二等锥支管分岔 .....	477
第七节	锥管上圆柱支管分岔 .....	484
第八节	三倒锥分岔 .....	490
第九节	检修进入孔管节 .....	502
第十七章	钢管的监测维护 .....	505
第一节	运行监测 .....	505
第二节	钢管维护 .....	507

# 第一章 闸 门 概 述

## 第一节 闸门的分类及用途

要正确地决定在特定的工程条件下选定哪种型式的闸门较为合适，必须对现已经生产和使用的闸门有较全面的了解。为此，将种类繁多的闸门归纳分类如下：



### 一、按闸门的工作性质分类

#### 1. 工作闸门

工作闸门系指承担主要工作并能在动水中启闭的闸门，这种闸门运用一般较频繁。

#### 2. 事故闸门

事故闸门系指当闸门的下游（或上游）发生事故时，为防止事故扩大，能在动水中关闭的闸门。当需快速关闭时，也称为快速闸门。这种闸门，一般在静水中开启。

#### 3. 检修闸门

检修闸门系指水工建筑物和机械设备等检修时用以挡水的闸门，这种闸门，一般在静水中启闭。

#### 4. 施工闸门

施工闸门系指在结构物施工期间，用来关闭导流孔口的闸门。这种闸门的操作条件与采用的施工组织有关。一般是在动水条件下关闭孔口，导流完毕，孔口堵塞完成后，此种闸门常被封死而不再使用。

## 二、按制造闸门的材料和方法分类

根据使用的材料不同，闸门可分为钢、木、混凝土、塑料和混合材料等五大类。

至于采用什么材料和那一种制造方法，主要根据当时当地的具体情况而定。

### 1. 钢闸门

钢闸门应用最为广泛，在钢闸门中，按制造方法不同，又分为焊接、铆接和铸造等三种。但焊接结构是主要形式，这是因为它比铆接结构的优点多，随着焊接技术的不断进步，铆接闸门已很少采用，当孔口尺寸较小，或闸门的外形比较复杂时，也可采用铸造闸门（铸钢或铸铁）。但铸造闸门的费用一般较高，只有在制造同一规格的闸门数量较多时，经济上才可能是合理的。

### 2. 木闸门

木闸门只有在孔口尺寸较小，水头较低的情况下才采用。木闸门的特点是制造与安装简单，但木质易腐，不能耐久。在我国木材供不应求的情况下，木闸门的使用日趋减少。

### 3. 混凝土闸门

由于混凝土闸门自重较大，启闭力也较大等缺点，它的使用受到限制。近年来，引用了薄壳结构、钢丝网水泥材料和预应力技术等措施，上述缺点已得到改善，而混凝土取材较易，制造和维护都较简单，造价亦低，这些对于农村小型水电站是可取的。

### 4. 塑料闸门

随着塑料生产工艺的发展，塑料强度的提高以及生产成本的降低，塑料闸门的运用亦为时不远了。

### 5. 混合材料闸门

混合材料的闸门，是在钢构架上，装以木挡水面板或压合木挡水面板。这种闸门能节约钢材，但由于面板会腐烂，需要经常更换，运行维护不便，而目前压合木的成本还比较高，所以这类闸门未能广泛采用。

## 三、按闸门与挡水高程的相对位置分类

### 1. 露顶式闸门

当闸门关闭孔口后，门叶顶部高出上游正常设计水位，门叶上只设置两侧和底缘三边止水，用于开敞式孔口。

### 2. 潜孔式闸门

当闸门关闭孔口后，门叶顶部低于上游正常设计水位，其门叶的四周均需设置止水，即具有顶部、两侧和底部止水，用于潜没式孔口。

## 四、按闸门的结构特征分类

按结构特征分类的闸门主要有：平面闸门（图1-1至图1-12）、弧形闸门（图1-13）、屋顶闸门（图1-14、图1-15）、浮箱式闸门（图1-16）、扇形闸门（图1-17、图1-18）、拱形闸门（图1-19）、圆辊闸门（图1-20）、圆筒闸门（图1-21）、球形阀（图1-22）、蝴蝶阀（图1-23）、针形阀（图1-24）、锥形阀（图1-25）。

### （一）平面闸门

平面闸门外形呈平面状。根据平面闸门移动的方式不同，又可分为四种型式，每种型

式又有许多种类。其中以直升式滑动平面闸门和滚动平面闸门应用最为广泛。下面就几种常见的平面闸门作进一步介绍。

### 1. 滑动闸门

图1-1所示为直升式滑动闸门。它主要由面板、水平次梁、纵梁（隔板）、主横梁、边柱、行走支承部分（包括滑道、反向和侧向导轮）、止水装置等组成的平板形式的门叶，插入门槽内起挡水作用。门槽是由主、侧、反支承轨道、顶、侧止水座和底槛等组成。滑动闸门的反向和侧向导向装置是使闸门的的活动部分移动时能保持其正常位置，防止门叶碰撞门槽，以及在动水操作时起减振作用。在小型闸门及静水中启闭的闸门，导向装置可采用结构简单的滑块，对较大的闸门及在动水中启闭的闸门，则采用滚轮。

滑动闸门与其他平面闸门的区别在于它的主行走支承部分是滑道。它的特点是可封闭相当大面积的孔口，建筑物顺水流方向的尺寸较小，闸门结构比较简单，制造、安装和运输工作比较简便，门叶可移出孔口，便于检修维护，且可在孔口间互换；但它需要较高和较厚的闸墩，具有影响水流不利的门槽，所需启闭力较大。

### 2. 滚轮闸门

图1-2为直升式滚轮闸门，它的门叶结构和门槽形式与滑动闸门大体一致，不过滚轮闸门的主行走支承部分是固定的滚轮。它也具有与滑动闸门大致相同的特点，不同处是摩阻力比滑动闸门小，启闭力也小；但滚轮式支承的构造比较复杂，造价较高。

### 3. 链轮闸门

图1-3为链轮闸门，也是直升式平面闸门的一种，它的门叶结构和门槽也与滑动闸门大体一致，只是它的主行走支承部分是采用许多辊柱，用链板联结成无极的链轮，绕着门叶边柱上特设的支承走道而转动。这种闸门由于其所承受的荷载是由许多辊柱承受的，作用在门槽主支承轨道的荷载比较均匀，所以闸门承载能力可大为提高。它的特点与滚轮闸门大致相同，不同在于链轮的摩阻力比滚轮小，抗震性能好；但链轮的加工精度要求高，制造、安装比较复杂，链轮对锈蚀和水草等污物的反应比较敏感，造价和维护费用均较高。

### 4. 串轮闸门

图1-4为串轮闸门，也是一种直升式的平面闸门。它的门叶结构和门槽形式也与滑动闸门相似，不同的是串轮闸门的主支承部分和行走部分是分开的。门叶的边柱上设有支承

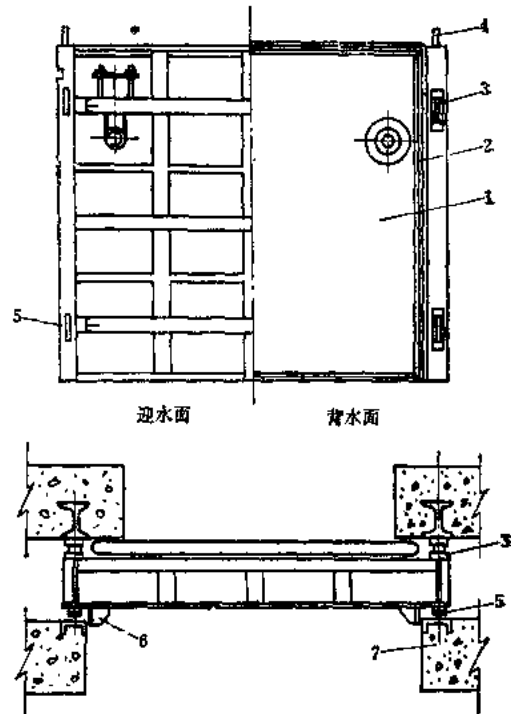


图 1-1 滑动闸门

1—门叶；2—止水装置；3—支承滑道；4—起吊装置；  
5—反垫块；6—侧导向；7—门槽

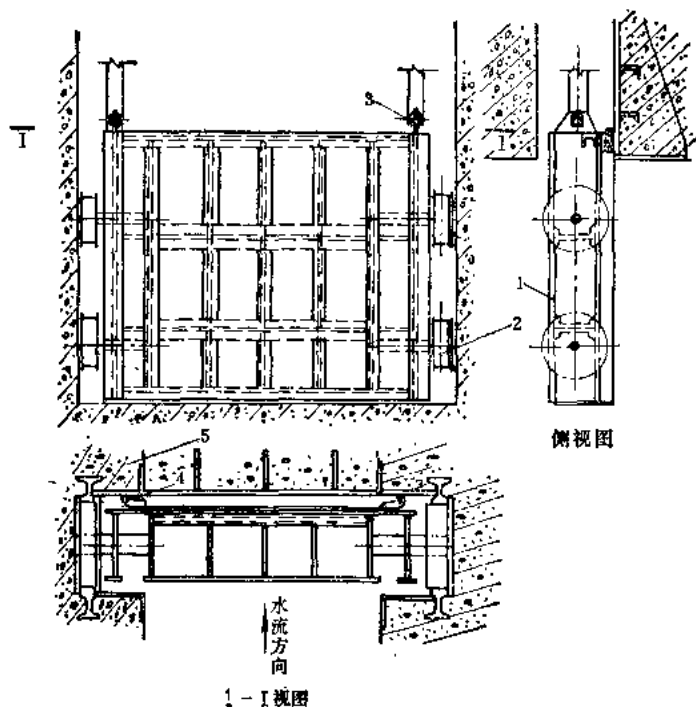


图 1-2 滚轮闸门

1—门叶；2—滚轮；3—起吊装置；4—止水装置；5—门槽

走道，在边柱支承走道和门槽的支承轨道间加设一串辊柱。串辊是将多个辊柱装配在小车架上面构成单独的部件。小车架是通长的，在串轮的顶部设滑轮，滑轮上绕有钢丝绳，钢丝绳的两端分别固定在门叶顶部和附加的启闭设备上。当闸门提升时，门叶的边柱支承在串轮上移动，串轮的行程约为门叶的行程一半。这种闸门除需要专门的启闭设备外，当需要将门叶提出门槽时，尚需附加的启闭设备，用以悬挂和提升串轮。该闸门可封闭开敞式大面积孔口，摩阻力比滚轮小，但造价高，门叶不易移出孔口，检修维护不便。

#### 5. 横拉闸门

图1-5为横拉闸门，它是沿水平方向移动的单扇平面闸门。横拉闸门的结构布置与直升式平面闸门相类似，也是由面板、次梁、隔板、主梁、边柱组成平面式的门叶，不同的是它的支承部分和行走部分是分开设置的。支承部分仍然设在边柱上，行走部分的轮子则装设在门底的两个小车上，或一个在闸门底和一个在门顶的两个小车上，沿着相应埋设的轨道横向行走。在门槽和门坑上设有侧、底止水座。横拉闸门的特点是：可以承受双向水压，启闭力小，启闭时间较短；但它不能在动水中操作，需要较大的门库和门坑，门坑可能被泥沙、污物阻塞，影响闸门的运行，长期处于水下时，不易维护检修。它多用在船闸或船坞上。

#### 6. 舌瓣闸门

图1-6为舌瓣闸门，它是转动式平面闸门，具有平板式的门叶，并绕着固定在底板支架上的水平轴旋转，在矮而宽的孔口上构成活动的挡水坝，用以调节水位，运送木材，泄洪、泄冰等。舌瓣闸门可以用机械升降，也可设平衡铰，藉水力自动控制。

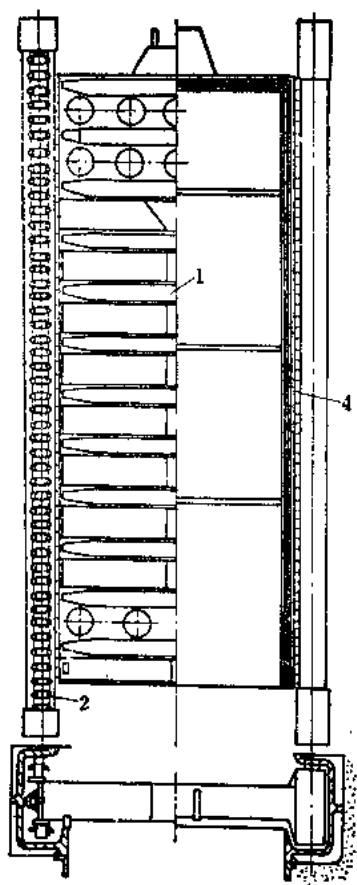


图 1-3 链轮闸门

1—门叶的梁系结构；2—链轮；3—侧向导轮；4—止水装置

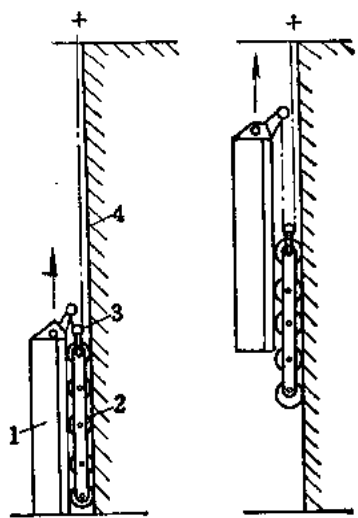


图 1-4 串轮闸门

1—门叶；2—串轮；3—滑轮；4—门槽

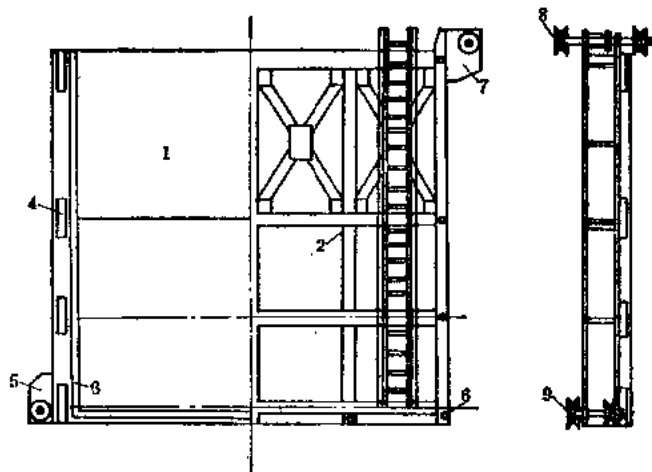


图 1-5 横拉闸门

1—面板；2—梁系结构；3—止水；4—主支承滑块；5—附加竖向构架；6—顶紧器；7—支承架；  
8—顶部小车，9—底部小车



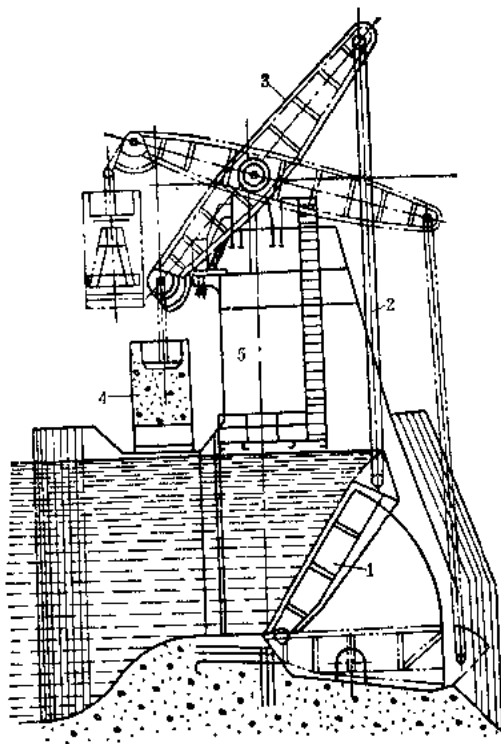


图 1-6 上平衡式舌瓣闸门

1—门叶；2—杠杆；3—杠杆梁；4—平衡铊；5—闸墩

口，在泄冰及泄漂浮物时可减少水量的消耗，闸门操作迅速，而且可实行自动操作；但闸门的制造、安装的精度要求高，杠杆及铰轴对自动平衡十分灵敏，需经常调整校正，闸门长期处于水中，检修维护比较困难。

#### 7. 翻板闸门

图1-7为翻板闸门，它也是转动式平面闸门的一种，闸门分活动和固定两部分，活动

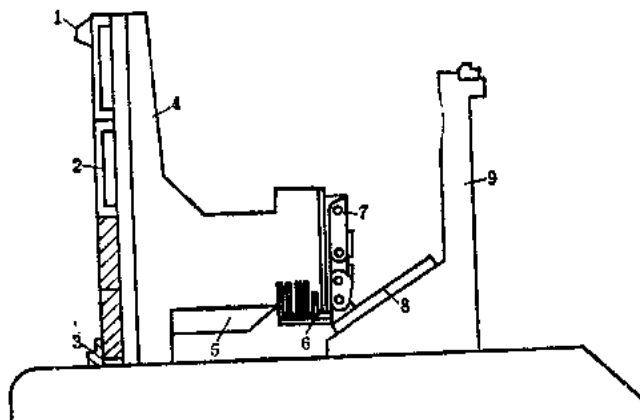


图 1-7 翻板闸门

1—梳齿；2—面板；3—底止水；4—支腿；5—分水尖；6—拦污栅；7—支承铰座；8—支承座；9—支墩

自动平衡的舌瓣闸门可分为上平衡式和下平衡式。图 1-6 为上平衡式闸门，应用较广。平衡铊与闸门两端的吊杆支承轴连接，使闸门体形、杠杆位置、杠杆力臂和平衡铊的重量在闸门任一位置挡水时都达到平衡。下平衡式舌瓣闸门的平衡铊不仅与闸门两端的吊杆支承轴连接，而且平衡铊的杠杆与每根纵梁的上端都连接起来，借平衡铊杠杆力臂的变化来调节水位。因此下平衡式舌瓣闸门除纵梁上端要设铰轴外，而且在坝下还需有较大的平衡铊室。

舌瓣闸门除可直接设在坝上外，有的还在直升式平面闸门或弧形闸门上装设，以适应自门顶泄流的要求。这种闸门称为带舌瓣的闸门。舌瓣的转动轴设在平面闸门或弧形闸门的顶部，在舌瓣和闸门之间沿水平位置设止水橡皮，舌瓣采用油压设备操作，操作设备布置在闸门的跨中。

舌瓣闸门的特点是：能封闭很宽的孔

部分由面板、支腿、支承、铰座和止水等组成；固定部分则由支承座和支墩组成。它的门顶装有“梳齿”是防止拍打的措施之一。支腿下部装有“分水尖”，以减少闸门全开时支腿承受的动水压力，有利于闸门关闭。支承铰座系活动多铰支承结构，受力的铰点在启闭过程中是经常变化的。既能减轻门叶的冲击，又能增大闸门关闭时的力矩，增加自动关闭的可靠性。为了防止污物进入铰座，往往在铰座上装有拦污栅。闸门的水力自控是靠水压力对支承铰中心的力矩与闸门自重及各种摩阻力对支铰中心的力矩的不平衡而实现，当水位上升比正常水位高至一定幅度时，闸门即随水位上升而逐步开启，并依次支承于各支承铰上，直至全开。当水位下降至正常水位时，闸门即自动关闭。

翻板闸门是利用水力自控翻转启闭的闸门，在小型水利工程上用得相当广泛，且大都应用在来水较猛的山区河道上，以适应河水暴涨暴落的运行特点。翻板闸门的优点是可以利用水力自动操作，管理方便，便于泄洪排沙，闸门制造、安装方便，不需启闭设备；缺点是闸门只能在一、二种设计水位条件下开关，不能按任意的运行条件操作，不能调节水位和流量；刚开闸门时，下游流量骤然增加，可能对河床产生严重的冲刷作用；在泄流时，门叶处于流水之中，可能产生撞击振动；当下游水位上升到某一定高度时，闸门可能出现周期性转动和支腿拍击支墩的“迫打”现象，以致危及闸门的安全运行。

#### 8. 拍门

图1-8为拍门，又称盖板闸门，也是转动式平面闸门的一种，这种闸门常设于抽水站水道出口，当水泵停止运转时，闸门迅速关闭，用以阻止出口水流倒灌。开机时闸门和机组近乎同时开启。拍门是由盖板、铰链、对重等组成，门叶绕着设在门槽顶部的水平轴而转动的，门框是用法蓝或框架嵌固在混凝土内，在法蓝（或框架）周围设止水橡皮，以保证闸门关闭后，具有不透水性。

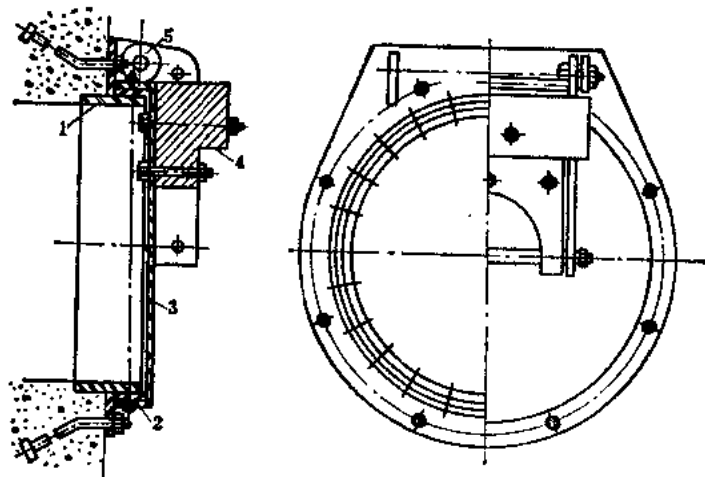


图 1-8 拍门

1—门框；2—止水；3—盖板；4—对重；5—铰链

拍门的特点是可以实行水力自动操作，管理简单；闸门的制造、安装方便，不需启闭设备；但闸门关闭时，往往产生撞击振动，止水装置设在门框上，检修维护不方便。

### 9. 人字闸门

人字闸门是船闸中普遍采用的一种闸门，它是由左右两扇闸门组成，各自围绕其端部的竖直轴旋转而启闭。当开启时，门扇转到闸首闸墙的门龛内。关闭时，门扇旋转至接近人字形位置，两扇门互相支承，在平面上形成一个三铰拱，并利用三铰拱将作用在闸门上的水压力传至闸墙混凝土。按照门扇的梁系布置，人字闸门可分为横梁式和竖梁式两种。当门扇高度较大，超过门扇宽度时，一般采用横梁式。当门扇高度小于宽度或门扇高度为闸室有效宽度的0.4~0.5倍时，采用竖梁式。图1-9是横梁式人字闸门，它是由面板、次梁、主梁、隔板、斜接柱、门轴柱、斜杆等梁系结构，底框、顶框、支垫座、枕垫座、导卡等支承设备，以及检查量测保护设施等组成。人字闸门在小型工程上很少采用。

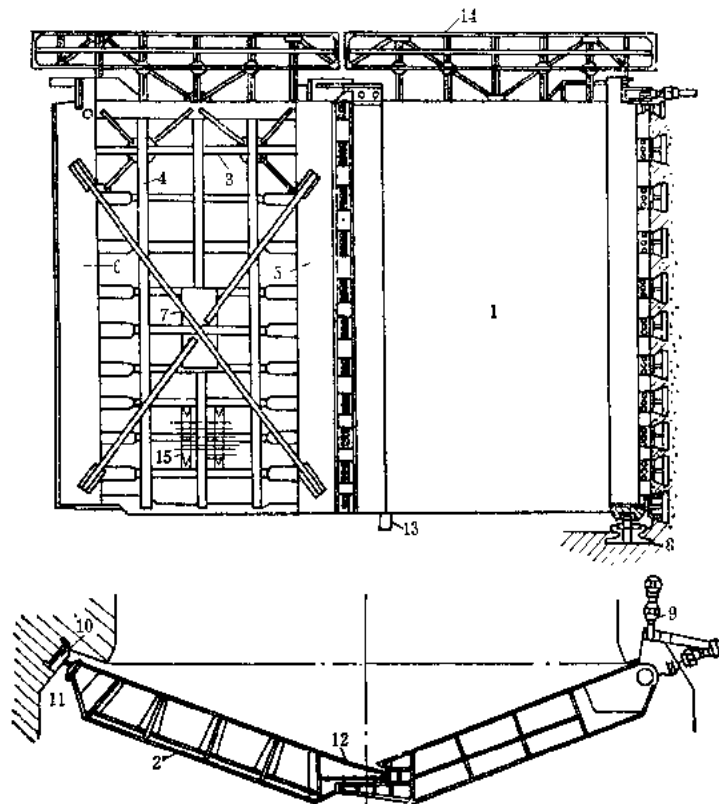


图 1-9 横梁式人字闸门

1—面板；2—次梁；3—主梁；4—隔板；5—斜接柱；6—门轴柱；7—斜杆；8—底框；9—顶框；  
10—枕垫；11—支垫；12—导卡；13—检查量测设备；14—工作桥；15—防护木

### 10. 升卧式闸门

图1-10为升卧式闸门，它是在直升式平面闸门基础上发展起来的，这种闸门的特点是当闸门关闭时直立挡水，启门时首先直升一段，然后边上升边转动，至闸门全开时成为水平状，平卧于闸墩的顶部，它使平面闸门的机架桥高度显著降低，提高了水工建筑物的抗震能力，减少了工程量。但它只能作露顶式闸门，且钢丝绳在水中容易锈蚀。

### 11. 叠梁闸门

图1-11为叠梁闸门，它是用多根单独的梁，逐根插入门槽，平放叠成以封闭孔口起堵

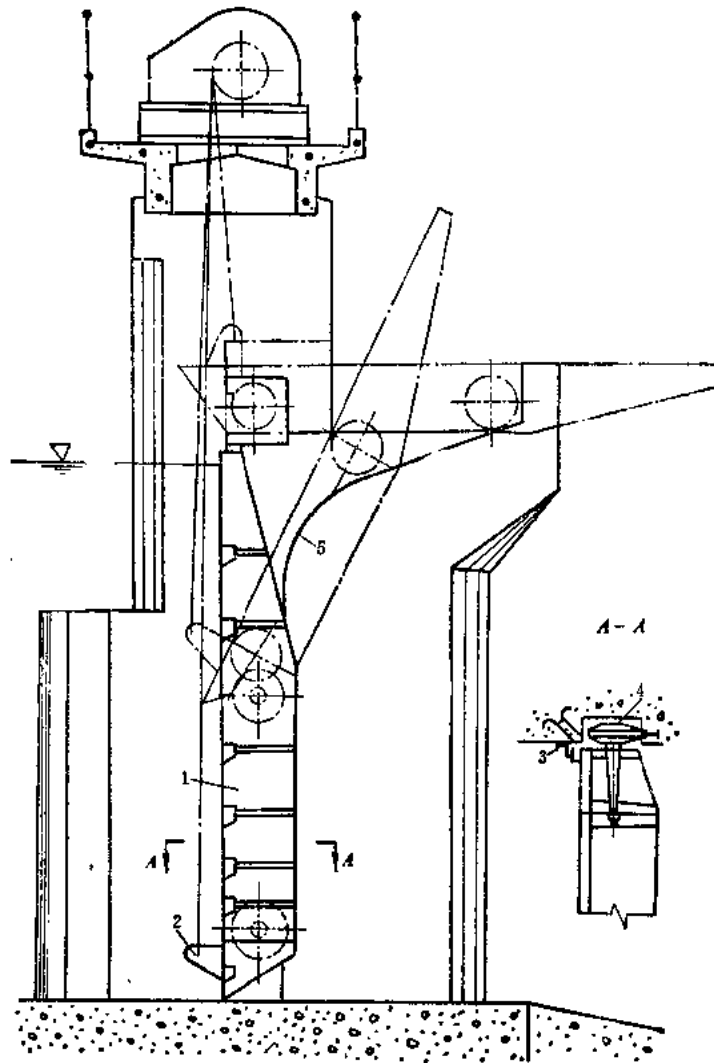


图 1-10 升卧式闸门  
1—门叶；2—吊耳；3—止水；4—悬臂轮；5—门槽

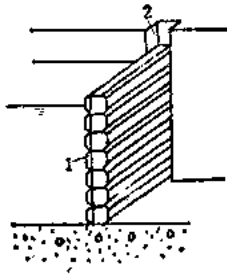


图 1-11 叠梁闸门  
1—叠梁；2—闸横

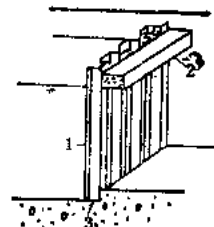


图 1-12 排杆闸门  
1—排杆；2—横梁；3—孔口底坎

水作用。一般用作检修闸门或临时堵水。

叠梁闸门按其跨度及水头大小，可以用木材、钢材、钢筋混凝土或混合材料制成。木叠梁闸门适用于较窄的孔口，一般用2~3根条木，利用铁件连接组成一根梁。叠梁间的水平接缝必须刨光，叠梁与门槽直接依靠水压力压紧，不再另设止水。当跨度较大时，可用钢筋混凝土制造成矩形梁。每根叠梁的顶、底面嵌以木条，叠梁与门槽间亦采用木支承兼作止水。当跨度大而水头较高时，可以采用钢叠梁闸门。钢叠梁一般制造成工字形梁（型钢或组合梁），叠梁间、叠梁与门槽均采用橡皮止水，并设有简易的行走支承部分。

叠梁闸门的特点是：闸门结构简单，制造、安装简便，可因地制宜，就地取材；闸门的启闭力小；但它的水平接缝多，漏水比较严重，木叠梁或木料止水设施均需经常拆换；闸门操作比较费时、费力。

#### 12. 排杆闸门

图1-12为排杆闸门，它是用多根简单杆件，竖立排联在开敞式孔口上，形成一个平面形的挡水结构。杆件是简单的直杆，其底部是支承在孔口底槛上，顶部支承在一横梁上，此横梁有时兼作操作桥用。

排杆闸门可用木或钢制造，使用的水头不大，多作为临时挡水之用。它的特点是简便易行，费用不高，但漏水量大。

#### （二）弧形闸门

弧形闸门（图1-13）也是用得十分广泛的一种门型。其面板呈圆弧形，门叶用支臂和活动铰链支承在固定于闸墩侧面的铰座上，并能沿支铰轴的中心转动。在大多数情况下，面板曲率中心与支铰轴的中心相重合。弧形闸门按梁系结构在布置上的差异，而有主横梁和主纵梁之分。一般宽扁形的孔口采用主横梁式弧形闸门，面高窄型孔口则采用主纵梁式弧形闸门。主横梁式弧形闸门（图1-13）的门叶结构由面板、小横梁、纵向隔板、主横梁、支臂、支铰支座和止水装置等组成。面板与梁系结构共同组成弧形挡水体，支承在主横梁与支臂组成的刚性构架上，支臂通过支铰支座支承于闸墩或下游胸墙上。主

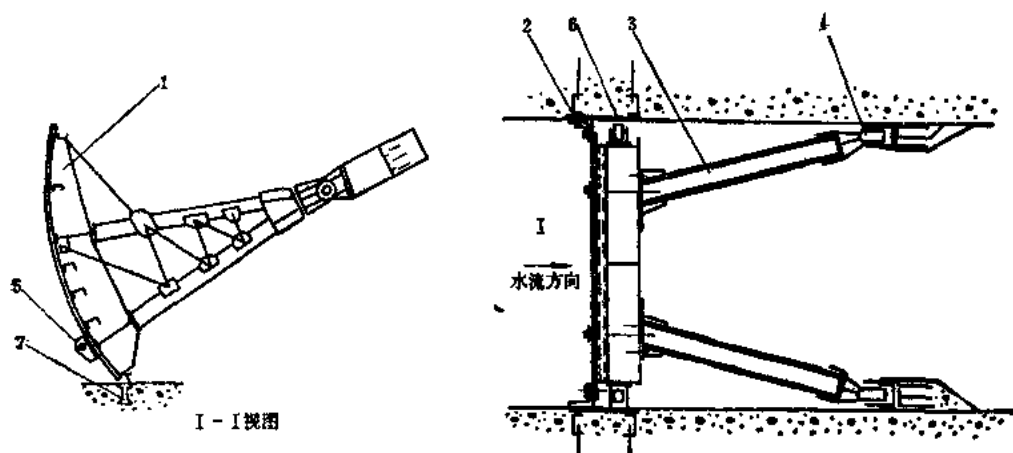


图 1-13 弧形闸门

1—门叶结构；2—止水装置；3—支臂；4—支铰；5—起吊装置；6—侧向装置；7—固定部分

横梁与支臂组成的刚性构架的型式有Ⅱ型、Ⅲ型和Ⅳ型三种。主纵梁式弧形闸门(图5-5)的门叶结构是由面板、小纵梁、横梁(横向隔板)、主纵梁、支臂、支铰支座和止水装置等组成。面板和梁系结构共同组成弧形挡水体,支承在主纵梁与支臂组成的三角形刚性构架上,支臂通过支铰支座支承于下游胸墙上。弧形闸门的支铰支座是闸门中重要的组成部分,它的作用是将闸门所受的全部水压力和门重传给闸墩,并保证闸门绕水平轴灵活转动。支铰支座的结构形式有:①圆柱铰;②圆锥铰;③球铰三种。目前用得最多的是圆柱铰,因其结构比较简单,制造安装较方便。只有当闸门跨度超过12m,采用斜支臂(Ⅳ型)其侧推力很大时,才采用结构比较复杂,制造、安装也比较困难的圆锥铰。球铰一般很少采用。

弧形闸门的优点是:可封闭相当大面积的孔口,所需启闭力较小,没有影响水流流态的门槽,所需闸墩的高度和厚度较小,埋设件的数量也较少;其缺点是:需要较长的闸墩,闸门所占空间位置较大,不能提出孔口以外进行检修维护,不能在孔口间互换,对闸墩有侧推力,闸门承受的总水压力集中于支座,对土建结构不利。

当弧形闸门的支铰支座设在上游面时,谓之反向弧形闸门。它的圆柱形弧面凸向下游,且在闸门的上游面用曲面板全部加以封盖,或至少在底梁以下用平板封盖,使闸门体形流线化;支臂也用流线型板全部或部分包起来。反向弧形闸门多用在船闸输水廊道上做输水工作闸门,其最大特点是:廊道输水时,可免除渗气现象,保证输入闸室的水流流态稳定。

### (三) 屋顶闸门

屋顶闸门(图1-14)系由两扇平面闸门所组成,它围绕着固定在底板或坝顶上的水平轴而旋转。闸门挡水时,好象一个屋顶,下游闸板支持着上游闸板。在两闸板间为压力室。当空腔内充水时,门叶升起形成挡水体。当排除空腔内的积水时,门叶下落在底板上。空腔的充、排水系由充水阀门和排水阀门所控制,调整空腔内的水量就可达到控制屋顶闸门开度的作用。

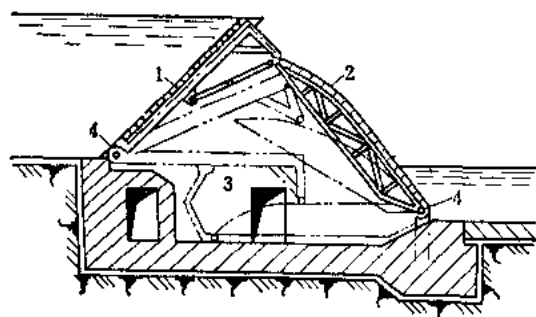


图 1-14 屋顶形闸门

1—上游闸板; 2—下游闸板; 3—压力室; 4—支铰支座

我国河南省采用钢筋混凝土结构的屋顶闸门较多,并对闸门作了一些改进。闸门由一块主门叶和两块副门叶铰接组成。主、副门叶间形成空腔(压力室),利用空腔充、排水控制闸门升降。闸门与土建部分总称为浮体闸(图1-15)。目前已被大量应用在需要调节水位、流放竹木及漂浮物的河道上,灌溉渠以及渠河交叉口的活动渡槽等建筑物上。

屋顶闸门的特点是:门叶支承于底板上,不需要中墩,过闸水流稳定,消能效果好;可利用水力自动操作,不需启闭设备,节省投资;可作部分开启运行;适宜流放木排、冰块及漂浮物;但门叶接缝多,止水部件多,漏水机会也多,影响闸门的正常运行;活动铰多,安装要求高,运行中易出故障;多砂河流上有淤积问题,检修维护比较困难。它主要用在具有宽顶的坝上,宣泄冰块及漂浮物而需要节省水量,并精确调节水位的地方。

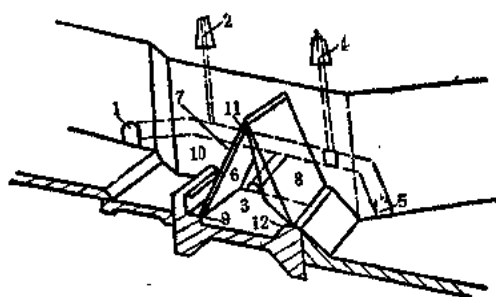


图 1-15 浮体闸

1—进水口；2—充水阀门；3—空腔进出水口；4—排水阀门；5—出水口；6—下副门叶；7—上副门叶；8—主门叶；9—前支铰支座；10—中间铰链；11—顶铰链；12—后支铰支座

#### (四) 浮箱式闸门

浮箱式闸门曾在船坞被广泛采用作工作闸门，由于该门型只能在静水中启闭，所以在水电工程中仅作露顶式孔口（如通航孔、溢洪道、水闸等）的检修闸门用。浮箱式闸门是依靠浮力动作的，因此闸门必须具有一定空间体积的封闭结构物，靠水泵、闸阀和管道等机械设备调节门体内的重量，改变门重与浮力的平衡关系，使闸门下沉封闭孔口进行挡水或上升开启孔口。浮箱式闸门按外形可分为箱形、比重计形和桶形三种。桶形的稳定性能好，又节省钢材，现在被普遍采用。

图1-16是桶形浮箱式闸门，由封闭壳体、小梁、主梁等组成。主梁的设置必须考虑层次分舱，置主梁于分舱位置上，以减少舱面板，布置小梁时亦应前后左右对称，以保证浮箱的稳定性。浮箱式闸门的侧、底止水应在同一平面上，并和支承结合。浮箱式闸门无需门槽，只需在闸墩头和坎底形成一个支承平面，并埋入必要的支承件。

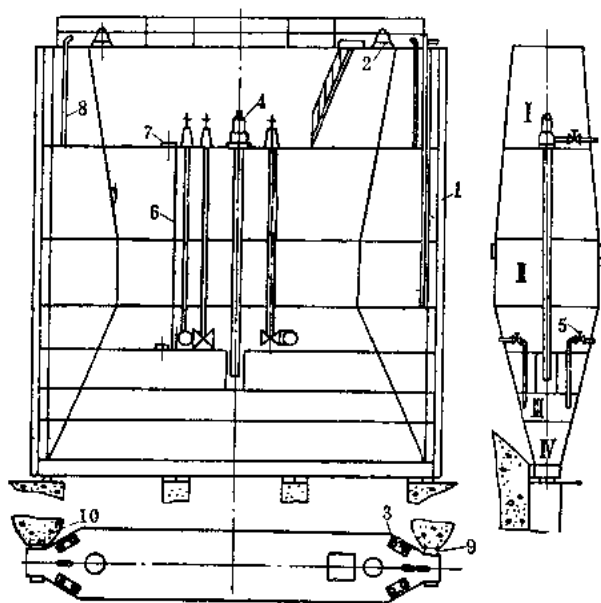


图 1-16 桶形浮箱式闸门

1—门体；2—人力绞盘；3—系绳桩；4—深井泵；5—闸门；6—爬梯；7—人孔；8—进气管；9—止水；10—支承件；I—机舱层；II—调节压舱层；III—固定水压舱；IV—混凝土压舱

浮箱式闸门的特点是：可封闭相当大面积的孔口；可不设启闭设备；可以自动浮动，运输方便，不需要门槽，泄流时水力条件好；具有较大的刚度。但它不能在动水中操作运行，且操作比较费时；需要有足够的水深才能运行；重量较大。

### (五) 扇形闸门

扇形闸门的断面为一扇形，在外形上和弧形闸门很相似，它绕着一固定在坝面下的水平轴面旋转。坝面下还设有凹槽，称为压力室。利用压力室的充水或泄水使闸门自动升降。扇形闸门按其结构特征可分为下沉式和上浮式两种，当门叶的上游面和顶面设有面板的称为下沉式闸门（图1-17），它在自重作用下能降落到压力室。在压力室充水后，在水压力作用下，闸门可自动升起。在门叶的上游面、顶面和底面都设有面板的称上浮式闸门。因为门叶系封闭体、体内有空气，使门叶具有浮力。当压力室泄水时，靠闸门自重降落到压力室。扇形闸门的旋转轴一般设在下游面，当为了使闸门过流面的形状较符合于坝顶溢流面线型，以提高流量系数，而将旋转轴设在上游面，且三面设有面板时，也称为鼓形闸门（见图1-18）。扇形闸门的门叶结构由面板、横梁、纵梁、扇形桁架、桁条和盖面板组成。闸门的止水设施是沿门叶底部、上游面板和顶盖板的两侧设置的，并利用水压力贴紧在闸墩的支承面上。

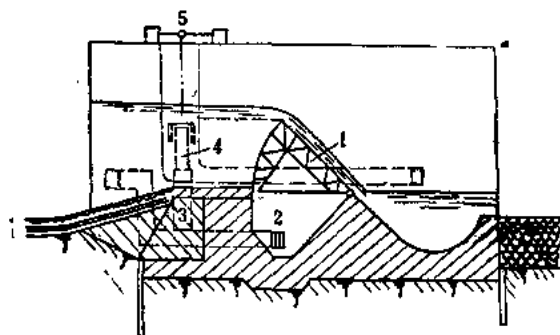


图 1-17 下沉式扇形闸门

1—闸门；2—压力室；3—闸墩内的竖井和孔道；4—闸门；5—闸门操纵设备

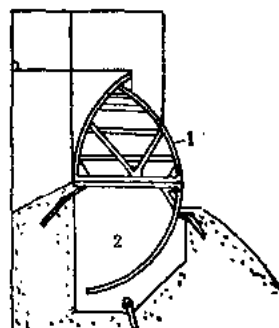


图 1-18 鼓形闸门

1—闸门；2—压力室

扇形闸门的特点是：可以封闭高度不大而跨度相当大的孔口，可利用水力自动操作，不需启闭设备及工作桥，闸墩较低，节省投资；可作部分开启运行，调节流量；泄冰条件好，门叶的刚度大；但需要较大的压力室，多泥沙河流压力室可能有淤积问题；闸门系多支铰支座结构，且止水线长，检修维护比较困难。它一般被用在需要精确及自动调节水位和流量，排泄冰块、木材及其它漂浮物，孔口跨度大，适合于在坝上不需要桥梁或其他设备的工程。

### (六) 拱形闸门

拱形闸门（图1-19）形同直立的瓦片，瓦片向上游凸出者是推力结构，面向下游凸出者为张力结构，都是为了减少结构受弯力的作用，充分发挥材料单向受拉或受压的强度，达到材料使用经济。拱形闸门的门叶结

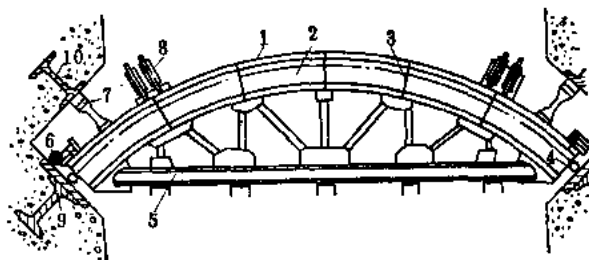


图 1-19 拱形闸门

1—面板；2—横梁；3—纵梁（隔板）；4—边支承柱；5—钢支承；6—止水；7—反向装置；8—吊耳；9—主支承轨道；10—反向支承轨道



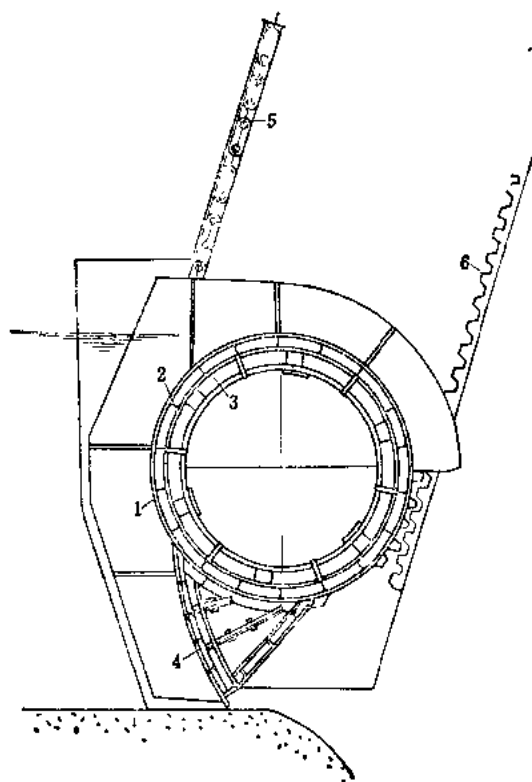


图 1-20 圆辊闸门

1—圆形面板；2—水平梁；3—横隔板；4—底部闸板；  
5—提升链；6—齿条

构由拱形面板、拱形横梁、纵梁、边支承柱、行走支承部分、止水和导向装置等组成。

拱形闸门的特点是：可以封闭相当大面积的孔口，结构简单，能充分发挥材料的作用，因而节省钢材；门槽的结构比较简单，对水流的影响比平面闸门好。

#### (七) 圆辊闸门

圆辊闸门又称辊筒门（图1-20）是一个空心管状圆辊，外形如横卧的圆管。圆辊两端有齿环，一端有起重链，升降时齿环沿埋设于闸墩上的齿条滚动。另一端为安全链，以防万一齿环与齿条滑脱时，闸门不致下坠，造成事故。圆辊闸门根据需求和构造上的差异而分为具有底部闸门的圆辊闸门和具有前面盖板的圆辊闸门两种。前者适用于跨度很大而高度不大的情况，后者适用于高度大而跨度不大的情况。圆筒闸门的圆筒梁系由面板（外壳）、水平梁（桁条）和横隔板所组成。

而板支承在水平梁上，水平梁支承在隔板上，隔板是一种刚性环或平面格栅状的构件。底部闸板或前面盖板是曲线形的挡水板，系由面板及梁格组成，并借助斜撑或垂直桁架将压力传递到圆筒上。圆辊闸门的止水沿两侧和底部设置。圆辊闸门的门槽除设有底、侧止水座外，必须使门槽具有1:0.4的坡度，并沿斜坡布置齿条。坡度不能过缓，否则闸门下降后不太稳定。但坡度也不能过陡，过陡则起重力增大。

圆辊闸门的特点是：可以封闭高度不大而宽度很大的孔口，闸门的启闭力比弧形闸门小，闸门本身的刚度大；但闸门构造复杂，耗钢量大，制造、安装比较困难，土建和闸门的造价都较高。它适用于多泥沙河流，用于宣泄冰块和漂浮物的低水头坝上。

#### (八) 圆筒闸门

圆筒闸门（图1-21）的外形如同直立的圆筒，塞在竖井孔口内以拦堵水流。它比较适宜于封闭塔式进水闸，当引水管道进口不可能直接建筑在岸坡上或坝体内而必须建筑在水库中时便采用塔式进水闸，在塔的不同高程上或仅在底部沿塔周开设很多径向引水口，而用圆筒门来控制这些引水口。在圆筒闸门的外围一般还设有拦污栅和检修闸门。出水口设在竖井底端，并接一弯道与下游水道连接。圆筒闸门的门叶系由圆形面板（管壁）、水平梁和竖向隔板组成，并分成几个相等的圆弧段，各段用螺栓连接。闸门的顶、底部周边设止水。闸门与竖井间设有导向支承，导向支承轨道设在竖井壁上。闸门上设导轮或弧形环

支承，并套在导向支承轨道上。闸门采用三根劲性吊杆，用三台电动螺杆机同步启闭闸门。

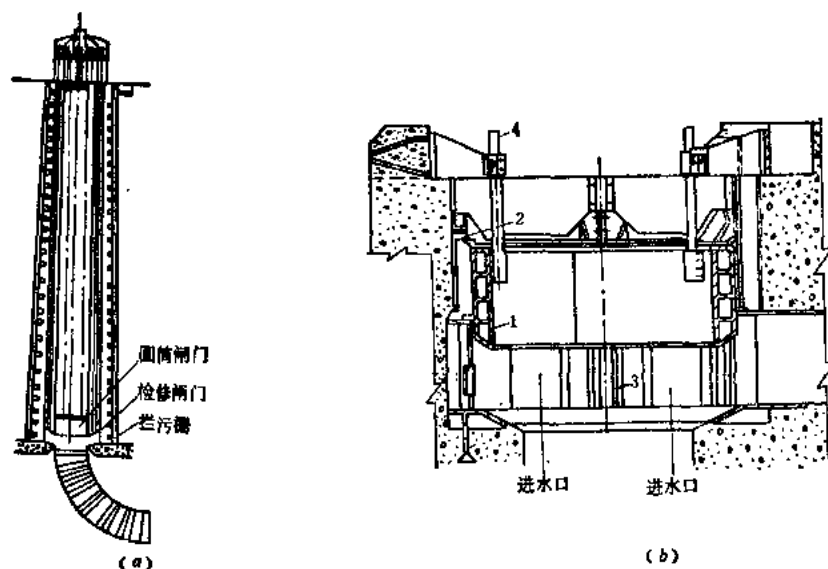


图 1-21 圆筒闸门  
(a)塔式进水闸剖面图；(b)圆筒闸门  
1—门叶；2—止水；3—导向支承；4—吊杆

露顶式的圆筒闸门也叫环形闸门，由于水压力作用均匀向心，故门叶移动时阻力很小。

圆筒闸门的特点是：适合于封闭塔式进水口，门叶的结构比较简单，刚度大，启闭力小。但进水口需要用金属衬砌，土建部分造价较高；需要劲性吊杆，当竖井较深时，需要设置许多吊杆支承座，闸门制造、安装的要求较高。

#### (九) 球形阀

球形阀(图1-22)主要由球状壳体和圆筒形的旋转部分组成。在开启位置时水流的过水断面未变，阀对水流不产生阻力。关闭时回转部分旋转 $90^\circ$ 截断水流，并由球面圆板及止水环组成止水装置。球面圆板可以象活塞一样在圆筒形空腔内移动。阀关闭时通过壳体和旋转部分的间隙和特殊缝槽，把压力水管上所引入的压力水引到空腔内，形成严密的水封。当开启阀时，先操作阀门，使空腔和阀后水管连通，以解除球面闸板水压力，这样就可以用不太大的力来旋转闸板。

球阀的特点是：阀门的关门严密，漏水很小，止水环的摩阻小，不易磨损。更重要的是由于阀门未引起水流有效断面的改变，运转中水头损失很小；但它结构复杂、重量大，外形尺寸大，造价昂贵。球阀主要用作水轮机的主阀装于蜗壳之前，并多用于水头较高的电站。

#### (十) 蝴蝶阀

蝴蝶阀(图1-23)主要由圆筒形的外壳，透镜形的阀体，轴承，止漏装置和包括旁通管、空气阀和操作机构的附属部件组成。它按装置型式可分为竖轴和横轴两种。

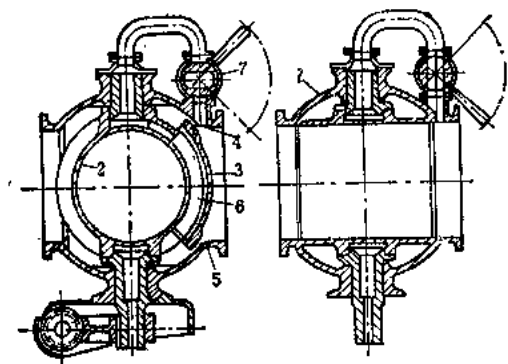


图 1-22 球形阀

1—壳体；2—旋转部分；3—球面板；4、5—止水环；  
6—压力室；7—操作阀

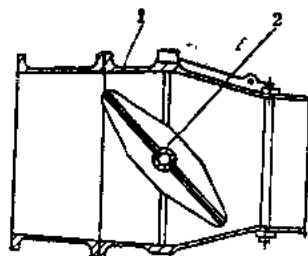


图 1-23 蝴蝶阀

1—阀壳；2—阀叶

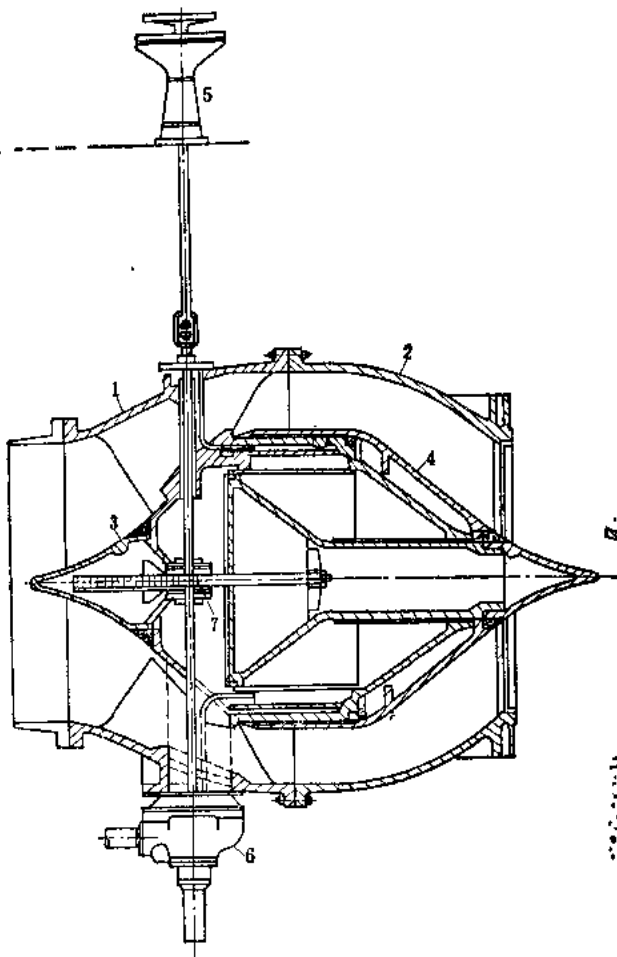


图 1-24 针形阀

1—阀体；2—喷嘴；3—固定阀舌；4—活动阀舌；5—螺杆  
式启闭机；6—双向阀；7—齿轮齿条传动机构

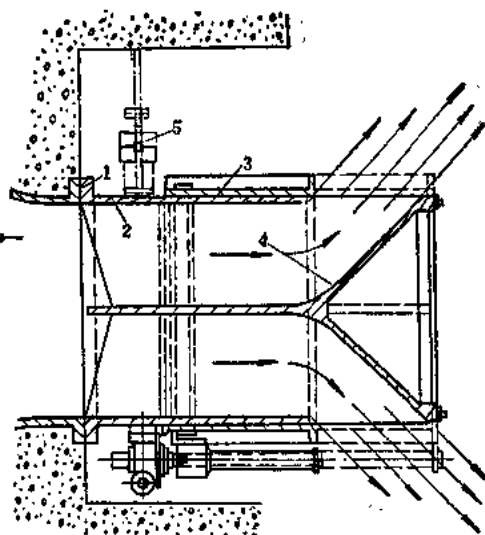


图 1-25 锥形阀

1—法基盘；2—固定阀体；3—活动阀套；  
4—锥体；5—操作设备

蝴蝶阀的特点是：和其他型式阀比较其结构简单，外形尺寸小，重量轻、造价低廉；由于其转动阀体的体积较小，所需操作力矩不大，很适宜作为快速阀。但其水封不如其他型式严密，漏水量较大，阀在压力钢管的过水断面内，对水流的扰乱较大，因而在阀内造成水头损失，容易产生气蚀现象，特别是在高水头情况下因阀体厚度增大和流速加快时更为明显。蝴蝶阀与球形阀一样主要用作水轮机的主阀装设在蜗壳之前，以便当由1根输水总管给几台机组供水时，其中某1台机组需要停机时，为了不致影响其他机组的正常运行或减少漏水的目的；或当机组发生事故而导水机构又同时发生故障时，可以迅速关闭主阀截断水流，避免事故的扩大。

#### （十一）针形阀

针形阀（图1-24）由阀体、喷嘴、固定阀舌、活动阀舌、止水装置及操纵设备等组成。固定阀舌用肋片与阀体固定，固定阀舌内设有齿轮、齿条传动机构，并与启闭机的操作杆连接。活动阀舌内设有套筒、阀舌盖等。活动阀舌在操纵设备的操纵下可沿固定阀段的外壁和导板滑动。当阀门开启时，阀体、喷嘴和阀舌间形成一环形水道，使水流以等加速度向外射出，以防发生负压或汽蚀，使在任何开度下流态稳定。

针形阀一般设于水道出口，水流在空气中消能，适用于要求开度较小，运行时间较长的水道上。

针形阀的特点是：可以用在高水头的水道上以精确调节流量；具有流线型的光滑表面，水头损失小，减少了汽蚀的可能性，阀门关闭紧密，止漏效果好。但结构复杂，制造加工困难，造价昂贵，不适宜多沙河流，流量系数 $\mu$ 较低（ $\mu=0.58$ ）。

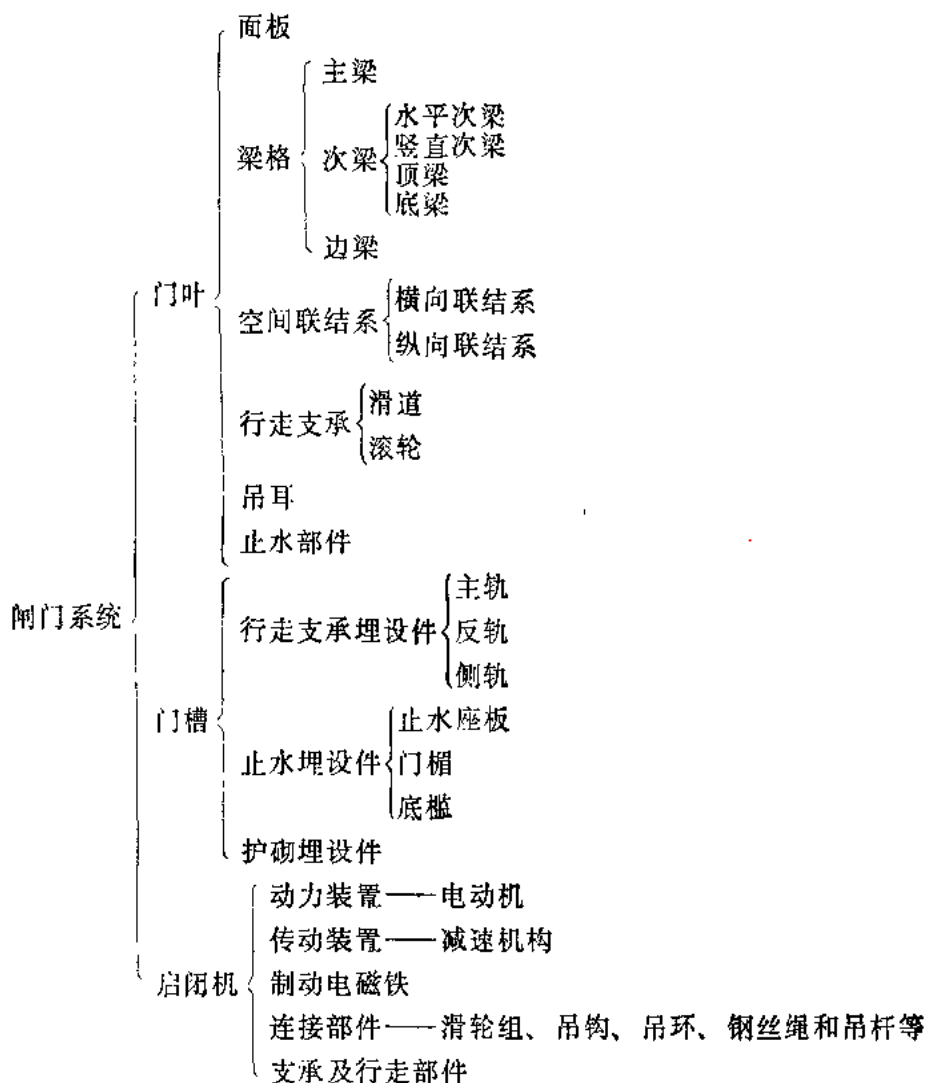
#### （十二）锥形阀

锥形阀按其构造可分为外套式和内套式两种。图1-25为外套式锥形阀，它是由法蓝盘、固定阀体、活动阀套、锥体、止水装置及操纵设备等组成。法蓝盘有止水圈，利用预埋螺栓与坝体混凝土内的法蓝连接。固定阀体为圆筒形，其上游端与法蓝连接，下游端则利用4~6根径向设置的肋片与锥体连接，锥体为锥面成90度的圆盘，在阀体下游端和锥体圆盘上设金属密封环（国内采用橡皮止水环）。活动阀套亦为圆筒形，阀套两端设有加固环，阀套内上、下游端均设有金属导向环。关闭闸门时，活动阀套沿阀体外壁和肋片自由端面向下游移动，抵紧锥体圆盘，严密止水。当开启阀门时，活动阀套向上游移动，水流经肋片间流出，遇锥面后转向成90度向四周射出，水舌成空心锥形扩散，利用空气消能。

锥形阀是当前国内使用较多的一种阀门，它装置在压力管道的末端出口处，用以调节流量，适用于高水头、小孔口的山区水利水电工程。布置时应注意射流所形成的水雾对附近建筑物的影响，此外尚应注意射流对下游河道的冲刷。直径2.2m以下的锥形阀可与水平线成45°的斜置式布置，在淹没下出流，以便消能和去雾；直径2.2m以上的锥形阀多为平置，这样可以在射流过程中渗气充分，以便在空中消能。锥形阀具有良好的水力条件；调节流量性能好；机构简单，自重轻，启闭力小，安装和维修比较简单。它的主要缺点是适应孔口小，泄流时的水雾不利于附近环境及电气设备，阀体悬臂支承，受力较差。目前，锥形阀多用钢板制作，因而减少了阀体的重量和造价。

## 第二节 闸门系统的组成

以平面闸门为例，一个闸门系统的组成可用以下层次表示，并参阅图1-26。



上表是对一个典型、完整的闸门系统而言的，并非每一个闸门系统都必须具备以上所有的构件。对于露顶式闸门无需设置门楣；对于小型闸门不设侧向导轮（一般只在边梁上装设一个用角钢等制成的简单的导引装置），因而也就无需装置侧轨了。

为了使读者对闸门系统各部分的结构和作用能有更清楚的了解，现分述如下：

### 一、闸门的活动部分——门叶

闸门的活动部分即门叶是由面板、梁格、横向和纵向联结系、行走支承（滚轮或滑道）、悬吊装置以及止水等部件组成，如图1-27所示。

#### 1. 面板

面板是用来直接挡水的，一般应布置在受水压的迎水面。

## 2. 梁格

梁格用来支承面板，以缩小面板的跨度并减小面板的厚度。梁格一般包括主梁、次梁（包括水平次梁、竖直次梁、顶梁和底梁）和边梁。它们共同支承着面板，并将面板传来的水压力依次通过次梁、主梁、边梁而后传给闸门的行走支承。

## 3. 空间联结系

为了增强门叶结构的刚度，使用空间联结系——横向和纵向联结系把门叶联结起来。横向联结系位于闸门横向竖平面内（图1-28），其形式一般为实腹隔板式，横向联结系用来支承顶梁、底梁和水平次梁，并将所承受的力传给主梁。同时横向联结系保证着门叶结构在横向竖平面内的刚度，不使门顶和门底产生过大的变形。小型水电站闸门纵向联结系一般采用框架式结构，其主要作用是承受门叶自重及其他可能产生的竖向荷载，并配合横向联结系保证了整个门叶结构在空间的刚度。

## 4. 行走支承

由于门叶是一个可以上、下移动的构件，就需要在门叶结构上设置滚轮或滑道来支承闸门，并将面板所承受的全部水压力传到设于门槽内的轨道上。为了保证门叶结构在启闭时不发生过大的偏斜而被卡在门槽内，并减少闸门的振动，还应设置导向用的侧轮和反轮。

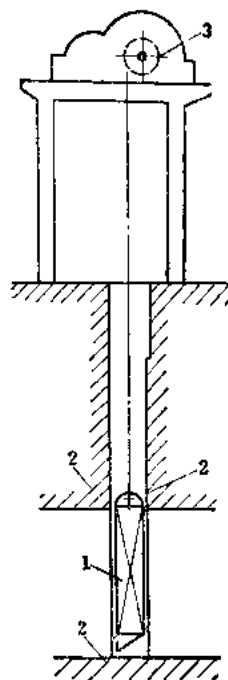


图 1-26 闸门三大部分示意图

1—门叶；2—门槽；3—启闭机

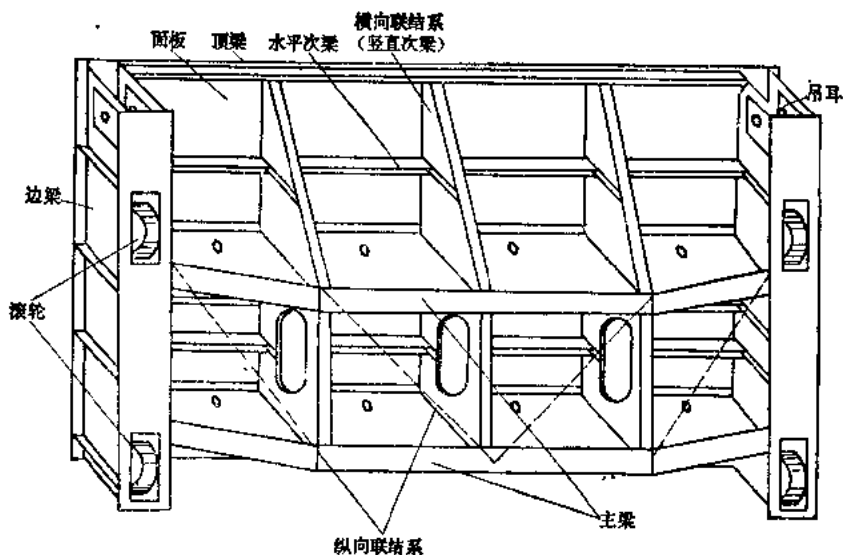


图 1-27 平面钢闸门门叶结构立体示意图

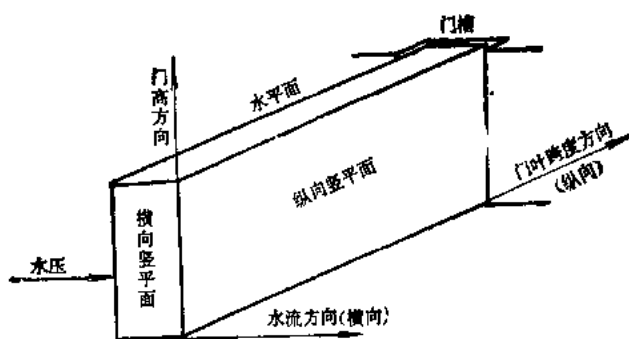


图 1-28 平面闸门的坐标平面示意图

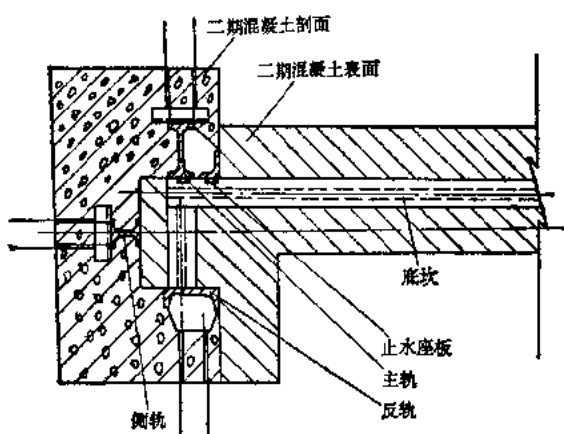


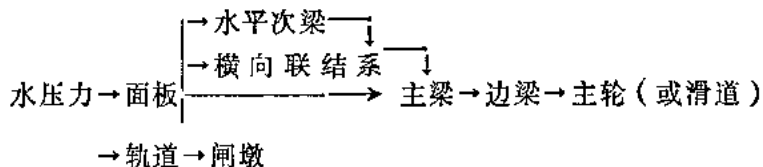
图 1-29 门槽结构图

楣和底槛等部件组成。露顶式闸门无需设门楣，底槛兼有止水和承受门叶自重的作用。

### 3. 护砌埋设件

护砌埋设件通常用角钢制成，主要为保护门槽和孔口边棱处的混凝土不直接受漂浮物的撞击和高速水流作用。

从上述平面钢闸门的结构组成可以知道：在封闭孔口时，闸门所承受的水压力是沿下列途径传递到闸墩上去的，即



了解闸门结构的传力途径，对于掌握各种构件的受力情况和闸门的设计程序是有帮助的。

## 三、闸门的操作装置

闸门的操作装置即启闭机，主要由动力部件、传动部件、制动部件、连接部件、支承及行走部件所组成。

### 5. 吊耳

为了启闭闸门，在门叶结构上部还要设置吊耳，用来连接启闭闸门的牵引构件。

### 6. 止水装置

为了防止闸门漏水，在门叶结构与孔口周围之间的所有缝隙里需设置止水。

## 二、闸门的固定部分——门槽埋设件

闸门的固定部分即门槽的埋设件往往与门叶的型式有关，一般由行走支承埋设件、止水埋设件和护砌埋设件等部件构成，如图1-29所示。

### 1. 行走支承埋设件

行走支承埋设件主要由主轨、反轨和侧轨等部件组成；主轨用于承受由滚轮或滑道传来的水压力，侧轨和反轨用来支承导向用的侧轮和反轮。

### 2. 止水埋设件

止水埋设件主要由止水座板、门

### 1. 动力部件

通常用电动机作为动力。

### 2. 传动部件

传动部件由开式齿轮传动装置和减速机组成。

### 3. 制动部件

制动部件一般就是一个制动电磁铁。

### 4. 连接部件

连接部件通常由滑轮组、吊钩或吊环、钢丝绳或吊杆等部件组成。

### 5. 支承及行走部件

对于一机操作多孔闸门的启闭机需要在机架上装置行走机构，而在闸门启闭机平台上装设轨道。

近年来，液压启闭机发展很快，已越来越多地在工程上使用。

## 第三节 闸门的总体布置

闸门是水利建筑物的重要组成部分之一，它的安全和适用在很大程度上保证着水利建筑物的使用效果。因此，在规划设计水利建筑物的时候，应使闸门的总体布置合理。

### 一、一般规定

(1) 闸门应布置在水流较平顺的部位，应尽量避免门前横向流及漩涡、门后淹没出流和回流等对闸门运行的不利影响。

由于水流条件不好，对闸门运行带来许多坏影响，致使闸门不能正常工作，有的甚至导致失事。如湖北富水水电站溢洪道 $12 \times 9\text{m}$ 弧门在部分开启运行时，由于横向流的作用产生振动，是导致该门支臂失稳破坏的原因之一。进口漩涡带进大量空气也易引起闸门振动和门槽气蚀。出口回流和淹没出流同样也易引起闸门振动，如河南三义寨闸 $12 \times 7\text{m}$ 弧门和江苏樟山闸 $10 \times 7.5\text{m}$ 弧门的剧烈振动，就是因为淹没出流引起的。此外，由于地形关系产生折冲水流和其他因素导致闸门失事。应防止这些流态对闸门运行中的不利影响。首先在布置上应尽量避免，当不能避免时，要采取各种具体措施，以减免其有害影响，如进口漩涡只在某一水位时才出现，是否考虑在此水位不作部分开启运行；当有横向流时，闸门不作部分开启运行或避免某些开度；再如淹没出流要加强通气等。

闸门布置在进口时，尚应避免闸孔和门槽顶部同时过水。门槽顶部和闸孔同时过水，也是一种不利的流态，易使闸门振动和门槽空蚀。例如岳城水库、皎口水库和磨子潭水库等，由于双层同时过水引起门槽空蚀，就是明显的例证。

(2) 泄水和水闸系统中的多孔口工作闸门，当需短时间内全部开启或均匀泄水时，宜选用固定式启闭机。这是主要考虑到溢洪时间的紧迫，需同时提升多孔口闸门和为了防止下游冲刷，需同时小开度提升多孔口闸门。

对平原水闸，泄水系统的工作闸门启闭机除保证常用电源可靠外，必要时应设置备用动力。这是确保枢纽安全运行的重要措施，也是不少运行单位的要求。有一些水库由于暴风雨袭击，将主电源切断，又没有备用动力曾发生过事故，如广西龙山水库溢洪道 $10 \times 7\text{m}$



弧门失事,即为一例。

(3) 两道闸门间或闸门与拦污栅之间的最小净距,应满足启闭机布置、运行和闸门安装、维修等方面的要求。

(4) 检修闸门的设置数量,应根据孔口数量、工程重要性和工作闸门的使用状况、维修条件等因素综合考虑。

对泄水和水闸系统,一般10孔以内者可设置1~2扇检修闸门;10孔以上者每增加10孔可增设1扇。

对引水发电系统,一般3~6台机组可设置尾水闸门两套,进口检修闸门1套;6台机组以上,每增加4~6台可各增设1套。

特殊情况,可酌情增减。

(5) 闸门不得承受冰的静压力。防止冰静压力的方法,应根据气温及库水位变化等条件,因地制宜地选用。在门前形成不冻带是比较有效的。一般采用压缩空气泡法,可用压缩空气机或用潜水泵(如官厅、蓟窝、上马岭、红山等),也有用开凿冰沟或其他方法,使闸门与冰层隔开。需要在冰冻期间操作的闸门,除其止水应尽量严密外,尚应采取保温或加热等措施,一般采用保温室使之不冻或采用蒸汽、电热等办法解冻(如三家店、上马岭等),使闸门与门槽不致冻结。

(6) 当潜孔式闸门,包括工作、事故和检修闸门,如门后闸门槽、竖井或出口等不能充分通气时,则应在紧靠闸门下游的孔口顶部设置通气孔,其上端应与启闭机室分开,并应有防护设施。通气孔面积的计算按下面的方法进行:

1) 设于泄水管道中的工作闸门或事故闸门,其门后通气孔面积可按下列经验公式计算:

$$\left. \begin{aligned} a &\geq \frac{Q_a}{[V_a]} \\ Q_a &= 0.09 V_w A \\ \frac{a}{A} &= 0.09 \frac{V_w}{[V_a]} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中  $a$ ——通气孔的断面面积,  $m^2$ ;

$Q_a$ ——通气孔的充分通气量,  $m^3/s$ ;

$[V_a]$ ——通气孔的允许风速,  $m/s$ , 一般取用40m/s, 对于小型闸门可取50m/s;

$V_w$ ——闸门孔口的水流流速,  $m/s$ ;

$A$ ——闸门后管道面积,  $m^2$ 。

对于高水头大型工程的重要闸门,若按上式计算所得的通气孔面积较大,而在布置上又有困难时,也可按下列半理论半经验公式计算:

$$Q_a = \frac{V_w A}{1 + 21.2 \frac{A_a^2}{\varphi_a a B V_w} \sqrt{\frac{g}{L}}} \quad (1-2)$$

式中  $A_a$ ——闸门后管道水面以上的空间面积,  $m^2$ ,  $A_a = A - A_w$ , 一般宜小于0.3A;

$A_w$ ——闸门后管道水面以下面积;

$\varphi_a$ ——通气孔道的风速系数, 一般取 $\varphi_a \approx 0.6$ ;

$B$ ——闸门孔口宽度, m;

$L$ ——闸门后管道长度, m;

$g$ ——重力加速度,  $m/s^2$ 。

其他符号意义同前(见图1-30)。

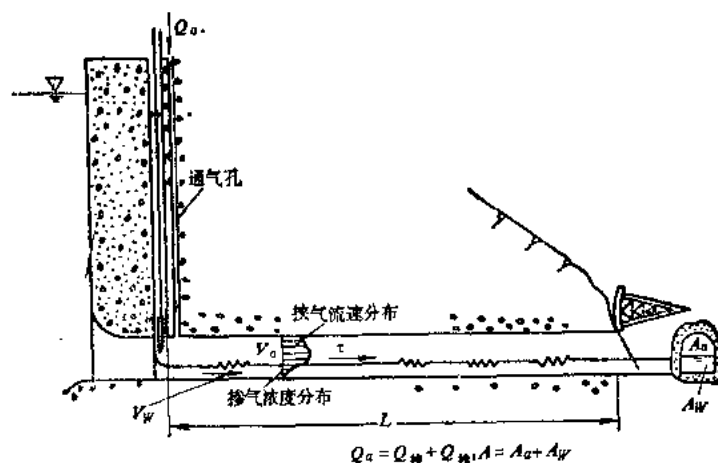


图 1-30 潜孔式闸门门后通气孔面积计算简图

当已知管道尺寸和闸孔流速时, 可先假定通气孔面积进行试算, 逐次逼近, 最后按通气孔风速等于或略小于允许风速 $[V_a]$ 这一条件选取合宜的通气孔面积。

需要指出, 上式比较适用于明流长管道, 并须采用合理的水面以上的空间余幅; 同时气流流速 $V_a$ 实际上应为参变量而非任意给定的常量, 因此允许风速 $[V_a]$ 不宜用一定值而应给予一定的变化范围, 这样在试算时就不致于出现负值。

2) 发电引水管道快速闸门门后的通气孔面积可按发电管道面积的3%~5%选用; 一般事故闸门的通气孔面积可酌情减小。

3) 检修闸门门后的通气孔面积, 可根据具体情况而定, 一般宜大于或等于充水管的面积。

(7) 闸门的平压设施, 一般采用设置于门上的充水阀, 也可采用其他有效设施。充水阀的尺寸, 应根据充水容积、下游漏水量和要求充满时间等来确定。阀体应有足够重量, 其导向机构应灵活可靠。充水管和阀体形状, 应尽量使充水时流态平稳。

充水阀的操作应和闸门启闭联动, 并应在启闭机上设置小开度的行程开关。

(8) 为便于制造、运输和安装, 设计闸门时应考虑:

1) 制造、安装的具体条件;

2) 运输单元应具有必要的刚度, 外形尺寸和重量应满足运输的要求;

3) 零部件、构件的品种规格应合理的减少, 并应尽量采用标准化、定型化的零部件;

4) 结构构件的连接, 宜采用焊接, 但应尽量减少现场焊接工作量。为减少拼装变形, 闸门节间也可采用销轴或螺栓连接;

(9) 为便于闸门、拦污栅和启闭机的运行、维修, 设计时应考虑:

1) 根据当地情况, 可设启闭机房或机室。位于坝内或地下洞室内的机室, 应考虑通风防潮设施;

2) 启闭机设置高程, 应满足闸门维修的要求;

3) 潜孔式弧形闸门, 宜在其胸墙和侧止水导板的适当高程处, 设置不小于80cm宽的检修台阶。在支铰处也可设检修平台;

4) 启闭机室、闸门检修室和检修平台, 宜有足够的面积和高度, 并应设置栏杆或盖板, 以满足运行、维修及安全的要求;

5) 为便于吊装, 在检修室和启闭机室内, 宜埋设必要的吊环和锚钩;

6) 检修闸门、备用拦污栅和其他附属设备, 宜设有存放场所, 有条件者可设门库。门库底部应设排水沟;

7) 启闭机室和闸门检修室的上下交通, 宜设置走梯解决。

(10) 为减轻闸门及其附属设备的腐蚀, 延长其使用寿命, 应根据水质情况、运行条件和设置部位, 采用有效的防腐蚀措施(参阅本手册压力钢管部分)。

## 二、泄水系统

(1) 在溢洪道工作闸门的上游侧, 一般设置检修闸门, 图1-31为溢洪建筑物布置图。对于重要工程, 必要时也可设置事故闸门。但当水库水位每年有足够的连续时间低于闸门底槛, 并能满足检修要求时, 可不设检修闸门。

(2) 在泄水孔工作闸门的上游侧, 应设置事故闸门。当下游水位经常淹没底槛时, 应研究设置下游检修闸门的必要性。

(3) 泄水孔的工作闸门, 一般选用弧形闸门、平面闸门或其他型式的门、

阀。从国内调查看, 弧形闸门和平面闸门用的最为广泛, 其次, 还有锥形阀。当选用弧形闸门时, 要注意采用合理的止水型式; 当选用平面闸门时, 还要注意采用合理的门槽型式。当闸门孔口尺寸较大, 且操作水头大于50m时, 应尽量选用弧形闸门。

(4) 泄水孔的工作闸门, 门后宜保持明流, 门前的压力段宜保持有一定的收缩率。

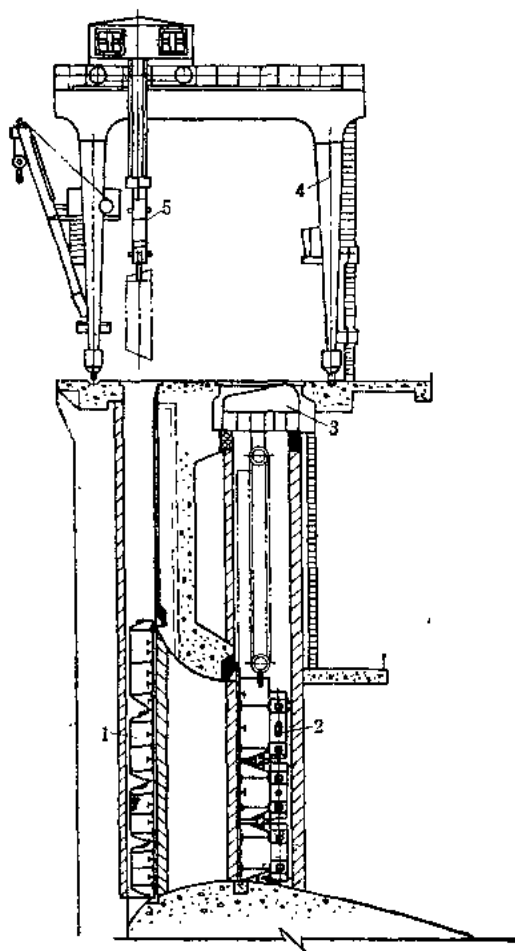


图 1-31 溢洪道建筑物布置图

1—叠梁式检修闸门; 2—平面工作闸门; 3—固定卷扬式平面闸门启闭机; 4—双向门式启闭机; 5—自动抓梁

工作闸门设置于出口，流态好，工作可靠，如吉林的云峰电站的中孔闸门，湖北的丹江口电站的底孔闸门；但也要有一定的条件，如便于布置承受推力的闸墩和启闭机。当采用泄洪洞方案，若受地质条件所限，放在出口就不合适了。这时可以布置在中部或进口处，但要强调门后为明流。否则，在闸门开启过程中，必然形成明满流过渡的很不好流态（如河北岗南泄洪洞）。在工作闸门以前泄水孔压力段应保持一定压力，即保持一定收缩率，这对减免空蚀改进运用条件，是很重要的。一般可选用压缩比1.5:1。据国内调查，大体合乎此比值，流态好些，如梅山、佛子岭、龚咀、丹江口和云峰等电站，反之，如磨子潭电站则较差。因压缩比太大不经济，太小则不安全，所以具体收缩率宜通过水工模型试验来确定。当泄水隧洞有弯道时，工作闸门尚宜布置在弯道下游水流平稳的直段上，否则水流在洞中转弯，流态很差，影响安全。图1-32为泄水建筑物布置图。

（5）排砂孔闸门，一般设置在进口段，且宜采用上游面板和上游止水，以防止闸门梁格中淤砂。门槽和水道边界应尽量光滑平整，并选用合适的抗磨材料加以防护。根据排砂闸的具体条件，必要时可设置排砂阀和高压水枪，以防止泥砂淤积过高，作为开门时的后备措施。

（6）施工导流孔闸门，应考虑工程施工期和初期发电的各种运行情况。截流下闸应安全可靠，必要时应有后备措施，并应尽量与永久性闸门共用。

### 三、水闸、排灌系统

水闸是排灌工程中主要建筑物之一。它的主要作用是控制流量和水位，进行水闸、排灌系统的建筑物布置时应考虑以下特点：

（1）水闸、排灌系统的闸门型式，应根据当地的特点，因地制宜，灵活选用。一般采用平面闸门、弧形闸门、拱形闸门、升降式闸门以及其他型式的门、阀。

（2）各类水闸工作闸门的上游侧，一般设置检修闸门。图1-33为水闸建筑物布置图。当下游水位经常淹没底槛时，应研究设置下游检修闸门的必要性。检修闸门的型式，可选用叠梁、浮式叠梁和平面闸门。

（3）为降低启闭机排架高度，提高闸的整体抗震性能，可采用升卧式闸门（见图

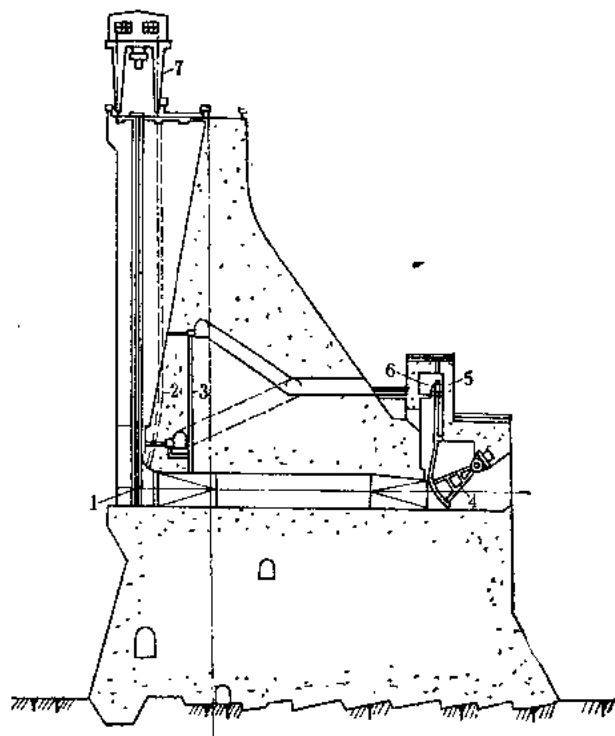


图 1-32 泄水建筑物布置图

1—事故检修闸门；2—通气孔；3—旁通管；4—弧形工作闸门；5—螺杆式启闭机；6—启闭机室；7—单向门式启闭机

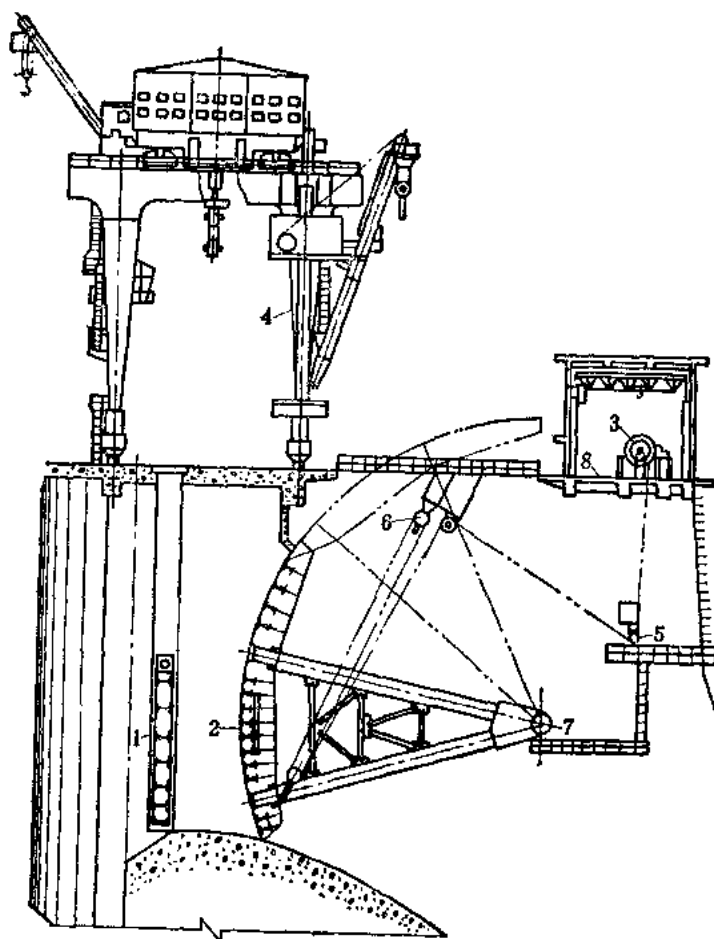


图 1-33 水闸建筑物布置图

1—平面检修闸门；2—弧形工作闸门；3—固定卷扬式平面闸门启闭机；4—双向门式启闭机；5—转向滑轮；6—双联滑轮组；7—检修平台；8—启闭机工作桥

1-10)，但应注意选择合适的起弧高度、弧轨半径和锁锭装置等，并需考虑闸门的检修条件。

(4) 为简化消能设施，提高泄流能力，降低启闭力，在泄水建筑物出口处，可采用平置式或斜置式锥形阀。但应注意喷射水雾对附近建筑物的影响和阀的检修条件。

(5) 在流量增长很快且泥沙淤积轻微，或有专门要求的河流上，可采用水力操作闸门。但应注意闸门的水力学问题和闸门检修时的排水放空设施。

(6) 挡潮闸工作闸门，一般要求启闭迅速；闸门的面板应布置于迎海水侧；同时宜采用双向止水，要求止水严密，以防止海水和泥砂倒灌。一般排灌闸工作闸门也有类似挡潮闸的某些特点，如双向止水和较长期处于水下工作等，排灌闸工作闸门的主要特点是承受双向水压力，在设计其支承、止水及底缘型式时，应能适应这一特点。

(7) 在有较大涌潮或风浪的水利枢纽中，当采用潜孔弧形闸门且上游水位有时低于门楣时，应在进口胸墙上设排气孔，以减轻潮浪所产生的强压气囊对闸门的冲击力。广东

鹤地水库溢洪道弧门、浙江马山闸弧门、河南白龟山水库弧门、江苏三河闸弧门，都处于沿库、沿海、沿湖有较大风浪和涌潮地区，前二者由于布置上的缺陷，在上游水位略低于前胸墙时，胸墙底部和弧门露出水面以上部分形成一个封闭的空腔，在较大风浪和涌潮作用下，空气被压缩，形成巨大的气囊冲击压力，以致造成闸门支臂失稳破坏。如鹤地水库弧门的布置，见图1-34所示。鹤地水库弧门为 $10 \times 4.5-6.5\text{m}$ ，在风浪作用下形成封顶，造成气囊冲击力，致使上支臂失事，破坏时水位 $39.54\text{m}$ 。而在后两个工程上，在布置上进行了改进，如在胸墙中开洞，拆除弧门顶止水等，未形成较大的气浪冲击压力，闸门基本完好。其他措施尚有：

- 1) 预留少许调压沟；
- 2) 设防冲木，也可以减少闸门冲击力。

#### 四、引水发电系统

引水发电系统工程的作用，是把河流上游或水库内的水引到发电厂房内的水轮机，经水轮机排出的水再通过尾水渠至下游河道。引水工程要承受水压力和水流的冲击。进行引水发电系统的建筑物布置时应考虑以下特点：

(1) 高水头引水式电站，其压力管道进水口应设置快速闸门（或事故闸门）和检修闸门（如图1-35所示）；中、低水头引水式电站，如水轮机前装设进水阀时，其压力管道进水口应装设事故闸门和检修闸门；否则，应装设快速闸门和检修闸门。当压力水道为长隧洞时，其进水口应装设事故闸门和检修闸门。

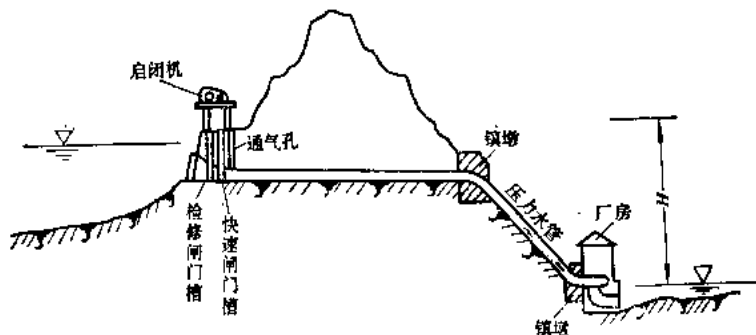


图 1-35 引水式水电站建筑物布置图

坝后式或混合式电站，如水轮机前装设进水阀时，其压力管道进水口应装设事故闸门和检修闸门；否则，应装设快速闸门和检修闸门。图1-36为坝后式电站建筑物布置图。

河床式电站，如机组有可靠的防飞逸装置时，其进水口应装设事故闸门和检修闸门，否则，应装设快速闸门和检修闸门。图1-37为河床式电站建筑物布置图。

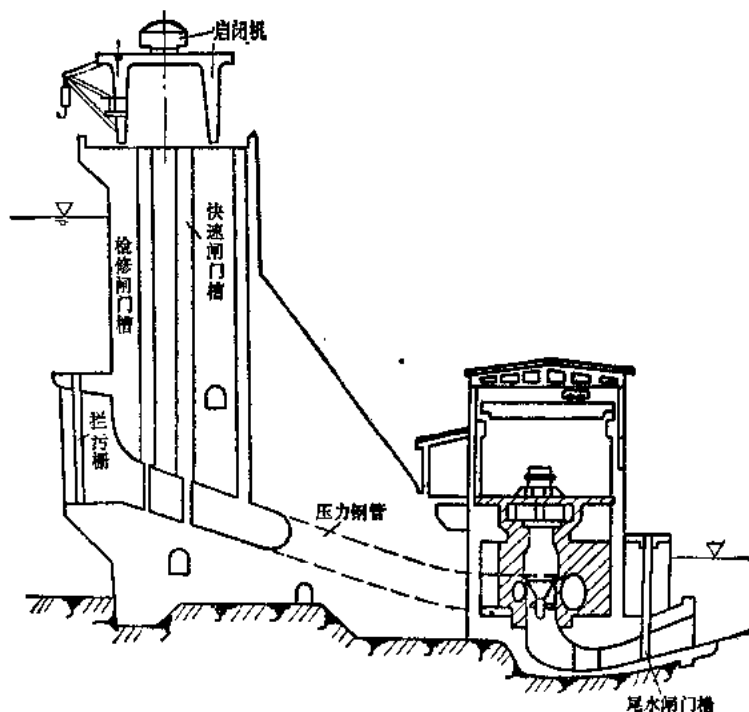


图 1-36 坝后式水电站建筑物布置图

(2) 对设于调压井中的事故闸门, 应考虑涌浪对闸门的停放和下降的影响。这是由于经常停放在调压井门槽内的闸门, 因水位的经常波动和导叶关闭时产生较大的涌浪所致。

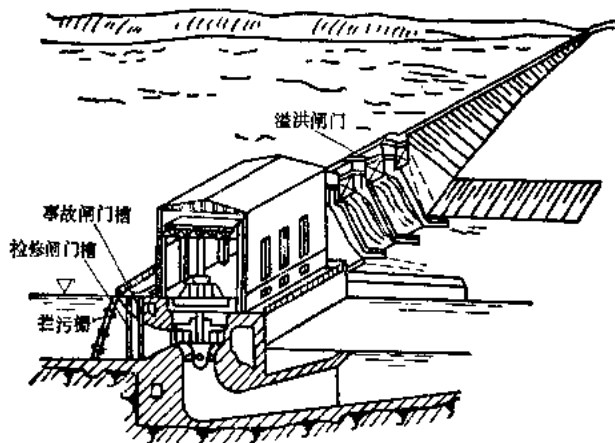


图 1-37 河床式水电站建筑物布置图

有些电站进水口快速闸门设在调压井内, 曾发生停放和快速下降过程中不稳定现象, 例如福建龙亭电站, 曾发生闸门浮起情况, 以致影响正常运行, 安砂电站在模型试验中, 也发生有相当的上托力。分析其原因, 系由于机组甩负荷, 调压井中发生较强烈的涌浪等, 影响闸门稳定。

(3) 快速闸门的关闭时间, 应满足对机组和钢管的保护要求, 其下降速度, 在接近底槛

时一般不大于 $5\text{m}/\text{min}$ 。快速闸门启闭机, 应有就地操作和远方操作两套系统, 并应配有可靠电源。

(4) 电站进水口应设有可靠的测压设施, 以便监视拦污栅的水位差, 以及事故闸门、检修闸门在开启前的平压情况。有些进水口事故、检修闸门, 因为充水不平压就操作闸门, 造成拉杆拉断事故, 如北京密云电站、湖北丹江口电站等, 因此宜有监视平压设备, 一般可采用压力计或指示讯号。

(5) 为了保证止水严密, 尾水闸门的止水应有预压装置。门槽埋件的安装精度应满足多孔共用一扇闸门的要求。平压时, 应从尾水方向引水。

(6) 拦污设施的布置型式, 应根据河流中污物性质、数量以及对清污的要求等来确定。在污物较少的地区, 一般设置一道拦污栅。在污物较多的地区, 宜考虑排污设施, 并宜考虑设两道拦污栅或采用连通式布置。此外尚应设置有效的清污设施。所有的拦污栅均宜设置可靠的清污平台。在寒冷地区, 必要时采取有效措施, 以防止栅条结冰或冰屑堵塞。

## 第四节 闸门设计的内容及设计的若干原则

### 一、闸门设计的内容

设计闸门时, 应根据具体情况必须具备下列有关资料:

- (1) 水利枢纽的任务和水工建筑物的布置;
- (2) 闸门的孔口尺寸和运用条件;
- (3) 水文、泥沙、水质、漂浮物和气象方面的情况;
- (4) 有关闸门的材料、制造、运输和安装等方面的条件;
- (5) 地质、地震和其他特殊要求等。

然后, 对这些资料进行详细的分析研究。根据枢纽布置情况, 按枢纽的设计程序分为三阶段或两阶段进行。三阶段设计的任务是:

#### 1. 初步设计

通过技术经济比较, 选定闸门型式、主要尺寸及数量, 并确定其运转方式与总工程量。初步设计包括:

- (1) 初步设计计算说明书: 应包括基本原始资料 and 主要设计原则, 所选门型和布置方案在技术经济上的合理性及主要结论, 闸门主要构件的简单计算及选用的主要材料。
- (2) 总图: 包括有关水工结构机械设备的总体布置图和必要的闸门总图。
- (3) 估算工程量。

#### 2. 技术设计

在批准的初步设计基础上进行结构布置、结构计算、材料选择及主要部件的设计等。技术设计包括:

(1) 计算说明书: 应力求简明扼要, 附有必要的结构插图和计算, 计算结果应着重标出, 以便校核和应用。计算说明书包括下列内容:

- 1) 概论:
  - (a) 闸门的基本资料和工作条件;
  - (b) 闸门型式选择及结构方案的论证;
  - (c) 重大技术问题试验研究成果;
  - (d) 止水(活动及固定部分)装置及构造;
  - (e) 材料的选用;



(f) 荷载及容许应力;  
(g) 闸门制造和运输单元的控制尺寸和重量, 构件安装的编组;  
(h) 闸门操作设备的说明: 启闭机、拉杆、锁锭、旁通管、通气孔、爬梯和特殊设备, 如防冻吹沙装置等;

(i) 操作运转方式的简单说明: 闸门的装卸、调运、启闭、检修和存贮。

说明书的概论, 如与初步设计的结论和基本资料有改变时, 应说明改变原因。

2) 结构计算:

(a) 面板及挡水构件的计算;

(b) 承重结构及辅助梁系的计算;

(c) 行走支承部分(包括活动部分及固定部分)计算;

(d) 辅助结构计算;

(e) 起吊及锁锭装置的计算。

3) 启闭力计算:

(a) 启门力、闭门力或持住力以及加重的确定;

(b) 启门和闭门时间的确定;

(c) 水力操作时的有关计算。

(2) 技术设计图纸内容包括有:

1) 总体布置图: 表示出闸门的全貌及其与闸墩、底槛、工作桥、检修室(平台)启闭机的关系(三面投影)以及各相关高程;

2) 闸门总图: 包括闸门上游视图、下游视图、平面图(俯视图、仰视图)、侧视图、典型的断面图和主要部分的局部详图;

3) 闸门与门槽、拉杆、锁锭等设备的各相关位置图;

4) 闸门个别部件的装配图, 例如行走支承部分;

5) 在装配图中必要的普通铆钉、螺栓结合、焊接、榫槽和节点应示出。

(3) 主要材料规格及总工程量。

3. 施工图设计

在批准的技术设计基础上进行闸门全部结构、部件及零件的详细设计。提供制造、安装、运转及维护等方面必须的图纸和文件。施工图设计包括:

(1) 补充计算: 系指技术设计未定的部分计算, 如联结计算、个别部件计算等;

(2) 施工详图: 包括闸门分段结构图、部件图、零件图。应表明细部尺寸、中心线、公差配合符号、铆钉及螺栓准线、铸造和拼装等技术条件, 安装接合的措施及特殊拼装的有关要求。

门槽埋设件的施工详图宜单独分开。

各施工详图上应附有材料表, 根据材料的型式及规格数量汇总成闸门综合材料表。

门槽埋设件的综合材料表应分列。

(3) 说明书: 应说明所采用材料的技术条件、制造、安装的允许公差和注意事项、运输中防止变形的措施, 运转与维护要求等(如说明不多, 也可写在图纸上)。

两阶段设计时,扩大初步设计的任务基本与上列初步设计相同,另需有闸门门叶总图、门槽总图及相关位置图,需要试验的初步试验成果。施工图设计的任务,是在批准的扩大初步设计基础上,适当合并技术设计与施工图设计的主要内容。

## 二、闸门设计的若干原则

### (一) 孔口尺寸的确定

闸门孔口尺寸必须满足泄流的要求。孔口尺寸及孔口型式主要取决于孔口所在的位置、过闸流速、闸门启闭力、启闭机型式及容量、闸后消能方式及允许单宽流量、闸门结构要求及制造工艺水平。在一般情况下,露顶式孔口选用宽而扁的孔口,宽高比一般在1:1~2:1的范围内,宽高比过大,则由于跨度较大而使结构不合理,并且给运行带来不便;宽高比过小亦会因跨度过小而不能充分发挥材料的作用。应当指出,孔口宽高比的选定同样取决于防止下游冲刷的允许单宽流量、溢流前沿宽度以及闸门的技术可能性及经济的合理性。潜孔闸门孔口的宽高比与露顶闸门相反,一般在1.2~1.1之间,而平面闸门的宽高比以2:1为最经济。潜孔闸门孔口尺寸、闸门位置与门型均有一定的关系,由于水头高,过闸流速大,因而存在的问题也远较露顶式闸门或低水头闸门复杂,它主要表现在水力学问题尖锐突出。最后确定闸门孔口尺寸时,还应优先考虑选用表1-1至表1-3推荐的标准系列尺寸。

闸门的设计水头也应选用符合下面的系列标准:

- (1) 设计水头为10~20m时,按1.0m递增;
- (2) 设计水头为20~50m时,按2.0m递增;
- (3) 设计水头大于50m时,按5.0m递增。

### (二) 设置位置及道数

闸门位置及道数的设置,在各类水工建筑物中都不尽相同,应按不同类型的建筑物特点区别对待,在本章第三节闸门的总体布置中已有详细的叙述,这里不再重复。

### (三) 闸门型式的选择

选择闸门型式时应综合考虑下列因素:

(1) 水利枢纽对闸门运行的要求:运行要求决定闸门工作性质,如静水或动水启闭,是否需要部分开启或快速关闭等,对门型选择都有很大关系。

闸门的型式不同,性能不同,适用的条件也不同:平面闸门的抗振性能较好,运行的适应性较强,在表孔和水头不高的闸门中,由于水力学条件不尖锐突出,故在国内外得到广泛的应用。对于潜孔平面闸门为避免其产生强烈振动以及使门槽不发生空蚀,平面闸门则主要限于小孔口的高压滑动闸门。弧形闸门由于其孔口侧壁无凹槽,过水时水流连续性不受干扰,故不会因此而产生空蚀;底缘尖锐,可以避免底缘不稳定流的脉动压力,改善了闸门的工作条件,因而也得到广泛使用,尤其是在高水头和大孔口的地方多采用弧形闸门。

水利枢纽对运行的要求不同,选用闸门的考虑也不同。例如,在引水发电建筑物中,进水口的工作闸门和检修闸门一般采用平面闸门;但如采用塔式进水口,可考虑采用圆筒闸门的可能性。在溢洪建筑物中,检修闸门常采用平面闸门,也可根据实际情况而采用叠

表 1-1 露顶式溢洪道闸门的孔口尺寸

孔 口 高 度 (m)	孔 口 宽 度 (m)																		
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	
1.0	○	○	○	○															
1.5		○	○	○															
2.0			○	○	○	○	○												
2.5				○	○	○	○												
3.0					○	○	○	○	○	○									
3.5						○	○	○	○	○									
4.0							○	○	○	○	○	○	○						
4.5							○	○	○	○	○	○	○						
5.0								○	○	○	○	○	○	○	○				
6.0									○	○	○	○	○	○	○	○			
7.0										○	○	○	○	○	○	○	○	○	
8.0											○	○	○	○	○	○	○	○	
9.0												○	○	○	○	○	○	○	
10.0													○	○	○	○	○	○	
11.0														○	○	○	○		
12.0															○	○	○	○	
13.0																○	○		
14.0																	○	○	
15.0																			
16.0																			
18.0																			
20.0																			
22.0																			

注 (1) 孔口高度即为闸门高度;  
(2) 表中之“○”者, 为推荐的孔口尺寸。

表 1-2 潜孔式泄水孔闸门的孔口尺寸

孔 口 高 度 (m)	孔 口 宽 度 (m)															
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0
1.0	○	○	○	○												
1.5	○	○	○	○												
2.0	○	○	○	○	○	○										
2.5		○	○	○	○	○										
3.0			○	○	○	○	○	○	○							

续表

孔 口 高 度 (m)	孔 口 宽 度 (m)															
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0
3.5				○	○	○	○	○	○							
4.0				○	○	○	○	○	○	○	○	○				
4.5					○	○	○	○	○	○	○	○				
5.0					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
6.0					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7.0						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8.0							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9.0								○	○	○	○	○	○	○	○	○
10.0									○	○	○	○	○	○	○	○
12.0										○	○	○	○	○	○	○
14.0											○	○	○	○	○	○
16.0												○	○	○	○	○
18.0												○	○	○		

表 1-3

其 他 闸 门 (尾水闸门除外) 的 孔 口 尺 寸

孔 口 高 度 (m)	孔 口 宽 度 (m)																	
	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	10.0
0.6	○																	
0.8	○	○																
1.0	○	○	○															
1.2	○	○	○															
1.5		○	○	○														
2.0			○	○	○													
2.5				○	○	○												
3.0				○	○	○	○	○										
3.5					○	○	○	○										
4.0					○	○	○	○	○									
4.5					○	○	○	○	○	○								
5.0						○	○	○	○	○	○							
5.5							○	○	○	○	○	○						
6.0							○	○	○	○	○	○	○					
6.5							○	○	○	○	○	○	○	○				
7.0							○	○	○	○	○	○	○	○	○			

续表

孔 口 高 度 (m)	孔 口 宽 度 (m)																	
	0.0	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	10.0
7.5									○	○	○	○	○	○	○	○		
8.0							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
9.0									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10.0							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11.0												○	○	○	○	○	○	○
12.0													○	○	○	○	○	○
14.0																○	○	○
16.0																	○	

梁闸门或浮箱式闸门：工作闸门常采用平面闸门或弧形闸门。在深式泄洪建筑物中，事故检修门常采用平面闸门，工作闸门则采用无门槽的弧形闸门。但亦可采用两道同类型的平面工作闸门。又如泄流时的水雾对结构及电气设备没有影响时，便可考虑采用锥形阀。在水闸灌溉枢纽中，工作闸门常用的门型为平面闸门（升卧式）或弧形闸门或水力自控的闸门。如山区河流，洪水陡涨急落，要求及时开闸泄流和迅速关门蓄水时，宜采用翻板闸门；当需要调节上游水位，泄放一定流量的水闸，宜采用浮体闸；为了保护水泵机组安全，一般采用拍门。在通航枢纽中，闸室的检修闸门常采用叠梁闸门或浮箱式闸门；工作闸门则要根据通航规模选用，在大、中型船闸中常采用下沉式平面闸门或人字闸门；在小型船闸中则可考虑采用横拉闸门。在输水廊道中的检修闸门采用平面闸门，工作闸门则可选用平面闸门或反向弧形闸门。

（2）闸门在水工建筑物中的位置、孔口尺寸、上下游水位和操作水头：闸门设置位置在出口、中部或进口有不同的考虑。在出口设弧门有利，在中部或进口选弧门要设较大闸室是不利因素，用平面闸门则可简化布置。孔口尺寸大小和操作水头高低都明显影响门型选择：大孔口倾向于采用弧形闸门，以减少启闭机容量；当操作水头较大时，考虑到水流条件，以选弧门为宜。若尾水位较高，设弧门则可能由于支铰长期浸水，可能选平面闸门有利。

（3）泥沙和漂浮物的情况：对排砂过推移质以选用弧门有利，对排漂浮物则可考虑选用下沉式或舌瓣式闸门。沉浮物包括沉木、半沉木及漂浮物。对林区尤应注意沉木、半沉木的影响。湖南省岭天河电站上平下弧的双层闸门，由于卡住半沉木使启门超载，下弧门吊点拉脱，造成闸门失事。

（4）启闭机的型式、容量和挂钩方式：为避免启闭力过大不采用平面闸门而选用弧门。弧门多用固定式启闭机，自动挂钩梁一般多用于平面闸门。

（5）制造、运输、安装、维修和材料供应等条件：平面闸门制造简单，安装、运行和维修比较方便；弧形闸门由于支臂的弹性压缩以及面板不平度等因素，使得顶止水的处理比较困难，维修时不能整扇闸门吊出孔口等，使得弧形闸门的制造和维修都较平面闸门

困难;

(6) 技术经济指标: 弧形闸门由于支臂使得表孔闸墩加长, 从而增加投资等。

#### (四) 闸门结构确定

当闸门的孔口尺寸与门型确定之后, 进而考虑闸门的结构。面板与梁格的布置见第四章第一节。为了简化和加速闸门的制造, 降低成本, 小型闸门的主梁一般采用型钢梁; 当梁的荷载较大, 型钢梁截面尺寸有限不能满足要求时, 可采用钢板或型钢拼焊成的组合梁。闸门的行走支承装置, 应根据闸门的工作条件、跨度和荷载大小选定。一般可采用滑动式或滚轮式。滑动式支承制造方便, 适用于在静水中操作或水头不大的动水中操作的闸门。但对于水头较高又需在动水中启闭的闸门, 因摩阻力太大不宜采用。对于中小型闸门可采用木滑道、钢滑道或铸铁滑道等。荷载不大的闸门可采用悬臂式滚轮。对荷载大, 但跨度不太大的闸门也可采用简支式支承, 其轮子装设在双腹板的边柱腹板间。一扇平板闸门通常布置四个支点, 即闸门的两侧各布置两个滚轮。为了阻止闸门侧向和前后移动以及导向要求, 一般应按构造布置侧向、反向导轮或滑块。平面闸门的顶、侧止水一般选用“P”型橡皮, 底止水多采用条型橡皮。为了便于进行方案比较, 可以多画一些草图帮助思考。

#### (五) 结构计算

闸门布置大体确定后, 就可进行结构和零件的计算和设计, 最后把这些设想绘制成图。

#### (六) 考虑工艺要求

在设计过程中要与制造单位经常取得联系, 以求设计出来的闸门工艺比较合理。

#### (七) 考虑运输的要求

如果闸门是在工厂内制成的, 还应了解从工厂到安装现场的运输情况, 沿途中转站的起吊运输能力等, 以便考虑闸门安装件分段的办法及结构强度的核算等等。

闸门需要准轨铁路运输时, 其外形尺寸一般不许超出GB146-59中规定的机车车辆限界, 如图1-38。一般运送货物的准轨车辆其底板面距轨面高一般不超过1250mm。

闸门需要公路运送时, 其外形尺寸应考虑运行公路沿线路面与桥梁、管线交叉时的净空尺寸。一般桥梁、管线的下部与公路路面间的最小净空尺寸如下:

- 公路与公路桥或管道交叉时, 4.5m;
- 公路与铁路桥交叉时, 5m;
- 公路与低压电力线交叉时, 6m;
- 公路桥梁桥面上部的最小净空: 5m。

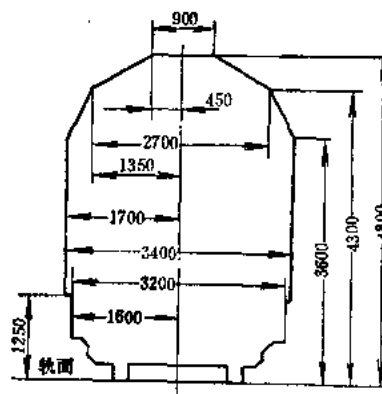


图 1-38 铁路运输允许外形尺寸界限  
(单位: mm)

## 第二章 荷 载 计 算

### 第一节 荷 载 的 分 类

作用在闸门上的荷载,一般按设计条件和校核条件划分为两类:设计荷载和校核荷载。

#### 一、设计荷载

设计荷载包括以下各项:

- (1) 闸门自重(包括加重);
- (2) 在设计水头下的静水压力;
- (3) 在设计水头下的动水压力;
- (4) 在设计水头下的波浪压力;
- (5) 风压力;
- (6) 泥沙压力;
- (7) 启闭力。

#### 二、校核荷载

校核荷载包括以下各项:

- (1) 闸门自重(包括加重);
- (2) 在校核水头下的静水压力;
- (3) 在校核水头下的动水压力;
- (4) 在校核水头下的波浪压力;
- (5) 风压力;
- (6) 泥沙压力;
- (7) 启闭力;
- (8) 冰、漂浮物和推移物的撞击力;
- (9) 水锤压力。

对闸门有特殊要求时(如抗地震、人防和水下爆破等),应专门研究作用在闸门上的荷载。

### 第二节 荷 载 的 计 算

#### 一、闸门自重计算

闸门自重可根据闸门型式采用下列经验公式估算:

##### 1. 露顶式平面钢闸门

当 $5\text{m} \leq H \leq 8\text{m}$ 时,

$$G = K_1 K_2 K_3 H^{1.45} B^{0.86} \quad (2-1)$$

式中  $G$ ——闸门自重, t;

$H$ ——孔口高度, m;

$B$ ——孔口宽度, m;

$K_1$ ——闸门行走支承系数:

对于滑动式支承  $K_1 = 0.81$ ;

对于滚轮式支承  $K_1 = 1.0$ ;

对于台车式支承  $K_1 = 1.3$ ;

$K_2$ ——材料系数:

用普通碳素结构钢制成的闸门  $K_2 = 1.0$ ;

用普通低合金结构钢制成的闸门  $K_2 = 0.8$ ;

$K_3$ ——孔口高度系数:

$H < 5\text{m}$   $K_3 = 0.156$ ;

$5\text{m} \leq H \leq 8\text{m}$   $K_3 = 0.13$ ;

当  $H > 8\text{m}$  时, 按下式计算:

$$G = 0.012 K_1 K_2 H^{1.55} B^{1.85} \quad (2-2)$$

式中符号意义、数值同前。

## 2. 露顶式弧形钢闸门

$$B \leq 10\text{m 时}, \quad G = K_1 K_2 H^{0.42} B^{0.33} H_0 \quad (2-3)$$

$$B > 10\text{m 时}, \quad G = K_1 K_2 H^{0.42} B^{1.1} H_0 \quad (2-4)$$

式中  $H_0$ ——设计水头, m;

$K_1$ ——孔口宽度系数:

$B \leq 5\text{m}$   $K_1 = 0.29$ ;

$5\text{m} < B \leq 10\text{m}$   $K_1 = 0.472$ ;

$10\text{m} < B < 20\text{m}$   $K_1 = 0.075$ ;

$B \geq 20\text{m}$   $K_1 = 0.105$ ;

其他符号意义、数值同前。

## 3. 潜孔式平面滚轮钢闸门

$$G = 0.073 K_1 K_2 K_3 A^{0.44} H_0^{0.6} \quad (2-5)$$

式中  $A$ ——孔口面积,  $\text{m}^2$ ;

$K_1$ ——闸门工作性质系数:

对于工作门与事故门  $K_1 = 1.0$ ;

对于检修门与导流门  $K_1 = 0.9$ ;

$K_2$ ——孔口高宽比修正系数:

当  $\frac{H}{B} \geq 2$  时,  $K_2 = 0.93$ ;



$$\frac{H}{B} < 1 \text{ 时} \quad K_2 = 1.1;$$

$$\text{其他情况} \quad K_2 = 1.0;$$

$K_3$ ——水头修正系数:

$$\text{当 } H_1 \geq 60 \text{ m 时} \quad K_3 = \left( \frac{H_1}{A} \right)^{1/4};$$

$$H_1 < 60 \text{ m 时} \quad K_3 = 1.0;$$

其他符号意义同前。

#### 4. 潜孔式平面滑动钢闸门

$$G = 0.022 K_1 K_2 K_3 A^{1.34} H_1^{0.69} \quad (2-6)$$

式中  $K_1$ ——闸门工作性质系数:

$$\text{对于工作门与事故门} \quad K_1 = 1.1;$$

$$\text{对于检修门} \quad K_1 = 1.0;$$

$K_3$ ——水头修正系数:

$$\text{当 } H_1 \geq 70 \text{ m 时} \quad K_3 = \left( \frac{H_1}{A} \right)^{1/4};$$

$$H_1 < 70 \text{ m 时} \quad K_3 = 1.0$$

其他符号意义、数值同前。

#### 5. 潜孔式弧形钢闸门

$$G = 0.012 K_1 A^{1.27} H_1^{1.48} \quad (2-7)$$

式中  $K_1$ ——孔口高宽比修正系数:

$$\text{当 } \frac{B}{H} \geq 3 \text{ 时} \quad K_2 = 1.2;$$

$$\text{其他情况} \quad K_2 = 1.0;$$

其他符号意义同前。

### 二、静水压力计算

作用在闸门上的静水压力, 根据闸门的结构型式和布置位置, 按表2-1的公式计算。

为方便工作, 这里介绍一组露顶及潜孔弧形闸门的垂直水压力和水平水压力计算通

式:

垂直水压力为:

$$P_y = \frac{R^2}{2} \gamma \left[ -\frac{2H_0}{R} (\cos\phi_2 - \cos\phi_1) + \frac{\phi_2 - \phi_1}{180} \pi - \frac{1}{2} (\sin 2\phi_2 - \sin 2\phi_1) \right]$$

水平水压力为:

$$P_x = R (\sin\phi_2 - \sin\phi_1) [2H_0 + R (\sin\phi_2 + \sin\phi_1)] \frac{\gamma}{2}$$

式中  $P_y$ ——为单位宽度的垂直水压力;

$R$ ——弧面半径;

$\gamma$ ——水的容重;

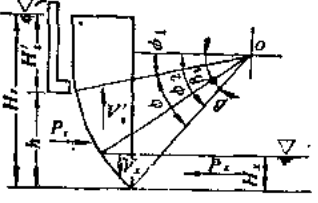
表 2-1

静水压力计算

序号	水压力图形	计 算 公 式
1		<p>总水压力: <math>P = \frac{1}{2} \gamma H_1^2 B_{\text{墙}}</math></p> <p>P力作用点位置: <math>H_c = \frac{2}{3} H_1</math></p>
2		<p>总水压力: <math>P = \frac{1}{2} \gamma (H_1^2 - H_2^2) B_{\text{墙}}</math></p> <p>P力作用点位置: <math>H_c = \frac{1}{3} \left( 2H_1 - \frac{H_1^2}{H_1 + H_2} \right)</math></p>
3		<p>总水压力: <math>P = \frac{1}{2} \gamma (2H_1 - h) h B_{\text{墙}}</math></p> <p>P力作用点位置: <math>H_c = H_1 - \frac{h}{3} \cdot \frac{3H_1 - 2h}{2H_1 - h}</math></p>
4		<p>总水压力: <math>P = \gamma (H_1 - H_2) h B_{\text{墙}}</math></p> <p>P力作用点位置: <math>H_c = H_1 - \frac{1}{2} h</math></p>
5		<p>总水压力: <math>P = \frac{1}{2} \gamma [(2H_1 - h)h - H_2^2] B_{\text{墙}}</math></p> <p>P力作用点位置: <math>H_c = \frac{3H_1 H_1^2 - H_2^3 - 6H_2^2 h + 6H_1 h^2 - 2h^3}{3H_1^2 - 6H_1 h + 3h^2}</math></p>

续表

序号	水压力图形	计 算 公 式
6		$F_1 = \frac{1}{2} \gamma H_1 B$ $V_y = \frac{1}{2} \gamma R^3 \left[ \frac{\pi \phi}{180} + 2 \sin \phi \cos \phi_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\phi_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$ $P_x = \frac{1}{2} \gamma H_1 B$ $V_x = \frac{1}{2} \gamma R^3 \left[ \frac{\pi \beta}{180} + 2 \sin \beta \cos \phi_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\beta_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$ <p>总水压力:</p> $P = \sqrt{(P_x - P_y)^2 + (V_x - V_y)^2}$
7		$P_1 = \frac{1}{2} \gamma H_1 B$ $V_y = \frac{1}{2} \gamma R^3 \left[ \frac{\pi \phi}{180} - 2 \sin \phi \cos \phi_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\phi_1 - \sin 2\phi_2) \right] B$ $P_x = \frac{1}{2} \gamma H_1 B$ $V_x = \frac{1}{2} \gamma R^3 \left[ \frac{\pi \beta}{180} + 2 \sin \beta \cos \phi_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\beta_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$ <p>总水压力:</p> $P = \sqrt{(P_x - P_y)^2 + (V_x - V_y)^2}$
8		$P_1 = \frac{1}{2} \gamma H_1 B$ $V_y = \frac{1}{2} \gamma R^3 \left[ \frac{\pi \phi}{180} - \sin 2\phi_1 - \sin(\phi_1 - \phi_2) - 2 \sin \phi \sin \left( \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \right) \right] B$ $P_x = \frac{1}{2} \gamma H_1 B$ $V_x = \frac{1}{2} \gamma R^3 \left[ \frac{\pi \beta}{180} + 2 \sin \beta \cos \phi_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\beta_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$ <p>总水压力:</p> $P = \sqrt{(P_x - P_y)^2 + (V_x - V_y)^2}$

序号	水压力图形	计 算 公 式
9		$P_s = \frac{1}{2} \gamma (H_s + H'_s) h B$ $V_s = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \phi}{180} + 2 \sin \phi_1 \cos \phi_1 \right. \\ \left. - \frac{1}{2} (\sin 2\phi_1 + \sin 2\phi_2) \right. \\ \left. + \frac{2H'_s}{R} (\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \right] B$ <p><math>P_x, V_x, P</math> 计算公式同(6)</p> <p>式中 <math>P_s</math>——上游水平分力, N;  <math>V_s</math>——上游垂直分力, N;  <math>P_x</math>——下游水平分力, N;  <math>V_x</math>——下游垂直分力, N;  <math>H_s</math>——上游水头, m;  <math>H_x</math>——下游水头, m;  <math>R</math>——弧门面板曲率半径, m;  <math>\gamma</math>——水的容重, 一般对淡水可取 <math>1 \text{ t/m}^3</math>; 对海水可取 <math>1.04 \text{ t/m}^3</math>; 含砂水按试验确定;  <math>B_x</math>——两侧止水间距, m;  <math>B</math>——孔口宽度, m;  <math>h</math>——闸门高度(计算到顶止水, m)</p>

$H_0$ —— $x$ 轴到上游或下游水面的距离, 在 $x$ 轴之上为正值,  $x$ 轴之下为负值;

$\phi_2$ ——支铰轴心与弧形闸底止水中心的连线与正 $x$ 轴的夹角;

$\phi_1$ ——当闸门为表孔弧形闸门时, 为弧面上游水位和支铰轴心连线与正 $x$ 轴的夹角; 当为潜孔弧形闸门时, 为闸顶止水中心和支铰轴心连线与正 $x$ 轴的夹角, 如计算下游水位垂直压力时, 为弧面下游水位和支铰轴心连线与正 $x$ 轴的夹角;

$P_x$ ——为单位宽度的水平水压力。

式中符号的图示见图2-1。

当计算一孔闸门的垂直水压力及水平水压力时, 分别将 $P_y$ 、 $P_x$ 乘以孔口宽度 $B$ 即可。

$$\text{总水压力 } P = \sqrt{(P_x^2 + P_y^2)}$$

### 三、动水压力计算

闸门在动水中工作时, 作用在闸门上的动水压力包括时均值及脉动值两部分。垂直作用于闸门面板的时均动水压力一般按静水压力分布计算。脉动值的作用和影响按动力系数予以考虑。高水头下操作的工作闸门或经常部分开启的工作闸门, 设计时应将作用在面板上的静水压力乘以动力系数, 其值可根据水流条件、闸门型式和不同部件取1.0~1.2。

动水压力的垂直分力, 如作用于闸门底缘的上托力、下吸力以及水柱压力可参照下列

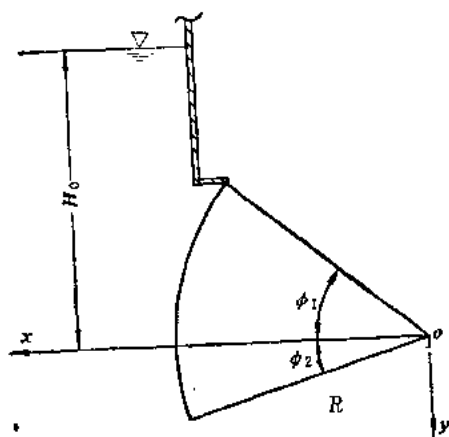


图 2-1 计算简图及坐标系

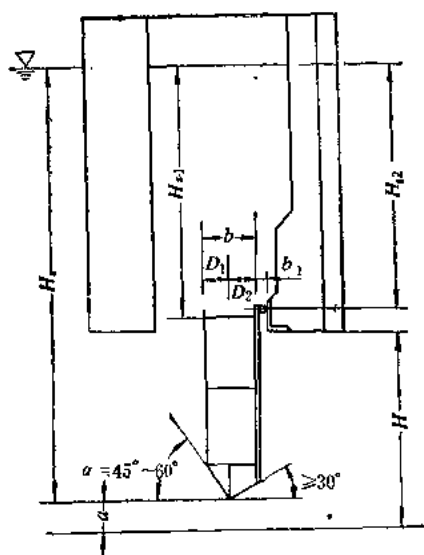


图 2-2 闸门的上托力计算

方法进行计算。

#### 1. 上托力计算

当采用图2-2所示之底缘形式时，上托力按下式计算：

$$P_t = \gamma \beta_i H_1 D_1 B_{zs} \quad (2-8)$$

式中  $P_t$ ——上托力，N；

$H_1$ 、 $D_1$ ——见图2-2；

$B_{zs}$ ——两侧止水间距，m；

$\beta_i$ ——上托力系数。

当验算闭门力时，按闸门接近完全关闭时的条件考虑，取 $\beta_i = 1.0$ 。

当计算持住力时，按闸门的开度考虑， $\beta_i$ 可参照表2-2选用。

表 2-2 上托力系数  $\beta_i$

$\frac{a}{D_1}$	2	4	8	12	16
$60^\circ$	0.8	0.7	0.5	0.4	0.25
$52.5^\circ$	0.7	0.5	0.3	0.15	—
$45^\circ$	0.6	0.4	0.1	0.05	—

注  $a$ ——闸门开启高度，m；

$D_1$ ——闸门底止水至上游面板的距离，m；

$\alpha$ ——闸门底缘的上游倾角（参阅图2-2）。

表2-2中 $\beta_i$ 值适用于闸后明流流态，且在应用时：

对泄水道闸门  $0 < a < 0.5H_1$ ；

对电站快速闸门  $0 < a < a_{k0}$ 。

$a_k$ 为电站快速闸门关闭时闸后明满流转换的临界开度。关于临界开度的确定问题,可根据已成工程类比或参考有关试验研究报告计算。必要时可通过水工模型试验确定。在一般情况下,亦可暂按 $a_k=0.5H$ 估算; $H$ 为引水道的孔高。

## 2. 下吸力计算

$$P_s = p_s D_2 B_{2s} \quad (2-9)$$

式中  $P_s$ ——下吸力, N;

$D_2$ ——闸门底缘止水至主梁下翼缘的距离, m;

$p_s$ ——闸门底缘 $D_2$ 部分的平均下吸强度, 一般按 $2 \times 10^4 \text{ Pa}$ 计算, 当流态良好、通气充分时, 可适当减小。

溢流坝闸门、水闸闸门和坝内明流底孔闸门底主梁到底止水的距离应符合底缘布置的要求, 即: 一般工作闸门和事故闸门下游倾角不小于 $30^\circ$ ; 当闸门支承在非水平底槛上时, 其夹角可适当增减; 当不能满足 $30^\circ$ 的要求时应采取适当补气措施, 对于部分利用水柱的平面闸门, 其上游倾角不应小于 $45^\circ$ , 应尽量采用 $60^\circ$ , 并且下游流态良好、通气充分时, 可不计下吸力。

## 3. 水柱压力计算

当采用图2-2所示结构时, 水柱压力可按下式计算:

$$W_s = \gamma(bH_{s1} + b_1 H_{s2})B_{2s} - P_t \quad (2-10)$$

式中  $W_s$ ——水柱压力, N;

$P_t$ ——上托力, 按式(2-8)计算;

其他符号意义见图2-2。

## 四、波浪压力计算

### 1. 浪高、波长

浪高、波长可按官厅水库公式计算(适用于山区峡谷水库库缘地势高峻, 风速 $4 \sim 16 \text{ m/s}$ , 吹程 $1 \sim 13 \text{ km}$ ):

$$2h_t = 0.0166 v_t^{5/4} D_t^{1/3} \quad (2-11)$$

$$2L_t = 10.4 (2h_t)^{0.4} \quad (2-12)$$

式中  $2h_t$ ——浪高, m;

$2L_t$ ——波长, m;

$v_t$ ——计算风速, m/s;

$D_t$ ——吹程, 由闸前沿水面至对岸的最大直线距离, km。

### 2. 浪压力计算

(1) 闸前水深 $H_1$ 满足 $H_{t1} < H_1 < L_t$ 时, 铅直面板上的浪压力 $P_{t1}$ , 可按照立波概念, 用下式计算:

$$P_{t1} = \gamma \frac{(H_1 + 2h_t + h_0)(H_1 + p_t)}{2} - \gamma \frac{H_1^3}{2} \quad (2-13)$$

式中  $h_0$ ——波浪中心线至水库静水位的高度, 可按下式计算:

$$h_0 = \frac{4\pi h_t^3}{2L_t} \operatorname{cth} \frac{\pi H_1}{L_t} \quad (2-14)$$

$p_l$ ——闸底面的浪压力剩余强度, 其值为,

$$p_l = 2h_l \operatorname{sech} \frac{\pi H_l}{L_l} \quad (2-15)$$

$H_{ll}$  乃使波浪破碎的临界水深, 其值为

$$H_{ll} = \frac{L_l}{2\pi} \ln \frac{2L_l + 4\pi h_l}{2L_l - 4\pi h_l} \approx (3 \sim 5)h_l \quad (2-16)$$

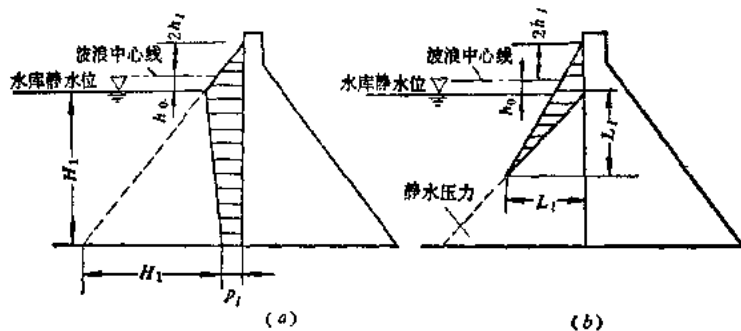


图 2-3 浪压力分布图

浪压力的分布图形可假定在水库静水位上下各近似作直线分布, 见图 2-3 (a)。

(2) 闸前水深  $H_l > L_l$  时, 在距水库静水位深  $L_l$  以下各点的浪压力可以忽略, 铅直面板的浪压力可按式计算:

$$P_l = \gamma \frac{(L_l + 2h_l + h_0)L_l}{2} - \gamma \frac{1}{2}(L_l)^2 \quad (2-17)$$

浪压力的分布见图 2-3 (b)。

## 五、泥砂压力计算

当闸门前面有泥砂淤积时, 作用在闸门上的泥砂压力可按下式计算:

$$P_n = \frac{1}{2} \gamma_n h_n^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) B \quad (2-18)$$

式中  $P_n$ ——泥砂压力, N;

$\gamma_n$ ——泥砂在水中的容重,  $\text{t/m}^3$ ;

$$\gamma_n = (\gamma_0 - 1)(1 - \rho)$$

$\gamma_0$ ——泥砂颗粒比重;

$\rho$ ——泥砂的空隙率;

$h_n$ ——泥砂的淤积高度, m;

$B$ ——门上泥砂淤积宽度, m;

$\phi$ ——淤砂的内摩擦角, 度。

## 六、漂浮物撞击力计算

漂浮物撞击力可按下式估算:

$$P_s = \frac{W_s V}{gt} \quad (2-19)$$

式中  $P_s$ ——漂浮物撞击力, N;

$W_s$ ——漂浮物重力, N, 根据河流中漂流物情况, 按实际调查确定;

$V$ ——水流速度, m/s;

$t$ ——撞击时间, s, 应根据实际资料估算;

$g$ ——重力加速度, 取 $9.81\text{m/s}^2$ 。

冰块撞击在闸门上所产生的压力, 当冰的运动方向垂直或接近垂直于铅直闸门时, 动冰压力 $P_{i,d}$ 可按下式计算:

$$P_{i,d} = K_b V_b d_b \sqrt{A_b} \quad (2-20)$$

式中  $K_b$ ——系数, 决定于流冰的抗碎强度 $R_b$ 值 (当 $R_b = 100 \times 10^4 \text{Pa}$ ,  $K_b = 4.3$ ;  $R_b = 50 \times 10^4 \text{Pa}$ ,  $K_b = 3.0$ ;  $R_b = 30 \times 10^4 \text{Pa}$ ,  $K_b = 2.36$ ; 当缺乏试验资料时, 对于结冰初期冰块坚实,  $R_b$ 可用 $75 \times 10^4 \text{Pa}$ ,  $K_b = 3.6$ ; 末期冰块松软,  $R_b$ 可用 $45 \times 10^4 \text{Pa}$ ,  $K_b = 2.7$ );

$V_b$ ——冰块流速, 一般不大于 $0.6\text{m/s}$ ;

$d_b$ ——冰块厚度,  $\text{m}$ ;

$A_b$ ——冰块面积,  $\text{m}^2$ 。

## 七、地震力计算

根据《水工建筑物抗震设计规范》的规定, 以下计算方法适用于烈度为7、8、9度的抗震设计, 对设计烈度高于9度的水工建筑物, 应进行专门研究; 设计烈度为6度时, 可不进行抗震计算。对于水工闸门只作抗震强度计算。水工建筑物的地震荷载, 一般只考虑水平向地震作用。在水平向地震作用下, 直立挡水面水深 $y$ 处的地震动水压力 $\bar{P}_y$ 按下式计算:

$$\bar{P}_y = K_H C_2 f_y \gamma_0 H_0 \quad (2-21)$$

式中  $f_y$ ——水深 $y$ 处的地震动水压力分布系数, 按表2-3采用;

$\gamma_0$ ——水的容重;

$K_H$ ——水平向地震系数, 按表2-4采用;

$H_0$ ——水深;

$C_2$ ——综合影响系数, 取 $1/4$ 。

表 2-3 水深 $y$ 处地震动水压力分布系数 $f_y$

$y/H_0$	$f_y$	$y/H_0$	$f_y$	$y/H_0$	$f_y$
0	0	0.4	0.74	0.8	0.71
0.1	0.43	0.5	0.76	0.9	0.68
0.2	0.58	0.6	0.76	1.0	0.67
0.3	0.68	0.7	0.75		

表 2-4 水平向地震系数 $K_H$

设计烈度	7	8	9
$K_H$	0.1	0.2	0.4

单位宽度的总地震动水压力 $\bar{P}_0$ 为:

$$\bar{P}_0 = 0.65 K_H C_2 \gamma_0 H_0^2 \quad (2-22)$$

其作用点位置自水面算起为 $0.54H_0$ 。

水深 $y$ 处以上单位宽度地震动水压力合力 $\bar{P}_y$ 及其作用点位置 $h$ , 见图2-4。

对于倾斜的近水面, 按式(2-21)计算动水压力时应乘以折减系数 $\psi/90^\circ$ ,  $\psi$ 为建筑物迎水面与水平面的夹角。当迎水面有折坡时, 若水面以下直立部分的高度等于或大于水深一半, 可近似取作直立面, 否则可近似取水面点与坡脚点的连线代替坡度。

对于宽高比 $B/H_0$ 小于5的梯形或三角形河谷, 按式(2-21)、式(2-22)计算动水压力时可乘以折减系数 $C_1$ 。



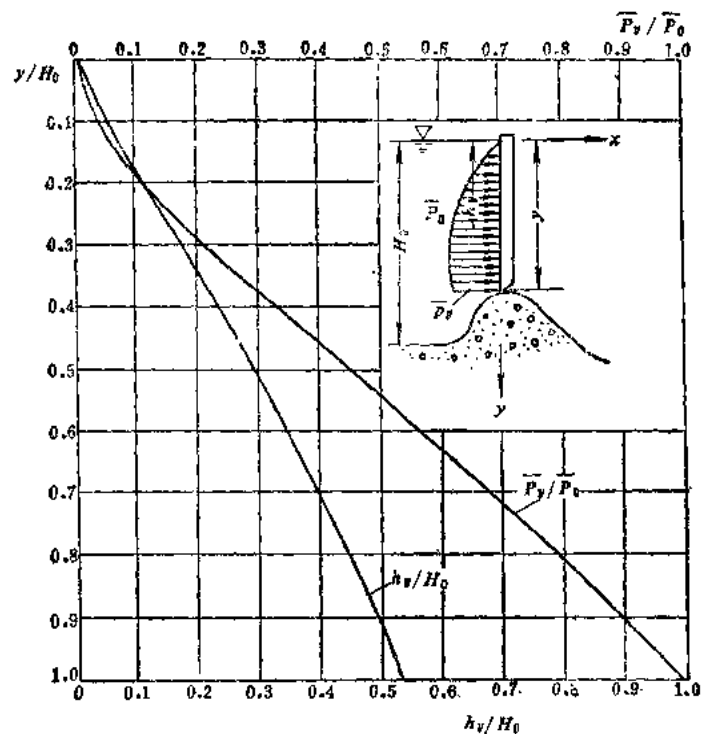


图 2-4 水深  $y$  处以上地震动水压力合力及其作用点位置

$$C_1 = 0.75 + 0.05B/H_0 \quad (2-23)$$

式中  $B$ ——河谷在水面处的宽度。

需要指出，闸门上、下游面的地震动水压力均垂直于挡水面。

#### 八、风荷载计算

作用在闸门面板上的风荷载  $W$  可按下式计算：

$$W = KK_2W_0 \quad (\text{Pa}) \quad (2-24)$$

式中  $W_0$ ——基本风压， $\text{Pa}$ ；系以一般空旷平坦地面、离地  $10\text{m}$  高、统计得的 30 年一遇  $10\text{min}$  平均最大风速  $V$  ( $\text{m/s}$ ) 为标准，一般按  $W_0 = V^2/16$  确定，但不得小于  $250\text{Pa}$ ；

$K_2$ ——风压高度变化系数，按表 2-5 采用；

$K$ ——风载体型系数，可取  $K=1.3$ 。

表 2-5 风压高度变化系数  $K_2$

离地面或海面高度 (m)	$K_2$		离地面或海面高度 (m)	$K_2$	
	陆	上		陆	上
$\leq 2$	0.52	0.64	20	1.25	1.18
5	0.78	0.84	30	1.41	1.29
10	1.00	1.00	40	1.54	1.37
15	1.15	1.10	50	1.63	1.43

## 第三章 材料与容许应力

### 第一节 材 料

闸门承重结构的钢材一般采用3号钢和16号锰钢,其质量标准应分别符合现行《普通碳素钢钢号和一般技术条件》、《普通低合金钢钢号和一般技术条件》规定的要求,并根据使用条件,按表3-1采用。

表 3-1 闸门及埋件采用的钢号

项次	使 用 条 件	计 算 温 度	钢 号
1	大型工程的工作闸门,大型工程的重要事故闸门 部分开启的工作闸门		宜采用平炉、顶吹氧气转炉3号镇静钢或16号锰钢
2	闸门部分	等于或低于 $-20^{\circ}\text{C}$	同1项
3		高于 $-20^{\circ}\text{C}$	可采用平炉、顶吹氧气转炉3号沸腾钢
4		高于 $-30^{\circ}\text{C}$	同3项 (当计算温度高于 $-15^{\circ}\text{C}$ 时,可采用侧吹碱性转炉3号镇静钢)
5	埋件部分	主要受力埋件	可采用3号沸腾钢
6		按构造要求选择的埋件	可采用0号钢

注 (1)当有可靠根据时,可采用其他钢号。对无证明书的钢材,经试验证明其化学成分和机械性能符合相应标准所列钢号的要求时可酌情使用。

(2)低温地区的焊接结构采用沸腾钢时,板厚不宜过大。

(3)非焊接结构的钢号,可参照表3-1选用。

(4)计算温度应按现行《工业企业采暖通风和空气调节设计规范》中的冬季空气调节室外计算温度确定。对于等于和低于 $-15^{\circ}\text{C}$ 的若干地区见表3-2。

(5)目前顶吹氧气转炉钢是按现行《普通碳素钢钢号和一般技术条件》中的平炉钢标准进行生产与验收的。

(6)上表中所谓大型工程,指一、二等工程;中型工程指三等工程;小型工程指四、五等工程。

表 3-2 低于或等于  $-15^{\circ}\text{C}$  的若干地区的冬季空气调节室外计算温度

省 份	地 区	计算温度	省 份	地 区	计算温度
黑龙江省	海 拉 尔	$-38^{\circ}\text{C}$	内蒙古自治区	锡林浩特	$-31^{\circ}\text{C}$
	嫩 江	$-36^{\circ}\text{C}$		呼和浩特	$-22^{\circ}\text{C}$
	博 克 图	$-31^{\circ}\text{C}$		磴 口	$-20^{\circ}\text{C}$
	海 伦	$-31^{\circ}\text{C}$	陕 西 省	榆 林	$-19^{\circ}\text{C}$
	齐齐哈尔	$-29^{\circ}\text{C}$		延 安	$-15^{\circ}\text{C}$
	哈 尔 滨	$-29^{\circ}\text{C}$	宁夏回族自治区	盐 池	$-19^{\circ}\text{C}$
吉 林 省	牡 丹 江	$-28^{\circ}\text{C}$		银 川	$-18^{\circ}\text{C}$
	长 春	$-26^{\circ}\text{C}$	青 海 省	玛 多	$-26^{\circ}\text{C}$
	四 平	$-25^{\circ}\text{C}$		格 尔 木	$-20^{\circ}\text{C}$
	通 辽	$-23^{\circ}\text{C}$		共 和	$-17^{\circ}\text{C}$
辽 宁 省	延 吉	$-22^{\circ}\text{C}$		西 宁	$-15^{\circ}\text{C}$
	沈 阳	$-23^{\circ}\text{C}$	甘 肃 省	山 丹	$-21^{\circ}\text{C}$
	本 溪	$-23^{\circ}\text{C}$		酒 泉	$-20^{\circ}\text{C}$
	赤 峰	$-20^{\circ}\text{C}$	新疆维吾尔自治区	敦 煌	$-17^{\circ}\text{C}$
河 北 省	营 口	$-19^{\circ}\text{C}$		乌 鲁 木 齐	$-27^{\circ}\text{C}$
	丹 东	$-18^{\circ}\text{C}$		伊 宁	$-25^{\circ}\text{C}$
	锦 州	$-17^{\circ}\text{C}$		哈 密	$-23^{\circ}\text{C}$
山 西 省	承 德	$-17^{\circ}\text{C}$		吐 鲁 番	$-21^{\circ}\text{C}$
	太 原	$-15^{\circ}\text{C}$		喀 什	$-16^{\circ}\text{C}$

## 一、闸门活动部分材料

### (一) 闸门活动部分——门叶

门叶中承重结构的钢材应具有下列技术特性:

(1) 闸门承重结构的钢材, 应保证抗拉强度, 伸长率、屈服点和硫、磷的含量合乎要求, 对焊接结构尚应保证碳的含量合乎要求。

(2) 主要受力结构和弯曲成型部件的钢材, 应具有冷弯试验的合格保证。

(3) 承受动载的焊接结构, 应具有常温冲击韧性的合格保证。当计算温度等于或低于  $-20^{\circ}\text{C}$  时, 对于 3 号钢尚应具有  $-20^{\circ}\text{C}$  冲击韧性的合格保证; 对于 16 号锰钢, 尚应具有  $-40^{\circ}\text{C}$  冲击韧性的合格保证。其冲击韧性指标见表 3-3。

(4) 承受动载的非焊接结构, 必要时其钢材也应具有冲击韧性的合格保证。

表 3-3 钢材的冲击韧性指标 (摘自 GB700-65, 摘自 YB13-69)

钢 号	钢 材 种 类	钢材直径或厚度 (mm)	取 样 方 向	试 样 状 态	冲击韧性 $a_k$ 值 不 小 于 ( $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ )
3 号 钢	钢 板	12~25	横着轧制方向	常 温	7
			顺着轧制方向		8
	条 钢				10
		供需双方协议	>25	双 方 协 议	常 温

续表

钢 号	钢 材 种 类	钢材直径或厚度 (mm)	取 样 方 向	试 样 状 态	冲击韧性 $a_k$ 值 不 小 于 (kgf·m/cm <sup>2</sup> )
3号镇静钢	钢 板	12~20	双方协议	-20℃	3
				-40℃	双方协议
				应变时效后	
		-20℃			
		应变时效后			
16锰钢				常 温	6
15锰钛钢				-40℃	3
				应变时效后	双方协议

## (二) 闸门常用材料

闸门常用材料的性能见表3-4至表3-6。

表 3-4 常用几种普通碳素钢的机械性能及化学成分  
(摘自GB700-65)

钢 号		机 械 性 能							钢 号		化 学 成 份 (%)				
甲类钢	特类钢	屈服点 $\sigma_s$ 不小于 (kgf/mm <sup>2</sup> )			抗拉 强度 $\sigma_b$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸长率 不小于 (%)		180度冷弯 试 验 $d = \text{弯心直径}$ $a = \text{试样厚度}$	乙类钢	特类钢	碳C	硅Si	锰Mn	磷P	硫S
		按尺寸分组													
		代号	代号	第1组	第2组	第3组	$\delta_2, \delta_{10}$		代号	代号				不 大 于	
A2 A2F	C2 C2F	22	20	19	34~42	31	26	$d = 0$	B2 B2F	C2 C2F	0.09~ 0.15	0.12~ 0.30 0.07	0.25~ 0.50	0.045	0.055
A3	C3	24	23	22	38~40 41~43 44~47	27 26 25	23 22 21	$d = 1.5a$	B3	C3		0.12~ 0.30	0.40~ 0.65		
A3F	C3F	24	22	21	38~40 41~43 44~47	27 26 25	23 22 21		B3F	C3F	0.14~ 0.22		0.30~ 0.60		
A4 A4F	C4 C4F	26	25	24	42~44 45~48 49~52	25 24 23	21 20 19		$d = 2a$	B4 B4F	C4 C4F	0.18~ 0.27	0.12~ 0.30 0.07		
A5	C5	28	27	26	50~53 54~57 58~62	21 20 19	17 16 15	$d = 3a$	B5	C5	0.28~ 0.37	0.15~ 0.35	0.50~ 0.80		

注 上表所列钢之炉种均指碱性平炉钢。

1 $\text{kgf}/\text{mm}^2 \approx 10^7 \text{Pa}$ 。

表 3-5

常用几种普通低合金钢的机械性能及化学成分

(摘自YB13-69)

序 号	钢 号		钢材厚度 或 直 径 (mm)	机 械 性 能				化 学 成 分 (%)					
	牌 号	代 号		屈 服 点 $\sigma_s$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	抗 拉 强 度 $\sigma_b$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	延 伸 率 $\delta$ (%)	冷 弯 试验	碳	锰	硅	钛	磷	硫
				不 小 于								180°	不 大 于
1	16锰	16Mn	≤16	35	52	21	$d=2a$	0.12 至 0.20	1.20 至 1.60	0.20 至 0.60		0.05	0.05
			17~25	33	50	19	$d=3a$						
			26~36	31	48	19	$d=3a$						
			38~50	29	48	19	$d=3a$						
			55~100	28	48	19	$d=3a$						
2	15锰钛	15MnTi	≤25	40	54	19	$d=3a$	0.12 至 0.18	1.20 至 1.60	0.20 至 0.60	0.12 至 0.20	0.05	0.05
			26~40	38	52	19	$d=3a$						

注 (1)用转炉生产的16锰钢, 允许含碳量上限提高到 0.25%, 伸长率降低 2%(绝对值); 或抗拉强度和屈服点各降低2kgf/mm<sup>2</sup>, 并在合同中注明;

(2)15MnTi钢的机械性能和工艺性能是热处理状态的, 若按热轧状态交货, 则试样要热处理;

(3)1kgf/mm<sup>2</sup>≈10<sup>7</sup>Pa。

表 3-6

优质碳素结构钢的机械性能和化学成分

(摘自GB699-65)

钢号	机 械 性 能							化 学 成 分(%)						
	屈 服 点 $\sigma_s$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $\sigma_b$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸长率 $\delta_s$ (%)	收缩率 $\psi$ (%)	冲 击 值 $a_k$ (kgf·m/cm <sup>2</sup> )	布氏硬度 HB 不 大 于		碳	硅	锰	磷	硫	铜	镍
	不 小 于					热轧钢	退火钢				不 大 于			
20	25	42	25	55		156	—	0.17~0.24	0.17~0.37	0.35~0.65	0.04	0.04	0.25	0.25
25	28	46	23	50	9	170	—	0.22~0.30	0.17~0.37	0.50~0.80	0.04	0.04	0.25	0.25
30	30	50	21	50	8	179	—	0.27~0.35	0.17~0.37	0.50~0.80	0.04	0.04	0.25	0.25
35	32	54	20	45	7	187	—	0.32~0.40	0.17~0.37	0.50~0.80	0.04	0.04	0.25	0.25
40	34	58	19	45	6	217	187	0.37~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.04	0.04	0.25	0.25
45	36	61	16	40	5	241	197	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	0.04	0.04	0.25	0.25
50	38	64	14	40	4	241	207	0.47~0.55	0.17~0.37	0.50~0.80	0.04	0.04	0.25	0.25

注 1kgf/mm<sup>2</sup>≈10<sup>7</sup>Pa。

制造门叶使用的钢板和型钢的规格分别见表3-7至表3-14。

表 3-7

热轧厚钢板品种(GB709-65)

厚度 (mm)	宽 度 (m)									
	0.6~1.2	>1.2 ~1.5	>1.5 ~1.6	>1.6 ~1.7	>1.7~1.8	>1.8~2.0	>2.0~2.2	>2.2~2.5	>2.5~2.8	>2.8~3.0
	最 大 长 度 (m)									
4.5~5.5	12	12	12	12	12	6				
6~7	12	12	12	12	12	10				
8~10	12	12	12	12	12	12	9	9		
11~15	12	12	12	12	12	12	9	8	8	8
16~20	12	12	12	10	10	9	8	7	7	7
21~25	12	11	11	10	9	8	7	6	6	6
26~30	12	10	9	9	9	8	7	6	6	6
32~34	12	9	8	7	7	7	7	7	6	5
36~40	10	8	7	7	6.5	6.5	5.5	5.5	5	
42~50	9	8	7	7	6.5	6	5	4		
52~60	8	6	6	6	5.5	5	4.5	4		

注 (1) 钢板厚度: >4~6mm, 则间隔为0.5mm; >6~30mm, 则间隔为1mm; >30~60mm, 则间隔为2mm;

(2) 钢板宽度为50mm倍数的任何尺寸, 但不得小于600mm, 并不得大于表中所列的最大尺寸;

(3) 钢板长度为100mm倍数的任何尺寸, 但不得小于1200mm, 并不得大于表中所列的最大长度。

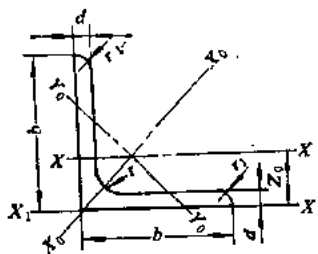
表 3-8

钢板每平方米面积理论重量表

厚 度 (mm)	理 论 重 量 (kg)	厚 度 (mm)	理 论 重 量 (kg)	厚 度 (mm)	理 论 重 量 (kg)	厚 度 (mm)	理 论 重 量 (kg)
0.2	1.570	1.50	11.78	10.0	72.50	29	227.70
0.25	1.963	1.6	12.56	11	86.35	30	235.50
0.27	2.120	1.8	14.13	12	94.20	32	251.20
0.30	2.355	2.0	15.70	13	102.10	34	266.90
0.35	2.748	2.2	17.27	14	109.90	36	282.00
0.40	3.140	2.5	19.63	15	117.80	38	298.30
0.45	3.533	2.8	21.98	16	125.60	40	314.00
0.50	3.925	3.0	23.55	17	133.50	42	329.70
0.55	4.318	3.2	25.12	18	141.30	44	345.40
0.60	4.710	3.5	27.48	19	149.20	46	361.10
0.70	5.495	3.8	29.83	20	157.00	48	376.80
0.75	5.888	4.0	31.40	21	164.90	50	392.50
0.80	6.280	4.5	35.33	22	172.70	52	408.20
0.90	7.065	5.0	39.25	23	180.60	54	423.90
1.00	7.850	5.5	43.18	24	188.40	56	439.60
1.10	8.635	6.0	47.10	25	196.30	53	455.30
1.20	9.420	7.0	54.95	26	204.10	60	471.00
1.25	9.813	8.0	62.80	27	212.00		
1.40	10.990	9.0	70.05	28	219.80		

表 3-9

热 轧 等 边



角 钢 号 数	尺寸(mm)			截面面积 (cm <sup>2</sup> )	理论重量 (kg/m)	外表面积 (m <sup>2</sup> /m)	参 X-X		
	b	d	r				I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>x</sub> (cm)	W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )
2	20	3	3.5	1.132	0.889	0.078	0.40	0.59	0.29
		4		1.459	1.145	0.077	0.50	0.58	0.36
2.5	25	3	3.5	1.432	1.124	0.098	0.82	0.76	0.46
		4		1.859	1.459	0.097	1.03	0.74	0.59
3.0	30	3	4.5	1.749	1.373	0.117	1.46	0.91	0.68
		4		2.276	1.736	0.117	1.84	0.90	0.87
3.6	36	3	4.5	2.109	1.656	0.141	2.58	1.11	0.89
		4		2.756	2.163	0.141	3.29	1.09	1.28
		5		3.382	2.654	0.141	3.95	1.08	1.56
4	40	3	5	2.359	1.852	0.157	3.59	1.23	1.23
		4		3.086	2.422	0.157	4.60	1.22	1.60
		5		3.791	2.976	0.156	5.53	1.21	1.96
4.5	45	3	5	2.659	2.088	0.177	5.17	1.40	1.58
		4		3.486	2.736	0.177	6.65	1.38	2.05
		5		4.292	3.369	0.176	8.04	1.37	2.51
		6		5.076	3.985	0.176	9.33	1.36	2.95
5	50	3	5.5	2.971	2.332	0.197	7.19	1.55	1.96
		4		3.897	3.059	0.197	9.26	1.54	2.56
		5		4.803	3.770	0.196	11.21	1.53	3.13
		6		5.688	4.465	0.196	13.05	1.52	3.68
5.6	56	3	6	3.343	2.624	0.221	10.19	1.75	2.48
		4		4.390	3.446	0.220	13.18	1.73	3.24
		5		5.415	4.251	0.220	16.02	1.72	3.97
		8		8.367	6.568	0.219	23.63	1.68	6.03
6	60	5	6.5	5.82	4.57		19.9	1.85	
		6		6.91	5.42		23.3	1.84	
		8		9.03	7.09		29.6	1.81	
6.3	63	4	7	4.978	3.907	0.248	19.03	1.96	4.13
		5		6.143	4.822	0.248	23.17	1.94	5.08
		6		7.288	5.721	0.247	27.12	1.93	6.00
		8		9.515	7.469	0.247	34.46	1.90	7.75
		10		11.657	9.151	0.246	41.09	1.88	9.39
6.5	65	6		7.55	5.93		29.8	1.98	
		8		9.87	7.75		38.1	1.96	
7	70	4	8	5.570	4.372	0.275	26.39	2.18	5.14
		5		6.875	5.397	0.275	32.21	2.16	6.32
		6		8.160	6.496	0.279	37.77	2.15	7.48
		7		9.424	7.398	0.275	43.09	2.14	8.59
		8		10.667	8.373	0.274	48.17	2.12	9.68

符号意义:

 $b$ —边宽 $d$ —边厚 $r$ —内圆弧半径 $r_1$ —一端内弧半径,  $r_1 = \frac{1}{3}d$  $I$ —惯性矩 $i$ —惯性半径 $W$ —截面系数 $Z_0$ —重心距离

考 数 值							$Z_0$ (cm)
$X_0 - X_0$			$Y_0 - Y_0$			$X_1 - X_1$	
$I_{X_0}$ (cm <sup>4</sup> )	$i_{X_0}$ (cm)	$W_{X_0}$ (cm <sup>3</sup> )	$I_{Y_0}$ (cm <sup>4</sup> )	$i_{Y_0}$ (cm)	$W_{Y_0}$ (cm <sup>3</sup> )	$I_{X_1}$ (cm <sup>4</sup> )	
0.63	0.75	0.45	0.17	0.39	0.20	0.81	0.60
0.78	0.73	0.55	0.22	0.38	0.24	1.09	0.64
1.29	0.95	0.73	0.34	0.49	0.33	1.57	0.73
1.62	0.93	0.92	0.43	0.48	0.40	2.11	0.76
2.31	1.15	1.09	0.61	0.59	0.51	2.71	0.85
2.92	1.13	1.37	0.77	0.58	0.62	3.63	0.89
4.09	1.39	1.61	1.07	0.71	0.76	4.68	1.00
5.22	1.38	2.05	1.37	0.70	0.93	6.25	1.04
6.24	1.36	2.45	1.65	0.70	1.09	7.84	1.07
5.69	1.55	2.01	1.49	0.79	0.96	6.41	1.09
7.29	1.54	2.58	1.91	0.79	1.19	8.56	1.13
8.76	1.52	3.10	2.30	0.78	1.39	10.74	1.17
8.20	1.76	2.58	2.14	0.90	1.24	9.12	1.22
10.56	1.74	3.32	2.75	0.89	1.54	12.18	1.26
12.74	1.72	4.00	3.33	0.88	1.81	15.25	1.30
14.76	1.70	4.64	3.89	0.88	2.06	18.36	1.33
11.37	1.96	3.22	2.98	1.00	1.57	12.50	1.34
14.70	1.94	4.16	3.82	0.99	1.96	16.69	1.38
17.79	1.92	5.03	4.64	0.98	2.31	20.90	1.42
20.68	1.91	5.85	5.42	0.98	2.63	25.14	1.46
16.14	2.20	4.08	4.24	1.13	2.02	17.55	1.48
20.92	2.18	5.28	5.46	1.11	2.52	23.43	1.53
25.42	2.17	6.42	6.61	1.10	2.98	29.33	1.57
37.37	2.11	9.44	9.89	1.09	4.16	47.24	1.68
31.4	2.32		8.29	1.19		35.9	1.66
36.8	2.31		9.76	1.19		43.3	1.70
46.8	2.28		12.4	1.17		58.2	1.78
30.17	2.46	6.78	7.89	1.26	3.29	33.35	1.70
36.77	2.45	8.25	9.57	1.25	3.90	41.73	1.74
43.03	2.43	9.66	11.20	1.24	4.46	50.14	1.78
54.56	2.40	12.25	14.33	1.23	5.47	67.11	1.85
64.85	2.36	14.56	17.33	1.22	6.36	84.31	1.93
47.2	2.50		12.3	1.28		54.8	1.82
60.3	2.48		15.8	1.27		73.7	1.90
41.80	2.74	8.44	10.99	1.40	4.17	45.74	1.86
51.08	2.73	10.32	13.34	1.39	4.95	57.21	1.91
59.93	2.71	12.11	15.61	1.38	5.67	68.73	1.95
68.35	2.69	13.81	17.82	1.38	6.34	80.29	1.99
76.37	2.68	15.43	19.98	1.37	6.98	91.92	2.03



角 钢  号 数	尺寸(mm)			截面面积 (cm <sup>2</sup> )	理论重量 (kg/m)	外表面积 (m <sup>2</sup> /m)	X-X		
	b	d	r				I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>x</sub> (cm)	W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )
(7.5)	75	5	9	7.367	5.818	0.295	39.97	2.33	7.32
		6		8.797	6.905	0.294	46.95	2.31	8.64
		7		10.160	7.976	0.294	53.57	2.30	9.93
		8		11.503	9.030	0.294	59.96	2.28	11.20
		10		14.126	11.089	0.293	71.98	2.26	13.64
8	80	5	9	7.912	6.211	0.316	48.79	2.48	8.34
		6		9.397	7.376	0.314	57.35	2.47	9.87
		7		10.860	8.525	0.314	65.58	2.46	11.37
		8		12.303	9.658	0.314	73.49	2.44	12.83
		10		15.126	11.874	0.313	88.43	2.42	15.64
9	90	6	10	10.637	8.350	0.354	82.77	2.79	12.61
		7		12.301	9.656	0.354	94.83	2.78	14.54
		8		13.944	10.946	0.353	106.47	2.76	16.42
		10		17.167	13.476	0.353	126.58	2.74	20.07
		12		20.306	15.940	0.352	149.22	2.71	23.57
10	100	6	12	11.932	9.366	0.393	114.95	3.10	15.68
		7		13.796	10.830	0.393	131.86	3.09	18.10
		8		15.638	12.276	0.393	148.24	3.08	20.47
		10		19.261	15.120	0.392	179.51	3.05	25.06
		12		22.800	17.898	0.391	208.90	3.03	29.48
		14		26.256	20.611	0.391	236.53	3.00	33.73
		16		29.627	23.257	0.390	262.53	2.98	37.82
11	110	7	12	15.190	11.928	0.433	177.16	3.41	22.05
		8		17.238	13.532	0.433	199.46	3.40	24.95
		10		21.261	16.690	0.432	242.19	3.38	30.60
		12		25.200	19.782	0.431	282.55	3.35	36.05
		14		29.056	22.809	0.431	320.71	3.32	41.31
12	120	10	13	23.3	18.3		316	3.68	
		12		27.6	21.7		371	3.66	
		14		31.9	25.1		423	3.64	
		16		36.1	28.4		474	3.62	
12.5	125	8	14	19.750	15.504	0.492	297.03	3.88	32.52
		10		24.373	19.133	0.491	361.67	3.85	39.97
		12		28.912	22.698	0.491	423.16	3.83	41.17
		14		33.367	26.193	0.490	481.65	3.80	54.16
14	140	10	16	27.373	21.488	0.551	514.65	4.34	50.58
		12		32.512	25.522	0.551	603.68	4.31	59.80
		14		37.567	29.490	0.550	688.81	4.28	68.75
		16		42.539	33.393	0.549	770.24	4.26	77.46
16	160	10	16	31.502	24.729	0.630	779.53	4.98	66.70
		12		37.441	29.391	0.630	916.38	4.95	78.98
		14		43.296	33.987	0.629	1048.36	4.92	90.95
		16		49.067	38.518	0.629	1175.08	4.89	102.63
18	180	12	18	42.241	33.159	0.710	1321.35	5.59	100.82
		14		48.896	38.383	0.709	1514.48	5.56	116.25
		16		55.467	43.542	0.709	1700.99	5.54	131.13
		18		61.955	48.634	0.708	1875.12	5.50	145.64
20	200	14	18	54.642	42.894	0.788	2103.55	6.20	144.70
		16		62.013	48.680	0.788	2366.15	6.18	163.65
		18		69.301	54.401	0.787	2620.61	6.15	182.22
		20		76.505	60.056	0.787	2867.30	6.12	200.42
		24		90.661	71.168	0.785	3338.25	6.07	236.17

注 (1)规格中的11号、18号根据1974年产品目录不生产。非标准的6号6.5号、12号角钢,因有产品供应,故补入。  
6~19m。(3)目前生产常用材料: A3、A3F、B3F、16Mn[127]。

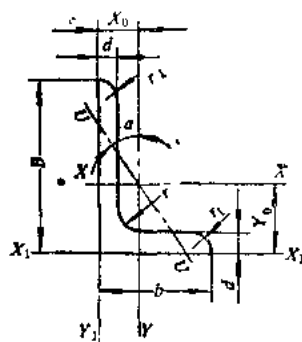
续表

考 数 值							Z <sub>1</sub> (cm)
X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub>			Y <sub>1</sub> -Y <sub>2</sub>			X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub>	
I <sub>X<sub>1</sub></sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>X<sub>1</sub></sub> (cm)	W <sub>X<sub>1</sub></sub> (cm <sup>3</sup> )	I <sub>Y<sub>1</sub></sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>Y<sub>1</sub></sub> (cm)	W <sub>Y<sub>1</sub></sub> (cm <sup>3</sup> )	I <sub>X<sub>1</sub></sub> (cm <sup>4</sup> )	
63.30	2.92	11.94	18.63	1.50	5.77	70.56	2.04
74.38	2.90	14.02	19.51	1.49	6.67	84.55	2.07
84.96	2.89	16.02	22.18	1.48	7.44	98.71	2.11
95.07	2.88	17.93	24.86	1.47	8.19	112.97	2.15
113.92	2.84	21.48	30.05	1.46	9.56	141.71	2.22
77.33	3.13	13.67	20.25	1.60	6.66	85.36	2.15
90.98	3.11	16.08	23.72	1.59	7.65	102.50	2.19
104.07	3.10	18.40	27.09	1.58	8.58	119.70	2.23
116.60	3.08	20.61	30.39	1.57	9.46	136.97	2.27
140.09	3.04	24.76	36.77	1.56	11.08	171.74	2.35
131.26	3.51	20.63	34.28	1.80	9.95	145.87	2.44
150.47	3.50	23.64	39.18	1.78	11.19	170.30	2.48
168.97	3.48	26.55	43.97	1.78	12.35	194.80	2.52
203.90	3.45	32.04	53.26	1.76	14.52	244.07	2.59
236.21	3.41	37.12	62.22	1.75	16.49	293.76	2.67
181.98	3.90	25.74	47.92	2.00	12.69	200.07	2.67
208.97	3.89	29.55	54.74	1.99	14.26	233.54	2.71
235.07	3.88	33.24	61.41	1.98	15.75	267.09	2.76
284.68	3.84	40.26	74.35	1.96	18.54	334.48	2.84
330.95	3.81	46.80	86.84	1.95	21.08	402.34	2.91
374.06	3.77	52.90	99.00	1.94	23.44	470.75	2.99
414.16	3.74	58.57	110.89	1.94	25.63	539.80	3.06
280.94	4.30	36.12	73.38	2.20	17.51	310.64	2.96
316.49	4.28	40.69	82.42	2.19	19.39	355.20	3.01
384.39	4.25	49.42	99.98	2.17	22.91	444.65	3.09
448.17	4.22	57.62	116.93	2.15	26.15	534.60	3.16
508.01	4.18	65.31	133.40	2.14	29.14	625.16	3.24
503	4.64		130	2.36		575	3.33
590	4.62		153	2.35		693	3.41
671	4.59		174	2.34		811	3.49
749	4.56		199	2.34		931	3.56
470.89	4.88	53.28	123.16	2.50	25.86	521.01	3.37
573.89	4.85	64.93	149.46	2.48	30.62	651.93	3.45
671.44	4.82	75.96	174.88	2.46	35.03	783.42	3.53
763.73	4.78	86.41	199.57	2.45	39.13	915.61	3.61
817.27	5.46	82.56	212.04	2.78	39.20	915.11	3.82
958.79	5.43	96.85	248.57	2.76	45.02	1099.28	3.90
1093.56	5.40	110.47	284.06	2.75	50.45	1284.22	3.98
1221.81	5.36	123.42	318.67	2.74	55.55	1470.07	4.06
1237.30	6.27	109.36	321.76	3.20	52.76	1365.33	4.31
1455.68	6.24	128.67	377.49	3.18	60.74	1639.57	4.39
1665.02	6.20	147.17	431.70	3.16	68.24	1914.68	4.47
1865.57	6.17	164.89	484.59	3.14	75.31	2190.82	4.55
2100.10	7.05	165.00	542.61	3.58	78.41	2332.80	4.89
2407.42	7.02	189.14	621.53	3.56	88.38	2723.48	4.97
2703.37	6.98	212.40	698.60	3.55	97.83	3115.29	5.05
2988.24	6.94	234.78	762.01	3.51	105.14	3502.43	5.13
3343.26	7.82	236.40	863.83	3.93	111.82	3734.10	5.46
3760.89	7.79	265.93	971.41	3.96	123.96	4270.39	5.54
4164.54	7.75	294.48	1076.74	3.94	135.52	4808.13	5.82
4554.55	7.72	322.06	1180.04	3.93	146.55	5347.51	5.69
5294.97	7.64	374.41	1381.53	3.90	166.55	6457.16	5.87

(2)角钢长度: 型号 2~4号 4.5~8号 9~14号 16~20号 长度 3~9m 4~12m 4~19m

表 3-10

热轧不等边角



角钢号数	尺 寸 (mm)				截面面积 (cm <sup>2</sup> )	理论重量 (kg/m)	外表面积 (m <sup>2</sup> /m)	X—X		
	a	b	d	r				I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>x</sub> (cm)	W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )
2.5/1.6	25	16	3	3.5	1.162	0.912	0.080	0.70	0.78	0.43
			4		1.499	1.176	0.079	0.88	0.77	0.55
3.2/2	32	20	3	3.5	1.492	1.171	0.102	1.53	1.01	0.72
			4		1.939	1.522	0.101	1.93	1.00	0.93
4/2.5	40	25	3	4	1.890	1.484	0.127	3.08	1.28	1.15
			4		2.467	1.936	0.127	3.93	1.26	1.49
4.5/2.8	45	28	3	5	2.140	1.687	0.143	4.45	1.44	1.47
			4		2.806	2.203	0.143	5.69	1.42	1.91
4.5/3	45	30	4	5	2.88	2.26		5.81	1.42	
			6		4.18	3.28		8.15	1.40	
5/3.2	50	32	3	5.5	2.431	1.908	0.161	6.24	1.60	1.84
			4		3.177	2.494	0.160	8.02	1.59	2.39
5.6/3.6	56	36	3	6	2.743	2.153	0.181	8.88	1.80	2.32
			4		3.590	2.818	0.180	11.45	1.79	3.03
			5		4.415	3.466	0.180	13.86	1.77	3.71
6/4	60	40	5	7	4.83	3.79		17.4	1.9	
			6		5.72	4.47		20.3	1.88	
			8		7.44	5.84		25.8	1.86	
6.3/4	63	40	4	7	4.058	3.185	0.202	16.49	2.02	3.87
			5		4.993	3.920	0.202	20.02	2.00	4.74
			6		5.908	4.638	0.201	23.36	1.96	5.59
			7		6.802	5.339	0.201	26.53	1.98	6.40
7/4.5	70	45	4	7.5	4.547	3.570	0.226	23.17	2.26	4.86
			5		5.609	4.403	0.225	27.95	2.23	5.92
			6		6.647	5.218	0.225	32.54	2.21	6.95
			7		7.657	6.011	0.225	37.22	2.20	8.03
(7.5/5)	75	50	5	8	6.125	4.808	0.245	34.86	2.39	6.83
			6		7.260	5.699	0.245	41.12	2.38	8.12
			8		9.467	7.431	0.244	52.39	2.35	10.52
			10		11.590	9.098	0.244	62.71	2.33	12.79
8/5	80	50	5	8	6.375	5.005	0.255	41.96	2.56	7.78
			6		7.580	5.935	0.255	49.49	2.56	9.25
			7		8.724	6.848	0.255	56.16	2.54	10.58
			8		9.887	7.745	0.254	62.83	2.52	11.92

符号意义:

B—长边宽度

b—短边宽度

d—边厚

r—内圆弧半径

$r_1$ —一端内圆弧半径,  $r_1 = \frac{1}{3}d$

I—惯性矩

i—惯性半径

W—截面系数

X<sub>1</sub>—重心距离

Y<sub>1</sub>—重心距离

参 考 数 值										
Y—Y			X <sub>1</sub> —X <sub>1</sub>		Y <sub>1</sub> —Y <sub>1</sub>		U—U			
$I_Y$ (cm <sup>4</sup> )	$i_Y$ (cm)	$W_Y$ (cm <sup>3</sup> )	$I_{X_1}$ (cm <sup>4</sup> )	$Y_1$ (cm)	$I_{Y_1}$ (cm <sup>4</sup> )	$X_1$ (cm)	$I_u$ (cm <sup>4</sup> )	$i_u$ (cm)	$W_u$ (cm <sup>3</sup> )	tgα
0.22 0.27	0.44 0.43	0.19 0.24	1.56 2.09	0.86 0.90	0.43 0.59	0.42 0.46	0.14 0.17	0.34 0.34	0.16 0.20	0.392 0.381
0.46 0.57	0.55 0.54	0.30 0.39	3.27 4.37	1.08 1.12	0.82 1.12	0.49 0.53	0.28 0.35	0.43 0.42	0.25 0.32	0.382 0.374
0.93 1.18	0.70 0.69	0.49 0.63	6.39 8.53	1.32 1.37	1.59 2.14	0.59 0.63	0.56 0.71	0.54 0.54	0.40 0.52	0.386 0.321
1.34 1.70	0.79 0.78	0.62 0.80	9.10 12.13	1.47 1.51	2.23 3.00	0.64 0.68	0.80 1.02	0.61 0.60	0.51 0.60	0.383 0.380
2.06 2.85	0.84 0.83		12.1 18.3	1.48 1.56	3.65 5.85	0.72 0.82	1.21 1.69	0.65 0.64		0.433 0.423
2.02 2.58	0.91 0.90	0.82 1.06	12.49 16.65	1.60 1.65	3.31 4.45	0.73 0.77	1.20 1.53	0.70 0.69	0.68 0.87	0.404 0.402
2.92 3.76 4.49	1.03 1.02 1.01	1.05 1.37 1.65	17.54 23.39 29.25	1.78 1.82 1.87	4.70 6.33 7.94	0.80 0.85 0.88	1.73 2.23 2.67	0.79 0.79 0.78	0.87 1.18 1.36	0.408 0.408 0.404
6.19 7.20 9.04	1.13 1.12 1.10		35.8 43.1 57.9	1.95 2.0 2.08	10.8 13.1 17.9	0.97 1.01 1.09	3.62 4.20 5.39	0.67 0.86 0.85		0.432 0.43 0.42
5.23 6.31 7.29 8.24	1.14 1.12 1.11 1.10	1.70 2.71 2.43 2.78	33.30 41.63 49.98 58.07	2.04 2.08 2.12 2.15	8.63 10.86 13.12 15.47	0.92 0.95 0.99 1.03	3.12 3.76 4.34 4.97	0.83 0.87 0.86 0.86	1.40 1.71 1.99 2.29	0.398 0.396 0.393 0.389
7.55 9.13 10.62 12.01	1.29 1.28 1.26 1.25	2.17 2.65 3.12 3.57	45.92 57.10 68.35 79.99	2.24 2.28 2.32 2.36	12.26 15.39 18.58 21.84	1.02 1.06 1.09 1.13	4.40 5.40 6.35 7.16	0.98 0.98 0.98 0.97	1.77 2.19 2.59 2.94	0.410 0.407 0.404 0.402
12.61 14.70 18.53 21.96	1.44 1.42 1.40 1.38	3.30 3.88 4.99 6.04	70.00 84.30 112.50 140.80	2.40 2.44 2.52 2.60	21.04 25.37 34.23 43.43	1.17 1.21 1.29 1.36	7.41 8.54 10.87 13.10	1.10 1.08 1.07 1.06	3.74 3.19 4.10 4.99	0.435 0.435 0.429 0.423
12.82 14.95 18.96 18.85	1.42 1.41 1.39 1.38	3.32 3.91 4.48 5.03	85.21 102.53 119.33 136.41	2.60 2.65 2.69 2.73	21.06 25.41 29.82 34.32	1.14 1.18 1.21 1.25	7.66 8.85 10.18 11.38	1.10 1.08 1.08 1.07	2.74 3.20 3.70 4.16	0.388 0.387 0.384 0.381

角钢号数	尺 寸 (mm)				截面面积 (cm <sup>2</sup> )	理论重量 (kg/m)	外表面积 (m <sup>2</sup> /m)	X—X		
	B	b	d	r				I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>x</sub> (cm)	W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )
9/5.6	90	56	5	9	7.212	5.661	0.287	60.45	2.90	9.92
			6		8.557	6.717	0.286	71.03	2.88	11.74
			7		9.880	7.756	0.286	81.01	2.86	13.49
			8		11.183	8.779	0.286	91.03	2.85	15.27
10/6.3	100	63	6	10	9.617	7.550	0.320	99.06	3.21	14.64
			7		11.111	8.722	0.320	113.45	3.20	16.88
			8		12.584	9.878	0.319	127.37	3.18	19.08
			10		15.467	12.142	0.319	153.81	3.15	23.32
10/8	100	80	6	10	10.637	8.350	0.354	107.04	3.17	15.19
			7		12.301	9.656	0.354	122.73	3.16	17.52
			8		13.944	10.946	0.353	137.92	3.14	19.81
			10		17.167	13.476	0.353	166.87	3.12	24.24
11/7	110	70	6	10	10.637	8.350	0.354	133.37	3.54	17.85
			7		12.301	9.656	0.354	153.00	3.53	20.60
			8		13.944	10.946	0.353	172.04	3.51	23.30
			10		17.167	13.476	0.353	203.39	3.48	28.54
12.5/8	125	80	7	11	14.096	11.066	0.403	227.98	4.02	26.86
			8		15.989	12.551	0.403	256.77	4.01	30.41
			10		19.712	15.474	0.402	312.04	3.98	37.33
			12		23.351	18.330	0.402	364.41	3.95	44.01
14/9	140	90	8	12	18.038	14.160	0.453	365.84	4.50	38.48
			10		22.261	17.475	0.452	445.50	4.47	47.31
			12		26.400	20.724	0.451	521.59	4.44	55.87
			14		30.456	23.908	0.451	594.10	4.42	64.18
16/10	160	100	10	13	25.315	19.872	0.512	668.69	5.14	62.13
			12		30.054	23.592	0.511	784.91	5.11	73.49
			14		34.709	27.247	0.510	896.30	5.08	84.56
			16		39.281	30.835	0.510	1003.04	5.05	95.33
18/11	180	110	10	14	28.373	22.378	0.571	956.25	5.80	78.98
			12		33.712	26.464	0.571	1124.72	5.78	93.53
			14		38.967	30.589	0.570	1286.01	5.75	107.76
			16		44.139	34.649	0.569	1443.06	5.72	121.64
20/12.5	200	125	12	14	37.912	29.761	0.641	1570.90	6.44	116.73
			14		43.867	34.436	0.640	1800.97	6.41	134.65
			16		49.739	39.045	0.639	2023.35	6.38	152.18
			18		55.526	43.588	0.639	2238.30	6.35	169.33

注 (1)规格中的2.5/1.6号、4/2.5号、4.5/2.8号、7/4.5号、8/5号、10/8号、11/7号、18/11号, 根据1974年产

(2)角钢长度: 型号3.2/2~5.6/3.6号 6/4~8/5.6号 10/8.3~14/9 16/10~20/12.5号  
长度 3~9m 4~12m 4~19m 6~19m。

(3)目前生产常用材料: A3、A3F、AD3、AD3F、B3F、16Mn。

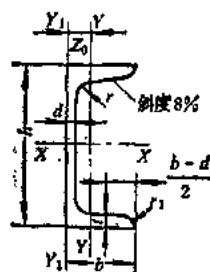
续表

参 考 数 值										
Y—Y			X <sub>1</sub> —X <sub>1</sub>		Y <sub>1</sub> —Y <sub>1</sub>		U—U			
I <sub>Y</sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>Y</sub> (cm)	W <sub>Y</sub> (cm <sup>3</sup> )	I <sub>X<sub>1</sub></sub> (cm <sup>4</sup> )	Y <sub>1</sub> (cm)	I <sub>Y<sub>1</sub></sub> (cm <sup>4</sup> )	X <sub>1</sub> (cm)	I <sub>u</sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>u</sub> (cm)	W <sub>u</sub> (cm <sup>3</sup> )	tga
18.32	1.59	4.21	121.32	2.91	29.53	1.35	10.98	1.23	3.49	0.383
21.42	1.58	4.96	145.59	2.95	35.58	1.29	12.90	1.23	4.13	0.384
24.36	1.57	5.70	169.66	3.00	41.71	1.33	14.67	1.22	4.72	0.382
27.15	1.56	6.41	194.17	3.04	47.93	1.36	16.34	1.21	5.29	0.380
30.94	1.79	6.35	199.71	3.24	50.50	1.43	18.42	1.38	5.25	0.394
35.26	1.78	7.29	233.00	3.28	59.14	1.47	21.00	1.38	6.02	0.393
39.39	1.77	8.21	266.32	3.32	67.88	1.50	23.50	1.37	6.73	0.391
47.12	1.74	9.98	333.06	3.40	85.73	1.58	28.33	1.35	8.24	0.387
61.24	2.40	10.16	199.83	2.95	132.68	1.97	31.65	1.72	8.37	0.627
70.08	2.39	11.71	233.20	3.00	119.98	2.01	36.17	1.72	9.69	0.626
78.58	2.37	13.21	266.61	3.04	137.37	2.05	40.58	1.71	10.80	0.625
94.65	2.35	16.12	333.63	3.12	172.48	2.13	49.10	1.69	13.12	0.622
42.92	2.01	7.90	365.78	3.53	69.08	1.57	25.36	1.54	6.53	0.403
49.01	2.00	9.09	310.07	3.57	80.82	1.61	28.95	1.53	7.50	0.402
54.87	1.98	10.25	354.39	3.62	92.70	1.65	32.45	1.53	8.45	0.401
65.88	1.96	12.48	443.13	3.70	116.83	1.72	39.20	1.51	10.29	0.397
74.42	2.30	12.01	454.99	4.01	120.32	1.80	43.81	1.76	9.92	0.408
83.49	2.28	13.56	519.99	4.06	137.85	1.84	49.15	1.75	11.18	0.407
100.67	2.26	16.56	650.09	4.14	173.40	1.92	59.45	1.74	13.64	0.404
116.67	2.24	19.43	780.39	4.22	209.67	2.00	69.35	1.72	16.01	0.400
120.69	2.59	17.34	730.53	4.50	195.79	2.04	70.83	1.98	14.31	0.411
146.03	2.56	21.22	913.20	4.58	245.92	2.12	85.82	1.96	17.48	0.409
169.79	2.54	24.95	1096.09	4.66	296.89	2.19	100.21	1.95	20.54	0.406
192.10	2.51	28.54	1279.26	4.74	348.82	2.27	114.13	1.94	23.52	0.403
205.03	2.85	26.56	1362.89	5.24	336.59	2.28	121.73	2.19	21.02	0.390
239.06	2.82	31.28	1635.56	5.32	405.94	2.36	142.33	2.17	25.79	0.388
271.20	2.80	35.83	1908.50	5.40	476.42	2.43	162.23	2.16	29.56	0.385
301.60	2.77	40.24	2181.79	5.48	548.22	2.51	182.57	2.16	33.44	0.382
278.11	3.13	32.49	1940.40	5.39	447.22	2.44	166.50	2.42	26.88	0.376
325.03	3.10	38.32	2328.38	5.98	538.94	2.52	194.87	2.40	31.66	0.374
369.55	3.08	43.97	2716.60	6.06	631.95	2.59	222.30	2.39	35.32	0.372
411.85	3.06	49.44	3105.15	6.14	726.46	2.67	248.94	2.38	40.87	0.363
483.16	3.57	49.99	3193.85	6.54	787.74	2.83	225.79	2.74	41.23	0.392
550.83	3.54	57.44	3726.17	6.62	922.47	2.91	326.58	2.73	47.31	0.390
615.44	3.52	64.69	4258.86	6.70	1058.86	2.99	366.21	2.71	53.32	0.388
677.19	3.49	71.74	4792.00	6.78	1197.13	3.06	494.83	2.70	59.18	0.385

品目录不生产。非标准的4.5/3号、6/4号角钢有产品供应故，故列入。

表 3-11

热 轧 普 通



型 号	尺 寸						截 面 面 积 (cm <sup>2</sup> )	理 论 重 量 (kg/m)
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>r</i>	<i>r</i> <sub>1</sub>		
	(mm)							
5	50	37	4.5	7	7	3.5	6.93	5.44
6.5	63	40	4.8	7.5	7.5	3.75	8.444	6.63
6.5	65	40	4.8	7.5	7.5	3.75	8.54	6.70
8	80	43	5	8	8	4	10.24	8.04
10	100	48	5.3	8.5	8.5	4.25	12.74	10.00
12	120	53	5.5	9.0	9.0	4.5	15.36	12.06
12.6	126	53	5.5	9.0	9.0	4.5	15.69	12.37
14 <sup>a</sup>	140	53	6	9.5	9.5	4.75	18.51	14.53
14 <sup>b</sup>	140	60	8	9.5	9.5	4.75	21.31	16.73
16 <sup>a</sup>	160	63	6.5	10	10	5	21.95	17.23
16 <sup>b</sup>	160	65	8.5	10	10	5	25.15	19.74
18 <sup>a</sup>	180	68	7	10.5	10.5	5.25	25.69	20.17
18 <sup>b</sup>	180	70	9	10.5	10.5	5.25	29.29	22.99
20 <sup>a</sup>	200	73	7	11	11	5.5	28.83	22.63
20 <sup>b</sup>	200	75	9	11	11	5.5	32.83	25.77
22 <sup>a</sup>	220	77	7	11.5	11.5	5.75	31.84	24.99
22 <sup>b</sup>	220	79	9	11.5	11.5	5.75	36.24	28.45
24 <sup>a</sup>	240	78	7	12	12	6	34.21	26.55
24 <sup>b</sup>	240	80	9	12	12	6	39.00	30.62
24 <sup>c</sup>	240	82	11	12	12	6	43.81	34.39
25 <sup>a</sup>	250	78	7	12	12	6	34.91	27.47
25 <sup>b</sup>	250	80	9	12	12	6	39.91	31.39
25 <sup>c</sup>	250	82	11	12	12	6	44.91	35.32
27 <sup>a</sup>	270	82	7.5	12.5	12.5	6.25	39.27	30.83
27 <sup>b</sup>	270	84	9.5	12.5	12.5	6.25	44.67	35.07
27 <sup>c</sup>	270	86	11.5	12.5	12.5	6.25	50.07	39.30
28 <sup>a</sup>	280	82	7.5	12.5	12.5	6.25	40.02	31.42
28 <sup>b</sup>	280	84	9.5	12.5	12.5	6.25	45.62	35.81
28 <sup>c</sup>	280	86	11.5	12.5	12.5	6.25	51.22	40.21
30 <sup>a</sup>	300	85	7.5	13.5	13.5	6.75	43.89	34.45
30 <sup>b</sup>	300	87	9.5	13.5	13.5	6.75	49.59	39.16
30 <sup>c</sup>	300	89	11.5	13.5	13.5	6.75	55.89	43.81
32 <sup>a</sup>	320	88	8	14	14	7	48.7	38.22
32 <sup>b</sup>	320	90	10	14	14	7	55.1	43.25
32 <sup>c</sup>	320	92	12	14	14	7	61.5	48.28
36 <sup>a</sup>	360	96	9	16	16	8	60.89	47.8
36 <sup>b</sup>	360	98	11	16	16	8	68.09	53.45
36 <sup>c</sup>	360	100	13	16	16	8	75.29	59.1
40 <sup>a</sup>	400	100	10.5	18	18	9	75.05	58.91
40 <sup>b</sup>	400	102	12.5	18	18	9	83.05	65.19
40 <sup>c</sup>	400	104	14.5	18	18	9	91.05	71.47

注 (1) 12.6号、25号、28号、32号、36号、40号根据1974年产品目录不生产。6.5号、12号、24号、27号、30号

(2) 槽钢长度: 型号 5~8号 10~18号 20~30号

长度 5~12m 5~19m 6~19m。

(3) 目前生产常用材料: A3、A3F、16Mn。

## 槽 钢 (GB707-65)

符号意义:

$h$ —高度	$Y$ —腿端圆弧半径
$b$ —腿宽	$I$ —惯性矩
$d$ —腰厚	$W$ —截面系数
$t$ —平均腿厚	$i$ —惯性半径
$r$ —内圆弧半径	$Z_0$ — $Y-Y$ 与 $Y_1-Y_1$ 轴线间距离

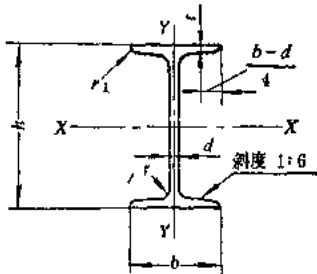
参 考 数 值							
$X-X$			$Y-Y$			$Y_1-Y_1$	$Z_0$
$W_x$ ( $\text{cm}^3$ )	$I_x$ ( $\text{cm}^4$ )	$i_x$ ( $\text{cm}$ )	$W_y$ ( $\text{cm}^3$ )	$I_y$ ( $\text{cm}^4$ )	$i_y$ ( $\text{cm}$ )	$I_{y_1}$ ( $\text{cm}^4$ )	( $\text{cm}$ )
10.4	26	1.94	3.55	8.3	1.1	20.9	1.35
16.123	50.786	2.453	4.50	11.872	1.185	28.38	1.36
17.0	55.2	2.54	4.59	12.0	1.19	28.3	1.38
25.3	101.3	3.15	5.79	16.6	1.27	37.4	1.43
39.7	198.3	3.95	7.8	25.6	1.41	54.9	1.52
57.7	346.3	4.75	10.17	37.4	1.56	77.7	1.62
62.137	391.466	4.953	10.242	37.99	1.567	77.09	1.59
80.5	563.7	5.52	13.01	53.2	1.7	107.1	1.71
87.1	609.4	5.35	14.12	61.1	1.69	120.6	1.67
108.3	866.2	6.28	16.3	73.3	1.83	144.1	1.8
116.8	934.5	6.1	17.55	83.4	1.82	160.8	1.75
141.4	1272.7	7.04	20.03	98.6	1.96	189.7	1.88
152.2	1369.9	6.84	21.52	111	1.95	210.1	1.84
178	1780.4	7.86	24.2	128	2.11	244	2.01
191.4	1913.7	7.64	25.88	143.6	2.09	263.4	1.95
217.6	2393.9	8.57	28.17	157.8	2.23	298.2	2.1
233.8	2571.4	8.42	30.05	176.4	2.21	326.3	2.03
254.3	3052.2	9.45	30.47	173.8	2.25	324.6	2.1
273.5	3282.5	9.17	32.51	194.1	2.23	354.8	2.03
292.7	3513.0	8.96	34.42	213.4	2.21	388.1	2.0
269.597	3369.62	9.823	30.607	175.529	2.243	322.256	2.065
282.402	3530.04	9.405	32.657	196.421	2.218	353.187	1.982
295.236	3690.45	9.065	35.926	218.415	2.206	384.133	1.921
323.1	4362.0	10.54	35.52	215.6	2.34	393.1	2.13
347.4	4690.1	10.25	37.72	239.2	2.31	428.2	2.06
371.7	5018.1	10.10	39.79	264.4	2.28	466.8	2.03
340.328	4764.59	10.91	35.718	217.989	2.333	387.566	2.097
366.46	5130.45	10.6	37.929	242.144	2.304	427.589	2.016
392.594	5496.32	10.35	40.301	267.602	2.286	426.597	1.951
463.2	6047.9	11.72	41.10	259.5	2.43	466.5	2.17
433.2	6497.9	11.41	44.03	289.2	2.41	515.2	2.13
463.2	6947.9	11.15	46.38	315.8	2.38	559.7	2.09
474.879	7598.06	12.49	46.473	304.787	2.502	552.31	2.242
509.012	8144.2	12.15	49.157	336.332	2.471	592.933	2.158
543.145	8690.33	11.88	52.642	374.175	2.467	643.299	2.092
659.7	11874.2	13.97	63.64	455	2.73	818.4	2.44
702.9	12651.8	13.63	66.85	496.7	2.7	880.4	2.37
746.1	13429.4	13.36	70.02	536.4	2.67	947.9	2.34
878.9	17577.9	15.30	78.83	592	2.81	1067.7	2.49
932.2	18644.5	14.98	82.52	640	2.78	1135.6	2.44
985.6	19711.2	14.71	86.19	687.8	2.75	1220.7	2.42

系保留产品, 不推荐使用。



表 3-12

热轧普通工字钢 (GB706-65)

							符号意义:		h—高度		r <sub>1</sub> —腿端圆弧半径	
							b—腿宽		I—惯性矩			
							d—腹厚		W—截面系数			
							t—平均腿厚		i—惯性半径			
							r—内圆弧半径		S—半截面的静力矩			

型号	尺 寸						截 面 面 积 (cm <sup>2</sup> )	理 论 重 量 (kg/m)	参 考 数 值						
	h	b	d	t	r	r <sub>1</sub>			X—X				Y—Y		
									I <sub>x</sub>	W <sub>x</sub>	i <sub>x</sub>	I <sub>x</sub> S <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	i <sub>y</sub>
(mm)							(cm <sup>2</sup> )	(kg/m)	(cm <sup>4</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(cm)	I <sub>x</sub> S <sub>x</sub>	(cm <sup>4</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(cm)
10	100	68	4.5	7.6	6.5	3.3	14.3	11.2	245	49	4.14	8.59	33	9.72	1.52
12	120	74	5	8.4	7	3.5	17.8	14.0	436	72.7	4.95	10.3	46.9	12.7	1.62
12.6	126	74	5	8.4	7	3.5	18.1	14.2	488.43	77.529	5.195	10.85	46.906	12.677	1.609
14	140	80	5.5	9.1	7.5	3.8	21.5	16.9	712	102	5.76	12	64.4	16.1	1.73
16	160	88	6	9.9	8	4	26.1	20.5	1130	141	6.58	13.8	93.1	21.2	1.89
18	180	94	6.5	10.7	8.5	4.3	30.6	24.1	1660	185	7.36	15.4	122	26	2
20a	200	100	7	11.4	9	4.5	35.5	27.9	2370	237	8.15	17.2	158	31.5	2.12
20b	200	102	9	11.4	9	4.5	39.5	31.1	2500	250	7.96	16.9	169	33.1	2.06
22a	220	110	7.5	12.3	9.5	4.8	42	33	3400	309	8.99	18.9	225	40.9	2.31
22b	220	112	9.5	12.3	9.5	4.8	46.4	36.4	3570	325	8.78	18.7	239	42.7	2.27
24a	240	116	8	13	10	5	47.7	37.4	4570	381	9.77	20.7	280	48.4	2.42
24b	240	118	10	13	10	5	52.6	41.2	4800	400	9.57	20.4	297	50.4	2.38
25a	250	116	8	13	10	5	48.5	38.1	5023.54	401.88	10.18	21.58	280.046	48.283	2.403
25b	250	118	10	13	10	5	53.5	42	5283.96	422.72	9.938	21.27	309.297	52.423	2.401
27a	270	122	8.5	13.7	10.5	5.3	54.6	42.8	6550	485	10.9	23.8	345	56.6	2.51
27b	270	124	10.5	13.7	10.5	5.3	60.0	47.1	6870	509	10.7	22.9	366	58.9	2.47
28a	280	122	8.5	13.7	10.5	5.3	55.45	43.4	7114.14	508.15	11.32	24.62	345.051	56.565	2.407
28b	280	124	10.5	13.7	10.5	5.3	61.05	47.9	7480	534.29	11.08	24.24	379.496	61.209	2.433
30a	300	126	9	14.4	11	5.5	61.2	48	8950	597	12.1	25.7	400	63.5	2.55
30b	300	128	11	14.4	11	5.5	67.2	52.7	9400	627	11.8	25.4	422	65.9	2.50
30c	300	130	13	14.4	11	5.5	73.4	57.4	9850	657	11.6	25.0	445	68.5	2.46
32a	320	130	9.5	15	11.5	5.8	67.05	52.7	11075.5	692.2	12.84	27.46	459.93	70.758	2.619
32b	320	132	11.5	15	11.5	5.8	73.45	57.7	11621.4	726.33	12.58	27.09	501.53	75.989	2.614
32c	320	134	13.5	15	11.5	5.8	79.95	62.8	12167.5	760.47	12.34	26.77	543.81	81.186	2.608
36a	360	136	10	15.8	12	6	76.3	59.9	15760	875	14.4	30.7	552	81.2	2.69
36b	360	138	12	15.8	12	6	83.5	65.6	16530	919	14.1	30.3	582	84.3	2.64
36c	360	140	14	15.8	12	6	90.7	71.2	17310	962	13.8	29.9	612	87.4	2.6
40a	400	142	10.5	16.5	12.5	6.3	86.1	67.6	21720	1090	15.9	34.1	660	93.2	2.77
40b	400	144	12.5	16.5	12.5	6.3	94.1	73.8	22780	1140	15.6	33.6	692	96.2	2.71
40c	400	146	14.5	16.5	12.5	6.3	102	80.1	23850	1190	15.2	33.2	727	99.6	2.65
45a	450	150	11.5	18	13.5	6.8	102	80.4	32240	1430	17.7	38.6	855	114	2.89
45b	450	152	13.5	18	13.5	6.8	111	87.4	33760	1500	17.4	38	894	118	2.84
45c	450	154	15.5	18	13.5	6.8	120	94.5	35280	1570	17.1	37.6	938	122	2.79
50a	500	158	12	20	14	7	119	93.6	46470	1860	19.7	42.8	1120	142	3.07
50b	500	160	14	20	14	7	129	101	48560	1940	19.4	42.4	1170	146	3.01
50c	500	162	16	20	14	7	139	109	50640	2080	19	41.8	1220	151	2.96
55a	550	166	12.5	21.0	14.5	7.3	134	105	62870	2290	21.6	46.9	1370	164	3.19
55b	550	168	14.5	21.0	14.5	7.3	145	114	65640	2390	21.2	46.4	1420	170	3.14
55c	550	170	16.5	21.0	14.5	7.3	156	123	68410	2490	21.9	45.8	1480	175	3.08
56a	560	166	12.5	21	14.5	7.3	135.25	106.2	65585.6	2342.31	22.02	47.73	1370.16	165.08	3.182
56b	560	168	14.5	21	14.5	7.3	146.45	115	68512.5	2446.69	21.63	47.17	1486.75	174.25	3.162
56c	560	170	16.5	21	14.5	7.3	157.85	123.9	71439.4	2551.41	21.27	46.66	1558.39	183.34	3.158
63a	630	176	13	22	15	7.5	154.9	121.6	95916.2	2981.47	24.82	54.17	1760.55	193.24	3.314
63b	630	178	15	22	15	7.5	167.5	131.5	98023.6	3163.98	24.2	53.51	1812.07	203.6	3.289
63c	630	180	17	22	15	7.5	180.1	141	102251.1	3298.42	23.82	52.92	1824.91	213.88	3.268

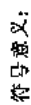
注 (1) 12.6号、22b号、28号、32号以及40号以上的根据1974年产品目录不生产。12号、24号、27号、36号、55号工字钢系保留品种, 不推荐使用。

(2) 工字钢长度: 型号10~18号 20~36号

长度 5~19m 6~19m

(3) 目前生产常用材料: A3、A3F、A5、16Mn。

# 經 理 雜 誌



$h$ —高度	$b$ —腰寬
$d$ —腰厚	$t$ —平均腰厚
$r$ —內圓弧半徑	$I$ —慣性矩
$H$ —載面系數	$i$ —慣性半徑
$r_1$ —腰端圓弧半徑	$Z_1$ —重心距離
$S_x$ —半截面的靜力矩	

（1）本厂所产系列薄板按(86)冶规字1257号文附件“热轧轻型薄板技术要求”，与YB164-63规定的板面(目前不生产)稍有不同。

(2) 目前生产钢号及型号 [1: 17]:

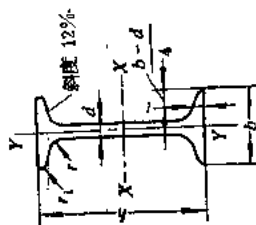
(3) 本表所列型号为武钢产品型号标注方法, 包钢产品的型号不标“Q”。

表 3-14

## 热 轧 轻 型 工 字 钢

符号意义:

$b$  — 腿宽  
 $t$  — 平均腿厚  
 $r_1$  — 腿端圆弧半径  
 $W$  — 截面系数  
 $S_x$  — 半截面的静力矩



型 号	尺 寸					截面面积 (cm <sup>2</sup> )	理论重量 (kg/m)	参 考 数 据						
	(mm)							X--X			Y--Y			
	h	b	d	t	r			r <sub>1</sub>	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	i <sub>x</sub> (cm)	S <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )
10Q	100	55	4.2	6.8	6.8	2.5	8.95	189	37.8	4.08	21.8	16.7	6.08	1.21
12Q	120	65	4.4	7.1	7.1	2.5	11.15	344	57.4	4.93	32.9	28.3	8.72	1.42
14Q	140	75	4.6	7.4	7.4	2.5	13.50	573	81.9	5.78	46.7	44.7	11.92	1.62
16Q	160	80	4.8	7.7	7.7	3.0	15.39	852	106.5	6.60	60.5	56.0	14.00	1.69
18Q	180	85	5.0	8.0	8.0	3.0	17.43	1209	134.3	7.39	76.6	69.6	16.37	1.77
20Q	200	90	5.2	8.8	8.8	3.0	20.25	1741	174.1	8.22	99.2	91.6	20.35	1.88
22Q	220	100	5.5	9.4	9.4	3.5	23.86	2493	237.1	9.07	129.0	133	26.58	2.09
25Q	250	110	6.0	10.2	10.2	3.5	28.89	3896	311.6	10.29	177.1	192	34.89	2.28
28Q	280	120	6.5	11.0	11.0	3.5	34.46	5803	414.5	11.50	235.7	269	44.77	2.48
32Q	320	130	7.0	12.0	12.0	4.0	41.37	9064	566.5	13.11	322.5	373	57.33	2.66
36Q	360	140	7.5	12.8	12.8	4.0	48.69	13364	742.4	14.70	423.2	496	70.97	2.83
40Q	400	150	8.0	13.6	13.6	5.0	56.28	18985	949.2	16.28	541.9	645	89.04	3.00
45Q	450	160	8.5	14.5	14.5	5.0	65.47	27737	1032.8	18.24	705.1	836	104.53	3.17
50Q	500	170	9.0	15.3	15.3	6.0	74.97	38908	1556.3	20.18	892.0	1054	123.96	3.32
56Q	560	180	10.0	17.0	17.0	6.0	90.57	58222	2079.4	22.46	1196.6	1407	156.29	3.49
63Q	630	190	11.0	18.7	18.7	6.0	108.56	87038	2763.1	25.09	1597.0	1838	193.46	3.65

注 (1) 本表所列截面数据按(60)冶钢字1257号文附件“热轧轻型工字钢技术要求”, 与YB163 83规定的截面(目前不生产)稍有不同。

(2) 目前生产钢号及型号:

钢 号	型 号	长 度
A3, A3F, A3b	22Q, 25Q	6~19m
A3F, 18Nb	32Q, 36Q, 40Q	6~19m
18Nb, 14MnNb	45Q, 56Q, 63Q	6~19m

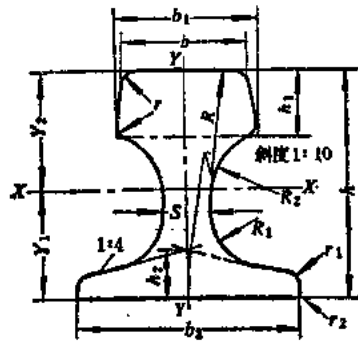
(3) 本表所列型号为武钢产品的型号标注方法, 包钢产品的型号不标“Q”。

## 二、闸门固定部分材料

闸门固定部分即门槽埋设件采用的钢号见表 3-1。埋设件钢材常用型钢，当主轨的荷载较大时可采用钢轨或起重机钢轨，它们的规格分别见表 3-15、表 3-16 和表 3-17。当主轨的荷载更大，采用前面型式的轨道满足不了时，则需要采用铸钢轨。

表 3-15

起重机钢轨 (YB172-63)



钢轨标号	截面面积 (cm <sup>2</sup> )	重心距离		惯性矩		截面系数		
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	$W_x = \frac{I_x}{Y_1}$	$W_y = \frac{I_y}{Y_2}$	$W_z = \frac{I_z}{b_z/2}$
		(cm)		(cm <sup>4</sup> )		(cm <sup>3</sup> )		
QU70	67.3	5.83	6.07	1081.99	327.16	182.46	178.12	54.53
QU80	81.13	6.43	6.57	1547.40	482.39	240.65	235.52	74.21
QU100	113.32	7.60	7.40	2864.73	940.98	376.94	387.12	125.45
QU120	150.44	8.43	8.57	4023.79	1694.83	584.08	574.54	199.39

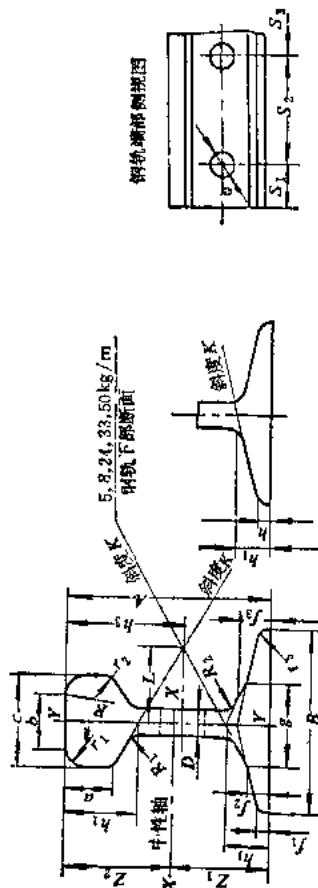
钢轨标号	理 论 重 量	尺 寸												
		b	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	s	h	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	R	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	r	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>
	(kg/m)	(mm)												
QU70	52.8	70	76.5	120	28	120	32.5	24	400	23	38	6	6	1.5
QU80	63.69	80	87	130	32	130	35	26	400	26	44	8	6	1.5
QU100	88.96	100	108	150	38	150	40	30	450	30	50	8	8	2
QU120	118.1	120	129	170	44	170	45	35	500	34	56	8	8	2

注 (1) 钢轨的标准长度为: 9, 9.5, 10, 10.5, 11, 11.5, 12, 12.5m。

(2) 目前生产: QU80、QU100及QU120型, 材料为APl<sup>111</sup>。

表 3-16

轻 轨 及 重 轨



钢轨类型 (kg/m)	主要尺寸 (mm)				截面面积 F (cm <sup>2</sup> )	重心距 至轨底 Z <sub>0</sub> (cm)		惯性矩 J <sub>x</sub> J <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )		截面系数 轨底 W <sub>x</sub> = J <sub>x</sub> /Z <sub>0</sub> 轨顶 W <sub>y</sub> = J <sub>y</sub> /Z <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	斜度 K	理论重量 (kg/m)	通常长度 (m)	标准号
	A	B	C	D		Z <sub>0</sub>	Z <sub>1</sub>	J <sub>x</sub>	J <sub>y</sub>	W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>			
轻轨	5	50	44	22	4.5	2.22	2.78	25.2	5.35	11.4	9.1	5.03	5~10	YB222-63
	8	65	54	25	7.0	2.89	3.61	59.3	9.62	20.6	16.4	8.42	5~10	YB222-63
	11	80.5	66	32	7.0	3.96	4.09	125	15.1	31.7	30.5	11.20	6~10	YB222-63
	15	91	76	37	7.0	4.35	4.75	222	30.2	51.0	46.5	14.72	6~12	YB222-63
	18	90	80	40	10.0	4.29	4.71	240	41.1	56.1	51.0	18.06	7~12	YB222-63
重轨	24	107	92	51	10.9	5.305	5.395	486	80.46	91.64	90.12	24.46	7~12	YB222-63
	33	120	110	60	12.5	5.76	6.24	821.9	185.1	142.6	131.8	33.288	12.5	YB350-63
	38	134	114	68	13	6.67	6.73	1204.4	209.3	180.6	178.9	36.7	12.5, 25	GB183-63
	43	140	114	70	14.5	6.85	7.15	1489	260	217.3	208.3	45	12.5, 25	GB182-63
	50	152	132	70	15.5	7.10	8.10	2037	377	237.2	251.3	57.1	12.5, 25	GB181-63

钢轨类型 (kg/m)	尺寸 (mm)													
	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	a	b	g	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
轻轨	5	9.0	12	27.8	9.25		3.5			4	2	2	28	52
	8	12	17	35	13.4		4.3			5	3	2.5	32	70
	11	12.5	23	45.5	17.25	19.4		6.5		9	7	3.5	44	100
	15	16.25	28.75	51.75	19.5	24.2	37	4.5	7	9.4	7	4	47	100
	18	20	32	51	20.9	28.2	36.1	4.25	10	14.75	7	4	46.5	100
重轨	24	17	32	61	23.28	26.13	5.5			13	3	4	60	100
	33	21	35	67	27.5	35.5	7.3			13	3	4	66	160
	38	24	39	74.5	27.7	43.9	79	9	10.8	13	4	4	56	110
	43	27	42	77.5	30.4	46	78	11	14	13	2	4	56	110
	50	27	42	83.5	33.3	46	10.5			13	2.5	4	60	150

表 3-17

钢 轨 的 技 术 条 件

钢轨型号 (kg/m)		5~11		15~24		33		38、43		50		38~50(普通低合金钢)			
钢 号		P (普通 轻型)	I (硬轻 型)	P (普通 轻型)	I (硬轻 型)	P67	J 53	P71	J 63	P74	J 68	U-Cu	U-Mn	U-Si	U-Ti
化学 成分 (%)	C	0.20~ 0.50	0.50~ 0.75	0.35~ 0.50	0.45~ 0.60	0.60~ 0.75	0.45~ 0.60	0.64~ 0.77	0.55~ 0.70	0.67~ 0.80	0.60~ 0.75	0.60~ 0.72	0.56~ 0.68	0.62~ 0.75	0.60~ 0.72
	Mn					0.60~ 0.90	0.60~ 0.30	0.60~ 0.90	0.70~ 1.00	0.70~ 1.00	0.80~ 1.10	0.90~ 1.30	1.35~ 1.65	0.70~ 1.00	0.90~ 1.30
	Si					0.18~ 0.28	0.15~ 0.30	0.13~ 0.28	0.15~ 0.30	0.13~ 0.28	0.15~ 0.30	0.20~ 0.35	0.20~ 0.35	0.70~ 1.00	0.20~ 0.35
	Cu或Ti											Cu0.20 ~0.50			Ti0.08 ~0.23
抗拉强度 (kgf/cm <sup>2</sup> )>				55		75	65	80	75	80	80	92	90	92	92
两端轨头表 面淬火硬度 HB						302~401									
落锤试 验(锤 重1000 kg 试 样长 1.3m)	锤落高 (m)					5.0	5.2	5.5	6.1	同 左					
	第一 次打击 后挠度 (mm) ≤					55									
冶炼方法		平炉P、I、酸、 碱侧吹转炉P		平炉或酸、 碱侧吹转炉		P—平炉镇静钢 J—碱性转炉(侧吹、纯氧顶吹)镇静钢						平炉或碱性转炉(侧吹或纯 氧顶吹)			
标 准 号		YB221-63		YB220-78		平炉镇静钢符合YB32-60 碱性转炉镇静钢符合YB33-60						YB34-60			

注 1kgf/cm<sup>2</sup>≈10<sup>5</sup>Pa。

## 三、行走支承部分材料

## 1. 铸钢件

闸门支承结构(包括主轨)的铸钢件,一般采用现行《碳素钢铸件分类及技术条件》规定的ZG25、ZG35、ZG45、ZG55号铸钢中的I级或II级。主要承受静压的支承结构,或其他支承结构有可靠论证时,也可采用上列钢号中的III级铸钢。碳素钢铸件的机械性能及化学成分见表3-18。

表 3-18

碳素钢铸件的机械性能及化学成分(摘自GB979-67)

铸件牌号	机 械 性 能					化 学 成 分 (%)		
	屈 服 点 $\sigma_s$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	抗 拉 强 度 $\sigma_b$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	延 长 率 $\delta_5$ (%)	收 缩 率 $\psi$ (%)	冲 击 值 $A_k$ (kgf·m/cm <sup>2</sup> )	碳	锰	硅
	不 小 于							
ZG15	20	40	25	40	6.0	0.12~0.22	0.35~0.65	0.20~0.45
ZG25	24	45	20	32	4.5	>0.22~0.32	0.50~0.80	0.20~0.45
ZG35	28	50	16	25	3.5	>0.32~0.42	0.50~0.80	0.20~0.45
ZG45	32	58	12	20	3.0	>0.42~0.52	0.50~0.80	0.20~0.45
ZG55	35	65	10	18	2.0	>0.52~0.62	0.50~0.80	0.20~0.45

注 (1)铸件分I级——高级铸件,硫、磷含量不大于0.04%,测定 $\sigma_s$ 、 $\sigma_b$ 、 $\sigma_t$ 及 $\psi$ ,并作冲击韧性试验。II级——优质铸件,硫、磷含量不大于0.05%,测定 $\sigma_s$ 、 $\sigma_b$ 、 $\delta_5$ 。III级——普通铸件,硫、磷含量不大于0.06%,测定 $\sigma_b$ 、 $\delta_5$ 。

(2)用酸性转炉生产II级铸件时,允许硫、磷含量分别提高到硫小于0.07%,磷小于0.09%。

(3)1kgf/mm<sup>2</sup>≈10<sup>5</sup>Pa。

荷载大的深孔工作闸门,可采用现行《合金铸钢》中规定的ZG35CrMo、ZG50Mn2号合金铸钢。合金铸钢的机械性能及化学成分见表3-19,

表 3-19

合 金

钢号	化 学 成 分 (%)						热处理类型
	C	Mn	Si	其 他	P	S	
					≤		
ZG40Mn	0.35~0.45	1.20~1.50	0.30~0.45		0.040	0.040	正火 回火
ZG40Mn2	0.35~0.45	1.60~1.80	0.20~0.40		0.040	0.040	正火, 回火 调质
ZG50Mn2	0.45~0.55	1.50~1.80	0.20~0.40		0.040	0.040	正火 回火
ZG20SiMn	0.16~0.22	1.00~1.30	0.60~0.80		0.040	0.040	正火 回火
ZG35SiMn	0.30~0.40	1.10~1.40	0.60~0.80		0.040	0.040	正火, 回火 调质
ZG42SiMn	0.38~0.45	1.10~1.40	0.60~0.80		0.040	0.040	正火, 回火 调质
ZG50SiMn	0.46~0.54	0.80~1.10	0.80~1.10		0.040	0.040	正火 回火
ZG40Cr	0.35~0.45	0.50~0.80	0.20~0.40	Cr 0.80~1.10	0.040	0.040	正火, 回火 调质
ZG35CrMnSi	0.30~0.40	0.90~1.20	0.50~0.75	Cr 0.50~0.80	0.040	0.040	正火 回火
ZG35CrMo	0.30~0.40	0.50~0.80	0.20~0.40	Cr0.80~1.10 Mo0.20~0.30	0.040	0.040	正火, 回火 调质
ZG50MnMo	0.47~0.55	0.90~1.10	0.20~0.40	Mo0.15~0.30	0.040	0.040	调质

注 (1)表中机械性能是合金铸钢件经过最后热处理的数据。 $\sigma_s$ 、 $\delta_s$ 、 $a_k$ 为铸件验收的主要依据, 有特殊要求者  
 (2)铸钢件的机械性能以单独浇铸的毛坯试样试验结果为准。如铸件本身要求带试样时图样中应规定。  
 (3) $1\text{kgf/mm}^2 \approx 10^7\text{Pa}$ 。

铸 钢 (Q/ZB66-73)

机 械 性 能						用 途
$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\delta_5$	$\psi$	$a_k$	HB	
(kgf/mm <sup>2</sup> )		(%)		(kgf·m/cm <sup>2</sup> )		
≥						
65	30	12	30		≥163	在较高压力作用下, 作承受摩擦和冲击的零件, 如齿轮等
60	40	20	55		≥179	作承受摩擦的零件, 如齿轮等。耐磨性比 ZG40Mn 高, 可代替 ZG30CrMnSi
85	70	13	45	4.5	269~302	
30	45	18	37			作高强度的铸造零件, 如齿轮、齿轮缘等
52	30	14	30	5.0	≥156	焊接性及液态流动性好, 作水压机工作缸、水轮机转子等
58	35	12	20	3.0		制造承受摩擦的零件。表面淬火 HBG40~45
65	42	12	25	3.5	207~241	
60	38	12	20	3.0	≥229	作齿轮、车轮及其他耐磨零件, 表面淬火 HBC45~53
65	45	12	25	3.5	229~321	
70	45	14	25		217~255	可代替 ZG40Cr 作齿轮等
64	35	18	26		≤212	作高强度的铸造零件, 如铸造齿轮、齿轮轮缘等主要零件。表面淬火 HRC48~55
70	48	15	20		228~321	
70	35	14	30	4.0	≤217	作承受冲击、受磨损的零件, 如齿轮、滚轮等
60	40	12	20	3.0		作链轮、电铲的支承轮、轴套、齿圈、齿轮等
70	55	12	25	4.0		
70	35	10	19	2.5	≤229	作车轮等零件

应按图样技术要求执行。



## 2. 铸铁件

闸门所采用的铸铁件，应符合现行《灰铁铸件分类及技术条件》中规定的各项要求。闸门加重使用的铸铁其牌号不限，但应保证其比重。灰铁铸件的机械性能见表3-20。

表 3-20 灰铁铸件的机械性能（摘自GB976-67）

灰铸铁牌号	铸件主要壁厚 (mm)	试棒毛坯直径 D (mm)	抗拉强度 $\sigma_b$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	抗弯强度 $\sigma_w$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	挠 度 支距=10D (mm)	抗压强度 $\sigma_g$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	硬 度 HB
			≥				
HT10-26	所有尺寸	30	10	26	2	50	143~229
HT15-33	4~8	13	28	47	1.5	65	170~241
	>8~15	20	20	39	2		170~241
	>15~30	30	15	33	2.5		163~229
	>30~50	45	12	25	3		163~229
	>50	60	10	21	4		143~229
HT20-40	6~8	13	32	53	1.3	75	187~255
	>8~15	20	25	45	2.5		170~241
	>15~30	30	20	40	2.3		170~241
	>30~50	45	18	34	3		170~241
	>50	60	16	31	4.5		163~229
HT25-47	>8~15	20	29	50	2.8	100	187~255
	>15~30	30	25	47	3		170~241
	>30~50	45	22	42	4		170~241
	>50	60	20	39	4.5		163~229
HT30-54	>15~30	30	30	54	3	110	187~255
	>30~50	45	27	50	4		170~241
	>50	60	26	48	4.5		170~241
HT35-61	>15~30	30	35	61	3.5	120	197~269
	>30~50	45	32	56	4		187~255
	>50	60	31	54	4.5		170~241
HT40-68	>20~30	30	40	68	3.5		207~269
	>30~50	45	38	65	4		197~269
	>50	60	37	63	4.5		197~269

注 (1) 铸件主要壁厚系指该铸件在使用情况下主要受负荷之处；

(2) 抗压强度系根据(JB297-62)标准，其壁厚>15~30mm时的抗压强度；

(3) 1kgf/mm<sup>2</sup>≈10<sup>7</sup>Pa。

## 3. 滑道

闸门的支承滑道可以采用压合胶木，小型闸门也可以采用MC尼龙。由于这两种材料在闸门使用上的性能尚未完全掌握，同时，目前订货还比较困难，因此小型电站常采用铸铁、铸钢、锻钢和青铜等材料做成的滑道。压合胶木的性能指标应符合表3-21的要求。

表 3-21

闸门用压合胶木(木材层积塑料)的物理机械性能

指 标 名 称	胶 木 板 (短层积板)			
	MCS-1	MCS-2	MCS-2-1	MCS-3
1. 容 积 重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )不小于	1.33	1.3	1.23	1.3
2. 水分和挥发物质(%)不大于	6	7	7	7
3. 24h吸水率(%)不大于	—	5	—	5
4. 极限吸水率(%)不大于	20	20	—	—
5. 极限膨胀率(%)不大于	22	22	—	—
6. 顺纹拉伸极限强度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )不小于	—	2600	2000	1400
7. 顺纹压缩极限强度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )不小于	1800	1600	1300	1250
8. 静曲极限强度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )不小于	—	2800	2200	1800
9. 冲击强度( $\text{kgf}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$ )不小于	—	80	60	30
10. 胶缝剪切极限强度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )不小于	150	150	125	140
11. 木材剪切极限强度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )不小于	—	—	—	—
12. 端面白氏硬度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )不小于	25	25	—	25

注 (1) 胶木牌号系上海胜利木材厂的统一编号; MCS-2用于制造滑道; MCS-2-1用于制造轴承;

(2) 规格: 厚度由15~55mm,

面积:  $500 \times 1000\text{mm}^2$ ;  $700 \times 700\text{mm}^2$ ;

(3)  $1\text{kgf}/\text{cm}^2 \approx 10^5\text{Pa}$ 。

MC尼龙和黑尼龙的物理机械性能应符合表3-22的要求。

表 3-22

MC尼龙和黑尼龙的物理机械性能

项 目	单 位	MC 尼 龙		黑 尼 龙
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
比 重	$\text{g}/\text{cm}^3$	1.15	1.16	1.162
拉伸强度	$\text{kgf}/\text{cm}^2$	750~1000	916	904
伸 长 率	%	10~30	20	28
拉伸弹性模数	$\times 10^4 \text{kgf}/\text{cm}^2$	4	3.6	—
弯曲强度	$\text{kgf}/\text{cm}^2$	1400~1700	1586	1547
压缩强度	$\text{kgf}/\text{cm}^2$	1000~1400	1068	1115
冲击强度	$\text{kgf}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$	200~630	520~624	145
马丁氏耐热性	$^{\circ}\text{C}$	67~74	55	51
硬度(布氏)				
线膨胀系数				
吸水率 $\begin{cases} 24\text{h} \\ \text{饱和} \end{cases}$				

注 (1) MC尼龙与普通尼龙6相同;

(2) MC尼龙内加入3~5%的二硫化钼称为黑尼龙;

(3)  $1\text{kgf}/\text{cm}^2 \approx 10^5\text{Pa}$ 。

#### 四、闸门的承重连接零件

闸门的吊杆轴、连接轴、上下段连接板、主轮轴和支承铰轴等通称闸门的连接零件，其材料一般可采用：

(1) 现行《优质碳素结构钢钢号和一般技术条件》或现行《优质碳素钢》中规定的35号、45号钢。

(2) 现行《普通碳素钢钢号和一般技术条件》中规定的5号钢。

(3) 现行《合金结构钢技术条件》中规定的35Mn2、40Cr钢。

常用几种合金结构钢的机械性能和化学成分见表3-23。

#### 五、闸门紧固件

(1) 普通螺栓、螺帽和锚栓等可采用现行《普通碳素钢钢号和一般技术条件》中规定的3号钢制成。普通垫圈可以用A2、A3钢制成。

(2) 高强度螺栓宜采用现行《合金结构钢技术条件》中规定的40号硼钢或现行《优质碳素结构钢钢号和一般技术条件》中规定的45号钢制成，并予以热处理。热处理后，按螺纹内径计算抗拉强度，对40号硼钢应不低于 $120\text{kgf/mm}^2$ ；对45号钢应不低于 $90\text{kgf/mm}^2$ 。高强度螺栓的螺帽和垫圈，宜采用现行《优质碳素结构钢钢号和一般技术条件》中规定的45号钢制成，并予以热处理。

普通螺栓、螺母和垫圈的规格分别列于表3-24、表3-25和表3-26。

表 3-23

常用几种合金结构钢的机械性能和化学成分

(摘自YB6-71、Q/2B61-73)

钢 号	机 械 性 能						化 学 成 分 (%)				
	屈服点 $\sigma_s$ ( $\text{kgf/mm}^2$ )	抗拉强度 $\sigma_b$ ( $\text{kgf/mm}^2$ )	伸长率 $\delta_5$ (%)	收缩率 $\psi$ (%)	冲击值 $\alpha_k$ ( $\text{kgf}\cdot\text{m/cm}^2$ )	布氏 硬度 HB	碳	硅	锰	铬	其 他
		不	小	于		不大于					
30Mn2	65	80	12	45	8	207	0.27~0.34	0.20~0.40	1.40~1.80		
35Mn2	70	85	12	45	7	207	0.32~0.39	0.20~0.40	1.40~1.80		
35SiMn	75	90	15	45	6	229	0.32~0.40	1.10~1.40	1.10~1.40		
20Cr	55	85	10	40	8	179	0.17~0.24	0.20~0.40	0.50~0.80	0.70~1.00	
30Cr	70	90	11	45	8	187	0.27~0.34	0.20~0.40	0.58~0.80	0.80~1.10	
35Cr	75	95	11	45	8	207	0.32~0.39	0.20~0.40	0.50~0.80	0.80~1.10	
40Cr	80	100	9	45	6	207	0.37~0.45	0.20~0.40	0.50~0.80	0.80~1.10	
40B	65	80	12	45	7	207	0.37~0.44	0.20~0.40	0.60~0.90		B0.001 ~0.004
30CrNi3	80	100	9	45	8	241	0.27~0.34	0.20~0.40	0.30~0.60	0.60~0.90	Ni2.75 ~3.25

注  $1\text{kgf/mm}^2 \approx 10^7\text{Pa}$ 。

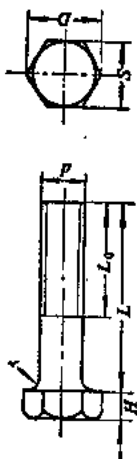
表 3-24

六角头螺栓 (粗制) (GB5-76)

✓

标记示例:

粗牙普通螺纹、直径10mm、长100mm机械性能按5.9级、不经表面处理的六角头螺栓: 螺栓M10×100 GB5-76

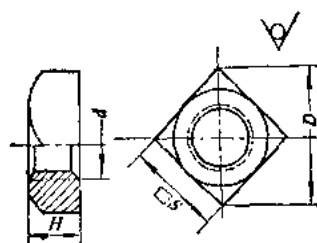


(mm)																				
d	10	12	(14)	16	(18)	20*	(22)	24*	(27)	30*	36*	42	48	56	64	72	80	90	100	
S	17	19	22	24	27	30	32	36	41	46	55	65	75	85	95	105	115	130	145	
H	7	8	9	10	12	13	14	15	17	19	23	26	30	35	40	45	50	57	63	
r	0.5			0.8			1			1.5			2			3				
D	19.6	21.9	25.4	27.7	31.2	34.6	36.9	41.6	47.3	53.1	63.5	75	86.5	98	109	121	132	150	167	
L 范围	20~200	25~260	25~260	30~300	35~300	35~300	50~300	55~300	60~300	60~300	80~300	80~300	110~300	150~380	180~380	200~380	220~500			
100mm长的重量 (kg)	0.072	0.103	0.141	0.185	0.242	0.304	0.369	0.459	0.609	0.765	1.166	1.680	1.857	2.646	3.561	4.626	5.864	7.564	8.802	
L 系列	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 350, 380, 400, 420, 450, 480, 500																			

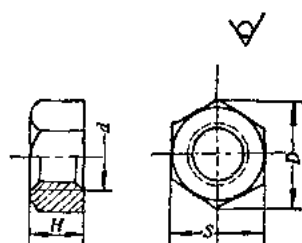
注 (1)  $L_0$  不包括螺尾, 当  $L \leq 125$  时,  $L_0 = 2d + 6$ ; 当  $L > 125 \sim 200$  时,  $L_0 = 2d + 12$ ; 当  $L > 200$  时,  $L_0 = 2d + 25$ 。  
(2) 带 \* 为优选系列, 以后各表同。

表 3-25

方 螺 母、六 角 螺 母



方螺母(粗制)(GB39-76)



六角螺母(粗制)(GB41-76)

标记示例:

粗牙普通螺纹、直径  
10mm、机械性能按5级、  
不经表面处理的方螺母:  
螺母M10 GB39-76

(mm)

d	S	D		H				每1000个钢螺母的重量(kg)≈				
		方	六角 (扁、厚、特厚)	方、 六角	六角扁	六角厚	六角 特厚	方	六角	六角扁	六角厚	六角特厚
1	3.2		3.7		0.8					0.052		
1.2	3.2		3.7		0.8					0.050		
1.4	3.2		3.7		1					0.062		
1.6*	3.2		3.7	1.3	1.2				0.075	0.069		
2*	4		4.6	1.6	1.2				0.119	0.121		
2.5*	5		5.8	2	1.5				0.220	0.215		
3*	5.5	7.7	6.3	2.4	2	4		0.560	0.393	0.330	0.723	
4*	7	9.9	8.1	3.2	2.5	5		0.857	0.844	0.651	1.633	
5*	8	11.3	9.2	4	3	6		1.289	1.246	0.910	2.364	
6*	10	14.1	11.5	5	4	7.5		2.754	2.317	1.826	4.381	
8*	14	19.8	16.2	6	5	9		6.682	5.674	4.671	8.530	
10*	17	24	19.6	8	6	11		13.05	10.99	8.184	15.16	
12*	19	26.9	21.9	10	7	14		19.40	16.32	11.21	22.91	
(14)	22	31.1	25.4	11	8	16		28.81	25.28	17.23	34.93	
16*	24	33.9	27.7	13	8	18	25	39.44	34.12	19.31	44.62	62.00
(18)	27	38.2	31.2	14	9	20	28	53.51	44.19	27.95	63.02	89.12
20*	30	42.4	34.6	16	9	22	32	75.12	61.91	34.15	84.99	124.5
(22)	32	45.2	36.9	18	10	24	35	90.96	75.94	41.41	101.1	148.4
24*	36	50.9	41.6	19	10	26	38	126.6	111.9	54.74	146.2	213.5
(27)	41	57.1	47.3	22	12	28	42	191.7	168.0	85.74	205.9	307.8
30*	46	65	53.1	24	12	32	48	277.2	234.2	109.4	297.2	450.3
36*	55	77.8	63.5	28	14	38	55	441.5	370.9	181.7	502.0	731.6
42	65	91.9	75	32	16	44	65	713.4	598.6	294.4	822.9	1224
48	75	106	86.5	38	18	50	75	114.0	957.3	445.6	1257	1890
56	85		98	45					1420			
64	95		109	51					1912			
72	105		121	58					2584			
80	115		132	64					3393			
90	130		150	72					4872			
100	145		167	80					6732			

注 (1) GB52-76 d: 1.6~48; GB41-76 d: 6~100。其他标准的直径范围可对应H/D的范围查找。

(2) 优选系列:

标准号	GB39-76	GB41-76	GB52-76	GB54-76	GB55-76
d	5~36	20~36	1.6~30	2~30	6~30

表 3-26

## 垫 圈

垫圈 (粗制) (GB 95-76)

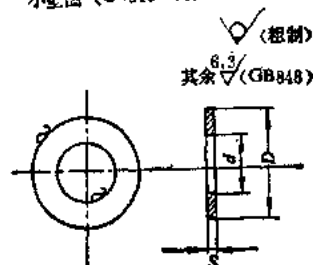
大垫圈 (粗制) (GB 96-76)

小垫圈 (GB 848-76)

垫圈 (GB 97-76)

A 型

B 型

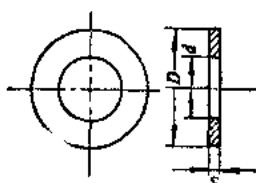


标记示例:

公称直径10mm,材料为A3,

不经表面处理的小垫圈:

垫圈10GB 848-76

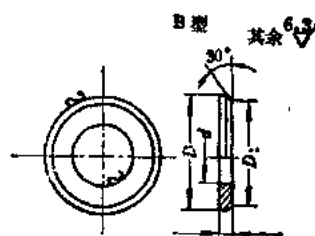


标记示例:

公称直径10mm,材料为A3,

不经表面处理按A型制造的垫圈:

垫圈10GB 97-76

 $D_1 \sim 0.9 D$ 

(mm)

公 称 直 径 (螺纹 直径)	S	d	GB95-76		GB96-76		d	GB97-76		GB848-76	
			D	每1000个钢 垫圈重量 (kg)≈	D	每1000个 钢垫圈重量 (kg)≈		D	每1000个A型 钢垫圈重量 (kg)≈	D	每1000个钢 垫圈重量 (kg)≈
1							1.1	3	0.0014	2.5	0.009
1.2							1.3	3.2	0.0016	2.5	0.008
1.4	0.3						1.5	3.5	0.018	3	0.012
1.6							1.7	4	0.024	3.5	0.017
2*							2.2	5	0.037	4.5	0.029
2.5*	0.5						2.7	6.5	0.108	5.5	0.071
3*							3.2	7	0.120	6	0.079
4*	0.8	4.5			12	0.61	4.2	9	0.308	8	0.224
5*		5.5			14	0.82	5.3	10	0.354	9	0.261
6*	1.5	6.6			18	2.59	6.4	12.5	1.066	11.5	0.844
8*		9			22	3.73	8.4	17	2.021	15.5	1.569
10*	2	11			28	8.17	10.5	21	4.078	18	2.636
12*		14	24	4.885	35	12.69	13	24	5.018	21	3.354
(14)		16	28	6.510	38	14.65	15	28	6.892	24	4.328
16*		18	30	10.65	45	31.46	17	30	11.3	28	9.155
(18)	3	20	34	13.98	50	38.84	19	34	14.7	30	9.969
20*		22	37	16.39	55	47.00	21	37	17.16	34	11.22
(22)		24	39	17.48	60	55.93	23	39	18.42	37	15.54
24*		26	44	31.08	65	87.52	25	44	32.33	39	22.10
(27)		30	50	39.46	70	98.64	28	50	42.32	44	28.41
30*	4	33	56	50.48	80	131.0	31	56	53.64	50	37.95
36*	5	39	66	87.40			37	66	92.07	60	68.77
42	7	45	78	175.2			43	78	182.8	66	108.2
48	8	52	92	284.1			50	92	294.1	78	176.8

续表

公称直径 (螺纹直径)	S	d	GB95-76		GB96-76		d	GB97-76		GB848-76	
			D	每1000个钢垫圈重量 (kg)≈	D	每1000个钢垫圈重量 (kg)≈		D	每1000个A型钢垫圈重量 (kg)≈	D	每1000个钢垫圈重量 (kg)≈
56	9	62	105	398.4							
64		70	115	461.9							
72	10	78	125	588.2							
80		86	140	902.8							
90	12	96	160	1212.1							
100	14	107	175	1655.1							

注 优选系列:

标准号	GB95-76	GB96-76	GB97-76	GB848-76
d	20~36	12~30	2~30	2~24

## 六、止水座板

小型露顶闸门的止水座板可以采用普通钢板,也可以采用非金属材料,如水磨石、瓷砖、塑料板等;对于深水闸门的止水座板建议采用现行《不锈钢、耐酸、耐热钢热轧厚钢板技术条件》中规定的1Cr18Ni9或1Cr18Ni9Ti号钢。这两种不锈钢的机械性能及化学成分见表3-27。

表 3-27 两种不锈钢热轧厚钢板的机械性能及化学成分 (摘自YB542-70)

钢 号	机 械 性 能		化 学 成 分 (%)								
	抗拉强度 $\sigma_b$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	延伸率 $\delta_5$ (%)	碳	硅	锰	铬	镍	钛	其 他	硫	磷
	不 小 于									不 大 于	
1Cr18Ni9	55	38	≤0.12	≤1.00	≤2.00	17~19	8~10.5			0.020	0.035
1Cr18Ni9Ti	55	38	≤0.12	≤1.00	≤2.00	17~19	8~10.5	5(C/0-0.02)~0.80		0.020	0.035

注 本表适用于厚度45~25mm的不锈钢热轧厚钢板。钢板的尺寸及偏差应符合GB709-65的规定;  
1kgf/mm<sup>2</sup>≈10<sup>5</sup>Pa。

## 七、轴套

闸门行走滚轮的轴套,弧门支铰的轴套,其材料可采用青铜或压合胶木。

采用的青铜,应符合现行《铸造铜合金》中规定的各项技术要求。常见青铜的机械性能及化学成分见表3-28。

## 八、闸门止水

中小型电站上的闸门,普遍采用橡皮止水,只有少数高压滑动闸门采用青铜止水。

闸门止水橡皮定型尺寸及物理机械性能应符合下列规定与要求:

(1) 止水橡皮的定型设计各部尺寸如表3-29(参阅图3-1)所示。

表 3-28

铸 造 铜 合 金 (GB1176-74)

组别	代 号	主 要 化 学 成 分 (%)											铸造 方法	机 械 性 能 $\geq$		
		锡	铅	锌	镍	硅	磷	铜	锰	铁	铝	抗拉强度 $\sigma_b$ (kgf/mm <sup>2</sup> )		延伸率 $\delta_5$ (%)	硬度 H B	
		Sn	Pb	Zn	Ni	Si	P	Cu	Mn	Fe	Al					
锡青铜	ZQSn6-6-3	5.0~7.0	2.0~4.0	5.0~2.0				余量				S J	18 20	8 10	80 65	
	ZQSn10-1	9.0~11.0					0.6~1.2	余量				S J	22 25	3 5	80 90	
铝青铜	ZQAl9-4							余量		2.0~4.0	8.0~10.0	S J	40 50	10 12	100 110	
	ZQAl10-3-1.5							余量	1.0~2.0	2.0~4.0	9.0~11.0	S J	45 50	10 20	110 120	

注 表中S表示砂型铸造, J表示金属型铸造; 1kgf/mm<sup>2</sup>  $\approx$  10<sup>7</sup> Pa。

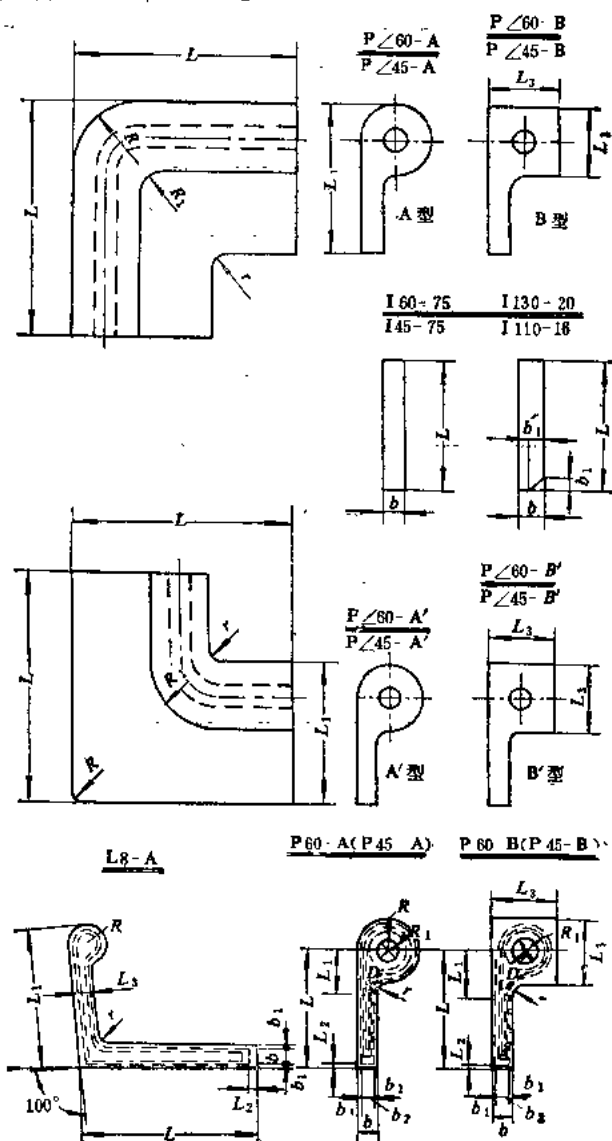


图 3-1 定型设计的止水橡皮尺寸



止水橡皮的设计各部尺寸

表 5-29

闸 门 类 别	止 水 部 位	型 号	各 部 尺 寸 (mm)												应 用 范 围
			(mm)												
			L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	b	b <sub>1</sub>	L <sub>4</sub>	R	R <sub>1</sub>	r	D		
平面闸门和带孔弧形闸门	顶制止水	P 60-A	110	40	6	—	20	6	8	30	24	10	20	1. P 60-A适用于孔口大的闸门, 2. P 45-A适用于孔口中、小的闸门, 3. P 60-B及 P 45-B适用于带孔闸门, 4. P 60-A及 P 60-B内有帆布三层	
		P 60-B	110	40	6	60	20	6	8	—	24	10	20		
		P 45-A	100	31	5	—	16	5	6	22.5	18	8	20		
		P 45-B	100	31	5	45	16	5	6	—	18	8	20		
	转角止水	P∠60-A	350	140	—	—	—	—	—	—	80	20	20	—	1. P∠60-A、P∠45-A及P∠60-B、 P∠45-B适用于下游止水的转角 2. P∠60-A'、P∠45-A'及P∠60-B'、 P∠45-B'适用于上游止水的转角
		P∠60-A'	350	140	—	—	—	—	—	—	20	80	20	—	
		P∠60-B	350	140	—	60	—	—	—	—	80	20	20	—	
		P∠60-B'	350	140	—	60	—	—	—	—	20	80	20	—	
		P∠45-A	350	122.5	—	—	—	—	—	—	55	10	10	—	
		P∠45-A'	350	122.5	—	—	—	—	—	—	10	55	10	—	
		P∠45-B	350	122.5	—	45	—	—	—	—	55	10	10	—	
		P∠45-B'	350	122.5	—	45	—	—	—	—	10	55	10	—	
底 止 水	I 130-20	130	—	—	—	—	20	10	—	—	—	—	—	适用于孔口大的闸门(无帆布), 适用于孔口中、小的闸门(无帆布)	
	I 110-16	110	—	—	—	—	16	8	—	—	—	—	—		
橡 皮 垫	I 60-75	75	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	适用于 P 60-A, 适用于 P 45-A	
	I 45-75	75	—	—	—	—	16	—	—	—	—	—	—		
露顶式弧门	侧 止 水	L 8-A	80	60	6	12	6	3	—	8	—	5	—		

(2) 闸门止水橡皮的物理机械性能,

1) 比重1.2~1.5;

2) 含胶量(新胶)≥60%;

3) 极限强度  $\sigma_b = 130 \sim 150 \text{ kgf/cm}^2 \approx (130 \sim 150) \times 10^5 \text{ Pa}$ ;

4) 肖氏硬度 HS=50~60;

5) 延伸率  $\delta = 400\% \sim 500\%$ ;

表 3-30 止水橡皮弹性模量与硬度关系

肖氏硬度HS	弹性模量E的平均值(kgf/cm <sup>2</sup> )		肖氏硬度HS	弹性模量E的平均值(kgf/cm <sup>2</sup> )	
	压缩时	剪切时		压缩时	剪切时
35~40	16.2~20.0	5.3~5.7	65~70	45.0~54.2	11.3~13.6
45~50	23.1~27.0	6.7~7.2	75~80	64.0~81.6	16.0~20.4
55~60	32.4~38.0	8.3~9.5			

注 1kgf/cm<sup>2</sup>≈10<sup>5</sup>Pa。

6) 弹性模量与硬度关系可参考表3-30;

7) 在-40℃到+40℃温度下工作不发生冻裂或硬化;

8) 试样压缩到原始高度的60%, 然后移去外力, 在5min内测得最大变形不超过0.2%, 压缩应力为 $(9 \sim 10) \times 10^5 \text{ Pa}$ 。试样压缩到原始高度的80%, 压缩应力为 $(3 \sim 4) \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

## 九、焊条

手工焊接用的焊条应符合现行《低碳钢及低合金高强度钢焊条》规定的要求, 选择的焊条型号, 应与主体金属强度相适应。自动焊和半自动焊应采用与主体金属强度相适应的焊丝和焊剂。焊丝应符合现行《焊条用钢丝》和现行《不锈钢酸钢丝》规定的要求。焊接结构几种主要钢种焊接焊条的选择列于表3-31, 焊丝的选择列于表3-32。

手工电弧焊接结构钢及不锈钢用焊条的机械性能及化学成分见表3-33。

表 3-31 焊 条 的 选 择

钢 种	钢 号	焊 条 的 选 用		施 焊 条 件
		一 般 结 构	动载荷、复杂和厚板结构	
普 通 碳素钢	A3, A3F	T42-1、T42-2、T42-3、T42-4、	T42-2、T42-3、T42-4、T42-5、	一般不预热
	A4	T42-5	T42-6、T42-7(T50-6、T50-7)	厚板结构预热>100℃
	A5	T42-6、T42-7	T50-6、T50-7	厚板结构预热>150℃
优 质 碳素钢	08、10、15、 20、25	T42-2、T42-3、T42-4、T42-5	T42-6、T42-7、(T50-6、T50-7)	一般不预热
	30、35、40、 45	T42-6、T42-7	T50-6、T50-7、T60-6、T60-7	厚板结构预热>150℃

续表

普通低合金结构钢	钢号	屈服强度等级 (10 <sup>3</sup> Pa)	厚度 (mm)	焊条选用	施焊条件
	09MnV、09Mn2、09Mn2Cu、 12Mn、09Mn2Si、18Nb	30kg级	≤25	T42-2、T42-3、T42-6、T42-7、 (T50-6、T50-7)	一般不预热
	16Mn、16MnCu、16MnRE、 12MnV、14MnNb、14MnNb	35kg级		(T50-2、T50-3)、T50-6 T50-7	
	15MnV、15MnVCu、16MnNb、 15MnTi(15MnTiCu)	40kg级		T50-6、T50-7(T55-3)、 T55-7	厚板预热100 ~150℃
	15MnVN(15MnVNCu)、 14MnVTiRE	45kg级		T55-6、T55-7、T60-6、 T60-7	预热>150℃
	18MnMoNb、14MnMoV、 (14MnMoVCu)	50kg级		T70-7	预热>200℃、 焊后热处理
	14MnMoVB	55kg级			预热>250℃、 焊后热处理
普通低合金钢 (耐蚀钢)	09MnCuPTi、08MnPRE、 10MnPNbRE、10MnPRE	抗大气海 水腐蚀钢			结502铜磷、结507铜磷

异种钢	钢号	焊条牌号	施焊条件		钢号	焊条牌号	施焊条件	
			焊前预热 温度	焊后消除 应力热处理			焊前预热 温度	焊后消除 应力热处理
	20、20g +16Mn、 16Mng	T42-7、			20CrMo +12-CrMo	TRCr1Mo -V-7	200~250℃	650~720℃ 炉冷
	09Mn2 +16Mn、 16Mng	T50-7			20CrMo +20g			
	ZG25+ 20g、16Mn	T50-7			12CrMn +15-CrMo			
	20g +20MnMo				12CrMo +Cr15Mo	TB25-20-2 TB25-20-7		660~680℃
	15MnV+20 MnMo	T60-7	厚度 >30mm、 预热 100~150℃	550~580℃炉 冷	14MnMoVB +45	T707-铜 T707-镍	200℃	500~520℃ 炉冷
	25+35	T50-7		530~550℃炉 冷	1Cr18Ni9Ti	TB25-13-2		
	35+45	T50-7、 T55-7		580~600℃炉 冷	+20g	TB25-13-7		
	45+16Mn			550~530℃炉 冷至300℃出炉	1Cr18Ni9Ti	TB25-13-2		
					+20MnMo	TB25-13-7		
	A3、A4 +16Mn	T42-2、T42-3、 T42-6、 T42-7			1Cr18Ni9Ti +15CrMo	TB25-20-2 TB25-20-7		

续表

复合钢板及不锈钢衬里

钢 号	焊 条 的 选 用		
	基 层	过 渡 层	复 层
0Cr13+A3	T42-2, T42-7		
0Cr13+16Mn(15MnV)	T50-2, T50-7, (T55-7)	TB25-13-2 TB25-13-7	TB18-8-2, TB18-8-7 TB18-8Nb-2, TB18-8Nb-7
0Cr13+12CrMo	TRCrMo-7		
0Cr18Ni9Ti+A3	T42-2, T42-7		
0Cr18Ni9Ti+16Mn(15MnV)	T50-2, T50-7, (T55-7)		
0Cr17Ni13Mo2Ti+A3	T42-2, T42-7	TB25-13Mo2-2	TB18-8Mo2Nb-2
0Cr17Ni13Mo2Ti+16Mn(15MnV)	T50-2, T50-7, (T55-7)		

低合金钢及不锈钢

钢 号	焊 条 牌 号	钢 号	焊 条 牌 号	钢 号	焊 条 牌 号
12CrMo	TRCr1Mo-2 TRCr1Mo-7	0Cr18Ni9Ti	TB18-8Nb-2	0Cr17Ni13Mo2Ti	TB18-8Mo2Nb-2
15CrMo	TRCr1MoV-7	1Cr18Ni9Ti	TB18-8-2	00Cr17Ni13Mo2	TB18-8Mo2D-2
12Cr2Mo1	TRCr3Mo1 VNB-7	00Cr18Ni10	TB18-8D-2	0Cr17Ni13Mo3Ti	

表 3-32

焊 丝 的 选 择

母 材		焊 接 材 料	
钢 种	钢 号	焊 丝	焊 剂
普通碳素钢	A3, A3g, A3F	H08A	焊剂430, 431
优质碳素钢	15, 20, 20A	H08A, H08MnA	焊剂430, 431
	25	H10Mn2	焊剂330
碳素锅炉钢	15g, 20g, 25g	H08MnA, H08MnSi H10Mo2	焊剂430, 431 焊剂330
普通低合金钢	30kg级 09MnV 09Mn2 09Mn2Cu 09Mn2Si 12Mn 18Nb	H08A H08MnA	焊剂430, 431

续表

母 材		焊 接 材 料		
钢 种	钢 号	焊 丝	焊 剂	
普通低合金钢	35kg级	16Mn 16MnCu 16MnRe 10MnSiCu 14MnNbb 14MnNb 12MnV	不开坡口对接 H08A 中板坡口对接 H08MnA H10Mn2 H10MnSi	焊剂430、431
		厚板深坡口 H10Mn2 H08Mn MoA	焊剂130、230	
	40kg级	15MnV 15MnVCu 15MnVRe 15MnTi 15MnTi Cu 14MnMoNb	不开坡口对接 H08MnA 中板开坡口对接 H10MnSi H10Mn2 H08Mn2Si	焊剂430、431
		厚板深坡口 H08MnMoA	焊剂250、350	
	45kg级	15MnVN 14MnVTiRe 15MnVNCu	H08MnMoA H10Mn2 H08Mn2Si	焊剂350
	50kg级	18MnMoNb 14MnMoV 14MnMoVCu 14MnMoVN	H08Mn2MoA H08Mn2MoVA H08Mn2NiMo	焊剂250、350
	55kg级	14MnMoVB	H08Mn2MoVA H08Mn2NiMoA	焊剂250、350
低温用钢	-70℃	09Mn2V 09MnTiCuRe	H08Mn2MoA	焊剂250
耐 热 钢	12CrMo 15CrMo 12Cr1MoV Cr5Mo	H10CrMo、H12CrMo H12CrMo H08CrMoVA HCr5Mo	焊剂250、350	
不锈钢耐酸钢	0Cr13 1Cr13	H0Cr14	焊剂260	
	2Cr13	H1Cr13		
	0Cr18Ni9 1Cr18Ni9	H0Cr19Ni9		
	0Cr18Ni9 1Cr18Ni9Ti	H0Cr18Ni9Ti H0Cr18NiSi2 H00Cr19Ni12Mo2		
	00Cr18Ni10	H00Cr22Ni10		
	0Cr17Ni13Mo2Ti	H00Cr17Ni13Mo2		

手工电弧焊结构钢及不锈钢用焊条机械性能及化学成分

表 3-33

焊条代号	机械性能			化学成分 (%)								电源种类	主 要 用 途	
	抗拉强度 $\sigma_b$ ( $10^7$ Pa)	延伸率 $\delta_5$ (%)	冲击值 $a_k$ ( $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ )	碳 C	硅 Si	锰 Mn	磷 P	硫 S	铬 Cr	钒 V	钼 Mo			铌 Nb
T 42-2	>42	≥18	≥8	≤0.12	≤0.25	0.3~0.6	≤0.05	≤0.035						焊接较重要的低碳结构钢
T 42-4	>42	≥18	≥8	≤0.12	≤0.15	0.5~0.9	≤0.05	≤0.035						焊接较重要的低碳结构钢
T 42-6	>42	≥22	≥14	≤0.12	≤0.5	0.5~0.8	≤0.04	≤0.035						焊接重要的受动载的低碳钢及低合金钢结构
T 42-7	>42	≥22	≥14	≤0.12	≤0.5	0.5~0.8	≤0.04	≤0.035						焊接重要的受动载的低碳钢及低合金钢结构
T 50-2	≥50	≥16	≥6	≤0.12	≤0.3	0.5~0.9	≤0.05	≤0.035						焊接受静载的低合金结构钢
T 50-6	≥50	≥20	直流>13	≤0.12	≤0.65	0.8~1.5	≤0.04	≤0.035						焊接在常温及低温下受动载的中碳钢和低合金钢结构
T 50-7	≥50	≥20	≥13	≤0.12	≤0.65	0.8~1.3	≤0.04	≤0.035						焊接在常温及低温下受动载的中碳钢和低合金钢结构
T 55-6	≥55	≥20	≥12	≤0.12	0.3~0.7	0.9~1.5	≤0.04	≤0.035						焊接中碳钢及相应强度的普低钢结构
T 60-6	≥60	≥18	≥10	≤0.12	0.3~0.7	1.0~1.6	≤0.04	≤0.035			0.1~0.4			焊接中碳钢及相应强度的普低钢结构
T 60-7	≥60	≥18	≥10	≤0.12	0.3~0.7	1.0~1.6	≤0.04	≤0.035			0.1~0.4			焊接中碳钢及相应强度的普低钢结构
T 70-7	≥70	≥16	≥7	≤0.12	0.3~0.8	1.2~1.8	≤0.035	≤0.035			0.3~0.6			焊接相应强度的低合金强度钢结构
TRCrMo-7	≥50	≥18	≥8	≤0.12	≤0.50	0.5~0.9	≤0.04	≤0.035	0.35~0.65		0.4~0.7			用于工作温度在510℃以下的 12 铬相变珠光体耐热钢的焊接
TRCr1Mo-7	≥50	≥16	≥8	≤0.12	≤0.50	0.5~0.9	≤0.04	≤0.035	0.7~1.10		0.4~0.7			用于工作温度在520℃以下的 15 铬相变珠光体耐热钢的焊接
TRCr1MoV-7	≥50	≥16	≥8	≤0.12	≤0.50	0.5~0.9	≤0.04	≤0.035	0.8~1.2	0.35	0.4~0.7			用于工作温度在540℃以下的 12 铬相变珠光体耐热钢的焊接

续表

焊条代号	机械性能			化学成分 (%)								电源种类	主要用途	
				碳	硅	Mn	P	S	Cr	V	钼			Nb
	抗拉强度 $\sigma_b$ ( $10^3$ Pa)	延伸率 $\delta_5$ (%)	冲击值 $a_k$ ( $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ )	C	Si									钨
TRCr3Mo1VNb-7	$\geq 55$	$\geq 14$	$\geq 6$	$\leq 0.12$	$\leq 0.50$	$0.5 \sim 0.9$	$\leq 0.04$	$\leq 0.035$	$2.4 \sim 3.0$	$0.25 \sim 0.50$	$0.7 \sim 1$	$0.35 \sim 0.65$	直	用于焊接12铬3钒钨钒铌(Co11)类珠光体耐热钢结构
TB18-8-2	$\geq 55$	$> 30$	铁素体含量 3~15%	$\leq 0.08$	$\leq 1.20$	$\leq 2.50$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$18 \sim 21$			镍Ni 8~11	交直	焊接工作温度低于300℃耐腐蚀的0铬18镍9,1铬18镍9铁的不锈钢结构
TB18-8-7	$\geq 55$	$\geq 30$	铁素体含量 3~15%	$\leq 0.08$	$\leq 1.20$	$\leq 2.50$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$18 \sim 21$			8~11	直	焊接工作温度低于300℃耐腐蚀的镍18镍9型不锈钢结构
TB18-8Nb-2	$\geq 55$	$\geq 25$	铁素体含量 3~15%	$\leq 0.08$	$\leq 1.00$	$\leq 2.50$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$18 \sim 21$			8~11	交直	焊接重要的含钛稳定的镍18镍9型不锈钢
TB18-8Nb-7	$\geq 55$	$\geq 25$	铁素体含量 3~15%	$\leq 0.08$	$\leq 1.00$	$\leq 2.50$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$18 \sim 21$			8~11	直	焊接重要的含钛稳定的镍18镍9型不锈钢结构
TB18-8D-2	$\geq 52$	$\geq 35$	铁素体含量 3~15%	$\leq 0.04$	$\leq 1.00$	$\leq 2.50$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$18 \sim 21$			8~11	交直	焊接超低碳镍18镍9不锈钢或0铬18镍9铁不锈钢结构
TB25-13-2	$\geq 55$	$\geq 25$		$\leq 0.12$	$\leq 1.00$	$\leq 2.50$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$22 \sim 26$			11~14	交直	焊接同类型的不锈钢结构
TB25-13-7	$\geq 55$	$\geq 25$		$\leq 0.12$	$\leq 1.00$	$\leq 2.50$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$22 \sim 26$			11~14	直	焊接同类型的不锈钢结构
TB25-20-2	$\geq 55$	$\geq 25$		$\leq 0.20$	$\leq 0.70$	$\leq 6.00$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$24 \sim 28$			18~21	交直	焊接高温条件下工作的同类型耐热不锈钢也可焊接镍5相,镍9相,镍13等
TB25-20-7	$\geq 55$	$\geq 25$		$\leq 0.20$	$\leq 0.70$	$\leq 6.00$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$24 \sim 28$			18~21	直	焊接高温条件下工作的同类型耐热不锈钢也可焊接镍5相,镍9相,镍13等
TB25-13Mo2-2	$\geq 55$	$\geq 25$		$\leq 0.12$	$\leq 1.00$	$\leq 2.50$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$22 \sim 26$			11~14	交直	焊接耐硫酸介质腐蚀的同类型不锈钢

自动半自动焊丝的化学成分和相应的焊剂及其用途见表3-34。

表 3-34 焊丝的化学成分和相应的焊剂及其用途

焊 丝 牌 号	焊剂牌号	焊 丝 化 学 成 分 (%)										用 途
		碳	锰	硅	铬	镍	钼	钒	钛	硫	磷	
										不 大 于		
H08A	430、431	≤0.10	0.3~0.55	≤0.03	≤0.20	≤0.30				0.04	0.04	各种低碳及低合金结构钢自动焊及半自动焊
H08MnA	430、431	≤0.10	0.8~1.1	≤0.07	≤0.20	≤0.30				0.03	0.03	
H08Mn2Si	430、431	≤0.11	1.7~2.1	0.65~0.95	≤0.20	≤0.30				0.04	0.04	低合金钢自动焊
H08MnMoA	250、350	≤0.10	1.2~1.6	≤0.25	≤0.20	≤0.30	0.3~0.5		0.15(加入量)	0.03	0.03	
H08Mn2MoVA	250、350	0.06~0.11	1.6~1.9	≤0.25	≤0.20	≤0.30	0.5~0.7	0.06~0.12	0.15(加入量)	0.03	0.03	
H10Mn2	330	≤0.12	1.5~1.9	≤0.07	≤0.20	≤0.30				0.04	0.04	
H10MnSi	430、431	≤0.14	0.8~1.1	0.6~0.9	≤0.20	≤0.30				0.03	0.04	
H0Cr19Ni9	260	≤0.06	1~2	0.5~1	18~20	8~10				0.02	0.03	

## 十、埋设件二期混凝土

埋设件二期混凝土标号，一般采用200~300号，最低不小于150号。

## 第二节 容 许 应 力

### 一、闸门承重结构的容许应力

闸门承重结构的容许应力，应根据表3-35规定的尺寸分组，按表3-36采用。焊缝和螺栓的容许应力按表3-37和表3-38采用。

采用表3-36至表3-38的容许应力值时，在校核条件下提高15%；在特殊情况下，除局部应力外，不超过 $0.85\sigma_s$  ( $\sigma_s$ —屈服点)。

表 3-35 钢 材 的 尺 寸 分 组

组 别	钢 材 尺 寸 (mm)			
	2 号、3 号 钢			16 锰 钢
	棒钢的直径或厚度	型钢和异型钢的厚度	钢 板 的 厚 度	钢材的直径或厚度
第 1 组	≤40	≤15	4~20	≤16
第 2 组	>40~100	>15~20	>20~40	17~25
第 3 组	>100~250	>20	>40~60	26~36
第 4 组				38~50

注 (1)棒钢包括圆钢、方钢、扁钢和六角钢；型钢包括角钢、工字钢和槽钢。

(2)工字钢和槽钢的厚度系指腹板的厚度。



表 3-36

钢材的容许应力 ( $10^5 \text{Pa}$ )

应力种类	符 号	2 号 钢			3 号 钢			16 锰 钢			
		第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
抗拉、抗压和 抗 弯	$[\sigma]$	1450	1350	1250	1600	1500	1450	2300	2200	2050	1900
抗 剪	$[\tau]$	900	800	700	950	900	850	1350	1300	1200	1100
局 部 承 压	$[\sigma_{ed}]$	2200	2000	1900	2400	2300	2200	3500	3300	3100	2900
局部紧接承压	$[\sigma_{ej}]$	1100	1000	950	1200	1150	1100	1750	1650	1550	1450

注 (1)局部承压应力不乘调整系数;

(2)局部承压是指构件腹板的小部分表面受局部荷载的挤压或端面承压(磨平顶紧)等情况;

(3)局部紧接承压是指可动性小的铰在接触面的投影平面上的压应力。

表 3-37

焊缝的容许应力 ( $10^5 \text{Pa}$ )

焊缝 分类	应 力 种 类		符 号	自动焊、半自动焊和用 T42X 型 焊条的手工焊, 当钢号为						自动焊、半自动焊和用 T50X 型焊条的手工焊, 当钢号为			
				2 号 钢			3 号 钢			16 锰 钢			
				第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
对 接 焊 缝	抗 压		$[\sigma^A]$	1450	1300	1250	1600	1500	1450	2300	2200	2050	1900
	抗 拉	1. 当用自动焊时	$[\sigma^A]$	1450	1300	1250	1600	1500	1450	2300	2200	2050	1900
		2. 当用半自动 焊或手工焊时, (1) 精确方法	$[\sigma^A]$	1450	1300	1250	1600	1500	1450	2300	2200	2050	1900
		焊缝质量的检查 为: (2) 普通方法	$[\sigma^A]$	1250	1100	1050	1350	1200	1150	2000	1900	1750	1650
	抗 剪		$[\tau^A]$	850	750	700	950	900	850	1350	1300	1200	1100
贴角 焊缝	抗拉、抗压和抗剪		$[\tau^A]$	1050	950	900	1150	1050	1000	1600	1500	1400	1300

注 (1)检查焊缝质量的普通方法系指外观检查、测量尺寸、钻孔检查等方法; 精确方法是在普通方法的基础上, 用“X”射线、超声波等方法进行补充检查;

(2)仰焊焊缝的容许应力按上表降低20%;

(3)安装焊缝的容许应力按上表降低10%。

表 3-38

普通螺栓连接的容许应力 ( $10^5\text{Pa}$ )

螺栓种类	应力种类	符 号	螺栓的钢号		结 构 的 钢 号											
			3号钢	16锰钢	2号钢			3号钢			16锰钢					
					第1组	第2组	第3组	第1组	第2组	第3组	第1组	第2组	第3组	第4组		
精制螺栓	抗 拉	$[\sigma]$	1250	1850												
	抗剪(I类孔)	$[\tau]$	1300	1900												
	承压(I类孔)	$[\sigma_c]$			2650	2400		2900	2750		4200	3950	3700	3450		
粗制螺栓	抗 拉	$[\sigma]$	1250	1850												
	抗 剪	$[\tau]$	850	1250												
	承 压	$[\sigma_c]$			1750	1600		1900	1850		2800	2650	2500	2350		
铆栓	抗 拉	$[\sigma]$	1050	1500												

注 (1) 孔壁质量属于下列情况者为 I 类孔:

- 1) 在装配好的构件上按设计孔径钻成的孔;
- 2) 在单个零件和构件上按设计孔径分别用钻模钻成的孔;
- 3) 在单个零件上先钻成或冲成较小的孔径, 然后在装配好的构件上扩钻至设计孔径的孔。

(2) 当螺栓直径大于 40mm 时, 螺栓容许应力应予降低, 对于 3 号钢降低 4%, 对于 16 锰钢降低 6%。

对于下列情况, 表 3-36 至表 3-38 的数值应乘以调整系数:

- (1) 大型工程的工作闸门 0.9~0.95;
- (2) 小型工程的闸门 1.05。

特殊情况, 另行考虑。

## 二、机械零件容许应力

(1) 闸门的机械零件系指吊耳、连接、支承部分的零部件和铸、锻造主轨等。机械零件的容许应力按表 3-39 采用。

表 3-39

机械零件的容许应力 ( $10^5\text{Pa}$ )

应力种类	符 号	普通碳素钢		低合金钢	优质碳素结构钢		碳 素 铸 钢				合金铸钢		合金结构钢	
		A3	A5	16Mn	35	45	ZG25	ZG35	ZG45	ZG55	ZG50 Mn2	ZG35 CrMo	35 Mn2	40Cr
抗拉、抗压和抗弯	$[\sigma]$	1000	1200	1400	1300	1450	1150	1200	1400	1500	1800	1700 (2350)	1300 (2800)	(3200)
抗 剪	$[\tau]$	650	750	900	850	950	850	900	1050	1150	1500	1300 (1800)	850 (1900)	(2150)
局部承压	$[\sigma_d]$	1500	1800	2100	1950	2200	1700	1800	2000	2200	2800	2500 (3450)	1950 (4300)	(4850)

续表

应力种类	符 号	普通碳素钢		低合金钢	优质碳素结构钢		碳 素 铸 钢				合金铸钢		合金结构钢	
		A3	A5	16Mn	35	45	ZG25	ZG35	ZG45	ZG55	ZG50Mn2	ZG35CrMo	35Mn2	40Cr
局部紧接承压	$[\sigma_{ef}]$	800	950	1100	1050	1200	900	950	1100	1200	1550	1350 (1900)	1050 (2300)	(2650)
孔壁抗拉	$[\sigma_k]$	1200	1450	1800	1500	1700	1300	1400	1550	1700	2200	1900 (2650)	1500 (3300)	(3750)

注 (1) 碳素铸钢系指 I 级、II 级;

(2) 括号内为调质处理后的数值;

(3) 孔壁抗拉容许应力系指固定结合的情况; 若系活动结合, 则应按表值降低 20%;

(4) 表列“合金结构钢”的容许应力, 适用于截面尺寸为 25mm。如按冶标规定, 由于厚度影响, 屈服点有减少时, 各类容许应力, 可按屈服点减少比例予以减少。

(2) 铸铁件的容许应力按表 3-40 采用。

表 3-40

铸铁件的容许应力 ( $10^5 \text{Pa}$ )

应 力 种 类	符 号	铸 铁 牌 号		
		HT15-33	HT20-40	HT25-47
轴心抗压和弯曲抗压	$[\sigma_c]$	1200	1500	2000
弯曲抗拉	$[\sigma_w]$	350	450	600
抗 剪	$[\tau]$	250	350	450
局部承压	$[\sigma_{cd}]$	1700	2100	2600
局部紧接承压	$[\sigma_{ef}]$	600	750	900

(3) 轴套的承压容许应力按表 3-41 采用。

表 3-41

轴套的容许应力 ( $10^5 \text{Pa}$ )

轴 和 轴 套 的 材 料	符 号	径 向 承 压
钢对 10-1 铸锡磷青铜	$[\sigma_{cd}]$	400
钢对 9-4 铸铝铁青铜		500
钢对压合胶木		300

注 钢对压合胶木的承压容许应力, 当两端有限制时, 可提高为  $(350 \sim 400) \times 10^5 \text{Pa}$ 。

## 三、木材的容许应力

木材的容许应力按表 3-42 采用。

表 3-42

木材的容许应力 ( $10^5\text{Pa}$ )

应力种类	符 号	针 叶 材		阔 叶 材	
		东北落叶松	红 松	柞木(柞木)	桦 木
承 压	$[\sigma_{ca}]$	17	13	30	22

#### 四、混凝土容许应力

混凝土的容许应力按表3-43采用。

表 3-43

混凝土的容许应力 ( $10^5\text{Pa}$ )

应力种类	符 号	混 凝 土 标 号			
		150*	200*	250*	300*
承 压	$[\sigma_k]$	50	70	90	110

#### 五、钢材和铸钢件的物理性能

钢材和铸钢件的物理性能按表3-44采用。

表 3-44

钢材和铸钢件的物理性能

材 料 名 称	弹性模量 $E$ (Pa)	剪切模量 $G$ (Pa)	线胀系数 $\alpha$ (以摄氏每度计)	容 重 $\gamma$ (kgf/m <sup>3</sup> )
钢材、铸钢件	$2.1 \times 10^{11}$	$0.81 \times 10^{11}$	$1.2 \times 10^{-5}$	7850

## 第四章 平面钢闸门的设计与计算

### 第一节 结构布置与计算的一般规定

#### 一、结构布置

平面钢闸门结构布置的主要内容有：确定闸门上需要设置哪些构件，每种构件需要的数目以及确定每个构件的所在位置等。

##### (一) 面板布置

平面钢闸门的面板一般应布置在受水压的迎水面，这样可以避免梁格和行走支承浸没于水中而聚积污物。当闸门承受双向水头时，面板一般设置在较大水压力的一面。挡潮闸的工作闸门，面板应布置于迎海水侧。检修闸门门底流速较小，为了设置止水的方便，面板可以布置在背水面；但当检修闸门在关闭孔口期间，泥砂有淤积梁格的可能时，面板仍应布置在迎水面。

##### (二) 梁格布置

###### 1. 布置形式

根据闸门跨度的大小，可以将梁格的布置分为三种情况。

(1) 简式。如图4-1(a)所示，对于跨度很小而门高较大的闸门，可不设次梁，面板直接由多根主梁支承。

(2) 普通式。如图4-1(b)所示，当主梁的跨度增大时，为了节约主梁的材料，应减少主梁的数目而加大主梁的截面尺寸，从而主梁的间距也相应地增大，为了不使面板增厚，可以设置竖直次梁来增加对面板的支承。这种梁格的布置形式适用于中等跨度的闸门。

(3) 复式。如图4-1(c)所示，当主梁的跨度更大时，主梁的数目应进一步减少，因

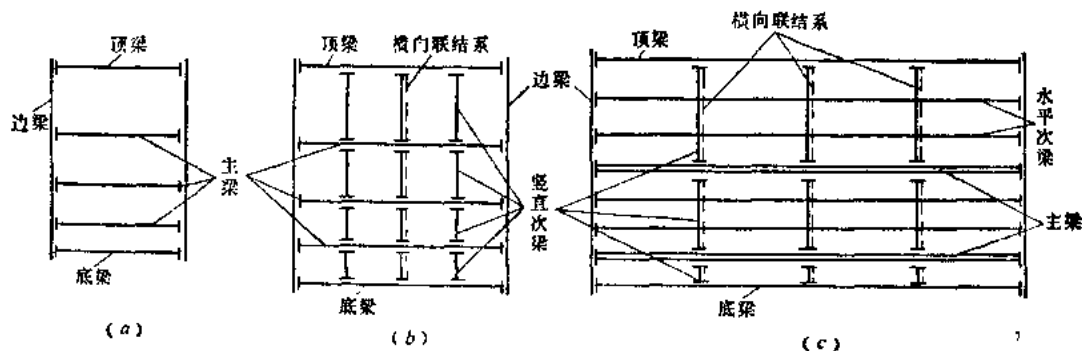


图 4-1 梁格布置图  
(a)简式；(b)普通式；(c)复式

而主梁的间距又进一步加大，为了使面板仍能保持经济合理的厚度，宜在竖直次梁之间再设置与主梁方向相平行的水平次梁。这种梁格的布置形式，比前两种梁格较为复杂，故称为复式梁格。

## 2. 连接形式

梁格的连接形式如图4-2所示，有等高连接和降低连接两种形式。

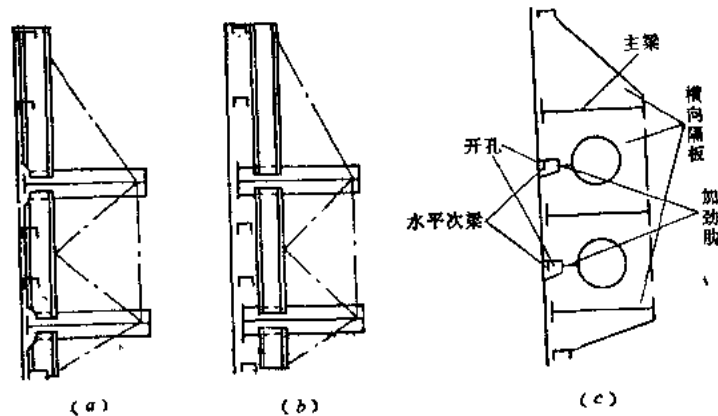


图 4-2 梁格连接的形式

(1) 等高连接。如图4-2(a)所示，就是使水平次梁、竖直次梁的上翼缘表面与主梁的上翼缘表面齐平，都直接与面板相连。这种连接形式的优点是：梁格与面板形成刚强的整体，面板为四边支承，受力条件较好；同时，由于面板与梁格牢固地连接成一个整体，部分面板可以作为梁截面的一部分，以减少梁格的用钢量。这种连接形式的缺点是：水平次梁遇到竖直次梁时，水平次梁需要断开，然后再与竖直次梁连接起来；竖直次梁遇到主梁时，竖直次梁也需断开，因此，构件多，制造费工，所以，现在越来越多地采用横向隔板兼作竖直次梁（图4-2c）。此时，由于隔板的截面尺寸较大，强度富裕较多，故可以在隔板上开孔，使水平次梁直接从中穿过而成为连续梁，从而改善了水平次梁的受力条件，也简化了接头的构造。这种连接叫做具有横向隔板的等高连接。

(2) 降低连接。如图4-2(b)所示，这种连接形式是主梁和水平次梁直接与面板相连，而竖直次梁则离开面板降低到水平次梁后面，使水平次梁可以在面板与竖直次梁之间穿过而成为连续梁。此时面板为两边支承，面板和水平次梁都可看作为主梁截面的一部分，参加主梁的整体抗弯。

布置梁格时，闸门的梁系应尽量采用同一层（即等高连接）的布置方式，并应考虑制造、运输、安装和防锈等方面的要求。另外，尚需避免一切积水的可能性。例如，角钢、槽钢的自由边缘应朝下，工字钢应在腹板上开 $\phi 6\text{mm}$ 左右的排水孔等。

## (三) 主梁布置

平面闸门一般按孔口型式及宽高比布置成双主梁或多主梁形式。当闸门的跨度 $L$ 较小，而门高 $H$ 较大，即 $L \leq H$ 时，主梁的数目一般应多于两根，称多主梁式。反之，当闸门的跨度较大，而门高较小，即 $L \geq 1.5H$ 时，主梁的数目一般应减少到两根，称为双主

梁式。

### 1. 主梁布置条件

主梁布置应考虑的因素:

(1) 主梁一般按等荷载要求布置, 这样每个主梁所需的截面尺寸相同, 便于制造。对于露顶式的双主梁闸门, 主梁宜布置在静水压力合力线上下等距离的位置上, 如图4-3所示。同时应注意: 两主梁间的距离 $a$ 值要尽量大些; 上主梁到闸门顶缘的距离:  $a_0 \leq 0.45H$ 。对于高水头的深孔闸门, 一般孔口尺寸较小, 门顶与门底的水压强度差值相对较小, 此时, 主梁的位置也可按等间距来布置。设计时应按最下面的那根受力最大的主梁来设计, 闸门各主梁也采用相同的截面, 这样主梁的钢材用量虽然稍有增加, 但给加工制造带来一定的方便。

(2) 主梁间距应适应制造、运输和安装的条件。

(3) 主梁间距应满足行走支承部分的要求。

(4) 底主梁到底止水的距离应符合底缘布置的要求。一般工作闸门和事故闸门下游倾角不小于 $30^\circ$ , 以免在启闭闸门时, 门底过水的射流冲击主梁腹板及翼缘而形成真空, 从而引起闸门振动并增加启门力。当闸门支承在非水平底槛上时, 其夹角可适当增减。当不能满足 $30^\circ$ 的要求时应采取适当补气措施。例如在主梁腹板上开通气孔, 孔径根据主梁高度一般采用 $150 \sim 300\text{mm}$ 。对于部分利用水柱的平面闸门, 其上游倾角不应小于 $45^\circ$ , 应尽量采用 $60^\circ$ , 见图4-4。

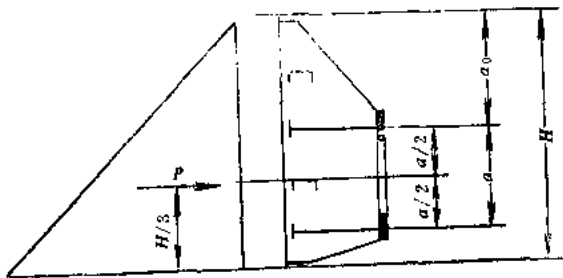


图 4-3 双主梁平面闸门的主梁布置

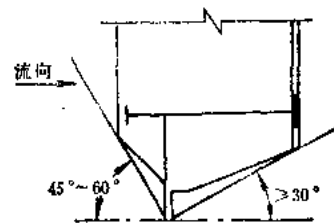


图 4-4 底主梁布置

### 2. 主梁位置的确定

根据等荷载布置的多主梁闸门的主梁位置, 可用图解和数解两种方法确定。

(1) 采用图解法确定主梁位置。对于露顶闸门, 承受等荷载的主梁位置如图4-5(a)所示。以水头 $H$ 为直径(图中的 $AB$ )作一个半圆。根据主梁的数目 $n$ 将直径分为 $n$ 等分, 从等分点作水平线交圆弧于1、2、……等点, 然后以直径顶点 $A$ 为圆心, 分别以 $A1$ 、 $A2$ ……为半径画弧线与直径相交于 $B_1$ 、 $B_2$ ……它们就是作用于主梁上相等荷载面积的边界, 主梁的位置就在三角形与梯形形心通过的水平面内。

三角形的形心在距离底边为三分之一的高度上, 如图4-5(a)中所示, 梯形的形心求法, 可将每个梯形的斜边分作三等分, 从每个梯形竖边的顶底两点分别作与斜边的上、下

两个三分点的连线，从这两根连线的交点  $d$  引水平线，这条水平线就通过该梯形面积的形心。

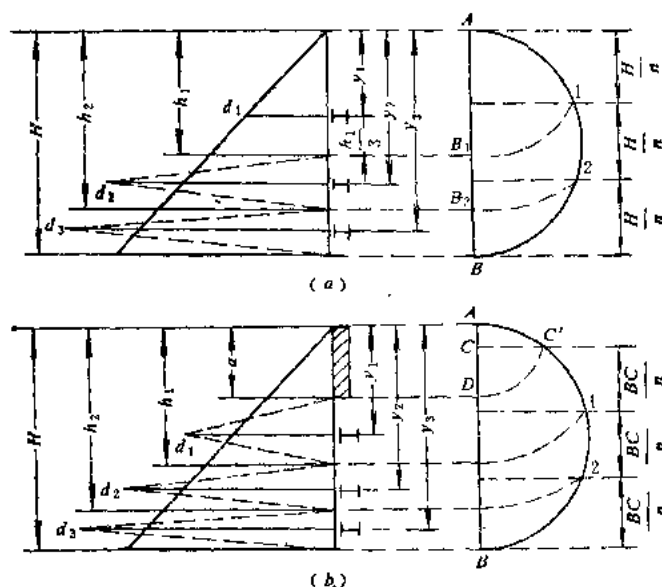


图 4-5 图解法确定等荷载梁位置  
(a)露顶闸门; (b)潜孔闸门

对于潜孔闸门，如图4-5(b)所示，在水面以下深度为  $a$  处的潜孔闸门，承受的水压力为梯形分布。确定主梁位置的方法与露顶闸门确定主梁位置的方法类似，不同之处仅在于应以半圆直径的端点  $A$  为圆心，以水深  $a$  为半径画弧与半圆相交于  $C'$ ，从  $C'$  再引水平线交  $AB$  于  $C$ 。然后根据主梁的数目来等分  $BC$ ，以下的作图步骤与露顶闸门完全相同。

对于露顶闸门，为了方便，也可用表4-1快速地确定各等荷载主梁的位置。

(2) 采用数解法确定主梁位置，可以按下列公式进行计算：

对于露顶闸门（图4-5a），假定第  $k$  ( $k=1, 2, \dots$ ) 根主梁至水面的距离为  $y_k$ ，则

$$y_k = \frac{2H}{3\sqrt{n}} [k^{1.5} - (k-1)^{1.5}] \quad (\text{m}) \quad (4-1)$$

式中  $n$  ——主梁根数；

$k$  ——由门顶算起的主梁号数；

$H$  ——水面至门底的距离。

对于潜孔闸门（图4-5b）：

$$y_k = \frac{2H}{3\sqrt{n+\beta}} [(k+\beta)^{1.5} - (k+\beta-1)^{1.5}] \quad (\text{m}) \quad (4-2)$$

$$\beta = \frac{na^2}{H^2 - a^2}$$

式中  $a$  ——水面至门顶的距离；

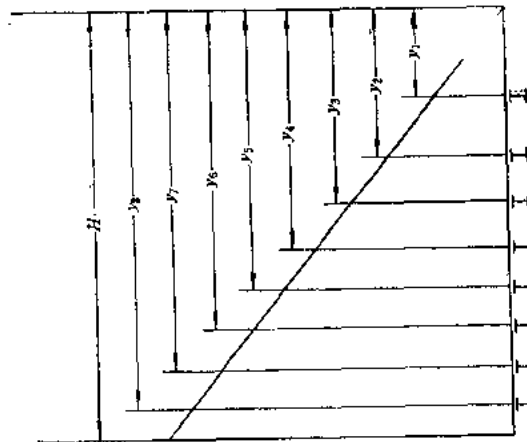
其余符号同前。

以上仅是确定主梁位置的一般原则，在工程实践中由于考虑其他因素，主横梁的荷载



表 4-1

等荷载分布时主横梁所在位置(露顶闸门)



主横梁 数目 主横梁 位置	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{y_1}{H}$	0.471	0.384	0.333	0.289	0.272	0.252	0.235
$\frac{y_2}{H}$	0.862	0.756	0.610	0.543	0.498	0.460	0.431
$\frac{y_3}{H}$		0.910	0.790	0.705	0.614	0.596	0.558
$\frac{y_4}{H}$			0.935	0.836	0.763	0.706	0.661
$\frac{y_5}{H}$				0.948	0.865	0.802	0.749
$\frac{y_6}{H}$					0.957	0.886	0.829
$\frac{y_7}{H}$						0.963	0.901
$\frac{y_8}{H}$							0.968

并不一定都是等荷载的。尤其是采用多主梁时，顶、底梁的荷载往往不能与中部主梁一样（因要满足底缘角度要求），故需进行特别的计算。

#### （四）次梁与联结系的布置

布置水平次梁的主要目的，是为了节约面板钢材，调整梁格尺寸，以使面板厚度相等。水平次梁的间距一般取40~120cm，并应随着水压力沿门高的变化而布置成上疏下密。在一般情况下，水平次梁密，面板较薄，则比较经济，所以水平次梁的布置应与钢面板的计算同时进行。

竖直次梁在等高连接的钢闸门中与水平次梁一起支承面板，起到节约面板钢材的作用；并且如前所述，也能起到改善水平次梁受力的作用，见图4-2(c)所示的布置形式。在

降低连接的钢闸门中，竖直次梁支承在水平次梁后面，起到改善水平次梁受力的作用，然后，竖直次梁将荷载传给主梁。竖直次梁的布置应与主梁的型式互相配合，当主梁采用桁架时，竖直次梁一般应布置在主桁架的节点上，其间距即为主桁架的节间长度。故布置竖直次梁时，应考虑主桁架节间划分的要求。竖直次梁的间距，一般为  $1 \sim 3 \text{ m}$ ，以免面板过厚。

横向联结系（又称竖向联结系）用来承受全部次梁（包括顶、底梁）传来的水压力，并将之传给主梁；当水位变更等原因而引起各主梁的受力不均时，横向联结系可以均衡各主梁的受力并且保证闸门横截面的刚度。横向联结系可以布置在每根竖直次梁所在的竖平面内，或每隔一根竖直次梁布置一个。当闸门受到偶然作用的外力而产生扭转时，横向联结系能够保证闸门横截面形状不变，增加其抗扭刚度。

横向联结系的型式有隔板式和桁架式两种，如图 4-6 所示。隔板式用的较多，它适用于多主梁式闸门。桁架式常用在主梁截面高度和间距都较大的双主梁闸门中。小型水电站工程上的闸门通常采用隔板式横向联结系。横向联结系的数目宜取单数，其间距一般不大于  $4 \text{ m}$ ，在双主梁闸门中也不大于主梁间距的两倍。

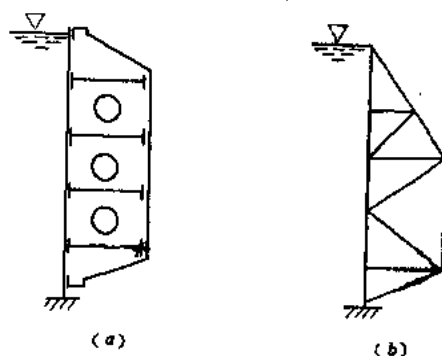


图 4-6 横向联结系的型式  
(a)隔板式；(b)桁架式

纵向联结系（又称门背联结系或起重桁架）位于闸门各主梁受拉翼缘之间的纵向竖平面内（见图 1-28）。其主要作用是：承受闸门自重和其他竖向荷载；保证闸门在竖平面内的刚度；另外与主梁构成封闭体系共同承受由于偶然外力作用而引起闸门的扭转。

纵向联结系的型式有桁架式（图 4-7 a、b）和框架式（图 4-7 c）两种。在双主梁闸门中，当跨度大于  $6 \text{ m}$  时常采用桁架式。在跨度较小，主梁数目较多的闸门中，纵向联结系可采用人字形斜杆（图 4-7 a，多用于单吊点）或对角斜杆（图 4-7 b，多用于双吊点）。潜孔多主梁闸门一般采用框架式的纵向联结系，即在主梁翼缘和横向隔板翼缘相交处设置扩大的节点板面构成刚性节点（图 4-7 c），或直接将横向隔板的连续翼缘焊在主梁翼缘

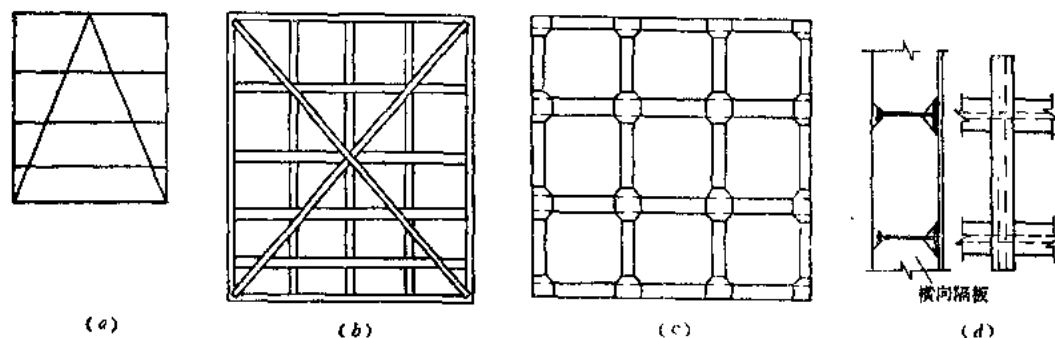


图 4-7 纵向联结系的型式  
(a)、(b)桁架式；(c)框架式；(d)横向隔板的连接翼缘焊在主梁翼缘外面的节点型式

的外面（图4-7d）。对于桁架式的纵向联结系，由于在起吊闸门时要承担一部分闸门自重，所以也称为起重桁架。它的弦杆即是上、下主梁的下翼缘或主桁架的下弦杆，其竖杆即是横向桁架的下弦杆或横向隔板的下翼缘，只有斜杆是另设的，它被支承在闸门两边梁或装置吊耳的横向联结系上。

#### （五）边梁的布置

边梁是设在平面钢闸门两侧的竖直构件，主要用来支承主梁和边跨的顶、底梁、水平次梁以及起重桁架等，并在边梁上设置行走支承（滚轮或滑道）和吊耳。

边梁的截面型式有单腹板式和双腹板式两种，如图4-8（a）、（b）。单腹板式边梁构造简单，便于与主梁连接，但抗扭刚度差，对于闸门因弯曲变形、温度胀缩以及其他力作用而使边梁中产生扭矩的情况是不利的。单腹板边梁主要用于滑道式支承的较小闸门中。双腹板边梁的抗扭刚度大，也便于与滚轮的轴以及吊座的轴相联结；但其构造较复杂，截面内部的焊接也较困难。双腹板式边梁广泛应用于较大跨度以及潜孔滚轮闸门中。主梁与边梁相连接处是个很重要的节点，为了加强它，我们使边梁外侧的一块腹板沿闸门全高连续，而内侧一块腹板则在与主梁腹板相交处断开，使主梁腹板穿过它而与外侧腹板相连，这里的焊缝应能承担主梁端的全部支承反力。

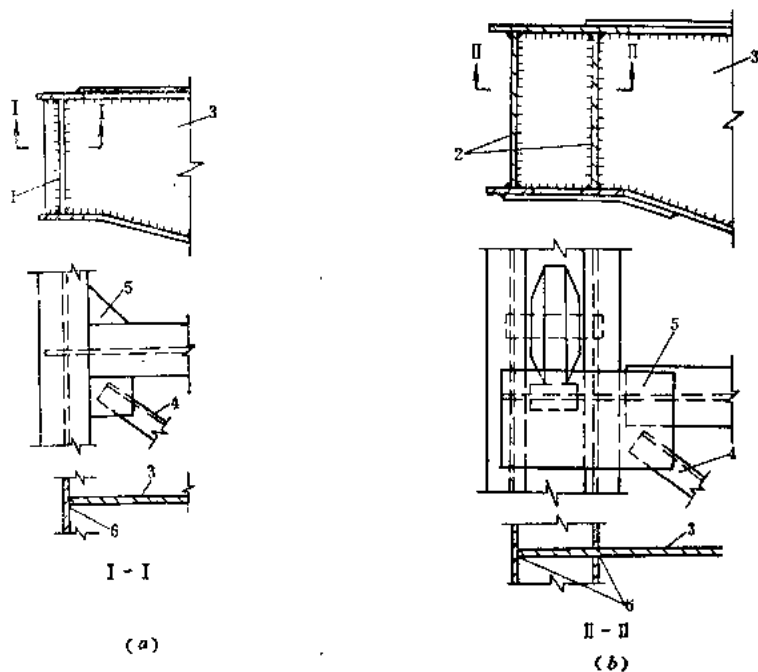


图 4-8 边梁的截面型式及连接构造

1—单腹板边梁；2—双腹板边梁；3—主梁腹板；4—起重桁架斜杆；5—扩大节点板；6—K形焊缝

为了提高边梁的抗扭刚度，最好把双腹板式边梁做成闭合截面，在不妨碍双腹板内施焊的情况下，可沿边梁下翼缘每隔一定距离设置联系板（缀板），同时在双腹板边梁内设置隔板。边梁上设置轮轴或吊轴的连接处，根据承压计算，边梁腹板常需局部加强。当闸门沿着门高划分为几个单元运输时，边梁的安装拼接缝要布置在主梁附近。

## 二、结构计算的一般规定

闸门的结构计算，应按实际可能发生的最不利的荷载组合情况，进行强度、刚度和稳定性计算。

### 1. 强度验算

对于闸门承重构件和连接件，应验算正应力和剪应力。在同时受较大正应力和剪应力作用处，尚应验算折算应力。

计算的最大应力值不得超过容许应力的 5 %。

### 2. 刚度验算

受弯构件，应验算其挠度。最大挠度与计算跨度之比，不应超过下列数值：

(1) 潜孔式工作闸门和事故闸门的主梁  $\frac{1}{750}$

(2) 露顶式工作闸门和事故闸门的主梁  $\frac{1}{600}$

(3) 检修闸门和拦污栅的主梁  $\frac{1}{500}$

(4) 一般次梁  $\frac{1}{250}$

### 3. 稳定验算

受弯、受压和偏心受压构件，应验算整体稳定和局部稳定性。

闸门构件的长细比，不应超过下列数值：

(1) 受压构件的容许长细比：

主要构件 120

次要构件 150

联系构件 200

(2) 受拉构件的容许长细比：

主要构件 200

次要构件 250

联系构件 350

## 第二节 按平面体系的计算方法

闸门的计算方法有两种。即按平面体系的计算方法和按空间体系采用有限元的计算方法。目前广泛采用的是按平面体系的计算方法。所谓按平面体系的计算方法，就是将整个结构分拆为面板、次梁、主梁以及竖向桁架和起重桁架等单独的平面构件进行计算。在计算当中，不考虑它们相互约束的影响。用这种方法计算使结构强度在实际工作中要增加一些裕度。

## 一、面板计算

### (一) 初选面板厚度

为充分利用面板的强度, 梁格布置时宜使面板的长短边比 ( $b/a$ ) 大于1.5, 并将长边布置在沿主梁轴线方向。

面板的局部弯曲应力, 可视支承边界情况, 按四边固定或三边固定一边简支或两相邻边固定, 另两相邻边简支的弹性薄板承受均布荷载计算。

对于梁系等高连接 (即梁系同一层布置) 的钢闸门, 中部区格面板的局部弯曲应力可按受均载的四边固定矩形弹性薄板计算;

潜孔多主梁钢闸门的边区格和角区格的面板也可近似按受均载的四边固定弹性薄板计算局部弯曲应力。

露顶式双主梁钢闸门的顶、底部区格的面板可按三边固定一边简支受均载的弹性薄板计算局部弯曲应力。

当闸门角区格的两相邻边均与截面刚度较弱的次梁相连时 (如斜支臂弧形闸门的顶部和底部的角区格), 则建议按两相邻边固定、另两相邻边简支的弹性薄板计算其弯曲应力。

对于梁系降低连接的钢闸门, 面板按两边固定、另两边简支的弹性薄板计算其弯曲应力。

初选面板厚度  $\delta$  时, 按下式计算:

$$\delta = a \sqrt{\frac{Kq}{\alpha[\sigma]}} \quad (\text{cm}) \quad (4-3)$$

式中  $K$  ——弹性薄板支承长边中点弯应力系数, 按表4-2至表4-4采用;

$\alpha$  ——弹塑性调整系数,  $b/a > 3$  时,  $\alpha = 1.4$ ,  $b/a \leq 3$  时,  $\alpha = 1.5$ ;

$q$  ——面板计算区格中心的水压力强度, Pa;

$a$ 、 $b$  ——面板计算区格的短边和长边长度, cm, 从面板与主 (次) 梁的连接焊缝算起;

$[\sigma]$  ——钢材的抗弯容许应力, 按表3-36采用。

把闸门的面板从上到下每个区格的厚度初选之后, 如各个区格之间的板厚相差较大, 应适当调整区格间距再次试选, 使各区格所需的板厚大致相等, 这样既节约材料, 又便于订货与制造。当门高较大且门顶与门底的水压力相差较大时, 也可沿门高采用两种面板厚度。面板厚度必须符合钢板产品规格, 常用的面板厚度为 8~16mm, 一般不应小于 6mm, 以保证面板具有一定的刚度来抵抗浮漂物的撞击。

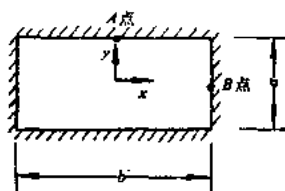
### (二) 面板的强度验算

验算面板强度时, 应考虑面板的局部弯应力与面板兼作主 (次) 梁翼缘的整体弯应力相叠加, 叠加后的折算应力  $\sigma_{sh}$  分两种情况计算:

(1) 当面板的边长比  $\frac{b}{a} > 1.5$ , 且长边布置在沿主梁轴线方向时 (见图4-9), 只须按下式验算面板 A 点的折算应力:

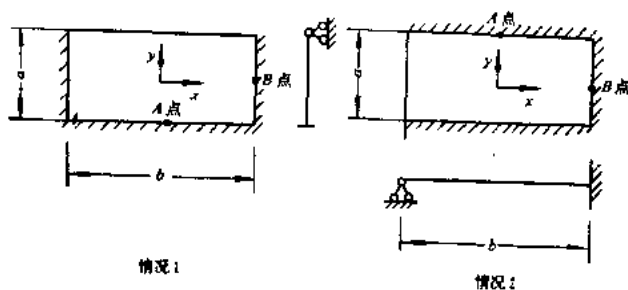
$$\sigma_{sh} = \sqrt{(\sigma_{my})^2 + (\sigma_{mx} - \sigma_{ox})^2} - (\sigma_{my})(\sigma_{mx} - \sigma_{ox}) \leq 1.1\alpha[\sigma] \quad (4-4)$$

表 4-2 四边固定矩形弹性薄板受均载的弯应力系数 $K$  ( $\mu=0.3$ )



验 算 点	$b/a$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.5	$\infty$
支承长边中点 $K_y$ (A点)		0.308	0.349	0.383	0.412	0.436	0.454	0.468	0.479	0.487	0.493	0.497	0.500	0.500
支承短边中点 $K_x$ (B点)		0.308	0.323	0.332	0.338	0.341	0.342	0.343	0.343	0.343	0.343	0.343	0.343	0.343

表 4-3 三边固定一边简支矩形弹性薄板受均载的弯应力系数 $K$  ( $\mu=0.3$ )



类 别 验 算 点 $b/a$	情 况 1		情 况 2	
	支承长边中点(A点) $K_y$	支承短边中点(B点) $K_x$	支承长边中点(A点) $K_y$	支承短边中点(B点) $K_x$
1.0	0.328	0.360	0.360	0.328
1.25	0.472	0.425	0.448	0.341
1.5	0.565	0.455	0.473	0.341
1.75	0.632	0.465	0.489	0.341
2.0	0.683	0.470	0.500	0.342
2.5	0.732	0.470	0.500	0.342
3.0	0.740	0.471	0.500	0.342
$\infty$	0.750	0.472	0.500	0.342

表 4-4

两相邻边简支另两相邻边固定矩形弹性薄板承受  
均载的弯应力系数 $K$  ( $\mu=0.3$ )

验算点	$b/a$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
支承长边中点(A点) $K_y$		0.407	0.459	0.506	0.549	0.585	0.616	0.640	0.662	0.680	0.695	0.708
支承短边中点(B点) $K_x$		0.407	0.425	0.441	0.452	0.459	0.463	0.467	0.468	0.470	0.471	0.472

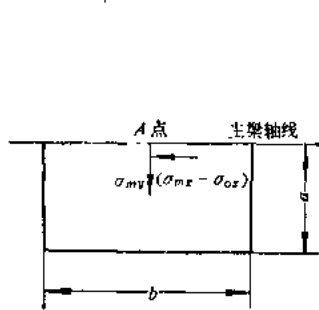


图 4-9 应力验算点 A

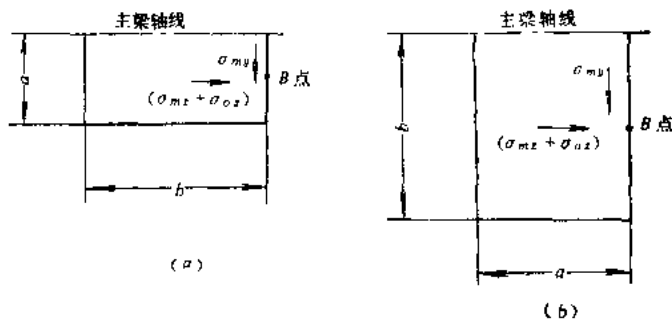


图 4-10 应力验算点 B

式中  $\sigma_{my}$ ——垂直于主(次)梁轴线方向面板支承长边中点的局部弯曲应力,

$$\sigma_{my} = \frac{K_y q a^4}{\delta^3}$$

$\sigma_{mx}$ ——面板沿主(次)梁轴线方向的局部弯曲应力, 其中  $\mu$  为泊桑比, 取为 0.3,

$$\sigma_{mx} = \mu \sigma_{my}$$

$\sigma_{ox}$ ——对应于面板验算点的主(次)梁上翼缘的整体弯曲应力;

$K_y$ ——支承长边中点弯应力系数, 按表 4-2 至表 4-4 采用;

$\alpha$ 、 $[\sigma]$ 、 $q$ ——意义同前;

$\sigma_{my}$ 、 $\sigma_{mx}$ 、 $\sigma_{ox}$  均取绝对值。

(2) 当面板的边长比  $\frac{b}{a} \leq 1.5$  或面板长边方向与主梁轴线垂直时 (见图 4-10), 尚应按下式验算面板 B 点的折算应力:

$$\sigma_{sk} = \sqrt{(\sigma_{my})^2 + (\sigma_{mx} + \sigma_{ox})^2} - (\sigma_{my})(\sigma_{mx} + \sigma_{ox}) \leq 1.1\alpha[\sigma] \quad (4-5)$$

式中  $\sigma_{mx}$ ——面板沿主梁轴线方向的局部弯应力；对图4-10(a)中K值取 $K_x$ ，对图4-10(b)中K值取 $K_y$ ；

$$\sigma_{mx} = \frac{Kqa^2}{\delta^2}$$

$\sigma_{my}$ ——垂直于主梁轴线方向面板的局部弯应力， $\mu$ 取0.3；

$$\sigma_{my} = \mu\sigma_{mx}$$

$\sigma_{ox}$ ——对应于面板验算点主梁上翼缘的整体弯应力，可按下列式计算：

$$\sigma_{ox} = (1.5\xi_1 - 0.5) \frac{M}{W}$$

$\xi_1$ ——面板兼作主(次)梁上翼缘的有效宽度系数，按表4-5计算；

$M$ ——对应于面板验算点主梁的弯矩；

$W$ ——对应于面板验算点主梁的截面抵抗矩；

$\sigma_{mx}$ 、 $\sigma_{my}$ 、 $\sigma_{ox}$ 均取绝对值；

其他符号意义同前。

表 4-5

面板的有效宽度系数 $\xi_1$ 、 $\xi_2$

$\frac{l_0}{b}$	0.5	1	1.5	2.0	2.5	3	4	5	6	8	10	20
$\xi_1$	0.2	0.40	0.58	0.70	0.78	0.84	0.90	0.94	0.95	0.97	0.98	1.00
$\xi_2$	0.16	0.30	0.42	0.51	0.58	0.64	0.71	0.77	0.79	0.83	0.86	0.92

注 (1)  $l_0$ 为主(次)梁弯矩零点之间的距离。对于简支梁 $l_0 = l$ ；对于连续梁的正弯矩段可近似地取 $l_0 = 0.6l \sim 0.8l$ ；对于其负弯矩段可近似地取 $l_0 = 0.4l$ ，其中 $l$ 为主(次)梁的跨度(见图4-11)。

(2)  $\xi_1$ 适用于梁的正弯矩图为抛物线图形；

(3)  $\xi_2$ 适用于梁的负弯矩图近似地取为三角形。

(三) 面板兼作主(次)梁翼缘的有效宽度 $B$ 的计算

(1) 对于简支梁或连续梁中正弯矩段，可按下列公式计算(式中符号见图4-11)，

取其中较小值：

$$1) B = \xi_1 b; \quad (4-6)$$

$$2) B \leq 60\delta + b_1 \text{ (3号钢);}$$

$$\text{或 } B \leq 50\delta + b_1 \text{ (16锰钢)} \quad (4-7)$$

式中  $b = \frac{b_1 + b_2}{2}$ ——主、次梁的间距；

$\xi_1$ ——有效宽度系数，按表4-5采用；

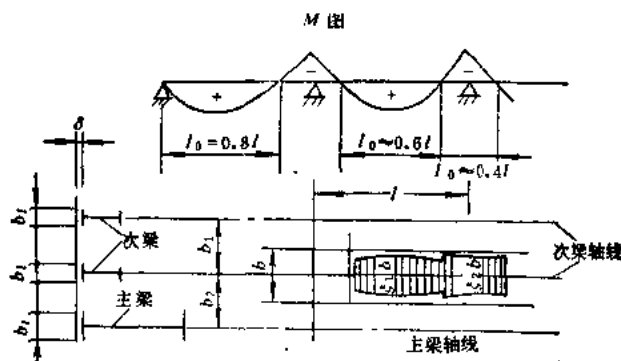


图 4-11 面板参加主次梁工作时的折算有效宽度



$\delta$ ——面板厚度;

$b_f$ ——梁肋宽度, 当梁另有上翼缘时, 为上翼缘宽度。

(2) 对于连续梁中负弯矩段或悬臂段, 面板的有效宽度应按下式取用:

$$B = \xi_1 b \quad (4-8)$$

式中  $\xi_1$ ——有效宽度系数按表4-5采用。

(四) 面板与梁格的连接

面板与梁格的连接焊缝厚度 $h_f$  (如图4-12示) 可近似地按下式确定:

$$h_f \geq \sqrt{N^2 + (T/2)^2} / 0.7[\tau_f^h] \quad (\text{cm}) \quad (4-9)$$

式中  $h_f$ ——焊缝厚度, cm;

$N$ ——面板与梁格之间的连接焊缝上垂直于焊缝方向每厘米焊缝长度上的侧拉力;

$$N = 0.07\delta\sigma_{\max} \quad (\text{N});$$

$\delta$ ——面板厚度, cm;

$\sigma_{\max}$ ——面板中的最大弯应力, Pa, 计算时可采用 $\sigma_{\max} = [\sigma]$ ;

$T$ ——面板与梁格之间的连接焊缝沿焊缝长度方向每厘米长度上的水平剪力, 如图4-13所示;

$$T = \frac{QS}{I}$$

$Q$ ——在计算位置上, 梁的剪力;

$I$ ——在计算位置上, 梁的截面惯性矩;

$S$ ——参加梁受弯工作的部分钢板截面面积对梁的中和轴的面积矩;

$[\tau_f^h]$ ——贴角焊缝容许剪应力, 按表3-37查取。

面板与梁格的连接焊缝应采用连续焊缝, 且焊缝厚度 $h_f$ 不应小于6mm。

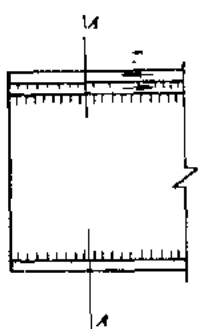
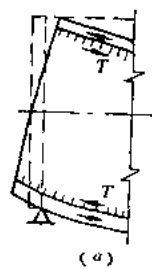
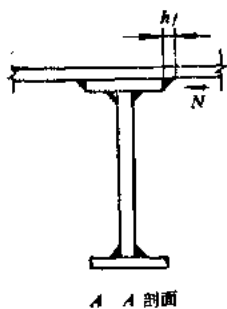


图 4-12 面板与梁格的连接焊缝



(b)

图 4-13 连接焊缝受沿焊缝长度方向的水平剪力

## 二、次梁设计

(一) 次梁的荷载与计算简图

1. 梁格为降低连接时次梁的荷载和计算简图

如图4-14(b)所示梁格为降低连接, 水平次梁是支承在竖直次梁上的连续梁, 由面板传给水平次梁的水压力, 其作用范围是按面板跨度的中心线来划分的 (图4-14a、b),

水平次梁所承受的均布荷载由下式计算:

$$q = P \frac{a_{\perp} + a_{\text{F}}}{2} \quad (4-10)$$

式中  $P$ ——次梁所负担的水压面积中心处的水压强度, Pa;

$a_{\perp}$ 、 $a_{\text{F}}$ ——分别为水平次梁轴线到上、下相邻梁之间的距离 (图4-14b)。

水平次梁的计算简图如图4-14(a)所示的连续梁。

竖直次梁为支承在主梁上的简支梁, 承受由水平次梁传来的集中荷载  $V$ ,  $V$  为水平次梁边跨内侧支座反力, 其计算简图如图4-14(c)所示。

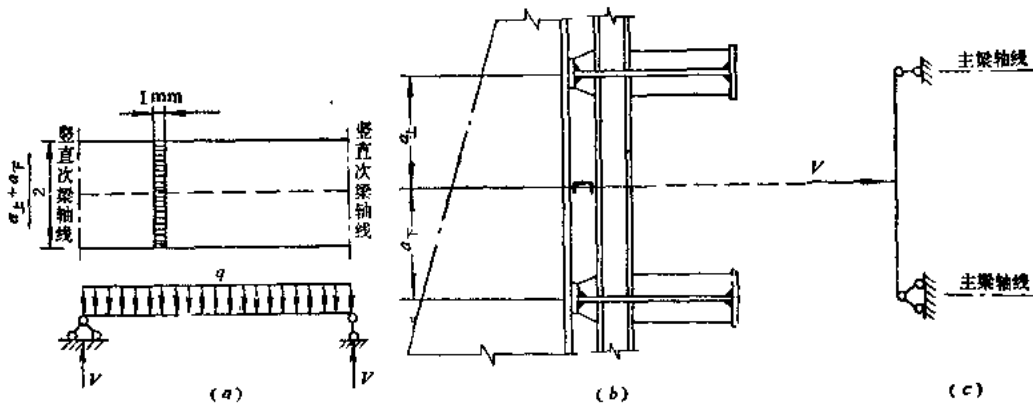


图 4-14 梁格为降低连接时次梁的荷载和计算简图

(a) 水平次梁计算简图; (b) 由面板传给水平次梁的水压力作用范围; (c) 竖直次梁计算简图

## 2. 梁格为等高连接时次梁的荷载和计算简图

如图4-15所示, 水平次梁和竖直次梁同时支承着面板, 面板上的水压力按梁格夹角的平分线来划分各梁所负担水压力的范围。例如, 当竖直次梁的间距大于水平次梁的间距时, 水平次梁 (如梁AB) 所负担的水压作用面积为六边形 (图示的阴影线部分)。水平次梁上作用荷载的计算与梁格为降低连接时水平次梁上作用荷载的计算类似, 取该六边形面积中心处的水压强度  $P$  为整个面积上的平均水压强度, 然后沿跨度方向将每一单位宽度面积上的水压力都简化到水平次梁的轴线 (跨度中部的荷载集度  $q = P \frac{a_{\perp} + a_{\text{F}}}{2}$ ), 这样就得到梁轴方向为梯形分布的荷载。当水平次梁是在竖直次梁处断开后再连接于竖直次梁上时, 水平次梁一般应按简支梁计算, 其计算简图如图4-15(d)所示。

竖直次梁为支承在主梁以及顶梁、底梁上的简支梁, 如图4-15(c)所示。它们除了承受由水平次梁传来的集中荷载  $2V$  外, 还承受由面板直接传来的分布水压力, 由图4-15(a)知道这个水压力作用的面积为有一条对角线与梁轴垂直的正方形, 因此作用到竖直次梁上的荷载是三角形分布的荷载, 其上、下两个三角形顶点处的荷载集度  $q_{\perp}$  和  $q_{\text{F}}$  分别为:

$$q_{\perp} = a_{\perp} p_{\perp} \quad \text{N/cm} \quad (4-11)$$

$$q_{\text{F}} = a_{\text{F}} p_{\text{F}} \quad \text{N/cm} \quad (4-12)$$

式中  $a_{\perp}$ 、 $a_{\text{F}}$ ——如图4-15(a)所示, 分别为水平次梁的上、下间距, cm;

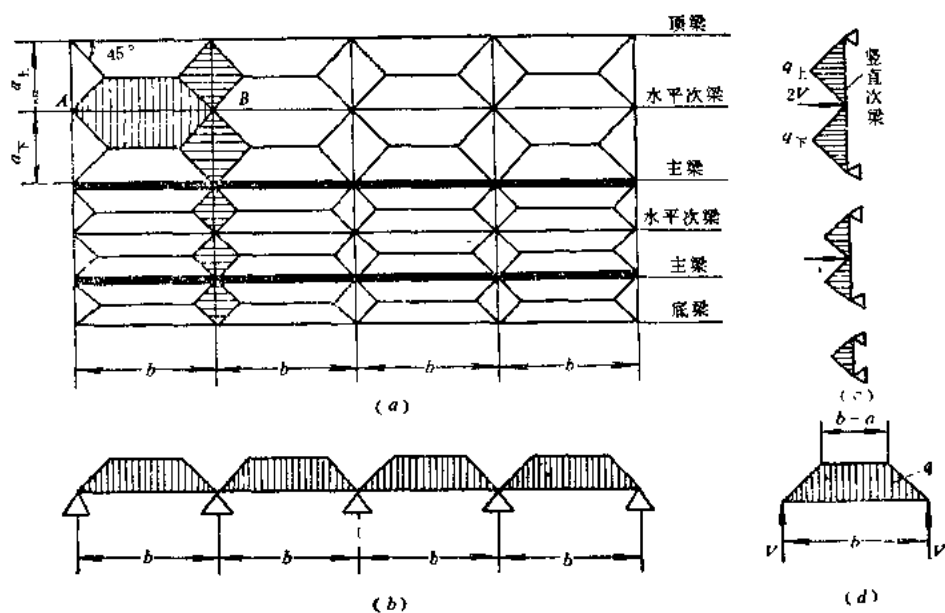


图 4-15 梁格为等高连接时次梁的荷载和计算简图

$p_{\text{上}}$ 、 $p_{\text{下}}$ ——分别为上、下两个正方形水压作用面积中心处的水压强度，Pa。

这里需要指出：由于目前更多地以实腹隔板来代替竖直次梁，可以在实腹隔板上开孔使水平次梁从中连续穿过并被支承在隔板上，这时水平次梁必须按连续梁计算（图 4-15 b）。但若按图 4-15 (b) 的梯形荷载进行计算，比较麻烦，为了简化计，可按均布荷载的连续梁考虑，差别很小。

## （二）次梁的设计计算

以连续梁计算的次梁，其内力可由结构力学一般方法求出，等截面的等跨与不等跨连续梁可按下列公式计算：

### 1. 等跨连续梁

等跨等截面连续梁在均布荷载作用下的内力及挠度计算公式：

支点反力：

$$A = K_1 ql \quad (4-13)$$

支点弯矩：

$$M = K_2 ql^2 \quad (4-14)$$

跨中弯矩：

$$M = K_3 ql^2 \quad (4-15)$$

剪力：

$$Q = K_4 ql \quad (4-16)$$

挠度：

$$f = K_5 \frac{ql^4}{100EI} \quad (4-17)$$

跨中最大弯矩点离相应支承点的距离

$$x = K_0 l \quad (4-18)$$

式中

$q$  —— 均布荷载强度,  $\text{N/cm}$ ;

$l$  —— 跨距,  $\text{cm}$ ;

$E$  —— 材料的弹性模量,  $\text{Pa}$ ;

$I$  —— 截面的惯性矩,  $\text{cm}^4$ ;

$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$  —— 系数, 见表4-6。

## 2. 不等跨连续梁

不等跨等截面连续梁在均布荷载作用下的内力计算公式:

$$\text{弯矩} \quad M = K_1 q l_1^2 \quad (4-19)$$

$$\text{剪力} \quad Q = K_2 q l_1 \quad (4-20)$$

式中  $q$  —— 荷载强度;

$l_1$  —— 跨距;

$l_2$  —— 跨距,  $l_2 = n l_1$ ;

$K_1, K_2$  —— 系数, 见表4-7或表4-8。

## 3. 多跨连续梁

任意荷载分布作用下多跨连续梁的内力计算, 可由弯矩分配法求出, 见一般结构力学。

根据计算出的最大弯矩, 次梁所需要的截面模量为:

$$W \geq \frac{M_{\max}}{[\sigma]} \quad (4-21)$$

再根据需要的 $W$ , 从型钢表 3-9 至表3-14中选取型钢截面尺寸, 一个闸门中的型钢规格不宜过多, 以便加工制造。

钢闸门中的水平次梁, 常用角钢或槽钢, 它们与面板连接时, 肢尖宜向下(图4-16 a), 以免因上部形成凹槽积水积尘而加速钢材腐蚀。竖直次梁常采用工字钢(图4-16 b)或实腹隔板。

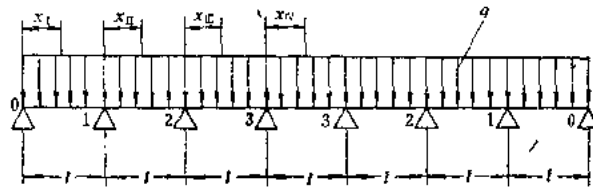
当次梁直接焊于面板时, 次梁两侧的一部分面板可以兼作次梁的翼缘参加次梁的抗弯工作, 面板参加次梁工作的有效宽度 $B$ 可按本节一(三)计算。

当横向联结系采用实腹隔板而水平次梁为连续梁时, 计算水平次梁和主梁弯矩时, 还可以考虑水平次梁和主梁联合工作的情况。这是由于横向隔板的牵制, 当主梁受水压力作用而挠曲时, 它将带动水平次梁共同挠曲。因此, 水平次梁对于主梁起到支持和减载的作用, 而主梁对水平次梁的跨间正弯矩起到加载的作用, 而对于支座的负弯矩则起到减载的作用。在计算时, 我们先求出水平次梁作为连续梁的局部弯矩  $M_k^*$  (图 4-17a), 再按水平次梁各点的挠度与主梁对应点的挠度相等的条件, 用下式求出由于主梁挠曲而在水平次梁任一截面内引起的整体弯矩  $M_k^*$  (图 4-17b):

$$M_k^* = \frac{M_{\pm} I_k}{I_{\pm} + \frac{n_k}{n_{\pm}} I_k} \quad (4-22)$$

表 4-6

等跨连续梁在均布荷载作用下的最大内力系数表



序号	未知量名称	未知量符号	系数	跨数						数值	附注
				2	3	4	5	6	7		
1	支点反力	$A_1$	$K_1$	0.375	0.400	0.393	0.395	0.394	0.394	$A = K_1 q l$	
2		$A_2$		1.250	1.100	1.143	1.132	1.135	1.134		
3		$A_3$				0.929	0.974	0.962	0.965		
4		$A_4$						1.019	1.007		
5	支点弯矩	$M_1$	$K_1$	-0.125	-0.100	-0.107	-0.105	-0.106	-0.106	$M = K_1 q l^2$	
6		$M_2$				-0.072	-0.079	-0.077	-0.077		
7		$M_3$						-0.087	-0.085		
8	跨中弯矩 (最大)	$M_{II}$	$K_1$	+0.070	+0.080	+0.077	+0.078	+0.078	+0.078	$M = K_1 q l^2$	
9		$M_{III}$			+0.025	+0.036	+0.033	+0.034	+0.034		
10		$M_{IV}$					+0.046	+0.034	+0.044		
11		$M_{IV}$							+0.040		
12	剪力	$Q_1$	$K_1$	0.375	0.400	0.393	0.394	0.394	0.394	$Q = K_1 q l$	
13		$Q_{1左}$		-0.625	-0.600	-0.607	-0.606				
14		$Q_{1右}$		0.625	0.500	0.536	0.526				
15		$Q_{2左}$				-0.464	-0.474				
16		$Q_{2右}$				0.464	0.500				
17		$Q_{3左}$									
18		$Q_{3右}$									
19	跨中挠度	$f_1$	$K_1$	0.521	0.677	0.632	0.644			$f = K_1 \frac{q l^4}{100 E I}$	
20		$f_2$			0.052	0.186	0.151				
21		$f_3$					0.315				
22		$f_4$									
23	跨中最大 弯矩点至 相应支点的 距离	$x_I$	$K_1$	0.375	0.400	0.393	0.395	0.394	0.394	$x = K_1 l$	由支点 0 计起
24		$x_{II}$			0.500	0.536	0.526	0.529	0.528		由支点 1 计起
25		$x_{III}$					0.500	0.490	0.493		由支点 2 计起
26		$x_{IV}$							0.500		由支点 3 计起

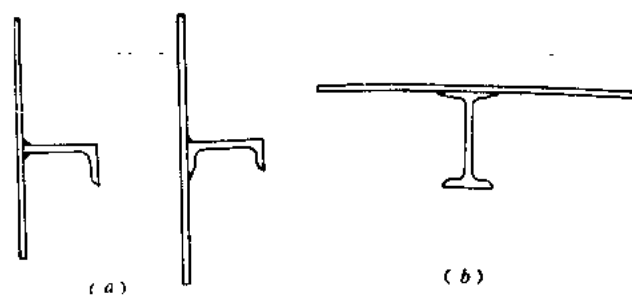
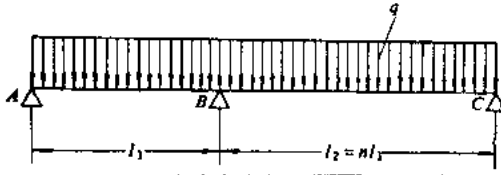


图 4-16 次梁的截面型式  
(a)水平次梁; (b)竖直次梁

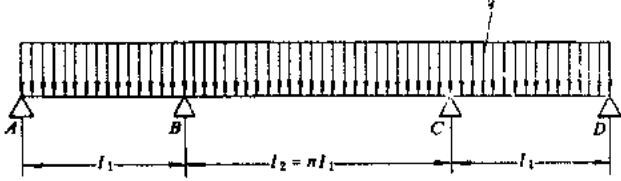
表 4-7 不等两跨连续梁在均布荷载作用下的最大内力系数表



$n = \frac{l_2}{l_1}$	弯矩内力系数 $K_i$			剪力内力系数 $K_i$			
	$M_B$	$M_{AB}$	$M_{BC}$	$Q_A$	$Q_{B左}$	$Q_{B右}$	$Q_C$
1.0	-0.1250	0.0703	0.0703	0.3750	-0.6250	0.6250	-0.3750
1.1	-0.1388	0.0353	0.0398	0.3613	-0.6387	0.6761	-0.4237
1.2	-0.1550	0.0395	0.1108	0.3450	-0.6550	0.7292	-0.4708
1.3	-0.1738	0.0532	0.1333	0.3263	-0.6737	0.7836	-0.5164
1.4	-0.1950	0.0165	0.1572	0.3050	-0.6950	0.8393	-0.5607
1.5	-0.2188	0.0396	0.1825	0.2813	-0.7187	0.8958	-0.6042
1.6	-0.2450	0.0325	0.2092	0.2550	-0.7450	0.9331	-0.6439
1.7	-0.2738	0.0256	0.2374	0.2263	-0.7737	1.0110	-0.6890
1.8	-0.3050	0.0190	0.2669	0.1950	-0.8050	1.0394	-0.7306
1.9	-0.3388	0.0130	0.2978	0.1613	-0.8387	1.1283	-0.7717
2.0	-0.3750	0.0078	0.3301	0.1250	-0.8750	1.1875	-0.8125
2.25	-0.4766	0.0003	0.4170	0.0234	-0.9766	1.3368	-0.9132
2.50	-0.5938	负值	0.5126	-0.0938	-1.0938	1.4375	-1.0125

注  $M_{AB}$ 、 $M_{BC}$ 分别为AB、BC跨内最大弯矩。

表 4-8 不等三跨连续梁在均布荷载作用下的最大内力系数表



$n = \frac{l_2}{l_1}$	弯矩内力系数 $K_i$			剪力内力系数 $K_i$		
	$M_B$	$M_{AB}$	$M_{BC}$	$Q_A$	$Q_{B左}$	$Q_{B右}$
0.4	-0.0831	0.0869	-0.0631	0.4169	-0.5831	0.2000
0.5	-0.0804	0.0880	-0.0491	0.4196	-0.5804	0.2500
0.6	-0.0800	0.0882	-0.0350	0.4200	-0.5800	0.3000

续表

$n = \frac{I_2}{I_1}$	弯矩内力系数 $K_1$			剪力内力系数 $K_2$		
	$M_B$	$M_{AB}$	$M_{BC}$	$Q_A$	$Q_{B左}$	$Q_{B右}$
0.7	-0.0819	0.0874	-0.0208	0.4181	-0.5819	0.3500
0.8	-0.0859	0.0857	-0.0059	0.4141	-0.5859	0.4000
0.9	-0.0918	0.0833	0.0095	0.4082	-0.5918	0.4500
1.0	-0.1000	0.0800	0.0250	0.4000	-0.6000	0.5000
1.1	-0.1100	0.0761	0.0413	0.3900	-0.6100	0.5500
1.2	-0.1218	0.0715	0.0582	0.3782	-0.6218	0.6000
1.3	-0.1355	0.0664	0.0758	0.3645	-0.6355	0.6500
1.4	-0.1510	0.0609	0.0940	0.3490	-0.6510	0.7000
1.5	-0.1683	0.0550	0.1130	0.3317	-0.6683	0.7500
1.6	-0.1874	0.0489	0.1327	0.3127	-0.6873	0.8000
1.7	-0.2082	0.0426	0.1531	0.2918	-0.7082	0.8500
1.8	-0.2308	0.0362	0.1742	0.2692	-0.7308	0.9000
1.9	-0.2552	0.0300	0.1961	0.2448	-0.7552	0.9500
2.0	-0.2813	0.0239	0.2188	0.2188	-0.7812	1.0000
2.25	-0.3540	0.0106	0.2788	0.1462	-0.8538	1.1250
2.50	-0.4375	0.0019	0.3437	0.0625	-0.9375	1.2500

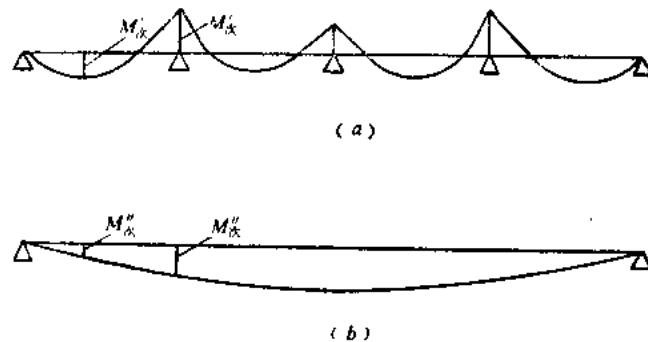
注  $M_{AB}$ 、 $M_{BC}$ 分别为AB、BC跨内最大弯矩。

图 4-17 次梁的弯矩图

(a)水平次梁作为连续梁的局部弯矩 $M'_{ik}$ ; (b)由于主梁挠曲而在水平次梁任一截面内引起的整体弯矩 $M''_{ik}$ 

式中  $M_{\pm}$ ——主梁任一截面（与所求水平次梁弯矩 $M'_{ik}$ 的作用截面相对应的截面）的弯矩；

$I_{\perp}$ 和 $I_{ik}$ ——分别为主梁和水平次梁的截面对其中和轴的惯性矩；

$n_{\pm}$ 和 $n_{ik}$ ——分别为主梁数目和水平次梁的数目（顶梁除外）。

水平次梁的弯矩图显然为图4-17(a)与(b)的叠加，于是：

$$\left. \begin{aligned} \text{水平次梁的跨间弯矩} \quad M_{ik中} &= M'_{ik} + M''_{ik} \\ \text{水平次梁的支座弯矩} \quad M_{ik支} &= M'_{ik} - M''_{ik} \end{aligned} \right\} \quad (4-23)$$

式中弯矩均取绝对值。

### (三) 次梁的验算

#### 1. 强度验算

仅在一个主平面内受弯的构件, 按式(4-24)和式(4-25)分别验算正应力和剪应力, 在梁的腹板未用加劲肋加强处, 当梁的上翼缘有集中荷载时, 还应按式(4-26)计算腹板的局部压应力。

##### (1) 正应力

$$\sigma = \frac{M}{W_j} \leq [\sigma] \quad (4-24)$$

式中  $M$ ——计算截面的弯矩;

$W_j$ ——净截面抵抗矩;

$[\sigma]$ ——钢材的抗弯容许应力。

##### (2) 剪应力

$$\tau = \frac{QS}{I\delta} \leq [\tau] \quad (4-25)$$

式中  $Q$ ——计算截面的剪力;

$I$ ——毛截面惯性矩;

$S$ ——计算剪应力处以上毛截面面积对中和轴的面积矩;

$\delta$ ——腹板的厚度;

$[\tau]$ ——钢材的抗剪容许应力。

##### (3) 局部压应力

$$\sigma_j = \frac{m_1 P}{\delta Z} \leq [\sigma] \quad (4-26)$$

式中  $P$ ——集中荷载, 不考虑动力系数;

$m_1$ ——系数, 对于钢闸门的梁可取  $m_1 = 1.0$ ;

$Z$ ——集中荷载压力分布长度, 可按下式计算:

$$Z = a + 2h_y$$

$a$ ——钢闸门梁为集中荷载处的支承长度;

$h_y$ ——梁顶面至腹板计算高度上边缘的距离。

在组合梁中同时受较大正应力和剪应力作用处(如连续梁的支座处或梁截面改变处等), 还应按下式验算折算应力:

$$\sigma_{\pm k} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1[\sigma] \quad (4-27)$$

在组合梁的某个局部区域有可能同时作用三种应力时(如正应力  $\sigma$ 、剪应力  $\tau$  和局部压应力  $\sigma_j$ ), 则应按下式验算折算应力:

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_j^2 - \sigma\sigma_j + 3\tau^2} \leq 1.1[\sigma] \quad (4-28)$$

式中  $\sigma$ 、 $\tau$ 、 $\sigma_j$ ——为组合梁腹板计算高度边缘同一点上同时产生的正应力、剪应力和局部压应力。 $\sigma$  和  $\sigma_j$  应带各自的正负号。

在两个主平面内受弯的构件, 按下式验算正应力:



$$\sigma = -\frac{M_x}{W_{xj}} + \frac{M_y}{W_{yj}} \leq [\sigma] \quad (4-29)$$

式中  $M_x$ 、 $M_y$ ——所验算截面对  $x$  轴和  $y$  轴的弯矩；

$W_{xj}$ 、 $W_{yj}$ ——对  $x$  轴和  $y$  轴的净截面抵抗矩。

## 2. 刚度验算

应使计算的最大挠度小于容许挠度，即  $f_{max} \leq [f]$ ，对于一般次梁，容许挠度  $[f] = \frac{l}{250}$ ， $l$  为计算跨度。几种型式梁在不同荷载作用下最大挠度的计算公式如下：

(1) 受均布荷载的等截面简支梁（图4-18），按下式计算最大挠度：

$$f_{max} = \frac{5}{384} \frac{ql_0^4}{EI} \quad (4-30)$$

(2) 受均布荷载的变截面简支梁，梁高改变、翼缘不变的情况下，最大挠度按下式计算：

$$f_{max} = \frac{5}{384} \frac{ql_0^4}{EI_M} (1 + K'\alpha) \quad (4-31)$$

式中  $q$ ——梁的均布荷载；

$l_0$ ——梁的计算跨度；

$I$ ——等截面梁的截面惯性矩；

$E$ ——弹性模量。

$$\alpha = \frac{I_M - I_0}{I_0}$$

$I_M$ ——变截面梁的跨中截面惯性矩；

$I_0$ ——变截面梁的支承截面惯性矩；

$k'$ ——随截面改变位置变化的系数，按表4-9采用。

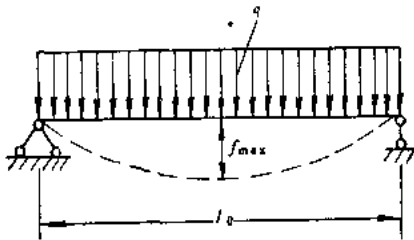


图 4-18 受均布荷载的等截面简支梁的最大挠度

表 4-9  $K'$  值

截面改变位置	$\frac{l_0}{4}$	$\frac{l_0}{5}$	$\frac{l_0}{6}$
$K'$	0.0175	0.00922	0.00544

(3) 受均布荷载的等截面双悬臂简支梁（图4-19），按下式计算最大挠度：

$$f_{max} = \frac{1}{48} \frac{ql_0^4}{EI} \left( \frac{5}{8} l_0^2 - 3a^2 \right) \quad (4-32)$$

式中  $a$ ——双悬臂简支梁的悬臂长度；

其余符号意义同前。

(4) 受均布荷载的等截面等跨连续梁的最大挠度可按表4-6计算。

(5) 在跨中受有集中荷载的等截面等跨连续梁的挠度（图4-20），按下式计算最大挠度：

$$f_{max} = K'' \frac{Pl_0^3}{EI} \quad (4-33)$$

式中  $P$ ——集中荷载;  
 $l_0$ ——支座间距;  
 $E$ ——弹性模量;  
 $I$ ——等截面连续梁的截面惯性矩;  
 $K''$ ——系数, 按表4-10采用。

表 4-10  $K''$  值

连续梁的类型	两跨连续梁	三跨连续梁	四跨连续梁
$K''$	0.00911	0.01146	0.01079

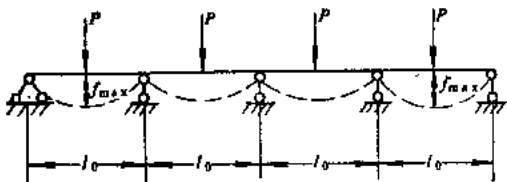


图 4-20 跨中受有集中荷载的等截面等跨连续梁的最大挠度

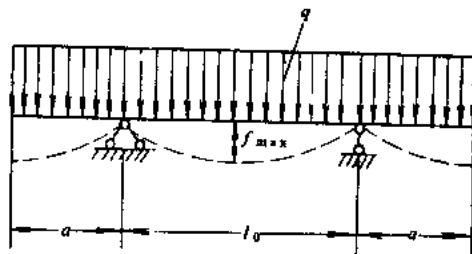


图 4-19 受均布荷载的等截面双悬臂简支梁最大挠度

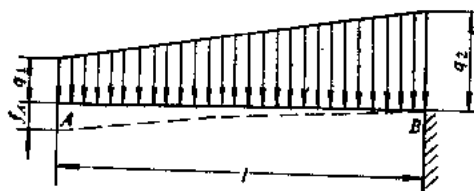


图 4-21 受梯形荷载的等截面悬臂梁I型挠度

(6) 受梯形荷载的等截面悬臂梁I型(图4-21), 按下式计算挠度,

$$f_A = \frac{(11q_1 + 4q_2)l^4}{120EI} \quad (4-34)$$

式中  $q_1$ 、 $q_2$ ——作用在梁上的单位长度上的荷载;

$l$ ——悬臂长度;

$E$ ——弹性模量;

$I$ ——等截面悬臂梁的截面惯性矩。

(7) 受梯形荷载的等截面悬臂梁II型(图4-22), 按下式计算挠度:

$$f_A = \frac{(11q_1 + 4q_2)l^4}{120EI} \quad (4-35)$$

式中  $q_1$ 、 $q_2$ ——作用在梁上的单位长度上的荷载(如图4-22);

其余符号意义同前。

(8) 受三角形荷载的等截面悬臂梁(图4-23), 按下式计算挠度:

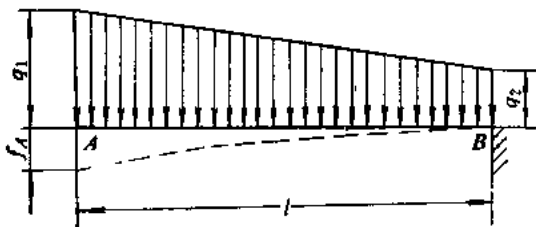


图 4-22 受梯形荷载的等截面悬臂梁II型挠度

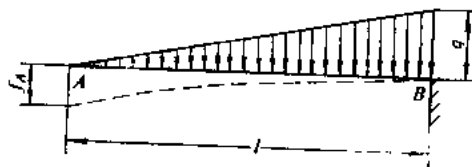


图 4-23 受三角形荷载的等截面悬臂梁挠度

$$f_A = \frac{ql^4}{30EI} \quad (4-36)$$

式中  $q$ ——作用在梁上的单位长度上的荷载;

其余符号意义同前。

### 3. 整体稳定验算

(1) 当符合下列情况之一时可以不验算梁的整体稳定性:

1) 当梁的受压翼缘与闸门面板连接时 (如水平次梁和梁格为等高连接的垂直次梁), 可不验算梁的整体稳定性;

2) 对于不与闸门面板连接的工字形截面的简支梁 (如梁格为降低连接的竖直次梁), 当受压翼缘的自由长度  $l$  与其宽度  $b_1$  之比不超过表4-11所规定的数值时, 也可以不验算其整体稳定。

表 4-11 工字形截面简支梁不需计算整体稳定性的最大  $l/b_1$  值

钢 号	跨中无侧向支承点的梁		跨中有侧向支承点的梁, 不论荷载作用于何处
	荷载作用在上翼缘	荷载作用在下翼缘	
3号钢或2号钢	15	22	18
16锰钢或16锰桥钢	12	18	15

注 (1)  $l$  为梁受压翼缘的自由长度: 对跨中无侧向支承点的梁, 为其跨度; 对跨中有侧向支承点的梁, 为受压翼缘侧向支承点的间距;

(2) 除上述第一种情况外, 在简支梁的端部支承处, 应采取构造措施 (例如设置横向联结系) 以阻止梁端截面的扭转;

(3) 当采用其它钢号时, 其最大  $l/b_1$  值, 应按表4-11中3号钢的数值乘以  $\sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}}$ 。

(2) 除上述情况外, 应按下式计算梁的整体稳定性:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{\varphi_w W} \leq [\sigma] \quad (4-37)$$

式中  $M_{\max}$ ——梁最大刚度平面内的最大弯矩;

$W$ ——梁受压最大纤维的毛截面抵抗矩;

$\varphi_w$ ——整体稳定系数, 按下述的方法确定。

(3) 梁的整体稳定系数确定:

1) 工字形等截面梁:

(a) 组合截面简支梁和双轴对称悬臂梁的整体稳定系数, 应按下式计算:

$$\varphi_w = K_1 \left( K_2 + K_3 \frac{lt_1}{b_1 h} \right) \frac{I_2}{I_1} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \frac{2400}{\sigma_s} \quad (4-38)$$

式中  $\varphi_w$ ——整体稳定系数, 当算出的  $\varphi_w$  值大于0.80时, 应按表4-14查出相应的  $\varphi'_w$  代替  $\varphi_w$  值;

$l$ ——同表4-11;

$t_1$ ——受压翼缘的厚度, 对铆接梁则为受压翼缘盖板与角钢厚度之和;

$\sigma_s$ ——钢材的屈服点, 对3号钢和2号钢, 取 $\sigma_s=2400 \times 10^5 \text{Pa}$ , 对16锰钢和16锰桥钢, 取 $\sigma_s=3500 \times 10^5 \text{Pa}$ ;

$h, b_1$ ——梁截面的全高度和受压翼缘宽度;

$I_x, I_y$ ——对 $x$ 轴和 $y$ 轴的毛截面惯性矩;

$K_1, K_2$ ——系数, 简支梁按表4-12查得, 悬臂梁按表4-13查得;

$K_1$ ——系数: 对双轴对称组合截面(图4-24a)简支梁,

$$\text{当 } \frac{t_1}{\delta} \leq 3 \text{ 时, } K_1 = 1.0,$$

$$\text{当 } \frac{t_1}{\delta} > 3 \text{ 时, } K_1 = 0.9;$$

对具有加强受压翼缘且与腹板轴线对称的组合截面(图4-24b)简支梁:

$$\text{当 } \frac{lt_1}{b_1 h} \leq 1.0 \text{ 时, } K_1 = \frac{(2m+1)y}{h},$$

$$\text{当 } \frac{lt_1}{b_1 h} > 1.0 \text{ 时, } K_1 = \frac{0.8(m+2)y}{h};$$

对双轴对称的悬臂梁,  $K_1 = 1.0$ ;

表 4-12

工字形截面简支梁的系数 $K_1, K_2$ 值

系 数		跨中无侧向支承点的梁				跨中有侧向支承点的梁	
		集 中 荷 载		均 布 荷 载		(不论荷载作用于何处)	
		沿上翼缘	沿下翼缘	沿上翼缘	沿下翼缘	双轴对称截面 (图4-24a)	单轴对称截面 (图4-24b)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\frac{lt_1}{b_1 h} \leq 0.85$	$K_1$	1480	4750	1350	3600	2360	1970
	$K_2$	1200	1200	1040	1040	1180	980
$\frac{lt_1}{b_1 h} > 0.85$	$K_1$	460	3730	460	2710	1450	1210
	$K_2$	2400	2100	2080	2080	2240	1870

注 表中第(1)、第(2)两栏的数值, 主要用于少数几个集中荷载位于跨度中间1/3范围内的情况, 对其它情况的集中荷载, 应按表中第(3)、第(4)栏内的数值采用。

表 4-13

工字形等截面悬臂梁的系数 $K_1, K_2$ 值

集 中 荷 载 作 用 于		$K_1$	$K_2$
上 翼 缘	$\frac{lt_1}{b_1 h} \leq 0.5$	480	1330
	$\frac{lt_1}{b_1 h} > 0.5$	-300	2890
截 面 形 心		2650	2500
下 翼 缘		5690	1350

注 (1) 本表仅适用于梁自由端承受集中荷载而支承端为固定的情况, 当用于由邻跨延伸出来的伸臂梁时, 应在结构上采取措施以增强支承处的抗扭能力;

(2) 当为轧制工字钢梁时, 表中的 $h, b_1, t_1$ 分别为工字钢截面高度、翼缘宽度和翼缘厚度。

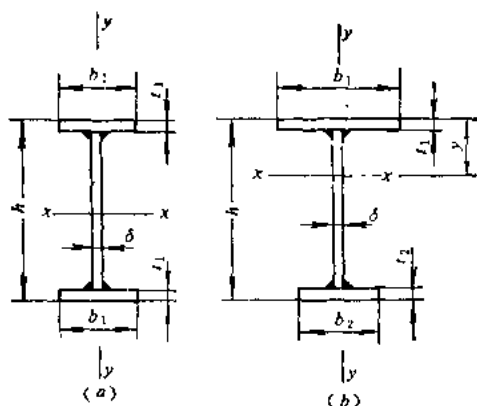


图 4-24 组合工字形截面图

(a) 双轴对称工字形截面; (b) 加强受压翼缘的单轴对称工字形截面

$\delta$  —— 腹板的厚度;

$y$  —— 形心轴至受压最大纤维的距离;

$$m = \frac{I_1}{I_1 + I_2};$$

$I_1$ 、 $I_2$  —— 受压翼缘和受拉翼缘对  $y$  轴的惯性矩, 对铆接梁不包括角钢的垂直肢。

(b) 轧制工字钢的整体稳定系数  $\varphi_w$ , 按表 4-15 或表 4-16 采用, 当所得的  $\varphi_w$  值大于 0.80 时, 应按表 4-14 查出相应的  $\varphi'_w$  值代替  $\varphi_w$  值。

2) 轧制槽钢简支梁: 轧制槽钢简支梁的整体稳定系数, 不论荷载的形式和荷载在截面上的作用位置, 均应按下列式计算:

$$\varphi_w = \frac{570bt}{lh} - \frac{2400}{\sigma_t} \quad (4-39)$$

式中  $\varphi_w$  —— 整体稳定系数, 算得的  $\varphi_w$  值不得大于 1.0, 同时不需按表 4-14 换算为  $\varphi'_w$  值;

$h$ 、 $b$ 、 $t$  —— 分别为槽钢截面高度, 翼缘宽度和翼缘厚度。

表 4 14

整体稳定系数  $\varphi_w$  值

$\varphi_w$	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15
$\varphi'_w$	0.830	0.818	0.835	0.850	0.862	0.874	0.883	0.892
$\varphi_w$	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55
$\varphi'_w$	0.901	0.908	0.913	0.919	0.925	0.930	0.934	0.938
$\varphi_w$	1.60	1.80	2.00	2.20	2.40	$\geq 2.50$		
$\varphi'_w$	0.941	0.953	0.961	0.968	0.973	$\sim 1.000$		

### 三、主梁设计

#### (一) 主梁的类型

主梁是平面钢闸门中的主要受力构件, 根据闸门的跨度和水头大小, 主梁的类型可采用实腹梁 (包括型钢梁和组合梁) 和桁架梁。型钢梁可以简化设计和制造, 但型钢梁受到轧钢条件的限制, 其截面尺寸和承载能力不能太大, 一般仅满足于所受弯矩在  $5 \times 10^5 \text{J}$  以内的主梁。对于中等跨度 (约 6~12m) 的露顶闸门或水头较大的潜孔闸门一般采用组合梁。对于跨度更大的露顶闸门, 宜采用桁架作主梁。桁架比实腹梁省料, 同时减轻了闸门

表 4-15

普通工字钢的  $\varphi_s$  值

项次	荷载情况			自由长度 $l$ (m)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				工字钢型号									
1	跨中无侧向 支承点的梁	集中荷载作用于 翼缘	上	10~20	2.0	1.30	0.99	0.80	0.68	0.58	0.53	0.48	0.43
				22~32	2.4	1.48	1.09	0.86	0.72	0.62	0.54	0.49	0.45
				36~63	2.8	1.60	1.07	0.83	0.68	0.56	0.50	0.45	0.40
下翼缘			10~20	3.1	1.95	1.34	1.01	0.82	0.69	0.63	0.57	0.52	
			22~40	—	2.80	1.84	1.37	1.07	0.86	0.73	0.64	0.56	
			45~63	—	—	2.30	1.62	1.20	0.96	0.80	0.69	0.60	
均布荷载作用于 翼缘		上	10~20	1.7	1.12	0.84	0.68	0.57	0.50	0.45	0.41	0.37	
		22~40	2.1	1.30	0.93	0.73	0.60	0.51	0.45	0.40	0.36		
		45~63	2.6	1.45	0.97	0.73	0.59	0.50	0.44	0.38	0.35		
下翼缘		10~20	2.5	1.55	1.08	0.83	0.68	0.56	0.52	0.47	0.42		
		22~40	—	2.20	1.45	1.10	0.85	0.70	0.60	0.52	0.46		
		45~63	—	—	1.80	1.25	0.95	0.78	0.65	0.55	0.49		
5	跨中有侧向 支承点的梁 (不论荷载 作用于何处)			10~20	2.2	1.39	1.01	0.79	0.66	0.57	0.52	0.47	0.42
				22~40	3.0	1.80	1.24	0.96	0.76	0.65	0.56	0.49	0.43
				45~63	—	2.20	1.38	1.01	0.80	0.66	0.56	0.49	0.43

注 (1) 项次 1、2 中的集中荷载的含义见表 4-12 的注；

(2) 对 3 号钢和 2 号钢，应按表中的  $\varphi_s$  值取用；对 16 锰钢和 16 锰桥钢，表中的  $\varphi_s$  值应乘以  $\frac{2400}{\sigma_s}$ ；

(3) 未写出的数值均大于 3.60。

重量和启闭机容量。但是，桁架的制造比较费工，维护比较麻烦。小型水电站工程上闸门的主梁多采用实腹梁。

当主梁的跨度较大时，为缩减门槽的尺寸和节约钢材，可采用变截面的主梁，其端部梁高  $h_0$  常须减少为跨中梁高  $h$  的  $2/5 \sim 3/5$ ，即  $h_0 = (0.4 \sim 0.6)h$ ，梁的截面一般宜距两端支座为  $1/4 \sim 1/6$  跨度处开始改变，改变后的截面应满足强度和刚度的要求。

## (二) 主梁的荷载

主梁所受的荷载与梁格的连接形式及侧止水的布置情况有关。

### 1. 侧止水设置上游面

当侧止水设置在闸门的上游面时：

#### (1) 实腹式主梁 (图 4-25) 的荷载：

$$R_A = R_B = \frac{1}{2} q l_k \quad (4-40)$$

$$M_{max} = \frac{q l_k}{4} \left( l_0 - \frac{l_k}{2} \right) \quad (4-41)$$

表 4-16

轻 型 工 字 钢 的  $\varphi_n$  值

项次	荷 载 情 况		自由长度 $l$ (m)		2	3	4	5	6	7	8	9	10
			工字钢型号										
1	跨中无侧向	集中荷载作用于	上翼缘	10~20	1.45	0.92	0.70	0.56	0.47	0.41	0.36	0.32	0.28
				22~28	1.80	1.07	0.77	0.61	0.52	0.44	0.39	0.35	0.32
				32~40	2.40	1.30	0.89	0.69	0.56	0.48	0.42	0.37	0.34
				45~56	3.10	1.60	1.03	0.76	0.60	0.51	0.43	0.38	0.35
				63	—	1.90	1.18	0.86	0.66	0.55	0.47	0.41	0.37
2		下翼缘	10~18	2.40	1.40	0.98	0.75	0.61	0.52	0.45	0.39	0.34	
			20、22	3.40	1.80	1.16	0.86	0.68	0.57	0.48	0.42	0.37	
			25、28	—	2.30	1.46	1.06	0.83	0.67	0.57	0.49	0.43	
			32~40	—	3.00	1.80	1.29	0.97	0.79	0.66	0.56	0.49	
			45、50	—	—	2.30	1.60	1.18	0.92	0.76	0.64	0.55	
3		56、63	—	—	2.70	1.80	1.37	1.07	0.85	0.72	0.62		
3	支承点的梁	均布荷载作用于	上翼缘	10~20	1.30	0.81	0.60	0.48	0.40	0.35	0.31	0.27	0.24
				22~28	1.65	0.95	0.68	0.54	0.45	0.39	0.34	0.30	0.27
				32~40	2.15	1.15	0.80	0.61	0.49	0.42	0.36	0.32	0.29
				45~56	2.80	1.43	0.92	0.67	0.53	0.44	0.38	0.34	0.30
				63	—	1.71	1.07	0.76	0.59	0.49	0.41	0.36	0.32
4		下翼缘	10~18	1.90	1.12	0.80	0.62	0.51	0.43	0.37	0.32	0.28	
			20、22	2.70	1.40	0.94	0.69	0.56	0.46	0.39	0.34	0.30	
			25、28	—	1.80	1.17	0.84	0.66	0.55	0.47	0.40	0.35	
			32~40	—	2.30	1.43	1.02	0.78	0.62	0.53	0.45	0.40	
			45、50	—	3.00	1.80	1.20	0.91	0.72	0.60	0.50	0.44	
5		56、63	—	—	2.10	1.45	1.08	0.84	0.68	0.57	0.49		
5	跨中有侧向支承点的梁 (不论荷载作用于何处)	10~20	1.70	1.04	0.75	0.59	0.48	0.41	0.36	0.31	0.28		
		22	2.30	1.26	0.86	0.66	0.54	0.46	0.40	0.35	0.31		
		25~32	2.80	1.44	1.05	0.73	0.59	0.49	0.43	0.37	0.34		
		36~45	—	1.90	1.20	0.86	0.68	0.56	0.48	0.42	0.37		
		50~63	—	2.40	1.48	1.03	0.79	0.64	0.53	0.44	0.40		

注 见表4-15的注。

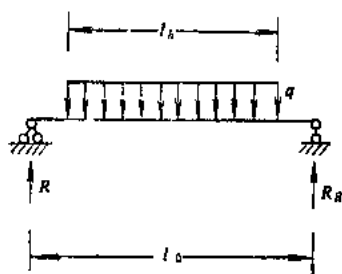


图 4-25 侧止水布置在闸门上游面时  
实腹式主梁的计算简图

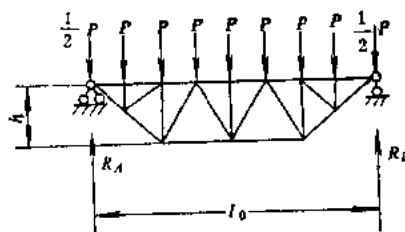


图 4-26 侧止水布置在闸门上游面时桁  
架式主梁的计算简图

式中  $q$  ——作用于梁上的均布荷载；

$l_k$  ——荷载跨度；

$l_0$  ——计算跨度；

$M_{max}$  ——最大弯矩；

$R_A, R_B$  ——支承反力。

(2) 桁架式主梁 (图 4-26) 的荷载: 图中  $P$  为桁架节点荷载, 由桁架上的总荷载除以节间数:  $h$  为桁架高, 一般为  $\left(\frac{1}{7} - \frac{1}{8}\right)l_0$ ;  $R_A, R_B$  为桁架支承反力。

杆件内力按桁架进行分析。

2. 侧止水设置下游面, 主横梁不承受水柱荷载

当侧止水设置在闸门的下游面、面板设在上游面时, 对不直接承受水柱荷载的主横梁还应考虑闸门侧向水压力对主横梁所引起的轴向压力, 按偏心受压构件计算 (图 4-27), 并参照本节四 (二) 4 进行; 图中  $N$  为轴向力, 其余符号意义同前。

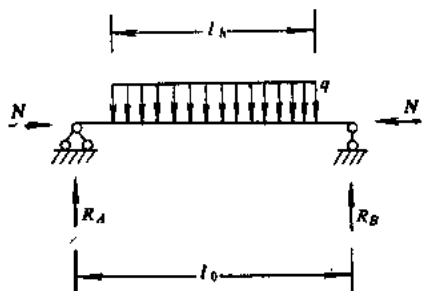


图 4-27 侧止水布置在闸门的下游面、面  
板设在上游面时主梁的计算简图

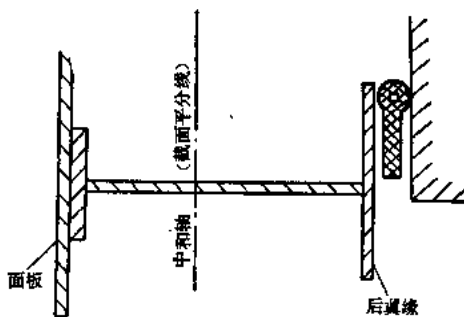


图 4-28 水柱荷载在主梁上的分配界线

3. 侧止水设置下游面, 主横梁承受水柱荷载

当侧止水设置在闸门的下游面, 面板设在上游面时, 对直接承受水柱荷载的主横梁, 由于承受双向 (水平和竖向) 水压力及轴向力, 按双向偏心受压构件计算。

计算水柱荷载分配时, 可假设一半 (以截面中和轴为界——即截面平分面积线为界, 见图 4-28) 由面板及部分腹板承担, 另一半由主梁后翼缘及部分腹板承担, 后者可视为支承在隔板上的多跨连续梁计算。



### (三) 主梁的设计计算

当主梁的内力确定之后,即可选择梁或桁架杆件的截面。当闸门面板与主梁直接焊牢时,部分面板可以作为主梁受压翼缘或桁架受压弦杆的组成部分。面板可被利用的有效宽度 $B$ 亦按本节一(三)计算。下面仅就小型水电站工程上常用的实腹式主梁(包括型钢梁和组合梁)加以介绍。

#### 1. 型钢梁的设计

由轧成的工字钢或槽钢制成的主梁与次梁的设计相类似,一般可按下列步骤进行设计:

(1) 根据梁的计算跨度与荷载,求得最大弯矩 $M$ 和最大剪力 $Q$ ;

(2) 按弯应力强度条件求得需要的截面抵抗矩 $W = \frac{M}{[\sigma]}$ ,当弯矩最大处有螺栓孔的,所需 $W$ 应增大10%~15%;

(3) 根据需要的 $W$ 从型钢表中选择适当的型钢,然后验算其强度、挠度和整体稳定性;

1) 弯应力强度按下式验算,

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq [\sigma]$$

2) 剪应力强度按下式验算,

$$\tau = \frac{QS}{I\delta} \leq [\tau]$$

由于轧成工字钢和槽钢的腹板相对较厚,除剪力相对很大的短梁以及梁的支承截面受到削弱等情况外,一般可不必验算剪应力强度,

3) 挠度按下式验算:

$$\frac{f}{L} = \beta \frac{PL^2}{EI_x} \leq \left[ \frac{f}{L} \right]$$

式中  $\beta$ ——系数,根据梁的荷载分布与支承情况而定。例如受均布荷载的简支梁 $\beta =$

$$\frac{5}{384}; \text{简支梁跨度中点受集中荷载 } P \text{ 时, } \beta = \frac{1}{48};$$

$P$ ——梁所受的荷载总值,例如,受均布荷载 $q$ 时, $P=ql$ ;

$EI_x$ ——梁的抗弯刚度;

$\left[ \frac{f}{L} \right]$ ——容许相对挠度,随各类结构的使用要求而定,见本章第一节二(一)2。

由于主梁直接与钢面板焊牢且有横向联结系的作用,所以主梁的整体稳定性得到了保证,设计时不必对此验算。

对于轧制工字钢和槽钢梁。由于腹板厚度较大,除在有很大的集中荷载处之外,通常都不需要布置加劲肋,亦不必验算其局部稳定性。

#### 2. 组合梁的设计

焊接组合梁的设计步骤大致如下:

(1) 根据梁的跨度与荷载求得最大弯矩、最大剪力以及强度、刚度、稳定,结合节

省钢材等要求, 来选择经济合理的截面尺寸 (简称截面选择), 有时还可在梁的弯矩较小处减小梁的截面 (简称截面改变);

(2) 计算梁的翼缘和腹板的连接焊缝 (翼缘焊缝), 验算组合梁的局部稳定性和设计腹板的加劲肋。现分述如下:

(1) 截面选择:

1) 主梁高度的确定。在平面钢闸门中, 主梁高度  $h$  是根据刚度、经济及钢板规格等条件决定的, 即根据最小梁高和经济梁高等因素来决定的。

(a) 最小梁高  $h_{\min}$  的确定: 根据刚度要求, 对受均布荷载的等截面简支梁按挠度计算公式可求出最小梁高  $h_{\min}$ :

$$h_{\min} = \frac{5}{24} \frac{[\sigma] l}{E \left[ \frac{f}{l} \right]} \quad (4-42)$$

式中  $[\sigma]$  ——容许弯应力;

$l$  ——主梁跨度;

$\left[ \frac{f}{l} \right]$  ——主梁容许相对挠度, 按本章第一节二(一)2取用;

$E$  ——材料的弹性模量。

(b) 经济梁高  $h_j$  的确定: 经济梁高就是主梁最小重量的梁高, 可按下式计算:

$$h_j = K \sqrt{\frac{M}{[\sigma] \delta}} \quad (4-43)$$

式中  $h_j$  ——经济梁高;

$M$  ——最大弯矩;

$\delta$  ——腹板厚度, cm, 可暂按经验公式估算:

$$\delta = 0.7 + 0.003h$$

$h$  ——可取前述最小梁高;

$[\sigma]$  ——容许弯应力;

$K$  ——系数, 对等截面梁和改变梁高的梁可取1.5左右, 对改变翼缘的梁可取1.3左右。

实际采用的梁高  $h$ , 介于最小梁高  $h_{\min}$  和经济梁高  $h_j$  之间, 一般比经济梁高  $h_j$  约小20%。初选梁高时, 根据主梁的高度与容许挠度有关, 也可采用:

$$h = \left( \frac{1}{10} \sim \frac{1}{6} \right) l \quad (4-44)$$

式中  $h$  ——主梁高度;

$l$  ——主梁的计算跨度。

露顶式闸门取式中的上限, 潜孔式闸门取式中的下限。

2) 选择腹板厚度  $\delta$ 。腹板厚度应根据剪应力强度、局部稳定性、防锈以及钢板规格等要求而定。工字形截面梁的剪力绝大部分是由腹板承受的, 腹板厚度可按下式决定:

$$\delta \geq 1.5 \frac{Q_{\max}}{h_0 [\tau]} \quad (4-45)$$

式中  $\delta$  ——腹板厚度, cm;

$Q_{\max}$  ——主梁承受的最大剪力, N;

$h_0$  ——主梁腹板高度, cm; 在初选梁截面时, 腹板的高度  $h_0$  即可取为梁高  $h$ ;

$[\tau]$  ——许用剪应力, Pa。

根据局部稳定要求, 一般宜选用  $\delta = \frac{h_0}{100} \sim \frac{h_0}{140}$ ; 考虑防腐蚀及制造时腹板不致产生过大的初弯曲, 腹板厚度一般不应小于 8mm。此外, 腹板厚度还须符合钢板规格, 见表 3-7。

3) 选择翼缘尺寸  $b_1$  和  $t_1$ 。组合梁的翼缘尺寸主要决定于弯应力强度条件, 同时还应满足整体稳定、局部稳定以及其他构造要求。

对称截面梁每个翼缘所需的截面积  $A_1 = b_1 t_1$  可由下式计算:

$$A_1 \approx \frac{W}{h} - \frac{\delta h}{b} \quad (4-46)$$

式中  $W$  ——主梁的截面抵抗矩,  $\text{cm}^3$ ;

$h$  ——主梁高度, cm;

$\delta$  ——主梁腹板厚度, cm。

求得  $A_1$  后即可根据其它条件选择翼缘宽度  $b_1$  和厚度  $t_1$ 。通常采用  $b_1 = \frac{h}{3} \sim \frac{h}{5}$ , 且不超过  $\frac{h}{2.5}$ , 如太宽则弯应力沿板宽的分布过分不均 (如图 4-29d); 如太窄则对整体稳定不利。为了保证梁的整体稳定, 一般应使  $b_1 \geq \frac{l}{15}$  (3 号钢) 或  $b_1 \geq \frac{l}{12}$  (16 锰钢), 其中  $l$  为受压翼缘的自由长度。

翼缘宽度  $b_1$  选定后, 即可算出其所需厚度  $t_1 = A_1 / b_1$ 。同时须考虑翼缘板局部稳定的要求:

$$t_1 \geq \frac{b_1}{30} \sqrt{\frac{\sigma_1}{2400}} \quad (4-47)$$

翼缘板厚度也不宜太厚, 对低碳钢不宜大于 40mm, 对低合金钢不宜大于 30mm, 以免翼缘焊缝产生过大的焊接应力, 同时厚板的轧制质量较差, 容许应力也较低。此外, 翼缘板的厚度还应符合钢板的规格尺寸。

当组合梁直接和钢面板用连续焊缝连接时, 部分面板可兼作组合梁上翼缘的一部分而参加整体弯曲。对于这种不对称截面的组合梁 (图 4-29e), 其下翼缘所需的截面积  $A_1$  仍可按式 (4-47) 求得; 与钢面板相连的上翼缘板则可按上述构造要求选用较小的尺寸 (可不考虑整体稳定要求); 也可将钢面板直接同梁腹板相焊接作为梁的上翼缘而不另设上翼缘板。

(2) 组合梁的截面改变。由于主梁所受弯矩是沿跨度变化的 (图 4-30), 为了缩减门槽的尺寸和节约钢材, 大跨度闸门可采用变截面的主梁, 截面变更的办法可以是改变梁

的高度，也可以是改变翼缘板的厚度和宽度，以及腹板的宽度等。在水工闸门上，则以改变梁在支承处的高度居多。但在跨度不大，主梁高度较小的闸门中，大多用改变翼缘截面尺寸的方法来改变梁截面的。

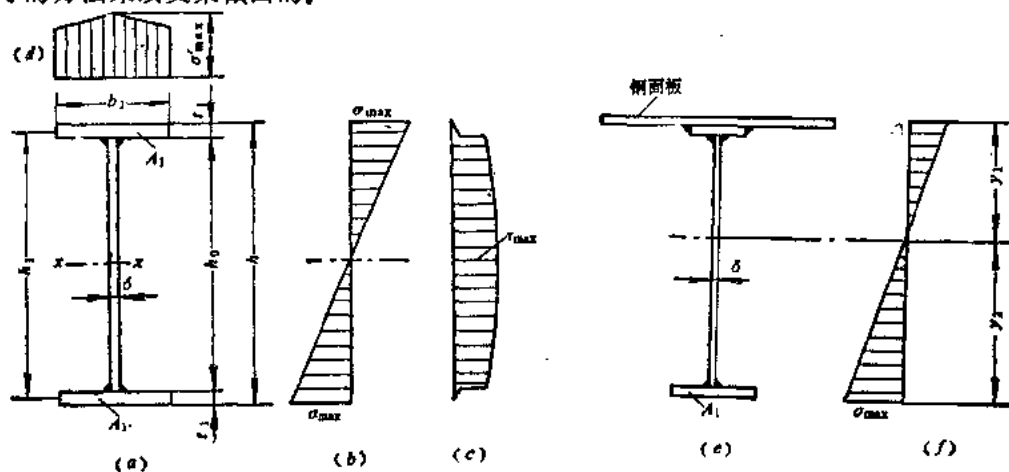


图 4-29 组合梁的截面尺寸和应力分布

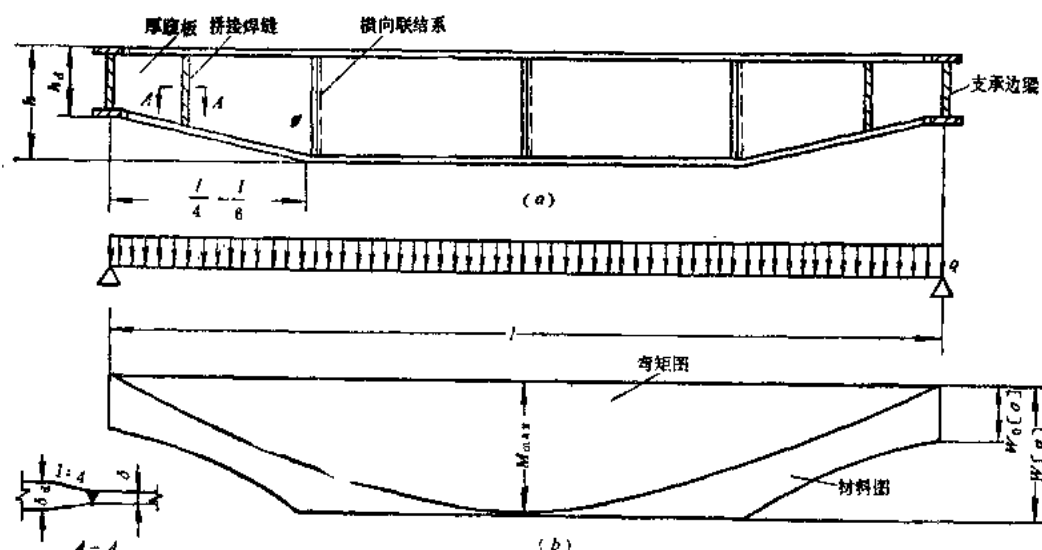


图 4-30 焊接梁截面高度的改变

梁高开始改变的位置一般取在离支点  $\frac{L}{4} \sim \frac{L}{6}$  处，主梁支承端的高度  $h_d$  可减小为跨中高度  $h$  的 0.4~0.6 倍，使梁高变化呈小于 1:3 的平缓坡度，同时应满足强度的要求，使梁截面的抗弯能力沿跨度的变化图形（即梁的材料图）能够包住梁的弯矩图。

对于变截面的主梁，主梁端部截面高度减小后，须按下式验算腹板的剪应力：

$$\tau = 1.5 \frac{Q_{max}}{\delta h_d} \leq [\tau] \quad (4-48)$$

式中  $Q_{max}$ ——主梁端部的最大剪力，N；

$\delta$ ——腹板厚度，cm；

$h_0$ ——主梁端部的腹板高度, cm。

如果支承端的剪力 $Q_{max}$ 很大, 在梁高改小后, 原来的腹板厚度难于满足剪切强度要求时, 可将靠近支点的一段腹板改用较厚的钢板, 其厚度 $\delta_2$ 由梁端剪切强度条件求得。这段较厚的腹板应从支承处向跨中延伸到原用较薄腹板能够满足剪应力强度的截面以外, 然后用对接焊缝拼接(如图4-30)。若两者厚度相差超过4mm, 则应将较厚腹板在拼接处的边缘按1:4的坡度刨成与薄腹板等厚, 再行对焊, 以减轻焊缝附近的应力集中。

在截面改变处, 由于同时受较大的正应力和剪应力, 故须按式(4-27)验算折算应力。

(3) 翼缘和腹板的连接——翼缘焊缝的计算。翼缘和腹板的连接焊缝厚度 $h_f$ 按下式计算:

$$h_f \geq \frac{Q_{max} S_1}{1.4 [\tau_f] I} \quad (4-49)$$

式中  $h_f$ ——焊缝厚度, cm;

$Q_{max}$ ——梁端最大剪力, N;

$S_1$ ——一个翼缘截面面积对梁的中和轴的面积矩; 当部分钢面板参加梁的受弯工作时,  $S_1$ 为一个翼缘和参加工作的部分钢面板截面积对梁的中和轴的面积矩之和,  $cm^3$ ;

$I$ ——在计算位置上, 梁的截面惯性矩,  $cm^4$ ;

$[\tau_f]$ ——焊缝的许用应力, Pa。

由上式求得的梁端翼缘焊缝厚度 $h_f$ 一般都较小, 所以在跨中剪力较小处就不须再缩小焊缝厚度, 全梁采用相同 $h_f$ 的连续焊缝。翼缘焊缝的最小厚度规定为 $h_f = \delta/2$ 或6mm。当变截面梁的梁端腹板须加厚时, 按照腹板厚度的改变范围, 翼缘焊缝可采用两种不同厚度。

(4) 主梁腹板局部稳定的验算: 根据腹板的高厚比 $h_0/\delta$ 的大小, 分三种情况:

1) 对受均布荷载的组合工字形截面, 当符合以下条件时, 可不验算腹板的局部稳定性:

$$\frac{h_0}{\delta} \leq 80 \sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}} \quad (4-50)$$

式中  $h_0$ ——腹板计算高度, cm;

$\delta$ ——腹板厚度, cm;

$\sigma_s$ ——钢板的屈服点, Pa。

2) 当 $80 \sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}} < \frac{h_0}{\delta} \leq 160 \sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}}$ 时, 腹板可能由于剪应力作用而失稳, 应配置横向加劲肋, 肋的间距 $a$ 应满足下式要求:

$$a \leq \frac{2000 h_0}{\frac{h_0}{\delta} \sqrt{\eta \tau} - 2500} \quad (4-51)$$

式中  $\tau$ ——所计算的梁段最大剪力 $Q_{max}$ 产生的腹板平均剪应力;

$$\tau = \frac{Q_{\max}}{h_0 \delta}$$

$\eta$ ——考虑腹板尚受弯应力 $\sigma$ 影响的增大系数, 应根据 $\sigma \left( \frac{h_0}{100\delta} \right)^2$  由表4-17查得。

表 4-17

$\eta$  值

$\sigma \left( \frac{h_0}{100\delta} \right)^2$	$\leq 1000$	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
$\eta$	1.00	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11	1.14	1.17
$\sigma \left( \frac{h_0}{100\delta} \right)^2$	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400
$\eta$	1.21	1.25	1.30	1.36	1.44	1.54	1.67	1.82	2.09

- 注 (1)  $\sigma$  为与腹板平均剪应力 $\tau$ 同一截面的腹板计算高度边缘的弯曲压应力(Pa);  
 (2) 公式(4-51)右端算得的值若大于 $2h_0$ 或分母为负值时, 取 $a = 2h_0$ ;  
 (3) 当梁上翼缘受有固定集中荷载时, 宜在该固定集中荷载作用处设置支承加劲肋。

加劲肋宜在腹板两侧成对称布置(见图4-31)。横向加劲肋的间距 $a$ 不得小于 $0.5h_0$ , 且不得大于 $2h_0$ , 其尺寸应按下列公式确定:

$$\left. \begin{array}{l} \text{外伸宽度} \quad b_f \geq \frac{h_0}{30} + 4\text{cm} \\ \text{厚度} \quad \delta_f \geq \frac{1}{15} b_f \end{array} \right\} \quad (4-52)$$

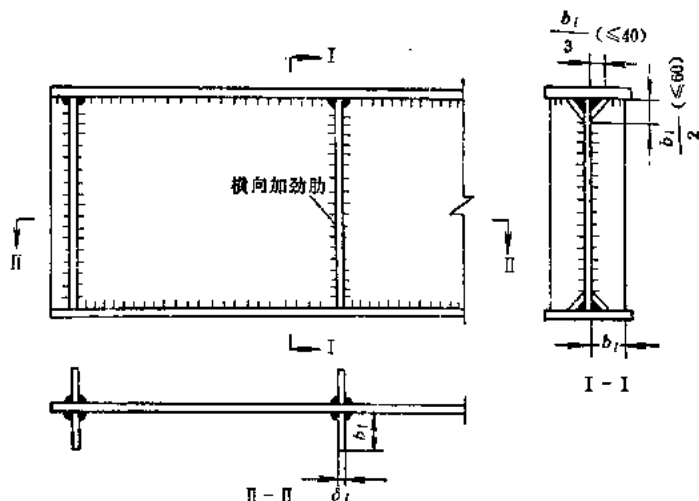


图 4-31 焊接梁横向加劲肋的构造与尺寸

上式的适用范围为 $a \leq 2h_0$ , 如遇到特殊情况,  $a > 2h_0$ 时, 则加劲肋尺寸须相应增大, 例如当 $a = 3h_0$ 时, 横向加劲肋宽度 $b_f$ 须增大30%。

在同时用横向加劲肋和纵向加劲肋加强的腹板中，横向加劲肋的尺寸除满足式(4-52)规定外，其截面对腹板水平轴线的惯性矩，应满足下式的要求：

$$I_1 \geq 3h_0\delta^3 \quad (4-53)$$

3) 当  $\frac{h_0}{\delta} > 160\sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}}$  时，腹板将主要由于弯应力作用而失稳。除配置横向加劲肋外，尚宜配置纵向加劲肋。一般梁的纵向加劲肋都布置在组合梁跨中弯矩较大范围内的腹板受压区（见图4-32），它离开腹板计算高度受压边缘的距离宜取为  $h_1 = \frac{h_0}{5} \sim \frac{h_0}{4}$ 。此时横向加劲肋间距  $a$  仍应按式(4-51)确定。但应以  $h_2 = h_0 - h_1$  来代替式中的  $h_0$ ，并取  $\eta = 1$ 。

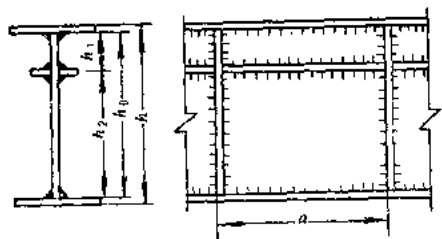


图 4-32 加劲肋布置图

纵向加劲肋的截面惯性矩  $I_2$  应同时满足下列两式的要求：

$$I_2 \geq \left(2.5 - 0.45 \frac{a}{h_0}\right) \frac{a^3}{h_0} \delta^3 \quad (4-54)$$

$$I_2 \geq 1.5h_0\delta^3 \quad (4-55)$$

加劲肋的贴角焊缝可采用最小厚度  $h_f = 6$  mm。为了避免这些焊缝同梁的翼缘焊缝汇集交叉而产生同号立体焊接应力，以防止焊接区的脆性断裂，加劲肋端部必须切角。切角宽约  $\frac{b_f}{3}$ ，但不大于40mm；切角高约  $\frac{b_f}{2}$ ，但不大于60mm（图4-31）。

#### 四、横向联结系和纵向联结系设计

（一）横向联结系（又称竖向联结系，见图4-6）

横向联结系的尺寸一般按构造要求确定，横向隔板的截面高度与主梁截面高度相同，而隔板厚度通常不大于8~10mm。横向隔板的应力一般很小，可不进行强度计算。它不另设上翼缘，隔板直接与面板和主梁的腹板焊牢，横向隔板的下翼缘一般用宽度为100~200mm、厚度为10~12mm的扁钢做成。为了减轻闸门重量，并增强隔板的局部稳定性，一般可在隔板的中部开孔，并在孔的周围焊上扁钢条加强其刚度。

（二）纵向联结系（又称门背联结系或起重桁架，见图4-7）

纵向联结系用以承受闸门的自重，有时也承受闸门顶部的水柱重或加重，其计算简图如图4-33所示。图中  $l_0$  为计算跨度； $G$  为闸门自重，估算公式见第二章第二节； $G_x$  为闸门自重传给下游门背联结系的门重：

$$G_x = G \frac{b_1}{b_1 + b_2}$$

图中  $G_1$  为闸门自重传给上游面板的门重，在计算联结系时，面板有足够的强度，故一般不计算  $G_1$ ； $P$  为传递至门背联结系节点上的荷载：

$$P = \frac{G_x}{n}$$

$n$  为桁架节间数。

各构件的内力按桁架进行分析, 可用图解法或数解法计算。一般来说, 对直线外形的桁架以数解法较好, 而折线外形则以图解法较好。桁架各杆件基本上只受轴心力作用, 可按轴心受拉和轴心受压构件计算。但如在弦杆节间内尚有荷载作用时, 在计算简图中需将节间荷载按杠杆原理分配给该节间相邻的两节点上,

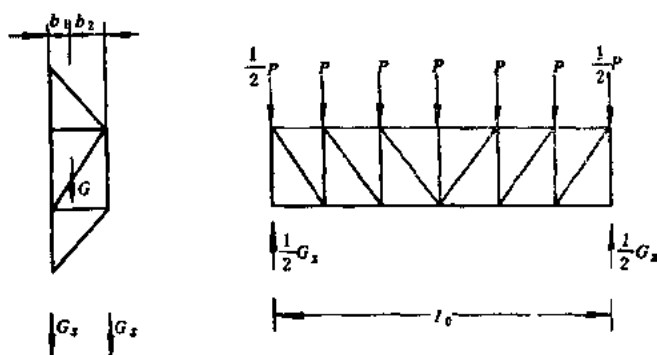


图 4-33 纵向联结系的计算简图

然后求出各杆轴心力。但对弦杆除承受轴心力外, 还要考虑由节间荷载而产生的弯矩作用, 即按偏心受压或偏心受拉杆件计算。下面介绍构件各种受力情况的计算。

#### 1. 轴心受拉和轴心受压构件计算

按下式验算强度:

$$\sigma = \frac{N}{A_j} \leq [\sigma] \quad (4-56)$$

式中  $N$ ——轴心力;

$A_j$ ——净截面面积。

轴心受拉构件按下式验算刚度:

$$\lambda = \frac{l}{r} \leq [\lambda] \quad (4-57)$$

式中  $[\lambda]$ ——许可长细比, 对主要构件为200, 次要构件为250, 联系构件为350;

$r$ ——构件截面的回转半径(又称惯性半径), 可按表 4-27 计算或直接从表3-9至表3-14查得;

$l$ ——构件计算长度, 确定桁架弦杆和单系腹杆的长细比时, 其计算长度按表 4-18采用。

表 4-18 桁架弦杆和单系腹杆的计算长度

项次	弯曲方向	弦杆	腹杆	
			支座斜杆和支座竖杆	其它腹杆
1	在桁架平面内	$l$	$l$	$0.8l$
2	在桁架平面外	$l_1$	$l$	$l$
3	斜平面	—	$l$	$0.9l$

注 (1)  $l$  为构件的几何长度(节点中心间的距离);  $l_1$  为桁架弦杆侧向支承点之间的距离。

(2) 项次 3 适用于构件截面两主轴均不在桁架平面内的单角钢腹杆和双角钢十字形截面腹杆。

如桁架弦杆侧向支承点间的距离为节间长度的 2 倍(图4-34), 且侧向支承点之间压力有变化时, 则该弦杆在桁架平面外的计算长度, 应按下式确定:

$$l_e = l_1 \left( 0.75 + 0.25 \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (4-58)$$

但不小于  $0.5l_1$ 。



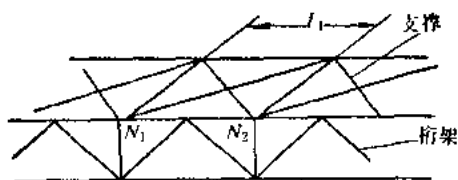


图 4-34 弦杆在侧向支承点间压力有变化的桁架简图

式中  $N_1$  ——较大的压力，计算时取正值；  
 $N_2$  ——较小的压力或拉力，计算时压力取正值，拉力取负值。

桁架再分式腹杆体系的受压主斜杆及K形腹杆体系的竖杆等在桁架平面外的计算长度也应按公式(4-58)确定(受拉主斜杆仍取  $l_1$ )，在桁架平面内则采用节点中心间距离。

确定桁架交叉腹杆的长细比时，在桁架平面内的计算长度应取节点中心到交叉点间的距离；在桁架平面外的计算长度应按下列规定采用：

压杆：

当相交的另一杆受拉，且两杆均不中断  $0.5 l$ ；

当相交的另一杆受拉，两杆中有一杆中断并以节点板搭接  $0.7 l$ ；

其它情况  $l$ ；

拉杆：  $l$ 。

采用以上数值时应注意三点：

1)  $l$  为节点中心间距离(交叉点不作为节点考虑)；

2) 当两交叉杆都受压时，不宜有一杆中断；

3) 当确定交叉腹杆中单角钢压杆斜平面内的长细比时，计算长度应取节点中心至交叉点间的距离。

## 2. 轴心受压构件稳定验算

按下式验算整体稳定性：

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} \leq [\sigma] \quad (4-59)$$

式中  $\varphi$  ——根据构件最大长细比决定的稳定系数，可按表4-19或表4-20查取，在计算长细比  $\lambda$  时仍需考虑到式(4-57)中对  $l$  的规定。

按式(4-57)验算刚度，压杆的许可长细比  $[\lambda]$  规定为：主要构件120，次要构件150，联系构件200。

为了保证实腹式轴心受压构件的腹板局部稳定性，腹板的计算高度  $h_0$  与厚度  $\delta$  之比宜满足下式要求：

$$\frac{h_0}{\delta} \leq 50 \sqrt{\frac{2400}{\sigma_c}} + 0.1 \lambda \quad (4-60)$$

式中  $h_0$  ——腹板的计算高度，见图4-32；

$\lambda$  ——构件最大长细比。

当验算结果不满足式(4-60)的要求时，在计算腹板截面面积时，仅考虑腹板两侧宽度各为  $20 \delta \sqrt{\frac{2400}{\sigma_c}}$  (从腹板计算高度边缘算起)的部分(图4-35)，中间部分可能失稳，

仅作为联系之用。此时，构件截面应重新验算；也可用纵向加劲肋加强，用纵向加劲肋加强的腹板，应按式（4-60）计算受压较大的翼缘与加劲肋之间的高厚比。纵向加劲肋应成对配置，其一侧外伸宽度不应小于 $10\delta$ ，厚度不应小于 $0.75\delta$ （ $\delta$ 为压杆的腹板厚度）。

此外，受压构件的未镶边板的外伸宽度（如图4-36，即焊接梁受压翼缘的外伸宽度和铆接梁受压翼缘从翼缘角钢的外排铆钉算起的外伸宽度）不应超过 $15t\sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}}$ （ $t$ 为对焊接梁为翼缘厚度；对铆接梁为不包括翼缘角钢厚度的翼缘板束厚度）。

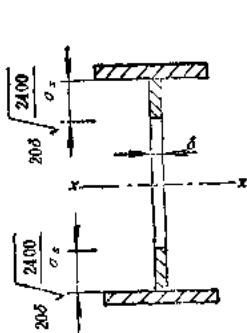


图 4-35 当不满足局部稳定时，腹板两侧的宽度取值图

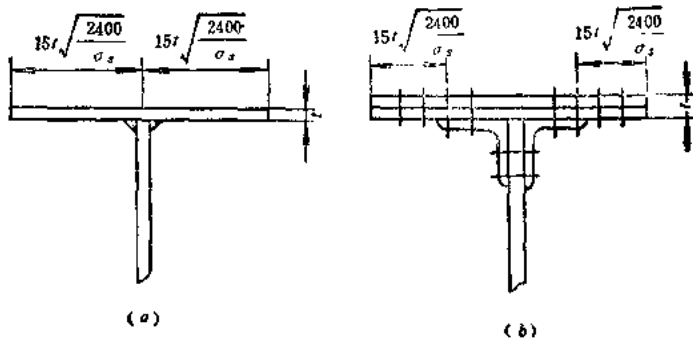


图 4-36 组合梁的翼缘图  
(a)焊接梁；(b)铆接梁

### 3. 偏心受拉构件

当弯矩作用在主平面内时，按下式验算强度：

$$\sigma = \frac{N}{A_I} \pm \frac{M_x}{W_{Ix}} \pm \frac{M_y}{W_{Iy}} \leq [\sigma] \quad (4-61)$$

式中  $A_I$ ——构件的净截面面积；

$M_x, M_y$ ——构件对  $x$  轴和  $y$  轴的弯矩；

$W_{Ix}, W_{Iy}$ ——构件对  $x$  轴和  $y$  轴的净截面抵抗矩。

刚度仍按式（4-57）验算。

### 4. 偏心受压构件

（1）强度验算：当弯矩作用在主平面内时，仍按式（4-61）验算。

（2）整体稳定性验算：与面板不连接的梁应作如下验算：

1）当弯矩作用在一个对称轴平面内时，应按下列规定分别计算弯矩作用平面内外的稳定性。

（a）弯矩作用平面内。当偏心率  $e \leq 30$  时，应按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_p A} \leq [\sigma] \quad (4-62)$$

式中  $\varphi_p$ ——实腹式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数。根据截面型式、长细比  $\lambda$ 、偏心方向和偏心率  $e$  按表4-21、表4-22和表4-23采用。偏心率  $e$  是荷载

表 4-19

3号钢和2号钢轴心受压构件的稳定系数 $\varphi$ 

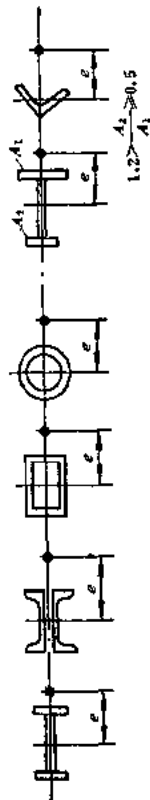
$\lambda$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997	0.996
10	0.995	0.994	0.993	0.992	0.991	0.989	0.988	0.987	0.985	0.983
20	0.981	0.979	0.977	0.975	0.973	0.971	0.969	0.966	0.963	0.961
30	0.958	0.956	0.953	0.950	0.947	0.944	0.941	0.937	0.934	0.931
40	0.927	0.923	0.920	0.916	0.912	0.908	0.904	0.900	0.896	0.892
50	0.888	0.884	0.879	0.875	0.870	0.866	0.861	0.856	0.851	0.847
60	0.842	0.837	0.832	0.826	0.821	0.816	0.811	0.805	0.800	0.795
70	0.789	0.784	0.778	0.772	0.767	0.761	0.755	0.749	0.743	0.737
80	0.731	0.725	0.719	0.713	0.707	0.701	0.695	0.688	0.682	0.676
90	0.669	0.663	0.657	0.650	0.644	0.637	0.631	0.624	0.617	0.611
100	0.604	0.597	0.591	0.584	0.577	0.570	0.563	0.557	0.550	0.543
110	0.536	0.529	0.522	0.515	0.508	0.501	0.494	0.487	0.480	0.473
120	0.466	0.459	0.452	0.445	0.439	0.432	0.426	0.420	0.413	0.407
130	0.401	0.396	0.390	0.384	0.379	0.374	0.369	0.364	0.359	0.354
140	0.349	0.344	0.340	0.335	0.331	0.327	0.322	0.318	0.314	0.310
150	0.306	0.303	0.299	0.295	0.292	0.288	0.285	0.281	0.278	0.275
160	0.272	0.268	0.265	0.262	0.259	0.256	0.254	0.251	0.248	0.245
170	0.243	0.240	0.237	0.235	0.232	0.230	0.227	0.225	0.223	0.220
180	0.218	0.216	0.214	0.212	0.210	0.207	0.205	0.203	0.201	0.199
190	0.197	0.196	0.194	0.192	0.190	0.188	0.187	0.185	0.183	0.181
200	0.180	0.178	0.176	0.175	0.173	0.172	0.170	0.169	0.167	0.166
210	0.164	0.163	0.162	0.160	0.159	0.158	0.156	0.155	0.154	0.152
220	0.151	0.150	0.149	0.147	0.146	0.145	0.144	0.143	0.142	0.141
230	0.139	0.138	0.137	0.136	0.135	0.134	0.133	0.132	0.131	0.130
240	0.129	0.128	0.127	0.126	0.125	0.125	0.124	0.123	0.122	0.121
250	0.120									

表 4-20

16锰钢和16锰桥钢轴心受压构件的稳定系数 $\varphi$ 

$\lambda$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997	0.996	0.994
10	0.993	0.992	0.990	0.989	0.987	0.985	0.983	0.980	0.978	0.976
20	0.973	0.970	0.967	0.964	0.961	0.958	0.955	0.951	0.948	0.944
30	0.940	0.936	0.932	0.928	0.923	0.919	0.915	0.910	0.905	0.900
40	0.895	0.890	0.885	0.880	0.874	0.869	0.863	0.858	0.852	0.846
50	0.840	0.834	0.828	0.822	0.815	0.809	0.803	0.796	0.789	0.783
60	0.776	0.769	0.762	0.755	0.748	0.741	0.734	0.727	0.719	0.712
70	0.705	0.697	0.690	0.682	0.674	0.667	0.659	0.651	0.643	0.635
80	0.627	0.619	0.611	0.603	0.595	0.587	0.579	0.571	0.563	0.554
90	0.546	0.538	0.530	0.521	0.513	0.504	0.496	0.488	0.479	0.471
100	0.462	0.454	0.445	0.436	0.428	0.420	0.413	0.405	0.398	0.391
110	0.384	0.378	0.371	0.365	0.359	0.353	0.347	0.341	0.336	0.331
120	0.325	0.320	0.315	0.310	0.305	0.301	0.296	0.292	0.288	0.283
130	0.279	0.275	0.271	0.267	0.263	0.260	0.256	0.253	0.249	0.246
140	0.242	0.239	0.236	0.233	0.230	0.227	0.224	0.221	0.218	0.215
150	0.213	0.210	0.207	0.205	0.202	0.200	0.197	0.195	0.193	0.190
160	0.188	0.186	0.184	0.182	0.180	0.178	0.176	0.174	0.172	0.170
170	0.168	0.166	0.164	0.162	0.161	0.159	0.157	0.156	0.154	0.152
180	0.151	0.149	0.148	0.146	0.145	0.143	0.142	0.140	0.139	0.138
190	0.136	0.135	0.134	0.132	0.131	0.130	0.129	0.128	0.126	0.125
200	0.124	0.123	0.122	0.121	0.120	0.118	0.117	0.116	0.115	0.114
210	0.113	0.112	0.111	0.110	0.109	0.108	0.108	0.107	0.106	0.105
220	0.104	0.103	0.102	0.101	0.101	0.100	0.099	0.098	0.097	0.097
230	0.096	0.095	0.094	0.094	0.093	0.092	0.091	0.091	0.090	0.089
240	0.089	0.088	0.087	0.087	0.086	0.085	0.085	0.084	0.084	0.083
250	0.082									

表 4-21

实腹式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数  $\varphi$  (—)

$\lambda$	$\varepsilon$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0	0	1.000	0.865	0.763	0.682	0.616	0.563	0.517	0.479	0.446	0.417	0.391	0.340	0.300	0.267	0.240
10	10	0.995	0.848	0.743	0.666	0.601	0.548	0.503	0.467	0.434	0.406	0.382	0.332	0.294	0.263	0.237
20	20	0.981	0.831	0.725	0.645	0.582	0.529	0.488	0.452	0.419	0.391	0.368	0.322	0.285	0.255	0.231
30	30	0.958	0.812	0.705	0.623	0.560	0.509	0.469	0.433	0.402	0.377	0.355	0.311	0.275	0.247	0.224
40	40	0.927	0.788	0.679	0.598	0.537	0.487	0.448	0.414	0.385	0.361	0.342	0.299	0.265	0.238	0.216
50	50	0.888	0.760	0.650	0.571	0.512	0.465	0.426	0.395	0.367	0.345	0.327	0.287	0.255	0.229	0.208
60	60	0.842	0.730	0.619	0.543	0.485	0.442	0.406	0.375	0.349	0.328	0.312	0.275	0.245	0.221	0.201
70	70	0.789	0.693	0.586	0.513	0.461	0.419	0.385	0.356	0.332	0.312	0.297	0.263	0.235	0.212	0.195
80	80	0.731	0.651	0.553	0.485	0.434	0.396	0.363	0.338	0.316	0.297	0.283	0.252	0.225	0.203	0.186
90	90	0.669	0.602	0.515	0.455	0.409	0.373	0.344	0.320	0.299	0.282	0.267	0.240	0.215	0.195	0.178
100	100	0.604	0.549	0.474	0.423	0.383	0.350	0.325	0.302	0.283	0.267	0.256	0.229	0.205	0.185	0.171
110	110	0.536	0.494	0.434	0.390	0.356	0.328	0.306	0.285	0.268	0.253	0.243	0.218	0.196	0.178	0.164
120	120	0.466	0.433	0.394	0.358	0.329	0.306	0.286	0.268	0.252	0.240	0.230	0.208	0.187	0.170	0.157
130	130	0.401	0.387	0.358	0.328	0.303	0.284	0.266	0.251	0.237	0.226	0.219	0.199	0.179	0.163	0.152
140	140	0.349	0.354	0.321	0.299	0.279	0.262	0.248	0.234	0.222	0.212	0.205	0.189	0.171	0.156	0.145
150	150	0.306	0.306	0.294	0.274	0.257	0.242	0.229	0.218	0.208	0.200	0.194	0.179	0.163	0.150	0.139
160	160	0.272	0.272	0.267	0.250	0.236	0.225	0.213	0.203	0.195	0.187	0.181	0.169	0.155	0.143	0.134
170	170	0.243	0.243	0.243	0.229	0.217	0.207	0.197	0.189	0.182	0.177	0.172	0.160	0.147	0.136	0.128
180	180	0.218	0.218	0.218	0.209	0.200	0.192	0.184	0.177	0.170	0.166	0.162	0.151	0.139	0.129	0.122
190	190	0.197	0.197	0.197	0.193	0.184	0.177	0.170	0.164	0.158	0.156	0.152	0.142	0.132	0.123	0.116
200	200	0.180	0.180	0.180	0.178	0.171	0.164	0.158	0.153	0.148	0.145	0.142	0.134	0.125	0.117	0.110

续表

$\frac{\varepsilon}{\lambda}$	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10	12	14	16	18	20	25	30
0	0.213	0.199	0.183	0.170	0.157	0.147	0.130	0.116	0.105	0.098	0.078	0.060	0.059	0.053	0.042	0.035
10	0.215	0.196	0.181	0.168	0.156	0.146	0.129	0.115	0.104	0.087	0.075	0.066	0.059	0.053	0.042	0.035
20	0.211	0.193	0.178	0.165	0.153	0.143	0.127	0.114	0.103	0.086	0.074	0.065	0.058	0.052	0.041	0.035
30	0.205	0.189	0.174	0.162	0.150	0.140	0.125	0.112	0.101	0.085	0.074	0.065	0.058	0.052	0.041	0.034
40	0.199	0.183	0.170	0.158	0.147	0.138	0.122	0.110	0.100	0.084	0.073	0.064	0.057	0.052	0.041	0.034
50	0.192	0.177	0.165	0.154	0.144	0.135	0.120	0.108	0.098	0.083	0.072	0.063	0.056	0.051	0.040	0.033
60	0.185	0.171	0.159	0.149	0.140	0.132	0.117	0.106	0.096	0.081	0.071	0.062	0.056	0.050	0.040	0.033
70	0.178	0.165	0.154	0.144	0.136	0.128	0.114	0.103	0.094	0.080	0.070	0.061	0.055	0.049	0.039	0.033
80	0.171	0.159	0.148	0.139	0.131	0.124	0.111	0.101	0.092	0.078	0.068	0.060	0.054	0.049	0.039	0.033
90	0.164	0.153	0.143	0.134	0.127	0.120	0.108	0.099	0.090	0.077	0.067	0.059	0.053	0.048	0.038	0.032
100	0.158	0.147	0.138	0.130	0.122	0.116	0.105	0.096	0.088	0.075	0.066	0.058	0.053	0.048	0.038	0.032
110	0.152	0.142	0.133	0.125	0.118	0.112	0.102	0.093	0.086	0.074	0.065	0.057	0.052	0.047	0.037	0.031
120	0.146	0.136	0.128	0.120	0.114	0.108	0.098	0.090	0.083	0.072	0.063	0.056	0.051	0.046	0.037	0.031
130	0.140	0.131	0.123	0.116	0.110	0.104	0.095	0.088	0.081	0.070	0.062	0.055	0.050	0.045	0.037	0.030
140	0.135	0.126	0.118	0.112	0.106	0.101	0.092	0.085	0.079	0.069	0.061	0.054	0.049	0.045	0.036	0.030
150	0.130	0.121	0.114	0.108	0.102	0.097	0.089	0.082	0.076	0.067	0.059	0.053	0.048	0.044	0.036	0.030
160	0.125	0.116	0.110	0.104	0.099	0.094	0.086	0.079	0.074	0.065	0.058	0.052	0.047	0.043	0.035	0.029
170	0.120	0.112	0.106	0.100	0.095	0.091	0.084	0.077	0.071	0.063	0.056	0.051	0.046	0.043	0.035	0.029
180	0.115	0.108	0.102	0.097	0.092	0.088	0.081	0.075	0.069	0.061	0.055	0.050	0.045	0.042	0.034	0.028
190	0.110	0.104	0.098	0.094	0.089	0.085	0.078	0.072	0.067	0.060	0.054	0.049	0.044	0.041	0.034	0.028
200	0.105	0.099	0.094	0.090	0.086	0.083	0.076	0.070	0.065	0.058	0.052	0.048	0.043	0.040	0.033	0.028

注 对3号钢和2号钢,应取实际长细比 $\lambda$ ;对16锰钢和16锰桥钢,应取假定长细比 $\lambda\sqrt{\frac{\sigma_s}{2400}}$ 代替实际长细比 $\lambda$ 。

表 4-22

实腹式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数 $\varphi$ 。(二)

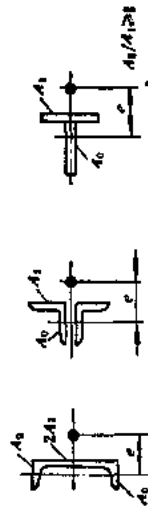
$\frac{e}{h}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0	1.000	0.930	0.875	0.819	0.766	0.720	0.675	0.630	0.586	0.562	0.534	0.468	0.414	0.370	0.333
10	0.995	0.920	0.855	0.795	0.742	0.695	0.648	0.610	0.575	0.546	0.518	0.455	0.404	0.362	0.325
20	0.981	0.900	0.826	0.766	0.710	0.662	0.620	0.583	0.550	0.520	0.495	0.439	0.390	0.349	0.315
30	0.958	0.875	0.795	0.730	0.680	0.630	0.591	0.555	0.525	0.496	0.473	0.420	0.373	0.335	0.303
40	0.927	0.830	0.753	0.688	0.635	0.597	0.560	0.526	0.494	0.464	0.449	0.399	0.355	0.320	0.290
50	0.888	0.788	0.712	0.647	0.598	0.558	0.524	0.492	0.462	0.436	0.420	0.377	0.338	0.304	0.277
60	0.842	0.735	0.668	0.606	0.560	0.523	0.491	0.459	0.433	0.412	0.395	0.355	0.319	0.289	0.263
70	0.789	0.676	0.618	0.559	0.518	0.482	0.453	0.428	0.403	0.381	0.370	0.334	0.301	0.273	0.249
80	0.731	0.630	0.572	0.521	0.480	0.446	0.417	0.393	0.370	0.358	0.344	0.314	0.283	0.258	0.236
90	0.669	0.571	0.521	0.477	0.440	0.411	0.388	0.364	0.347	0.333	0.322	0.294	0.266	0.243	0.224
100	0.604	0.530	0.478	0.441	0.408	0.379	0.357	0.336	0.317	0.303	0.292	0.275	0.250	0.229	0.211
110	0.536	0.470	0.435	0.403	0.373	0.352	0.330	0.310	0.294	0.283	0.272	0.257	0.234	0.216	0.200
120	0.466	0.431	0.396	0.365	0.341	0.320	0.301	0.288	0.273	0.264	0.252	0.239	0.221	0.203	0.189
130	0.401	0.388	0.355	0.330	0.310	0.293	0.278	0.264	0.251	0.243	0.234	0.224	0.206	0.191	0.178
140	0.349	0.318	0.323	0.304	0.285	0.271	0.256	0.247	0.235	0.227	0.219	0.209	0.193	0.180	0.168
150	0.306	0.306	0.290	0.274	0.260	0.247	0.237	0.227	0.217	0.208	0.205	0.193	0.182	0.163	0.158
160	0.272	0.272	0.263	0.248	0.235	0.227	0.218	0.207	0.200	0.194	0.190	0.180	0.170	0.159	0.149
170	0.243	0.243	0.240	0.228	0.218	0.209	0.201	0.193	0.187	0.182	0.177	0.168	0.159	0.150	0.141
180	0.218	0.217	0.217	0.208	0.200	0.191	0.185	0.178	0.173	0.169	0.165	0.158	0.149	0.141	0.133
190	0.197	0.197	0.197	0.191	0.184	0.176	0.171	0.165	0.160	0.156	0.152	0.148	0.141	0.133	0.126
200	0.180	0.180	0.180	0.176	0.170	0.165	0.160	0.155	0.150	0.146	0.142	0.137	0.132	0.125	0.119

续表

$\lambda \backslash \delta$	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10	12	14	16	18	20	25	30
0	0.303	0.277	0.256	0.235	0.220	0.205	0.182	0.162	0.147	0.123	0.106	0.094	0.084	0.075	0.060	0.050
10	0.298	0.271	0.251	0.231	0.217	0.201	0.179	0.160	0.145	0.122	0.105	0.093	0.083	0.074	0.060	0.050
20	0.288	0.263	0.243	0.225	0.210	0.196	0.174	0.157	0.141	0.120	0.102	0.090	0.080	0.072	0.059	0.049
30	0.277	0.254	0.234	0.218	0.203	0.191	0.169	0.152	0.138	0.117	0.100	0.087	0.078	0.071	0.058	0.048
40	0.265	0.243	0.226	0.210	0.196	0.184	0.164	0.148	0.135	0.114	0.098	0.086	0.077	0.070	0.057	0.047
50	0.253	0.234	0.216	0.201	0.189	0.177	0.159	0.143	0.130	0.111	0.096	0.085	0.075	0.069	0.056	0.046
60	0.241	0.224	0.207	0.193	0.182	0.171	0.153	0.138	0.126	0.107	0.094	0.084	0.074	0.068	0.055	0.045
70	0.230	0.213	0.198	0.185	0.174	0.164	0.147	0.134	0.122	0.104	0.091	0.082	0.073	0.066	0.054	0.044
80	0.218	0.203	0.189	0.177	0.167	0.157	0.142	0.129	0.118	0.101	0.089	0.080	0.072	0.065	0.053	0.043
90	0.207	0.192	0.180	0.169	0.160	0.151	0.136	0.124	0.114	0.098	0.087	0.078	0.070	0.063	0.052	0.042
100	0.197	0.183	0.172	0.161	0.153	0.144	0.131	0.120	0.110	0.095	0.084	0.075	0.068	0.062	0.051	0.042
110	0.186	0.173	0.163	0.154	0.146	0.138	0.126	0.115	0.106	0.092	0.081	0.073	0.066	0.060	0.050	0.041
120	0.176	0.165	0.155	0.147	0.138	0.132	0.120	0.110	0.102	0.089	0.079	0.071	0.065	0.059	0.049	0.041
130	0.166	0.156	0.147	0.139	0.132	0.126	0.115	0.106	0.098	0.086	0.076	0.068	0.062	0.057	0.048	0.040
140	0.158	0.149	0.140	0.133	0.126	0.121	0.110	0.102	0.095	0.084	0.074	0.066	0.060	0.055	0.047	0.040
150	0.149	0.141	0.133	0.126	0.120	0.115	0.106	0.099	0.091	0.080	0.071	0.064	0.059	0.054	0.046	0.039
160	0.141	0.134	0.127	0.120	0.115	0.110	0.101	0.094	0.087	0.077	0.069	0.063	0.058	0.053	0.045	0.038
170	0.134	0.127	0.120	0.114	0.110	0.105	0.097	0.090	0.084	0.074	0.067	0.061	0.057	0.052	0.044	0.038
180	0.126	0.120	0.114	0.109	0.104	0.100	0.093	0.086	0.080	0.072	0.065	0.059	0.055	0.051	0.043	0.037
190	0.120	0.114	0.109	0.104	0.099	0.096	0.090	0.083	0.078	0.070	0.063	0.057	0.053	0.049	0.042	0.036
200	0.113	0.107	0.103	0.099	0.095	0.092	0.086	0.079	0.075	0.068	0.061	0.055	0.052	0.048	0.041	0.035

注 见表4-21的注。

表 4-23 实腹式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数  $\varphi$ , (三)



$\frac{e}{\lambda}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0	1.000	0.893	0.795	0.707	0.629	0.560	0.500	0.448	0.404	0.365	0.333	0.271	0.225	0.192	0.167
10	0.995	0.872	0.773	0.685	0.610	0.546	0.487	0.438	0.393	0.357	0.324	0.265	0.217	0.188	0.165
20	0.981	0.851	0.747	0.662	0.590	0.525	0.468	0.422	0.380	0.347	0.318	0.258	0.216	0.184	0.161
30	0.958	0.825	0.720	0.637	0.566	0.501	0.450	0.404	0.365	0.333	0.307	0.250	0.209	0.179	0.156
40	0.927	0.799	0.691	0.608	0.540	0.478	0.426	0.386	0.350	0.319	0.293	0.241	0.202	0.174	0.152
50	0.888	0.758	0.657	0.577	0.513	0.456	0.408	0.365	0.330	0.303	0.280	0.231	0.194	0.167	0.146
60	0.842	0.733	0.626	0.547	0.486	0.432	0.387	0.350	0.315	0.280	0.268	0.220	0.183	0.159	0.139
70	0.789	0.699	0.590	0.518	0.458	0.408	0.368	0.329	0.297	0.272	0.251	0.207	0.173	0.151	0.133
80	0.731	0.655	0.557	0.483	0.430	0.380	0.340	0.305	0.275	0.251	0.231	0.193	0.163	0.144	0.127
90	0.689	0.608	0.520	0.451	0.397	0.348	0.311	0.278	0.253	0.232	0.213	0.182	0.154	0.137	0.121
100	0.604	0.555	0.473	0.408	0.359	0.315	0.283	0.254	0.230	0.211	0.196	0.171	0.147	0.130	0.116
110	0.536	0.501	0.426	0.367	0.323	0.286	0.256	0.232	0.214	0.198	0.191	0.161	0.140	0.123	0.110
120	0.466	0.436	0.378	0.330	0.288	0.255	0.230	0.212	0.197	0.185	0.179	0.151	0.132	0.118	0.106
130	0.401	0.383	0.332	0.293	0.260	0.235	0.214	0.200	0.183	0.175	0.167	0.141	0.125	0.112	0.102
140	0.349	0.330	0.291	0.260	0.235	0.216	0.200	0.185	0.173	0.162	0.156	0.135	0.120	0.107	0.096
150	0.306	0.302	0.265	0.239	0.218	0.199	0.184	0.170	0.158	0.149	0.146	0.127	0.113	0.101	0.092
160	0.272	0.270	0.241	0.218	0.200	0.184	0.170	0.158	0.148	0.140	0.138	0.120	0.106	0.096	0.088
170	0.243	0.241	0.217	0.198	0.182	0.168	0.157	0.147	0.138	0.131	0.129	0.113	0.102	0.092	0.083
180	0.218	0.217	0.197	0.181	0.167	0.156	0.145	0.137	0.130	0.124	0.121	0.107	0.096	0.086	0.080
190	0.197	0.197	0.181	0.166	0.155	0.145	0.135	0.129	0.122	0.115	0.115	0.100	0.092	0.084	0.077
200	0.180	0.179	0.166	0.154	0.144	0.135	0.127	0.120	0.114	0.109	0.108	0.096	0.088	0.080	0.074



续表

$\lambda$	$\varepsilon$	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10	12	14	16	18	20	25	30
0	0	0.148	0.133	0.119	0.109	0.100	0.092	0.080	0.071	0.064	0.054	0.047	0.041	0.035	0.031	0.024	0.020
	10	0.146	0.130	0.118	0.108	0.099	0.092	0.079	0.070	0.062	0.053	0.046	0.040	0.035	0.031	0.024	0.020
	20	0.144	0.128	0.117	0.106	0.098	0.090	0.078	0.069	0.061	0.052	0.045	0.039	0.034	0.030	0.024	0.020
	30	0.140	0.125	0.113	0.103	0.095	0.088	0.076	0.067	0.060	0.051	0.044	0.038	0.033	0.029	0.023	0.019
	40	0.135	0.121	0.109	0.100	0.092	0.086	0.075	0.066	0.059	0.050	0.043	0.037	0.032	0.029	0.023	0.019
60	50	0.131	0.117	0.106	0.097	0.089	0.082	0.073	0.065	0.058	0.049	0.042	0.037	0.032	0.029	0.023	0.019
	60	0.125	0.112	0.102	0.094	0.087	0.080	0.071	0.063	0.057	0.048	0.041	0.036	0.032	0.028	0.022	0.018
	70	0.120	0.108	0.099	0.090	0.083	0.078	0.069	0.062	0.055	0.047	0.041	0.036	0.031	0.027	0.022	0.018
	80	0.115	0.103	0.095	0.088	0.081	0.075	0.067	0.060	0.054	0.046	0.040	0.035	0.030	0.027	0.021	0.017
	90	0.109	0.100	0.091	0.085	0.079	0.073	0.065	0.058	0.053	0.045	0.039	0.034	0.030	0.026	0.021	0.017
110	100	0.106	0.094	0.088	0.082	0.075	0.071	0.063	0.057	0.052	0.044	0.038	0.033	0.030	0.026	0.021	0.017
	110	0.102	0.092	0.085	0.078	0.073	0.066	0.061	0.055	0.050	0.043	0.037	0.033	0.029	0.026	0.021	0.017
	120	0.097	0.088	0.082	0.075	0.071	0.066	0.059	0.053	0.049	0.042	0.037	0.032	0.028	0.025	0.020	0.017
	130	0.093	0.085	0.078	0.073	0.068	0.063	0.057	0.052	0.048	0.041	0.036	0.032	0.028	0.025	0.020	0.017
	140	0.088	0.081	0.075	0.069	0.065	0.061	0.055	0.050	0.046	0.040	0.035	0.031	0.027	0.024	0.019	0.016
160	150	0.085	0.078	0.073	0.068	0.063	0.059	0.053	0.049	0.045	0.039	0.034	0.030	0.027	0.024	0.019	0.016
	160	0.082	0.075	0.070	0.066	0.061	0.058	0.052	0.048	0.044	0.038	0.033	0.029	0.026	0.023	0.019	0.016
	170	0.078	0.072	0.067	0.063	0.059	0.056	0.050	0.046	0.043	0.037	0.033	0.029	0.026	0.023	0.019	0.016
	180	0.075	0.069	0.065	0.062	0.058	0.055	0.049	0.045	0.042	0.036	0.032	0.028	0.025	0.022	0.018	0.016
	190	0.072	0.067	0.062	0.058	0.055	0.052	0.047	0.044	0.041	0.035	0.031	0.028	0.024	0.021	0.017	0.015
200	200	0.069	0.065	0.060	0.057	0.054	0.051	0.046	0.042	0.039	0.034	0.030	0.027	0.023	0.021	0.017	0.015

注 (1) 见表4-21的注;  
 (2)  $A/A_0 < 1$  时,  $\varphi_p$  应按表中的数值乘以下列折减系数:  
 当  $\varepsilon = 0$  时, 1.0;  
 当  $\varepsilon = 1$  时, 0.8;  
 当  $\varepsilon = 2$  时, 0.75;  
 当  $\varepsilon \geq 5$  时, 0.70。  
 对于  $\varepsilon$  为中间数值时, 折减系数按直线插入。  
 (3) 等边角钢组成的截面,  $\varphi_p$  不乘折减系数。

3号钢和2号钢偏心受压构件在弯矩作用平面外的稳定系数 $\varphi$

续表

$\frac{\varepsilon}{\lambda_0}$	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10	12	14	16	18	20	25	30
0	0.186	0.171	0.158	0.147	0.137	0.128	0.114	0.103	0.093	0.079	0.069	0.061	0.054	0.049	0.040	0.033
10	0.184	0.169	0.156	0.146	0.136	0.127	0.113	0.102	0.092	0.078	0.068	0.060	0.053	0.049	0.039	0.033
20	0.182	0.168	0.155	0.144	0.134	0.125	0.112	0.101	0.091	0.077	0.068	0.060	0.053	0.048	0.039	0.033
30	0.180	0.166	0.153	0.143	0.133	0.124	0.111	0.100	0.090	0.077	0.067	0.059	0.052	0.048	0.038	0.032
40	0.179	0.164	0.152	0.141	0.132	0.123	0.109	0.099	0.089	0.076	0.066	0.059	0.052	0.047	0.038	0.032
50	0.177	0.162	0.150	0.140	0.130	0.122	0.108	0.098	0.089	0.075	0.066	0.058	0.051	0.047	0.038	0.032
60	0.171	0.157	0.145	0.135	0.126	0.118	0.105	0.094	0.086	0.073	0.063	0.056	0.050	0.045	0.036	0.031
70	0.165	0.151	0.140	0.130	0.121	0.114	0.101	0.091	0.083	0.070	0.061	0.054	0.048	0.044	0.035	0.029
80	0.159	0.146	0.135	0.125	0.117	0.110	0.097	0.088	0.080	0.068	0.059	0.052	0.046	0.042	0.034	0.028
90	0.152	0.140	0.129	0.120	0.112	0.105	0.094	0.084	0.077	0.065	0.056	0.050	0.044	0.040	0.033	0.027
100	0.146	0.134	0.124	0.115	0.108	0.101	0.090	0.081	0.074	0.062	0.054	0.048	0.043	0.039	0.031	0.026
110	0.140	0.128	0.118	0.110	0.103	0.096	0.086	0.077	0.070	0.060	0.052	0.046	0.041	0.037	0.030	0.025
120	0.133	0.122	0.113	0.105	0.098	0.092	0.082	0.074	0.067	0.057	0.049	0.044	0.039	0.035	0.029	0.024
130	0.126	0.115	0.107	0.099	0.093	0.087	0.078	0.070	0.064	0.054	0.047	0.042	0.037	0.034	0.027	0.023
140	0.118	0.108	0.100	0.093	0.087	0.082	0.073	0.066	0.060	0.051	0.044	0.039	0.035	0.032	0.026	0.022
150	0.109	0.100	0.093	0.086	0.081	0.076	0.068	0.062	0.056	0.048	0.042	0.037	0.033	0.030	0.024	0.020
160	0.100	0.092	0.086	0.080	0.075	0.070	0.063	0.057	0.052	0.044	0.038	0.034	0.031	0.028	0.022	0.019
170	0.092	0.084	0.078	0.073	0.068	0.064	0.057	0.052	0.047	0.040	0.035	0.031	0.028	0.025	0.021	0.017
180	0.083	0.076	0.071	0.065	0.062	0.058	0.052	0.047	0.043	0.037	0.032	0.028	0.025	0.023	0.019	0.016
190	0.074	0.068	0.063	0.059	0.055	0.052	0.047	0.042	0.038	0.033	0.028	0.025	0.023	0.021	0.017	0.014
200	0.065	0.060	0.056	0.052	0.048	0.046	0.041	0.037	0.034	0.029	0.025	0.022	0.020	0.018	0.015	0.012

注 对工字形或T形截面构件, 应按表中的 $\varphi$ 值取用; 对闭合矩形截面构件, 表中的 $\varphi$ 值应乘以增大系数;

当 $\varepsilon \geq 1$ 时, 乘1.2, 当 $\varepsilon < 1$ 时乘 $(1+0.3\varepsilon)$ 。增大后的 $\varphi$ 值, 不应大于轴心受压时的稳定系数 $\varphi$  (即本表 $\varepsilon = 0$ 一栏的数值)。

表 4-25 16锰钢和16锰桥钢偏心受压构件在弯矩作用平面外的稳定系数 $\varphi$

$\lambda$	$\lambda$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\lambda$	$\lambda$															
0	0	1.000	0.833	0.714	0.625	0.556	0.500	0.455	0.417	0.385	0.357	0.333	0.286	0.250	0.222	0.200
10	10	0.993	0.823	0.705	0.617	0.549	0.494	0.449	0.412	0.381	0.353	0.330	0.283	0.247	0.220	0.198
20	20	0.973	0.812	0.697	0.610	0.543	0.488	0.444	0.407	0.376	0.350	0.326	0.280	0.245	0.218	0.196
30	30	0.940	0.800	0.687	0.602	0.536	0.483	0.439	0.404	0.372	0.346	0.323	0.277	0.242	0.216	0.194
40	40	0.895	0.787	0.678	0.595	0.530	0.477	0.434	0.398	0.368	0.342	0.319	0.274	0.240	0.214	0.192
50	50	0.840	0.755	0.670	0.586	0.523	0.471	0.429	0.393	0.364	0.338	0.315	0.271	0.237	0.211	0.190
60	60	0.776	0.702	0.629	0.556	0.496	0.447	0.406	0.374	0.345	0.321	0.300	0.257	0.225	0.200	0.181
70	70	0.705	0.646	0.586	0.526	0.469	0.423	0.385	0.353	0.326	0.304	0.284	0.244	0.213	0.190	0.171
80	80	0.627	0.581	0.535	0.488	0.441	0.398	0.363	0.333	0.308	0.286	0.268	0.230	0.201	0.179	0.161
90	90	0.546	0.512	0.477	0.443	0.408	0.374	0.340	0.313	0.289	0.269	0.251	0.216	0.189	0.168	0.152
100	100	0.462	0.438	0.414	0.390	0.366	0.342	0.318	0.291	0.270	0.251	0.235	0.202	0.177	0.157	0.142
110	110	0.384	0.368	0.351	0.334	0.318	0.301	0.284	0.267	0.247	0.230	0.215	0.185	0.162	0.145	0.131
120	120	0.325	0.313	0.301	0.289	0.276	0.264	0.252	0.240	0.223	0.208	0.194	0.168	0.147	0.131	0.119
130	130	0.279	0.269	0.259	0.249	0.239	0.228	0.218	0.208	0.198	0.185	0.173	0.149	0.131	0.117	0.106
140	140	0.242	0.233	0.224	0.216	0.207	0.198	0.190	0.181	0.172	0.160	0.151	0.130	0.115	0.102	0.093
150	150	0.213	0.204	0.196	0.187	0.179	0.170	0.162	0.153	0.145	0.135	0.127	0.110	0.097	0.087	0.079
160	160	0.188	0.181	0.174	0.168	0.161	0.154	0.148	0.141	0.134	0.126	0.118	0.102	0.091	0.081	0.074
170	170	0.168	0.162	0.157	0.151	0.146	0.140	0.135	0.129	0.124	0.116	0.109	0.095	0.084	0.075	0.068
180	180	0.151	0.146	0.141	0.136	0.131	0.127	0.122	0.117	0.112	0.105	0.099	0.086	0.077	0.069	0.063
190	190	0.136	0.131	0.127	0.122	0.118	0.114	0.109	0.105	0.101	0.094	0.089	0.078	0.069	0.062	0.057
200	200	0.124	0.119	0.115	0.110	0.106	0.101	0.097	0.092	0.088	0.083	0.078	0.069	0.061	0.055	0.050

续表

$\lambda$	$\varepsilon$	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10	12	14	16	18	20	25	30
0		0.182	0.167	0.154	0.143	0.133	0.125	0.111	0.100	0.091	0.077	0.067	0.059	0.053	0.048	0.038	0.032
10		0.180	0.165	0.152	0.141	0.132	0.124	0.110	0.099	0.090	0.076	0.066	0.058	0.052	0.047	0.038	0.032
20		0.178	0.163	0.151	0.140	0.131	0.123	0.109	0.098	0.089	0.076	0.065	0.058	0.052	0.047	0.038	0.032
30		0.176	0.162	0.149	0.139	0.129	0.121	0.108	0.097	0.088	0.075	0.065	0.057	0.051	0.046	0.037	0.031
40		0.175	0.160	0.148	0.137	0.128	0.120	0.107	0.096	0.087	0.074	0.064	0.057	0.051	0.046	0.037	0.031
50		0.173	0.158	0.146	0.136	0.127	0.119	0.106	0.095	0.087	0.073	0.063	0.056	0.050	0.045	0.037	0.031
60		0.164	0.151	0.139	0.129	0.121	0.113	0.101	0.090	0.082	0.070	0.060	0.053	0.048	0.043	0.035	0.030
70		0.156	0.143	0.132	0.122	0.114	0.107	0.095	0.086	0.078	0.066	0.057	0.051	0.045	0.041	0.033	0.028
80		0.147	0.135	0.124	0.115	0.108	0.101	0.090	0.081	0.074	0.062	0.054	0.048	0.043	0.039	0.031	0.027
90		0.138	0.127	0.117	0.109	0.101	0.095	0.084	0.076	0.069	0.059	0.051	0.045	0.040	0.036	0.029	0.025
100		0.129	0.118	0.109	0.102	0.095	0.089	0.079	0.071	0.065	0.055	0.048	0.042	0.038	0.034	0.027	0.023
110		0.119	0.109	0.101	0.094	0.087	0.082	0.073	0.066	0.060	0.051	0.044	0.039	0.035	0.031	0.025	0.021
120		0.108	0.099	0.092	0.085	0.080	0.075	0.067	0.060	0.055	0.046	0.040	0.035	0.032	0.029	0.023	0.019
130		0.097	0.089	0.082	0.076	0.071	0.067	0.060	0.054	0.049	0.041	0.036	0.032	0.029	0.026	0.021	0.017
140		0.084	0.078	0.072	0.067	0.063	0.059	0.052	0.047	0.043	0.037	0.032	0.028	0.025	0.023	0.018	0.015
150		0.072	0.066	0.061	0.057	0.053	0.050	0.045	0.040	0.037	0.031	0.027	0.024	0.021	0.019	0.016	0.013
160		0.067	0.062	0.057	0.053	0.050	0.047	0.042	0.038	0.035	0.029	0.025	0.023	0.020	0.018	0.015	0.012
170		0.062	0.057	0.053	0.050	0.046	0.044	0.039	0.035	0.032	0.027	0.024	0.021	0.019	0.017	0.014	0.012
180		0.057	0.053	0.049	0.046	0.043	0.040	0.036	0.033	0.030	0.025	0.022	0.019	0.017	0.016	0.013	0.011
190		0.052	0.048	0.044	0.042	0.039	0.036	0.033	0.030	0.027	0.023	0.020	0.018	0.016	0.014	0.012	0.010
200		0.046	0.042	0.039	0.037	0.034	0.032	0.029	0.026	0.024	0.020	0.018	0.016	0.014	0.013	0.010	0.009

注 见表4-24的注。

的偏心距  $e = \frac{M}{N}$  和截面的核心距  $\rho = \frac{W}{A}$  的比值, 即  $\varepsilon = \frac{e}{\rho} = \frac{M}{N} \frac{A}{W}$ 。

$M$ ——弯矩, 应按下列规定采用:

- a) 框架系统: 等截面柱采用柱长范围内的最大弯矩; 阶形柱的各段采用各该段的最大弯矩;
- b) 悬臂构件采用固定端弯矩;
- c) 两端铰接支承的构件 (包括端部有弯矩作用的构件) 采用全长中间  $\frac{1}{3}$  长度范围内的最大弯矩, 但不小于构件最大弯矩的一半。

$N$ ——构件轴向压力;

$W$ ——弯矩作用平面内受压最大纤维的毛截面抵抗矩;

$A$ ——构件毛截面面积。

当偏心率  $\varepsilon > 30$  时, 不必进行稳定验算, 可按公式 (4-24) 验算其强度。

(b) 弯矩作用平面外。当弯矩作用在工字形和闭合箱形截面最大刚度平面内以及 T 形截面腹板平面内时, 应按下式计算:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_1 A} \leq [\sigma] \quad (4-63)$$

式中  $\varphi_1$ ——偏心受压构件在弯矩作用平面外的稳定系数, 对工字形和 T 形截面 (图 4-37

a、b、c)、闭合箱形截面 (图 4-37d), 根据长细比  $\lambda_y$  和偏心率  $\varepsilon \left( \varepsilon = \frac{M}{N} \frac{A}{W_1} \right)$

按表 4-24 和表 4-25 采用;

$\lambda_y$ ——构件在弯矩作用平面外的长细比;

$M$ ——弯矩, 应按下列规定采用:

- a) 有侧向支承的构件, 采用两个相邻支承点之间中央  $\frac{1}{3}$  范围内的最大弯矩, 但不小于该段最大弯矩的一半;
- b) 悬臂构件采用固端弯矩。

当弯矩作用在工字形或闭合箱形截面的最小刚度平面内时 (图 4-37e、f), 如果  $\lambda_x \leq \lambda_y$ , 不必作弯矩作用平面外的稳定性计算; 如果  $\lambda_x > \lambda_y$ , 则可近似地按式 (4-59) 计算弯矩作用平面外的稳定性。

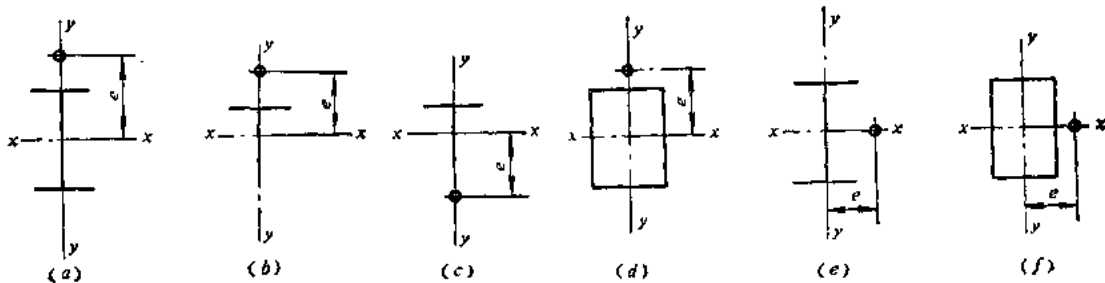


图 4-37 实腹式偏心受压构件截面图

2) 当弯矩作用在两个主平面内时, 工字形偏心受压构件可按下列公式验算稳定性:  
当 $\lambda_y > \lambda_x$ 时

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_{yx} A} + 0.9 \frac{M_x}{W_x} \leq [\sigma] \quad (4-64)$$

当 $\lambda_y < \lambda_x$ 时

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_{yx} A} + \frac{2}{3} \frac{M_y}{W_y} \leq [\sigma] \quad (4-65)$$

式中  $M_x$ ——最大刚度平面内的弯矩;  
 $M_y$ ——最小刚度平面内的弯矩;  
 $W_x, W_y$ ——对 $x$ 轴和 $y$ 轴受压最大纤维的毛截面抵抗矩;  
 $\varphi_{yx}$ ——考虑 $N$ 和 $M_x$ 作用的实腹式构件在弯矩平面内的稳定系数, 根据 $\lambda_x$ 和 $\varepsilon_x \left( \varepsilon_x = \frac{M_x}{N} \frac{A}{W_x} \right)$ 按表4-21采用;  
 $\varphi_{xy}$ ——考虑 $N$ 和 $M_y$ 作用的实腹式构件在弯矩平面内的稳定系数, 根据 $\lambda_y$ 和 $\varepsilon_y \left( \varepsilon_y = \frac{M_y}{N} \frac{A}{W_y} \right)$ 按表4-22采用。

此外, 当 $\varepsilon_x$ 大于1.5并大于1.25 $\varepsilon_y$ 时, 还应按公式(4-63)作补充计算(此时设 $M_y=0$ )

3) 腹板局部稳定性验算。在偏心受压构件中, 腹板计算高度与其厚度之比 $\frac{h_0}{\delta}$ 宜满足下式的要求:

$$\frac{h_0}{\delta} \leq 100 \sqrt{\frac{\xi}{\sigma_{\max}}} \quad (4-66)$$

式中  $\xi$ ——系数, 根据 $a_0 \left( a_0 = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \right)$ 应按表4-26采用;  
 $\sigma_{\max}$ ——腹板计算高度边缘的最大压应力(Pa), 不考虑稳定系数;  
 $\sigma_{\min}$ ——腹板计算高度另一边缘相应的应力(Pa), 压应力为正, 拉应力为负。

表 4-26

$\xi$  值

$a_0$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$\xi$	400	750	1100	1400	1600	1800	1950	2100	2100	2100

当(4-66)式不能满足时, 可用纵向加劲肋加强, 并仍按(4-66)式验算翼缘与加劲肋之间的高厚比。纵向加劲肋应成对配置, 其一侧外伸宽度不应小于 $10\delta$ , 厚度不应小于 $0.75\delta$ ( $\delta$ 为腹板厚度)。

在双壁箱形截面偏心受压构件中, 受压翼缘板在两腹板之间的计算宽度与其厚度之比不应超过 $40 \sqrt{\frac{2400}{\sigma_c}}$ 。

4) 刚度验算。按下式验算构件的挠度,

$$f = \frac{f_0}{1 - a_1 a_2} \leq [f] \quad (4-67)$$

式中  $f_0$ ——不考虑轴向力时构件的计算挠度；

$$a_1 = \frac{Nl^3}{\pi^2 EI}$$

$a_1$ ——系数，对简支梁  $a_1 = 1$ ；

$[f]$ ——许可挠度，其值见本章第一节二。

在大多数情况下，闸门桁架的杆件采用两个型钢组成，并使杆件在两个方向具有相近的稳定性（即  $\lambda_x \approx \lambda_y$ ）。由两个型钢组成的杆件，在长度上应设置连接垫板，垫板间的最大距离，对压杆为  $40r$ （且沿长度每根不宜少于 2 个），对拉杆为  $80r$ 。

$r$  为回转半径，应按下列规定采用：

（a）图 4-38（a）、（b）所示的截面，取一个角钢（或槽钢）平行于垫板的形心轴的回转半径；

（b）图 4-38（c）所示的截面，取一个角钢的最小回转半径。

常用截面回转半径见表 4-27。

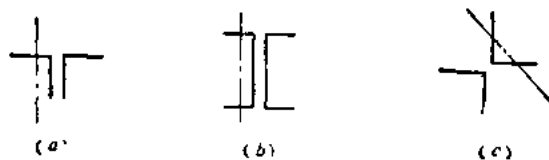


图 4-38 计算回转半径的截面轴线图

## 五、边梁设计

### 1. 边梁的受力分析

作用在边梁上的外力有（如图 4-39 示）：梁系传来的水平水压力  $P_1$ 、 $P_2$ 、……、 $P_n$  和行走支承的反力  $R_1$ 、 $R_2$ ，在竖直方向有闸门自重  $G/2$ 、启闭闸门时行走支承和止水与埋设构件之间的摩阻力  $T_{s1}/2$  和  $T_{s2}/2$ 、门底过水时的下吸力  $P_s$ ，有时还有门顶水柱压力  $W$ ，以及作用在边梁顶端吊耳上的启门力  $T$  等。








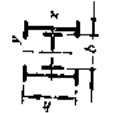
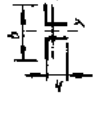

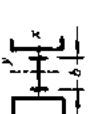

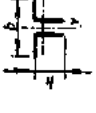

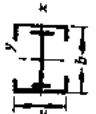


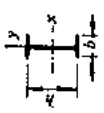

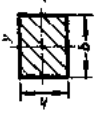
### 2. 边梁的截面尺寸

边梁的截面尺寸一般是按构造要求确定。其截面高度应与主梁端部的高度相等，其腹板厚度宜等于主梁端部腹板的厚度，翼缘厚度则应大于腹板的厚度，可用面板兼作上翼缘，也可另设单独的翼缘板。单腹式边梁的翼缘宽度不宜小于 300mm，以便安装行走支


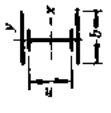

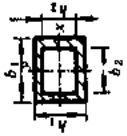

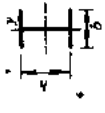
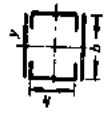
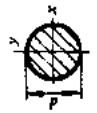



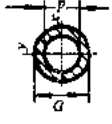




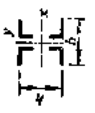
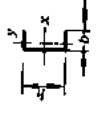
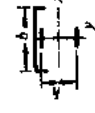
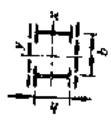


表 4-27

常用截面回转半径近似值表

 $r_x = 0.30h$ $r_y = 0.30b$ $r_z = 0.195h$	 $r_x = 0.40h$ $r_y = 0.21b$	 $r_x = 0.38h$ $r_y = 0.60b$	 $r_x = 0.41h$ $r_y = 0.22b$
 $r_x = 0.32h$ $r_y = 0.28b$ $r_z = 0.18 \frac{h+b}{2}$	 $r_x = 0.45h$ $r_y = 0.235b$	 $r_x = 0.38h$ $r_y = 0.44b$	 $r_x = 0.32h$ $r_y = 0.49b$
 $r_x = 0.30h$ $r_y = 0.215b$	 $r_x = 0.43h$ $r_y = 0.28b$	 $r_x = 0.32h$ $r_y = 0.58h$	 $r_x = 0.29h$ $r_y = 0.50b$
 $r_x = 0.32h$ $r_y = 0.20b$	 $r_x = 0.43h$ $r_y = 0.43b$	 $r_x = 0.37h$ $r_y = 0.40b$	 $r_x = 0.29h$ $r_y = 0.45b$
 $r_x = 0.28h$ $r_y = 0.24b$	 $r_x = 0.39h$ $r_y = 0.20b$	 $r_x = 0.38h$ $r_y = 0.21b$	 $r_x = 0.29h$ $r_y = 0.29b$

续表

 $r_x = 0.30h$ $r_y = 0.17b$	 $r_x = 0.42h$ $r_y = 0.22b$	 $r_x = 0.44h$ $r_y = 0.32b$	 $r_x = 0.24h_p$ $r_y = 0.41b_p$
 $r_x = 0.20h$ $r_y = 0.21b$	 $r_x = 0.43h$ $r_y = 0.24b$	 $r_x = 0.44h$ $r_y = 0.38b$	 $r = 0.25d$
 $r_x = 0.21h$ $r_y = 0.21b$ $r_x = 0.185h$	 $r_x = 0.365h$ $r_y = 0.275b$	 $r_x = 0.37h$ $r_y = 0.54b$	 $r = 0.35d_{cp}$ $d_{cp} = \frac{d + D}{2}$
 $r_x = 0.21h$ $r_y = 0.21b$	 $r_x = 0.35h$ $r_y = 0.56b$	 $r_x = 0.37h$ $r_y = 0.45b$	 $r_x = 0.39h$ $r_y = 0.53b$
 $r_x = 0.45h$ $r_y = 0.24b$	 $r_x = 0.39h$ $r_y = 0.26b$	 $r_x = 0.40h$ $r_y = 0.24b$	 $r_x = 0.50h$ $r_y = 0.39b$

承。双腹式边梁的两条下翼缘通常用宽度为100~200mm的扁钢做成,为了使两块腹板之间的焊接方便,两块腹板的间距一般不应小于400mm。

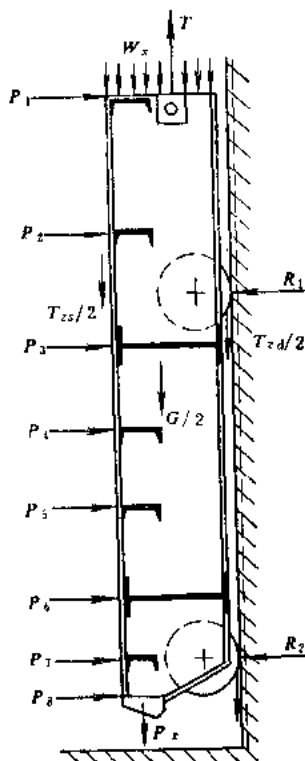


图 4-39 平面钢闸门边梁荷载图

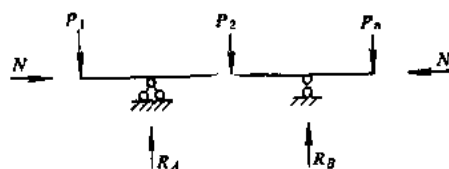


图 4-40 闸门全关时边梁计算简图

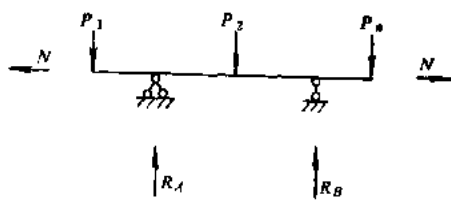


图 4-41 闸门在开启过程中边梁计算简图

### 3. 边梁强度的验算

(1) 边梁上为两个滚轮时的计算简图:

1) 闸门全关,按偏心受压构件计算(如图4-40示),其计算方法见本节四(二)4。

2) 闸门在开启过程中,按偏心受拉构件计算(如图4-41示),其计算方法见本节四(二)3。

图中 $P_1$ 、……、 $P_n$ 为由主梁传给边梁上的荷载; $N$ 为边梁承受的竖向荷载或作用力; $R_A$ 、 $R_B$ 为支承反力。

(2) 边梁上为两个以上的滚轮,其横向荷载引起的内力可按多跨连续梁计算,然后考虑轴向荷载引起的内力。

(3) 边梁上的支承为分段滑块时,在横向荷载作用下,可近似地按支承反力作用于每段滑块的中心来计算边梁的内力,然后考虑轴向荷载引起的内力。

当滑块布满边梁全长时,由于边梁内力很小,其截面尺寸可按构造要求选定。

对承受侧向水压力的边梁,还应考虑侧向荷载对边梁引起的内力。

## 第五章 弧形钢闸门的设计与计算

### 第一节 弧形钢闸门的结构与布置

弧形闸门由于水力条件好、启闭力小见长，使之在水利水电工程上得到广泛应用。弧形闸门也有露顶式和潜孔式两种（见图5-1和图5-2）。

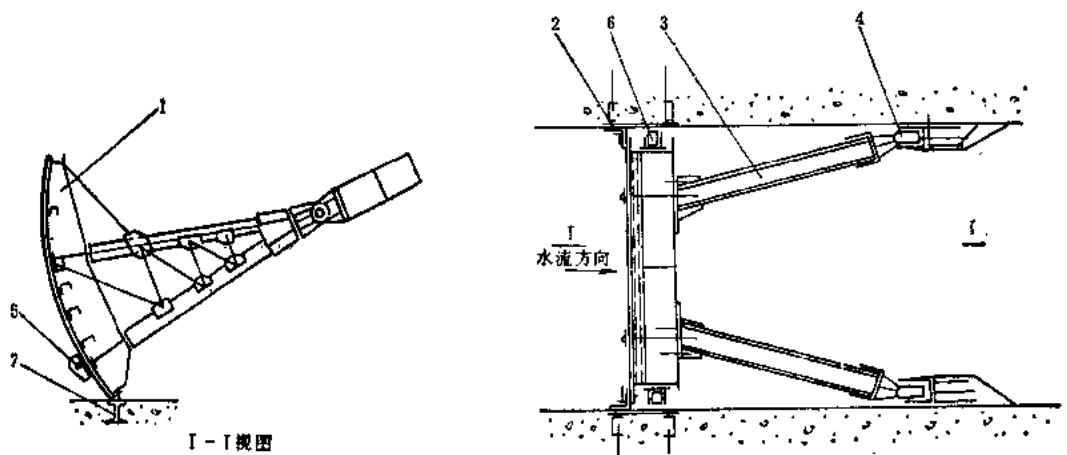


图 5-1 露顶式弧形闸门示意图

1—门叶结构；2—止水装置；3—支臂；4—支铰；5—起吊装置；6—侧向装置；7—固定部分

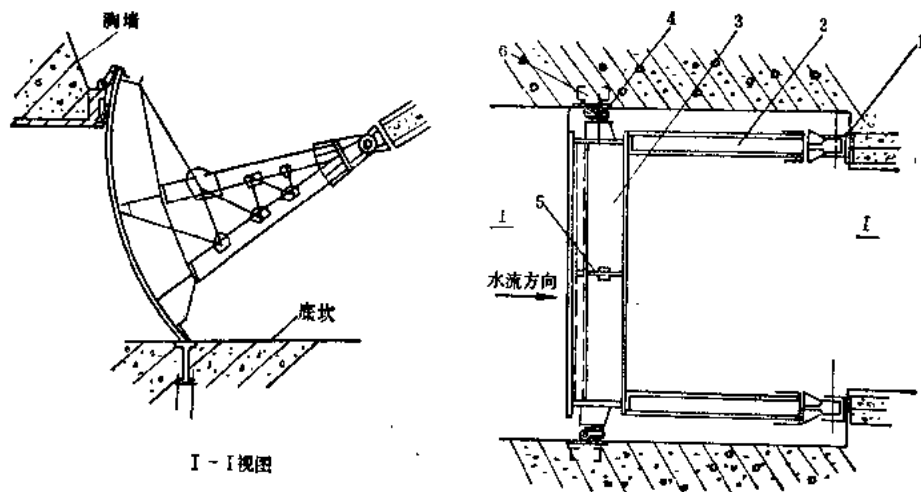


图 5-2 潜孔式弧形钢闸门示意图

1—支铰；2—支臂；3—门叶结构；4—止水装置；5—起吊装置；6—固定部分

#### 一、结构组成

弧形闸门与平面闸门一样，也由活动部分、固定部分和启闭设备三大部分组成。

### (一) 活动部分

#### 1. 门叶

它由面板、梁格、横向联结系和纵向联结系、主框架、支承桁架等构件组成。

(1) 面板: 弧形闸门的面板通常是弧形的, 由于面板的曲率很小, 可以不考虑, 因而弧形闸门面板的计算与平面闸门面板的计算相同, 面板的厚度不应小于  $6 \sim 8 \text{ mm}$ 。

(2) 主框架: 由主梁和支臂构成。

(3) 支承桁架: 由闸门同一端, 将框架的支臂和联接支臂的杆件共同组成的桁架。

弧形闸门的梁格、横向联结系和纵向联结系等构件的布置、计算和截面选择等均与平面闸门相似。

#### 2. 支承铰的活动部分

支承铰的活动部分 (铰链, 见第六章第二节图6-22), 固接在支臂的末端。

#### 3. 止水装置

止水装置见第六章第四节。

#### 4. 悬吊装置

露顶式弧形闸门的吊耳大多数设在面板上游面底部, 潜孔式弧形闸门的吊耳一般设置在闸门顶部, 见第九章第六节。

### (二) 固定部分

#### 1. 支承铰的固定部分

支承铰的固定部分 (铰座) 固定在闸墩或边墩的墙上。

#### 2. 门槽埋设件

弧形闸门埋设件的布置较平面闸门简单, 一般可不进行计算, 按构造要求布置。门楣、底坎结构与平面闸门相类似, 两侧的弧形侧导板宽度要满足侧止水的要求, 并考虑侧轮的活动范围, 设置的高度要满足闸门最大开度的要求, 侧导板的厚度一般选用  $8 \sim 10 \text{ mm}$ 。

### (三) 启闭设备

启闭设备见第九章。

## 二、布置特点

### (一) 弧面曲率中心与半径

在大多数情况下, 弧形闸门面板的曲率中心与支承铰轴的中心相重合, 亦即作用在圆弧面板上的水压力的合力总是通过旋转中心, 特殊情况例外。当面板圆弧中心在旋转中心以上时就产生一个有助于启升闸门的力矩; 反之, 就产生一个帮助闸门下降的力矩。前者可减小起门机的起重量, 后者则可增加底止水在底槛上的压紧程度。当为了达到减小起门机的起重量时, 受到底止水在底槛上压紧程度的制约, 因此应慎重选择两个中心的距离, 以避免闸门底止水压不紧而漏水。

弧形闸门面板的曲率半径与闸门高度的比值可取为:

露顶式  $1.1 \sim 1.5$

潜孔式  $1.2 \sim 2.2$

## (二) 支铰的位置

弧形闸门支铰应尽量布置在过流时支铰不受水流及漂浮物冲击的高程上。

对于溢流坝上的露顶式弧形闸门，因门后水面陡降，支铰位置可布置在  $a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{3}{4}\right)H$  附近（图5-3a）， $H$  为门高；

对于水闸的露顶式弧形闸门，支铰位置可布置在  $a = \left(\frac{2}{3} \sim 1\right)H$  附近，且高出下游水位0.5m左右（图5-3b）；

对于潜孔式弧形闸门，支铰位置可布置在  $a = 1.1H$  以上。

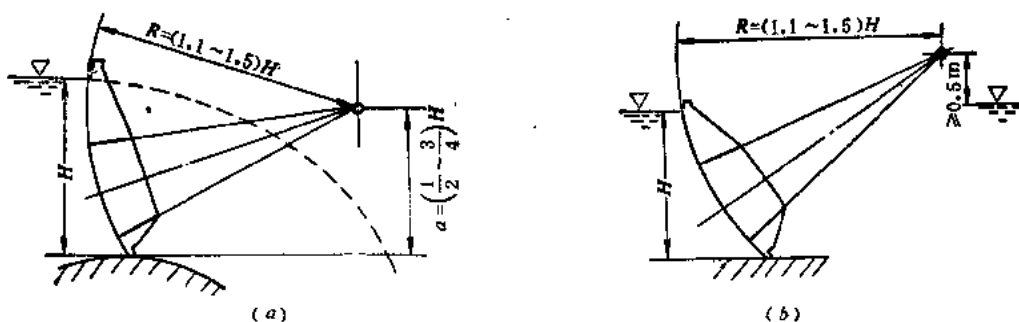


图 5-3 支铰位置和弧面半径的确定

## (三) 主框架的类型

主框架是弧形钢闸门的主要承载结构，它承受由面板和次梁等传来的水压力，并将此力传给支铰。根据孔口宽高比的不同，主框架的结构型式有主横梁式和主纵梁式两种：对宽高比较大的弧形闸门，一般采用主横梁式结构，对宽高比较小的弧形闸门，可采用主纵梁式结构。小型水电站工程主要采用主横梁式框架，因此，以下主要介绍主横梁框架的弧形闸门。

### 1. 主横梁式的主框架型式

主横梁式弧形闸门的主梁为水平放置。主横梁与左右两个支臂构成主框架。主框架的型式一般有三种（如图5-4）：

（1）带悬臂的直支臂Ⅱ形框架（图5-4a），支臂方向与主梁正交。这种主框架的

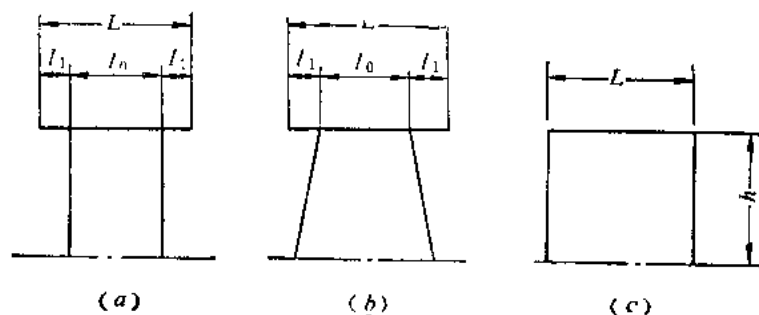


图 5-4 主框架的布置型式

优点是主梁的弯矩很小，同时支铰处的侧推力小因而支臂弯矩亦很小。支臂和支铰的构造都很简单。

(2) 斜支臂八形框架(图5-4b)，支臂与主梁斜交。这种框架的主梁两端为悬臂，主梁的跨度较小。由于在两端悬臂上的荷载产生负弯矩，可以使主梁跨中部分的正弯矩减小很多，因而主梁有可能采用型钢梁或高度不大的组合梁。但这种型式闸门的抗扭刚度较差，支铰构造复杂，斜支臂对闸墩的侧推力较大，从而引起闸墩材料用量的增多。但这种形式能使闸门自重减轻，因而得到广泛的应用。

(3) 直支臂门型框架(图5-4c)，支臂方向与主梁正交。这种框架的主梁可为实腹梁或桁架，支臂常用实腹截面。采用这种框架形式的优点是其支臂对闸墩的侧推力较小，支铰构造简单，制造和安装较方便。其缺点是主梁跨度大，需用材料较多。

当支承条件许可时，应尽量采用带悬臂的直支臂门型框架，因此大部分潜孔钢闸门都采用这种型式；当支承在侧墙上时，应尽量采用斜支臂八形框架；上述两种带悬臂的框架悬臂长度 $l$ 宜取 $0.2L$ 左右。当孔口净空不适应采用上述两种型式的主框架时，可采用直支臂门型框架，它比较适用于承受双向水头或需要门顶溢流的闸门。

## 2. 主纵梁式的主框架型式

主纵梁式弧形闸门的主梁为竖立放置，主纵梁与上下两个支臂构成主框架(图5-5)。

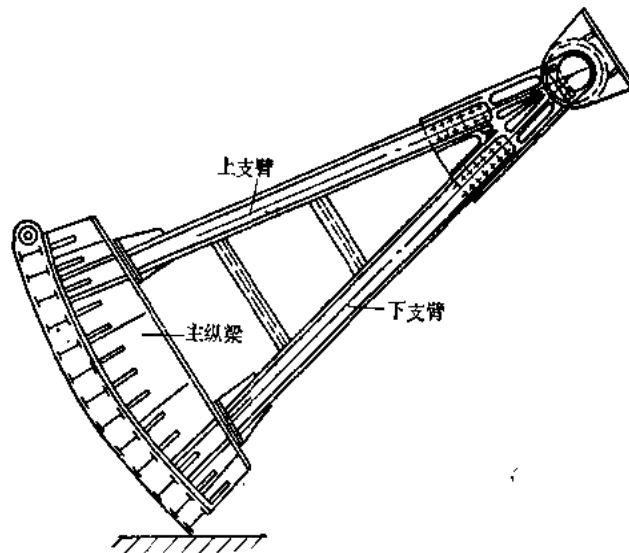


图 5-5 主纵梁式主框架的结构型式

## (四) 主梁的布置

在主横梁式弧形闸门中通常都采用双主梁，因为两个主框架受力明确，制造方便，只有当门高较大时（门高 $H > 7 \sim 9 \text{ m}$ ）才考虑采用三个主框架，主梁的位置应按等荷载的原则来确定。如两个主框架的布置对称于静水压力的合力作用线（参看图5-7b），其间距应尽量大些，以增加闸门的整体刚度，并减小闸门上悬臂的长度。由于主梁腹板的方向一般是垂直于弧面，下主梁向上倾斜，门下泄流条件较好，下悬臂可取短些，有时也可不设下悬臂。

### (五) 梁格的连接型式

弧形钢闸门的梁格连接型式一般与平面钢闸门相同, 采用等高连接或降低连接, 有时还采用层叠连接。以图 5-1 的主横梁同层布置 (即等高连接) 为例, 面板支承在小横梁、纵向隔板和主横梁组成的梁格上, 纵向隔板与主横梁在同一平面, 主横梁与面板直接焊接, 因而面板参与主梁工作, 梁系连接高度小, 闸门整体刚性大, 适用宽高比较大的弧形闸门。图 5-5 为主纵梁层叠连接布置, 面板支承在小横梁与小纵梁构成的梁格上, 梁格又支承在两根主纵梁上。水压力经面板、梁格传给主纵梁框架, 再通过支铰传至基础。这种结构布置便于分段运输, 安装拼接较简便, 其缺点是增加了梁系连接高度, 结构整体刚度较差, 适用于宽高比较小的弧形闸门。

## 第二节 弧形钢闸门的荷载

作用在弧形钢闸门上的荷载主要有静水压力、闸门自重和启闭力。

### 一、静水压力计算

作用在弧形闸门上的静水压力可以分解为水平分力  $P$  和垂直分力  $V$  两部分来计算, 计算公式见表 2-1。

以表 2-1 中序号 6 为例, 已知:

水平水压力

$$P = P_1 - P_2$$

$$\tilde{P}_1 = \frac{1}{2} \gamma H_1^2 B$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \gamma H_2^2 B$$

垂直水压力

$$V = V_1 - V_2$$

$$V_1 = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \phi}{180} + 2 \sin \phi_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2\phi_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \beta}{180} + 2 \sin \beta_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2\beta_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$$

$$\text{总水压力} \quad P_{\Sigma} = \sqrt{P^2 + V^2} = \sqrt{(P_1 - P_2)^2 + (V_1 - V_2)^2} \quad (5-1)$$

总水压力  $P_{\Sigma}$  的作用线应通过面板曲率中心, 其方向与水平线之夹角 (如图 5-6 示) 为:

$$\alpha = \arctg \frac{V_1 - V_2}{P_1 - P_2} \quad (5-2)$$

由总水压力  $P_{\Sigma}$  分配在两个主框架上的力  $P_1$  和  $P_2$ , 可用图解法 (图 5-7a) 或按下式求得:

$$\frac{P_1}{\sin(\beta_2 - \alpha)} = \frac{P_2}{\sin(\alpha - \beta_1)} = \frac{P_{\Sigma}}{\sin \beta} \quad (5-3)$$

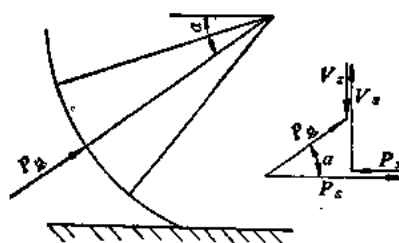


图 5-6 总水压力  $P_{\Sigma}$  的作用方向

当上下主框架的布置对称于静水压力时 (图 5-7b), 每个主框架承受的水压力各为:



$$P_1 = P_2 = \frac{P_R}{2 \cos \frac{\beta}{2}} \quad (5-4)$$

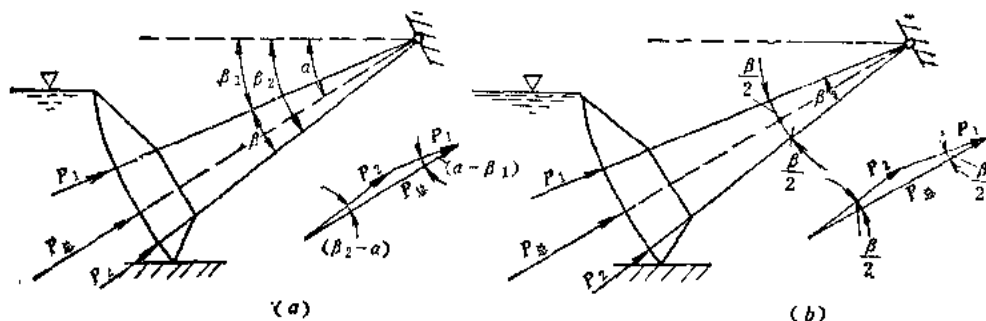


图 5-7 静水压力在两个主框架上的分配

## 二、弧形钢闸门的自重计算

弧形钢闸门自重的实际数值，要待设计完成后才能求得。初步估算可根据第二章第二节所列经验公式进行。

门重  $G$  的作用点可假定位于弧面圆心角  $\varphi$  的等分角线上，且离开支承轴中心约为  $(0.8 \sim 0.9) R$  处，其中  $R$  为弧面半径，如图 5-8 所示。

## 三、启闭力的计算

弧形钢闸门的启门力不仅要克服门重对轴心的阻力矩，而且还要克服止水摩阻力、铰轴摩阻力和下吸力对轴心的阻力矩（图 5-9）。

弧形钢闸门启闭力的计算按第九章第三节进行。

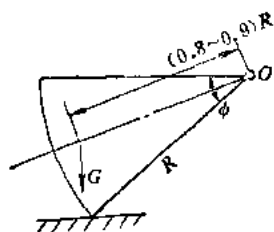


图 5-8 弧形闸门自重的作用点

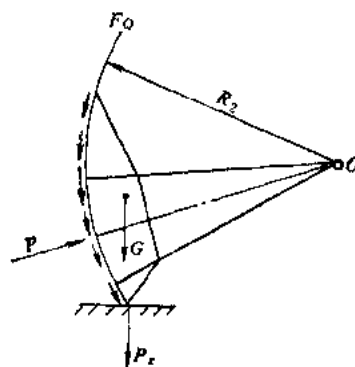


图 5-9 弧形钢闸门的启门力

## 四、自重与启门力作用在框架上所产生的力

在弧形闸门中，启闭机的启门力通常加于面板前面，有时加于门架的支腿上，有时也加在主梁上。启门力的作用点及其方向决定于起吊装置在闸门上的位置 and 启闭机在结构物上的位置。当闸门是用移动式启闭机操作时，从闸门上引出来的钢丝绳或链条应该是垂直方向的；当闸门用固定式启闭机操作时，钢丝绳或链条的方向应该这样来选择，即当闸门提升到上部位置时，它们仍能紧贴在闸门上，因为这样可以使钢丝绳或链条的方向固定不变。

由闸门自重和启门力在两个主框架上产生的力 $F_{\perp}$ 与 $F_{\parallel}$ 可用图解法(图5-10a)求得。

图中 $G$ 为门重,  $T$ 为启门力,  $F$ 为其合力。 $F_{\perp}$ 、 $F_{\parallel}$ 各为 $F$ 沿上、下支臂方向的分力。可以看出, 门重和启门力对支臂的作用是上支臂受压, 下支臂受拉(如图5-10b)。与水压力相叠加后, 上支臂为增载, 而下支臂为减载。因此, 在设计中若要求支臂按等荷载考虑时, 上、下支臂在总水压力作用线两侧位置不宜完全对称, 而应将下支臂布置得稍靠近合力作用线一些。

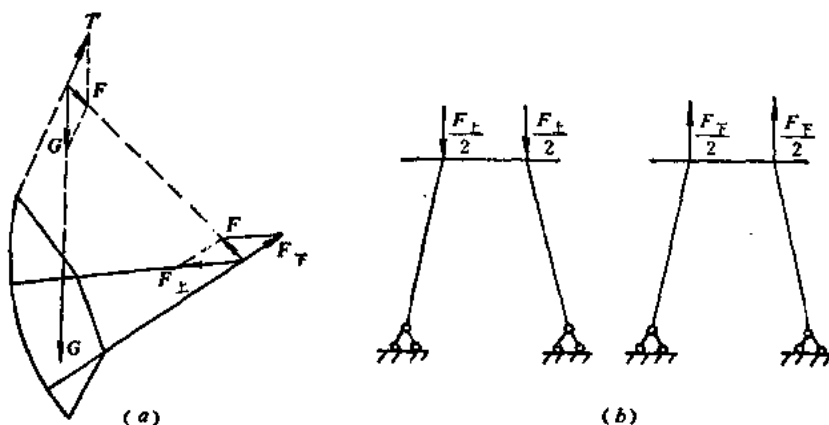


图 5-10 自重与启门力在两个主框架上产生的力

### 第三节 主横梁框架的设计

当作用于弧形闸门上的荷载知道之后, 就可以对弧形闸门进行结构计算。由于弧形钢闸门的面板曲率很小, 所以弧形闸门的面板、水平次梁、垂直次梁、横向联结系和纵向联结系等的计算方法与平面钢闸门基本相同。因此, 下面仅介绍弧形钢闸门的主框架和支铰装置(见第六章第二节)的设计计算。在工程中, 采用主横梁框架型式的弧形闸门较为普遍, 小型水电站工程更是如此。因此, 下面仅对主横梁式弧形闸门的主框架进行计算。

#### 一、主框架的内力计算

主框架横梁上的荷载主要是由弧形竖直次梁传来的集中力和由部分面板传来的水压力。计算时可近似地将每个框架承受的静水压力 $P$ , 换算成沿主梁跨长上作用的均布荷载

$$q = \frac{P}{L} \quad (L \text{ 为主梁长度})。$$

##### (一) 直支臂主框架

计算简图可取为有两个铰支承的一次超静定刚架(图5-11)。

当主梁和支臂都为实腹截面时, 支铰处的侧推力为:

$$H = \frac{ql^2}{4h(2K_0 + 3)} \quad (5-5)$$

式中  $K_0$ ——框架主梁单位刚度与支臂单位刚度的比值。

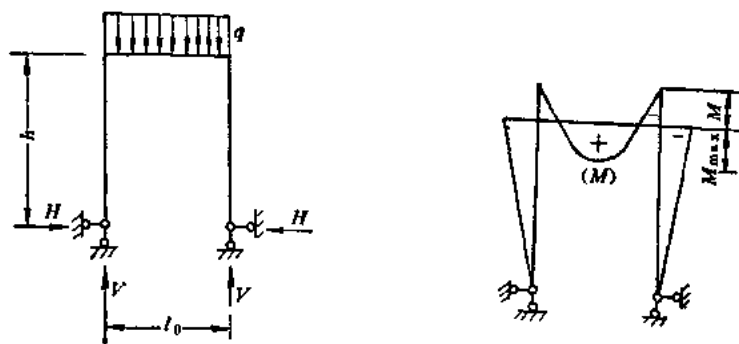


图 5-11 直支臂式主框架计算简图

$$K_0 = \frac{I_{l_0}/l_0}{I_n/h} = \frac{I_{l_0}h}{I_n l_0} \quad (5-6)$$

为求得 $H$ ，须先参考已有的类似结构估算 $K_0$ 值，当主梁和支臂都为实腹截面时， $K_0 = 4 \sim 10$ ，一般可假定 $K_0 = 8.5$ 左右。在主梁和支臂的截面被选定以后还应加以核算，如假定的 $K_0$ 值与实际的 $K_0$ 值相差超过30%，则须以实际的 $K_0$ 重新计算主框架的内力：

$l_0$ ——主梁之计算跨度；

$h$ ——框架支臂的长度，即铰支点至主梁轴线的距离；

$q$ ——均布荷载；

$I_w$ ——主梁之截面惯性矩；

$I_n$ ——支臂之截面惯性矩。

支铰处之反力 $V$ 为：

$$V = \frac{1}{2}ql_0 \quad (5-7)$$

主梁与支臂刚接点之负弯矩为：

$$M = -Hh \quad (5-8)$$

主梁跨中最大弯矩 $M_{max}$ 为：

$$M_{max} = \frac{ql_0^2}{8} - Hh \quad (5-9)$$

## (二) 带悬臂的直支臂式主框架

计算简图如图5-12所示。

当主梁和支臂都为实腹截面时，支铰处的侧推力为：

$$H = \frac{ql_0^2}{4h(2K_0+3)} - \frac{3qc^2}{2h(2K_0+3)} \quad (5-10)$$

式中  $l_0$ ——主梁之中间跨度；

$c$ ——主梁之悬臂长度；

其它符号意义同前。

支铰处之反力 $V$ 为：

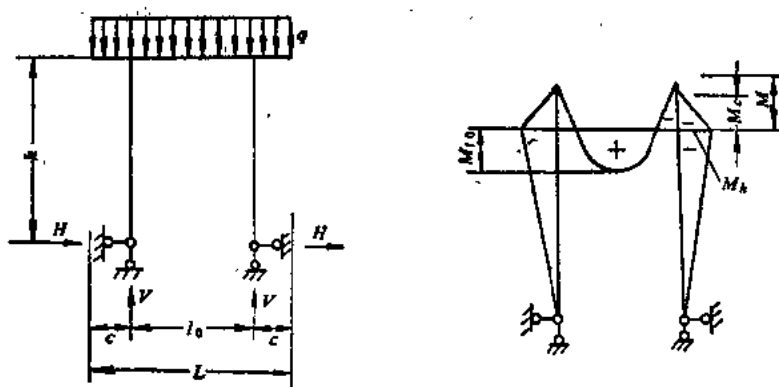


图 5-12 带悬臂的直支臂式主框架计算简图

$$V = \frac{1}{2}ql \quad (5-11)$$

悬臂端处之负弯矩  $M_c$  为:

$$M_c = -\frac{qc^2}{2} \quad (5-12)$$

支臂上之弯矩  $M_b$  为:

$$M_b = -Hh \quad (5-13)$$

$$M = M_c + M_b \quad (5-14)$$

框架主梁跨中弯矩  $M_{l0}$  为:

$$M_{l0} = \frac{ql_0^2}{8} + M_c + M_b \quad (5-15)$$

### (三) 斜支臂主框架

计算简图如图5-13所示。

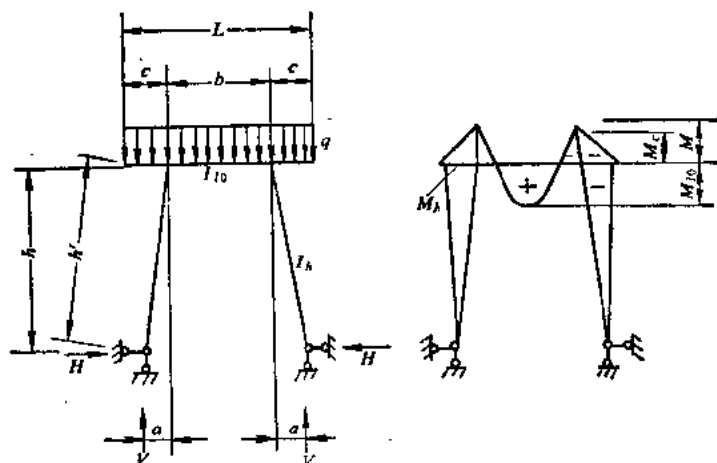


图 5-13 斜支臂主框架计算简图

主梁和支臂一般采用实腹截面。计算框架侧推力时，可将框架上承受的均布荷载分解为三种情况来考虑，即：

(1) 悬臂段c的负弯矩  $M_c = -\frac{qc^2}{2}$  (图5-14a) 产生的侧推力  $H_M$  为:

$$H_M = -\frac{3M_c}{h(2K_0+3)} \quad (5-16)$$

(2) 悬臂段荷载传至刚架节点的集中力  $P_c = qc$  (图5-14b) 产生的侧推力  $H_P$  为:

$$H_P = \frac{P_c a}{h} \quad (5-17)$$

(3) 作用于主梁跨间b上的均布荷载  $q$  (图5-14c) 产生的侧推力  $H_w$  为:

$$H_{Ic} = \frac{qb}{4h} \frac{b+2a(3+2K_0)}{3+2K_0} \quad (5-18)$$

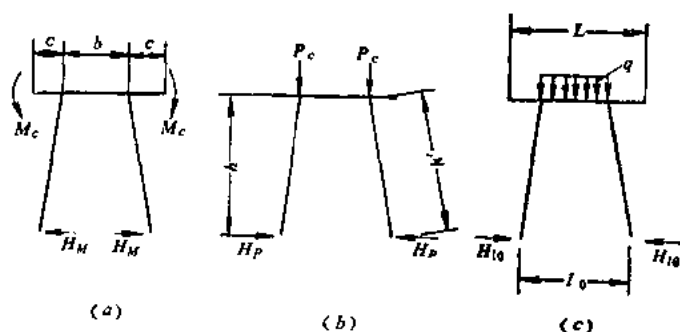


图 5-14 斜支臂主框架承受均布荷载分解的三种情况计算简图

由上述三种情况所产生侧推力的总和为

$$H = H_M + H_P + H_w = -\frac{3M_c}{h(2K_0+3)} + \frac{P_c a}{h} + \frac{qb}{4h} \frac{b+2a(3+2K_0)}{3+2K_0} \quad (5-19)$$

式中  $K_0 = \frac{I_{I0}}{I_h} \frac{h'}{b}$ ; 对于斜支臂主框架, 设计时可暂取  $K_0 = 45$  左右;

其余符号意义同前。

支铰处之反力  $V$  为:

$$V = \frac{ql}{2} \quad (5-20)$$

支臂端处之弯矩  $M_h$  为:

$$M_h = -Hh + V \quad (5-21)$$

$$M = M_c + M_h \quad (5-22)$$

框架主梁跨中弯矩  $M_{I0}$  为:

$$M_{I0} = \frac{qh^2}{8} + M_c + M_h \quad (5-23)$$

斜支臂的轴向力  $N$  为:

$$N = V \frac{h}{h'} + H \frac{a}{h'} \quad (5-24)$$

## 二、框架主梁和支臂的结构设计

### (一) 框架主梁

框架主梁的型式类似平面闸门的主梁，视跨度和荷载大小可采用型钢梁、组合梁或桁架。当闸门跨距较小时，一般用工字形截面的型钢梁作成；当闸门跨距较大时，则作成工字型截面的焊接组合梁或桁架梁。而斜支腿框架的主梁悬臂部分往往作成变截面的。框架主梁承受弯矩、剪力和轴心压力，由于轴心压力不大，选择实腹主梁截面时，由弯矩产生的应力要比轴心力所产生的应力大得多，因此按弯矩来选择截面时，把容许应力降低10%左右，然后再考虑弯矩和轴心压力的共同作用，验算主梁跨中截面的正应力以及与支臂连接处主梁截面的正应力、剪应力和折算应力。

### (二) 框架支臂及支承桁架

框架支臂可用轧成工字钢或一对槽钢，当荷载较大时，可用焊接工字形组合截面(如图5-15示)。选择支臂截面型式时应注意与主梁连接的方便。对于工字型截面，由于它在两个主轴平面内的回转半径差别较大，为了使两主轴内的稳度基本相等，往往将 $y$ 轴布置在水平面内，而在上、下臂杆间加设支撑以缩短其在 $x$ 轴方向支撑长度。框架支臂一般为偏心受压柱，其计算长度在框架平面内取由铰轴中心至主梁中和轴距离的1.2~1.5倍(一般取1.3倍)，在垂直于框架平面内取支承桁架中最长的一段节间长度。

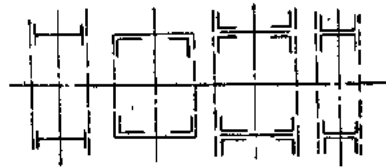


图 5-15 支承桁架截面的型式

支承桁架的节间长度一般不大于2~3m。主横梁式弧形闸门中支臂之间的联系杆一般不受力，可按构造要求采用一对角钢，在小型闸门中可直接与支臂翼缘相连；在大型闸门中必须在节点处设节点板，靠近支铰的竖腹杆宜做成隔板式，以增加支臂横截面的刚度。

### (三) 主梁与支臂的连接

支臂与主横梁的连接构造应具有足够的刚性，可用焊接或螺栓连接(如图5-16)。焊接连接比较简单，但安装定位不方便。目前应用最为普遍的是采用螺栓连接。在支臂端部焊一顶板，顶板的悬臂部分用肋板加强。顶板一般用粗制螺栓与主梁翼缘相连。螺栓所受的拉力可偏安全地按支臂端部的弯矩算得。另外，在主梁下翼缘下面焊一抗剪板，它与顶板的接触面须刨平顶紧，以承受支臂传来的侧推力。

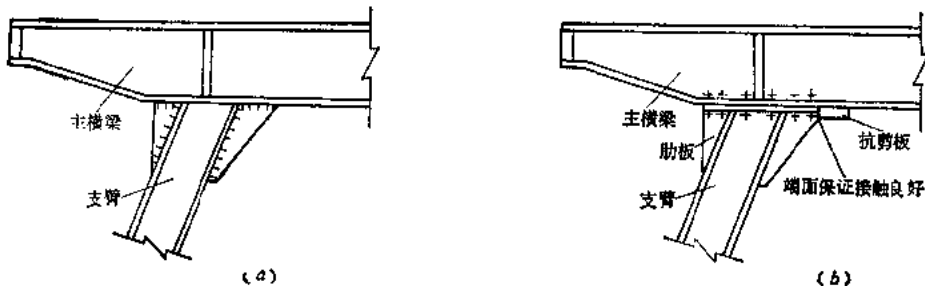


图 5-16 斜支臂与主梁的连接型式

#### (四) 支臂与铰链的连接

支臂的另一端与支承铰的活动部分用螺栓相连, 同一侧的两支臂焊于一块厚为12~24 mm 的支承垫板上。在小型闸门中, 支臂直接焊在此板上, 在支臂翼缘侧面有加劲板 (图 5-17 a); 在较大的闸门中, 一般都是将支臂翼缘分别焊在两块扩大的节点板上 (图 5-17

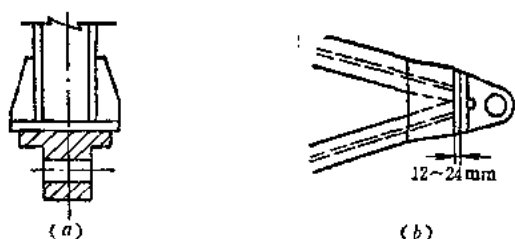


图 5-17 支臂与铰链连接示意图

b)。节点板与垫板之间也有加劲板, 节点板直接焊在垫板上, 垫板与铰链用粗制螺栓相连。

对于斜支臂的弧形闸门, 由于支臂双向偏斜, 当支臂与主横梁水平连接时, 在支承垫板处两支臂形成扭角  $2\phi$  (图 5-18)。

$\phi$  角可用下式计算:

$$\phi = \sin^{-1}(\sin \theta \operatorname{tg} \alpha) \quad (5-25)$$

式中  $\alpha$  ——斜支臂水平偏斜角度;  
 $\theta$  ——上下两支臂夹角的一半。

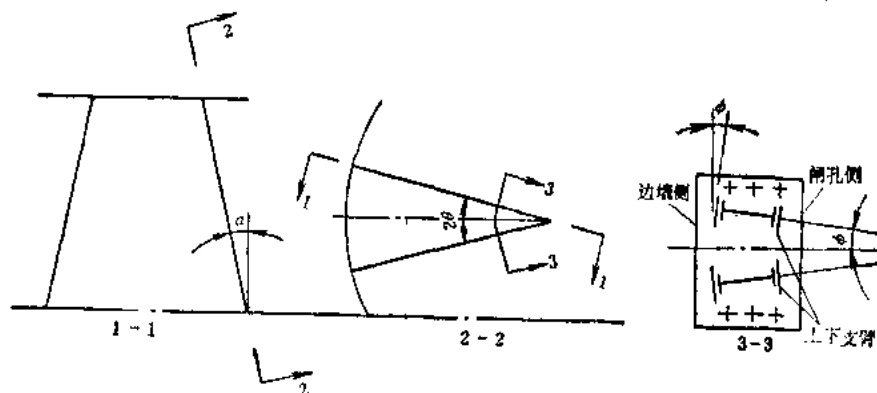


图 5-18 斜支臂的扭角

### 三、主框架结构应力验算

#### (一) 框架主横梁

主梁除承受弯矩外, 同时承受框架水平推力作用产生的轴向压力, 可按偏心受压构件计算, 主要验算跨中和支座两个断面。

跨中截面:

$$\text{正应力} \quad \sigma = \frac{N}{A_j} \pm \frac{M}{W_j} \leq [\sigma] \quad (5-26)$$

式中  $N$  ——主梁轴向压力, 即框架水平推力,  $N$ ;

$M$  ——主梁跨中弯矩,  $N \cdot \text{cm}$ ;

$A_j$  ——主梁跨中净截面面积,  $\text{cm}^2$ ;

$W_j$  ——主梁跨中净截面抵抗矩,  $\text{cm}^4$ 。

支座截面:

$$\text{正应力} \quad \sigma = \frac{N}{A_j} \pm \frac{M_0}{W_j} \leq [\sigma] \quad (5-27)$$

$$\text{剪应力} \quad \tau = \frac{QS}{I_{j_0} \delta} \leq [\tau] \quad (5-28)$$

式中  $M_0$ ——主梁支座处弯矩, N·cm;

$Q$ ——主梁支座处剪力, N;

$S$ ——主梁支座处截面对中和轴的面积矩, cm<sup>3</sup>;

$I_{j_0}$ ——主梁支座截面的惯性矩, cm<sup>4</sup>;

$\delta$ ——主梁支座截面腹板的厚度, cm;

其余符号同前。

折算应力:

$$\sigma_{\text{折}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1[\sigma] \quad (5-29)$$

式中  $\sigma$ 、 $\tau$ ——为支座处主梁腹板高度边缘同一点上同时产生的正应力和剪应力。

主横梁的受压翼缘与闸门面板直接连接具有很大的刚度, 能阻止梁截面的扭转, 因此, 不需要验算整体稳定性。

对于腹板的局部稳定性, 如腹板高度与腹板厚度之比即  $\frac{h_0}{\delta} \leq 80\sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}}$  时, 可不验算, 一般按构造配置加劲肋。如果  $80\sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}} < \frac{h_0}{\delta} \leq 160\sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}}$  时, 则应配置横向加劲肋, 加劲肋配置的计算见第四章第二节三。

## (二) 框架支臂

弧形闸门主框架支臂是一种柱结构, 轴心受压和偏心受压柱在验算稳定性时, 对柱的计算长度  $l_1$  的确定主要根据柱端的连接性质而定, 可按下列式计算:

$$l_1 = cl \quad (5-30)$$

式中  $l$ ——柱的实际几何长度;

$c$ ——与柱端连接方式有关的系数, 对于等截面柱可取为:

一端固接一端自由	$c = 2.0$ ;
两端铰接	$c = 1.0$ ;
一端铰接一端固接	$c = 0.7$ ;
两端固接	$c = 0.5$ ;

若柱有一端系与梁连接, 呈框架形式, 则  $c$  值与梁和柱的刚度比  $\frac{I_{\text{梁}}}{l_{\text{梁}}} - \frac{l_{\text{柱}}}{I_{\text{柱}}}$  有关, 可按表5-1查取, 该表系按框架允许侧移而得到的。

以下介绍柱的计算。

### 1. 轴心受压的实腹式柱 (图5-19)

轴心受压柱按下式验算强度:



表 5-1

c 值 表

$I_{梁柱}/I_{柱梁}$	0	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	$\geq 10$
一端固定	2.00	1.50	1.40	1.28	1.16	1.08	1.06	1.00
一端铰接	—	3.42	3.00	2.63	2.33	2.17	2.11	2.00

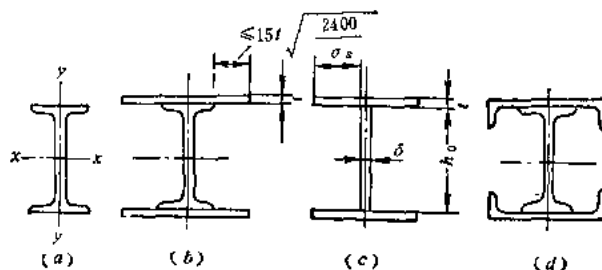


图 5-19 实腹式柱的截面形式

$$\sigma = \frac{N}{A_j} \leq [\sigma] \quad (5-31)$$

式中  $N$ ——轴心力;

$A_j$ ——净截面面积。

并按下式验算稳定性:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} \leq [\sigma] \quad (5-32)$$

式中  $A$ ——毛截面面积;

$\varphi$ ——根据最大长细比决定的稳定系数,按表4-19和表4-20查取。

一般来说,控制条件是(5-32)式,截面选择时可先假定一个长细比,查取 $\varphi$ 值,进行验算,在验算过程中多次反复,最后得到满意的截面尺寸。

关于轴心受压实腹式柱腹板的局部稳定性计算,可按轴心受压构件腹板局部稳定性要求进行,见第四章。

若 $\frac{h_0}{\delta} > 80$ ,应采用成对的横向加劲肋加强,其间距不得大于 $3h_0$ 。加劲肋的外伸宽度 $b_1$ 及厚度应按式(4-52)和式(4-53)确定。横向加劲肋还可以根据构造需要布置,其间距一般为4~6m,且每个运输单元不少于2个。

在轴心受压柱中,腹板与翼缘间的剪力很小,因此焊缝可按构造要求确定。

## 2. 轴心受压的格构式柱(见图5-20)

轴心受压的格构式柱仍按式(5-31)和式(5-32)验算强度及稳定性,即格构式柱对实轴 $x$ (在截面上同单肢腹板相垂直的截面主轴,见图5-21)的稳定性计算方法与实腹式柱稳定性的计算方法完全相同,但格构式柱对虚轴 $y$ 的稳定性却比具有同等长细比的实腹

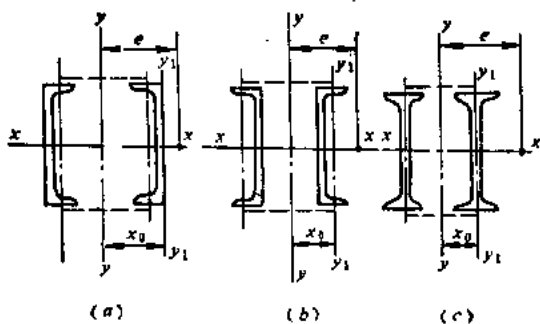


图 5-20 格构式柱的截面形式

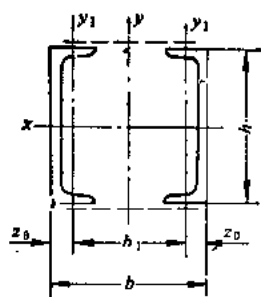


图 5-21 格构式柱截面的实轴 (x 轴) 和虚轴 (y 轴)

式柱小，因为格构式柱的单肢是每隔一定距离用缀条或缀板连系起来的，当柱绕虚轴  $y$  失去稳定时，引起的变形就比实腹式柱大。因此，格构式柱对虚轴  $y$  的稳定性，要求出换算长细比  $\lambda_{Ay}$ ，用  $\lambda_{Ay}$  去查轴心受压构件的稳定系数  $\varphi$  值，即可按轴心受压实腹式柱的公式 (5-32) 进行计算。

几种截面型式的格构式柱的换算长细比  $\lambda_{Ay}$  列于表 5-2 以便计算。

对缀条和缀板应按剪力进行验算，理论上中心受压柱是没有剪力和弯矩的，但由于制造不可能很精确，因此实际上有剪力存在。这些剪力与初始偏心和挠度有关，根据《钢结构设计规范》规定，剪力大小可按下列公式计算：

$$\text{用 3 号钢制成的构件} \quad Q = 20A \quad (5-33)$$

$$\text{用 16 锰钢或 16 锰桥钢制成的构件} \quad Q = 34A \quad (5-34)$$

式中  $Q$  ——剪力，N；

$A$  ——柱横截面的毛面积， $\text{cm}^2$ 。

剪力  $Q$  值沿柱全长不变，并由有关承受该剪力的缀材面（包括用整体板连接的面）分担。

缀条的内力应按桁架腹杆计算，其计算方法为：

考虑压杆隔离部分的平衡，就可以决定横缀条中的内力（图 5-22 b、d）：

$$V = Q_0 \quad (5-35)$$

式中  $Q_0$  ——分配到一个缀材面的剪力， $Q_0 = \frac{Q}{2}$ 。

斜缀条上的内力为：

$$\text{单斜杆式的连缀系：} \quad D = Q_0 / \cos \alpha \quad (5-36)$$

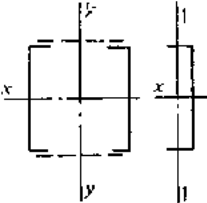
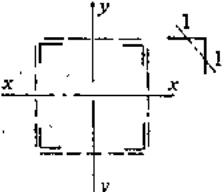
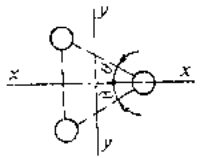
$$\text{双斜杆式的连缀系（交叉）：} \quad D = Q_0 / 2 \cos \alpha \quad (5-37)$$

在单斜杆式的连缀系中，斜缀条的自由长度，为两连缀点之间的距离；在双斜杆式连缀系中为此一距离的  $\frac{1}{2}$ （与之相交的另一斜缀条受拉力）。

横条及斜条的截面常取其一致。连缀系的杆件最常用者为一个角钢，在弧形闸门的支腿上也有槽钢作连缀系的杆件。角钢沿着一个肢相连，而槽钢则沿着腹板相连。

表 5-2

格构式构件换算长细比 $\lambda_e$ 计算公式

项次	构件截面形式	缀材类别	计 算 公 式	符 号 意 义
1		缀板	$\lambda_{hy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}$	$\lambda_y$ ——整个构件对虚轴的长细比 $\lambda_1$ ——单肢对1-1轴的长细比, 其计算长度取缀板间的净距离(铆接构件取缀板边缘铆钉中心间的距离)
2		缀条	$\lambda_{hy} = \sqrt{\lambda_y^2 + 27 \frac{A}{A_1}}$	$A_1$ ——构件横截面所截各斜缀条的毛截面面积之和
3		缀板	$\lambda_{hx} = \sqrt{\lambda_x^2 + \lambda_1^2}$ $\lambda_{hy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}$	$\lambda_1$ ——单肢对最小刚度轴1-1的长细比其计算长度取缀板间的净距离(铆接构件取缀板边缘铆钉中心间的距离)
4		缀条	$\lambda_{hx} = \sqrt{\lambda_x^2 + 40 \frac{A}{A_{1x}}}$ $\lambda_{hy} = \sqrt{\lambda_y^2 + 40 \frac{A}{A_{1y}}}$	$A_{1x}$ ——构件横截面所截垂直于x-x轴的平面内各斜缀条的毛截面面积之和 $A_{1y}$ ——构件横截面所截垂直于y-y轴的平面内各斜缀条的毛截面面积之和
5		缀条	$\lambda_{hx} = \sqrt{\lambda_x^2 + \frac{42A}{A_1(1.5 - \cos^2\theta)}}$ $\lambda_{hy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{42A}{A_1 \cos^2\theta}}$	$\theta$ ——缀条所在平面和x轴的夹角

注 (1) 缀板组合构件的单肢长细比 $\lambda_1$ 不应大于40, 缀板沿柱纵向的宽度不应小于肢件轴线间距离的2/3, 厚度不应小于该距离的1/40, 并不小于6mm;

(2) 斜缀条与构件轴线间倾角应保持在 $40^\circ \sim 70^\circ$ 范围内。

按照斜条(它的内力和长度均较横条为大)受压时的工作情形来复核连缀系的截面:

$$\sigma = \frac{D}{A\varphi} \leq [\sigma] \quad (5-38)$$

式中  $D$ ——斜缀条的压力;

$A$ ——斜缀条的毛截面;

$\varphi$ ——受压构件的稳定系数, 按表4-19和表4-20查得。

缀板的内力计算:

$$\text{剪力} \quad T = \frac{Q_e l}{a} \quad (5-39)$$

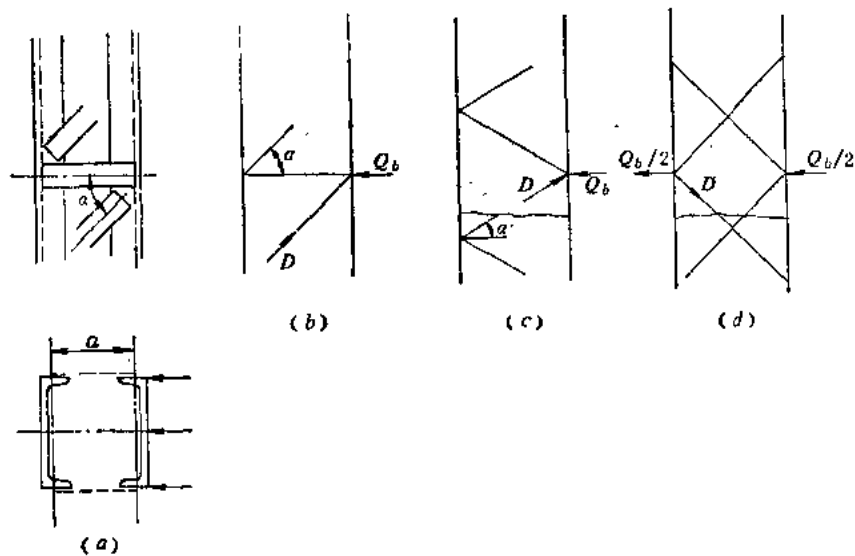


图 5-22 缀条连接系的节点及计算简图  
(a)节点的构造; (b)、(c)单斜杆缀条; (d)双斜杆缀条

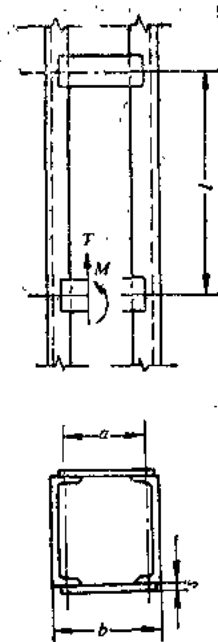


图 5-23 缀板组合图

弯矩 (和肢件连接处) 
$$M = \frac{Q_b l}{2} \quad (5-40)$$

式中  $Q_b$  —— 分配到一个缀材面的剪力;

$l$  —— 缀板中心间的距离 (图5-23);

$a$  —— 肢件轴线间的距离 (图5-23)。

缀板的内应力为:

$$\sigma = \frac{6M}{\delta b^2} \leq [\sigma] \quad (5-41)$$

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{T}{b\delta} \leq [\tau] \quad (5-42)$$

式中  $M$ 、 $T$  —— 见式 (5-39) 和式 (5-40);

$b$  —— 缀板宽度;

$\delta$  —— 缀板厚度。

缀板的厚度不应小于 6mm, 当没有加固的角钢时, 它的厚度常不小于  $\frac{1}{50}a$  ( $a$  如图 5-22 所示); 有时用槽钢代替缀板, 其刚性较好。

用作减小受压构件计算长度的杆件, 应能承受该受压构件按式 (5-33) 或式 (5-34) 算得的剪力  $Q$  所引起的轴向力。

### 3. 偏心受压实腹式柱

偏心受压柱可采用对称的或不对称的截面型式。在轴心力和弯矩作用下, 截面上的应力为压应力和弯曲正应力之和, 而最大的组合应力在柱的受压一侧边缘上。按照节约钢材的

原则,柱截面应采用不对称的、在应力较大的一侧加大的截面。如果弯矩作用的方向有可能变为相反的方向时,则应采用对称的截面。

偏心受压柱的计算与偏心受压构件的计算完全一样,见第四章。

#### 4. 偏心受压格构式柱

(1) 当弯矩作用在实轴平面内时,在弯矩作用平面内的稳定性验算与实腹式柱一样。在弯矩作用平面外的稳定性验算也和实腹柱一样,但其长细比应按表5-2换算。

(2) 当弯矩作用在虚轴平面内时,应按下式验算弯矩作用平面内的稳定性:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_{ps} A} \leq [\sigma] \quad (5-43)$$

式中  $\varphi_{ps}$ ——格构式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数,根据换算长细比 $\lambda_{sy}$ 、

偏心率 $\varepsilon_1$  ( $\varepsilon_1 = \frac{M A x_0}{N I_y}$ )按表5-3选用;

$M$ ——弯矩,按第四章四(二)4规定采用;

$x_0$ ——从 $y$ 轴到压力较大肢的轴线间距离(图5-20b),但如果这一距离小于 $y$ 轴至较大压力肢腹板的距离,取后一距离(图5-20a);

$I_y$ ——对 $y$ 轴的毛截面惯性矩。

弯矩作用平面外的稳定性不需验算,但应按轴心受压构件验算单肢的稳定性,如图5-20所示的格构式柱,其单肢所承受的轴向力 $N'$ 按下式计算:

$$N' = \frac{N}{2} \pm \frac{M}{a} \quad (5-44)$$

式中  $M$ 、 $N$ ——作用在格构式柱上的弯矩及轴向力;

$a$ ——单肢重心轴之间的距离(见图5-23)。

偏心受压格构式柱的缀材与轴心受压格构式柱一样,按承受剪力考虑。但剪力的数值应取构件实际剪力和按公式(5-33)、式(5-34)规定的剪力中的较大者进行验算。

(3) 当在实轴和虚轴同时作用有弯矩时,应分两次验算其稳定性:

1) 整体稳定性验算:

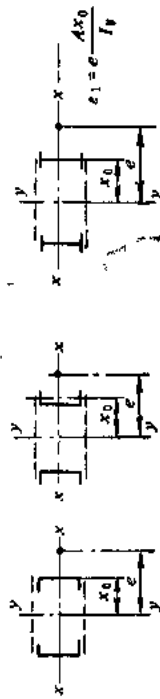
$$\sigma = \frac{N}{\varphi_{ps} A} + 0.9 \frac{M_x}{W_x} \leq [\sigma] \quad (5-45)$$

式中 $\varphi_{ps}$ 的含义与式(5-43)相同,按表5-3查取。

2) 单肢稳定性验算:如图5-20所示由两根相同截面的单肢型钢组成的格构式柱,每根单肢承受由(5-44)式求得的 $N'$ 及 $\frac{1}{2}M_x$ 进行验算,验算的方法按实腹式柱考虑。对缀板柱还应考虑(5-40)式中的局部弯矩在内。

弧形闸门的框架支臂为偏心受压柱,除具有足够的强度外,更重要的是在外力作用下不失去稳定。支臂失稳形态有两种可能情况:一是在弯矩作用平面内失去稳定,这是由于外力过大以致外力和构件内力不能继续保持静力平衡,使弯曲变形急剧增加而失去稳定;另一在弯矩作用平面外(即垂直于弯矩作用平面)构件以弯扭变形而失去稳定。因此支臂必须按两个方向分别进行稳定验算。

表 5-3

格构式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数  $\varphi_x$ 

$\lambda_x \backslash \varepsilon_1$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0	1.000	0.833	0.714	0.625	0.555	0.500	0.455	0.417	0.385	0.357	0.333	0.286	0.250	0.223	0.200
10	0.995	0.825	0.709	0.621	0.551	0.496	0.451	0.413	0.382	0.355	0.332	0.284	0.249	0.222	0.200
20	0.981	0.816	0.703	0.615	0.545	0.488	0.445	0.408	0.378	0.352	0.330	0.283	0.248	0.220	0.199
30	0.958	0.801	0.689	0.601	0.534	0.479	0.437	0.401	0.370	0.345	0.328	0.280	0.245	0.218	0.197
40	0.927	0.783	0.671	0.586	0.520	0.467	0.426	0.392	0.362	0.338	0.320	0.275	0.241	0.215	0.194
50	0.888	0.757	0.648	0.565	0.502	0.452	0.413	0.380	0.352	0.329	0.313	0.269	0.237	0.212	0.191
60	0.842	0.730	0.620	0.544	0.484	0.435	0.399	0.367	0.340	0.318	0.304	0.263	0.231	0.207	0.187
70	0.789	0.696	0.594	0.517	0.460	0.416	0.381	0.352	0.327	0.306	0.294	0.255	0.225	0.202	0.183
80	0.731	0.654	0.556	0.487	0.436	0.396	0.363	0.337	0.313	0.293	0.283	0.246	0.218	0.196	0.178
90	0.669	0.600	0.514	0.456	0.411	0.374	0.345	0.320	0.299	0.280	0.272	0.237	0.211	0.190	0.173
100	0.604	0.560	0.474	0.423	0.384	0.351	0.325	0.302	0.283	0.267	0.259	0.227	0.203	0.184	0.168
110	0.536	0.510	0.435	0.389	0.356	0.327	0.305	0.285	0.267	0.255	0.247	0.218	0.195	0.177	0.162
120	0.466	0.453	0.395	0.358	0.330	0.304	0.284	0.267	0.252	0.242	0.234	0.207	0.187	0.170	0.156
130	0.401	0.401	0.359	0.329	0.304	0.282	0.265	0.250	0.236	0.228	0.221	0.197	0.178	0.163	0.150
140	0.349	0.350	0.325	0.300	0.279	0.262	0.246	0.233	0.222	0.214	0.208	0.187	0.170	0.156	0.144
150	0.306	0.306	0.295	0.275	0.258	0.242	0.229	0.218	0.208	0.201	0.196	0.177	0.162	0.149	0.138
160	0.272	0.272	0.268	0.251	0.237	0.224	0.213	0.203	0.195	0.189	0.185	0.168	0.154	0.142	0.132
170	0.243	0.243	0.243	0.230	0.218	0.207	0.198	0.189	0.182	0.177	0.173	0.158	0.146	0.135	0.126
180	0.218	0.218	0.218	0.211	0.201	0.192	0.184	0.176	0.170	0.166	0.163	0.149	0.138	0.129	0.120
190	0.197	0.197	0.197	0.194	0.185	0.178	0.170	0.164	0.159	0.155	0.153	0.141	0.131	0.122	0.115
200	0.180	0.180	0.180	0.178	0.171	0.165	0.159	0.153	0.148	0.145	0.143	0.133	0.124	0.116	0.110

续表

$\epsilon_1$ $\lambda_b$	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10	12	14	16	18	20	25	30
0	0.182	0.167	0.154	0.143	0.134	0.125	0.111	0.100	0.091	0.077	0.067	0.059	0.053	0.048	0.038	0.032
10	0.181	0.166	0.154	0.143	0.134	0.125	0.110	0.099	0.091	0.077	0.067	0.059	0.053	0.048	0.038	0.032
20	0.180	0.165	0.153	0.142	0.133	0.124	0.110	0.099	0.091	0.077	0.067	0.059	0.053	0.048	0.038	0.032
30	0.179	0.164	0.152	0.141	0.132	0.123	0.110	0.099	0.090	0.076	0.066	0.058	0.052	0.047	0.037	0.031
40	0.177	0.162	0.150	0.140	0.131	0.122	0.109	0.098	0.090	0.076	0.066	0.058	0.052	0.047	0.037	0.031
50	0.174	0.160	0.148	0.138	0.129	0.121	0.108	0.097	0.089	0.075	0.065	0.058	0.052	0.047	0.037	0.031
60	0.171	0.157	0.146	0.136	0.127	0.120	0.107	0.096	0.088	0.075	0.065	0.057	0.051	0.047	0.036	0.030
70	0.167	0.154	0.143	0.133	0.125	0.118	0.105	0.095	0.087	0.074	0.064	0.057	0.051	0.046	0.036	0.030
80	0.163	0.151	0.140	0.131	0.123	0.115	0.103	0.094	0.086	0.073	0.064	0.056	0.050	0.046	0.036	0.030
90	0.159	0.147	0.137	0.128	0.120	0.113	0.102	0.092	0.084	0.072	0.063	0.056	0.050	0.046	0.035	0.029
100	0.154	0.143	0.133	0.125	0.117	0.111	0.100	0.090	0.083	0.071	0.062	0.055	0.049	0.045	0.035	0.029
110	0.149	0.139	0.129	0.121	0.114	0.108	0.097	0.089	0.081	0.070	0.061	0.054	0.049	0.045	0.035	0.029
120	0.144	0.134	0.126	0.118	0.111	0.105	0.095	0.087	0.080	0.069	0.060	0.053	0.048	0.044	0.034	0.028
130	0.139	0.130	0.122	0.114	0.108	0.102	0.093	0.085	0.078	0.067	0.059	0.052	0.048	0.044	0.034	0.028
140	0.134	0.125	0.118	0.111	0.105	0.100	0.090	0.083	0.075	0.066	0.058	0.052	0.047	0.043	0.034	0.028
150	0.129	0.121	0.113	0.107	0.102	0.097	0.088	0.081	0.075	0.065	0.057	0.051	0.047	0.043	0.033	0.027
160	0.123	0.116	0.109	0.103	0.098	0.094	0.085	0.078	0.073	0.063	0.056	0.050	0.046	0.042	0.033	0.027
170	0.118	0.111	0.105	0.100	0.095	0.091	0.083	0.076	0.071	0.062	0.055	0.049	0.045	0.041	0.033	0.027
180	0.113	0.107	0.101	0.096	0.092	0.087	0.080	0.074	0.069	0.060	0.054	0.048	0.044	0.041	0.032	0.026
190	0.108	0.102	0.097	0.093	0.088	0.084	0.078	0.072	0.067	0.059	0.053	0.047	0.043	0.040	0.032	0.026
200	0.104	0.098	0.093	0.089	0.085	0.082	0.075	0.070	0.065	0.058	0.052	0.046	0.042	0.039	0.032	0.026

注 对3号钢和2号钢,应取换算长细比 $\lambda_b$ ; 对16锰钢和16锰桥钢,应取假定长细比 $\lambda_b \sqrt{\frac{E}{2400}}$ 代替换算长细比 $\lambda_b$ 。

对于实腹式的框架支臂可按前述第3点计算, 支臂的长细比计算如下:

$$\lambda = \frac{h_0}{r} \quad (5-46)$$

式中  $h_0$ ——支臂的计算长度:  $h_0 = \mu h$ ;

$h$ ——支臂的几何长度;

$\mu$ ——计算长度系数, 对圆柱铰和锥形铰可取1.2~1.5;

$r$ ——构件在弯矩作用平面内的回转半径。

为了保证支臂受压不失去稳定, 支臂长细比的容许值 $[\lambda]$ 取120, 即:

$$\lambda = \frac{\mu h}{r} \leq [\lambda] = 120 \quad (5-47)$$

对于格构式的框架支臂可按前述第4点计算。

(三) 支臂与主横梁的连接计算 (图5-24)

1. 连接螺栓计算

螺栓承受由弯矩产生的拉力, 最大拉力 $N_{\max}$ 为

$$N_{\max} = \frac{r_1 M_b}{2(r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2)} \quad (5-48)$$

$$\text{螺栓直径 } d \geq \sqrt{\frac{4N_{\max}}{\pi[\sigma_t^b]}} \quad (5-49)$$

式中  $M_b$ ——支臂与主梁连接处弯矩, N·cm;

$[\sigma_t^b]$ ——螺栓容许拉应力, Pa。

注: 式(5-48)只适用于两排螺栓。

2. 抗剪板焊缝计算

抗剪板焊缝承受框架水平推力产生的剪力。

$$\text{焊缝高度 } h_f \geq \frac{H}{2 \times 0.7 l_f [\tau_t^b]} \quad (5-50)$$

式中  $H$ ——框架水平推力, N;

$l_f$ ——焊缝长度, cm;

$[\tau_t^b]$ ——焊缝容许剪应力, Pa。

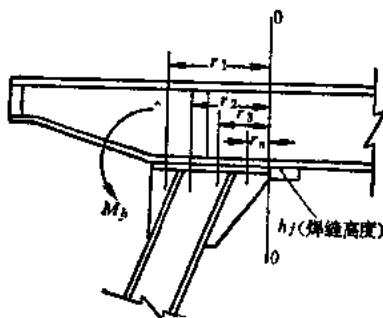


图 5-24 斜支臂与主横梁的连接计算图



## 第六章 零 部 件 设 计

### 第一节 平面钢闸门的行走支承装置

#### 一、概述

平面闸门的行走支承包括主行走支承装置和侧、反向支承导向装置三部分。主行走支承装置承受闸门全部水平荷载，并通过主轨传递到土建部分；侧、反向支承导向装置防止闸门在闸槽中移动时因左右倾斜而被卡住或前后碰撞，并减小门下过水时的振动，以保证闸门在闸槽中能顺利启闭。

行走支承有滑动式和滚动式两种类型，如图6-1所示。

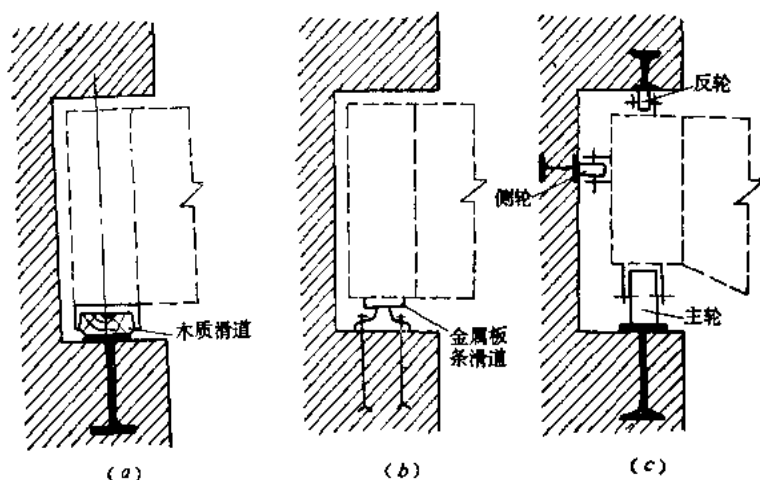


图 6-1 行走支承类型  
(a)、(b)滑动式；(c)滚动式

平面闸门行走支承的型式，应根据工作条件、荷载和跨度选定。动水中启闭的闸门一般可采用滚轮或胶木滑道支承；静水中启闭的闸门和启闭力不大的动水中启闭的闸门，可以用钢或铸铁等材料制造的滑动支承。

常用的滚轮支承有悬臂轮、筒支轮和台车等三种类型。一般采用筒支轮；当荷载不大时，可采用悬臂轮；当支承跨度较大时，也可采用台车或其他型式支承，以保证轮子与轨道的接触良好。为降低轮子的荷载，在闸门上布置多滚轮时，为调整滚轮踏面在同一平面上，宜采用偏心轴。

采用热处理方法提高滚轮表面硬度时，滚轮硬度应略低于轨道硬度。

#### 二、滑动式行走支承

##### (一) 木滑道和金属板条滑道

小型水电站工程闸门的滑动式行走支承可用方木或金属板条制成(图6-1a、b)，沿

边梁的全高设置,可兼作侧面止水。它的构造简单、材料经济、运行也可靠,但在闸门移动时滑动摩擦力很大,故只适用于水头不大的小型闸门和静水启闭的闸门。

方木常采用经过防腐处理的优质松木和橡木,最常用的截面尺寸每边是18~24cm。方木置于槽钢内,并使方木高出槽钢翼缘2.5~5.0cm,同时将方木的棱角切去1.5~2cm使之成45°斜角(图6-1a),再用螺栓沿闸门全高固定在单腹板式边梁上。在方木上通常布置两行螺栓,交错排列,螺栓间距为25~50cm。螺栓的数量及其尺寸须能承担启闭闸门时加于方木和埋件之间所产生的摩擦力和方木自重。螺栓头部埋置在方木的预留槽内,以使方木的表面保持平滑并能紧密地靠在埋件上。方木的承压计算,可以按照闸门底槛以上1m高度处的平均应力进行:

$$\sigma_{sh} = \frac{pl}{2b} \leq [\sigma_{sh}] \quad (6-1)$$

式中  $p$  —— 闸门底槛以上1m高度处的平均水压力强度;

$l$  —— 闸门的荷载跨度;

$b$  —— 滑道的承压面宽度;

$[\sigma_{sh}]$  —— 湿方木的横纹容许承压应力,按表3~42选用。

当 $\sigma_{sh} > [\sigma_{sh}]$ ,而方木宽度又不能增宽时,可改用金属板条(可由铸铁、铸钢、锻钢和青铜等材料制成)。

荷载不大的闸门的行走支承,有时采用金属滑道,在闸门两侧的边梁上各设置两个(如图6-2示)。

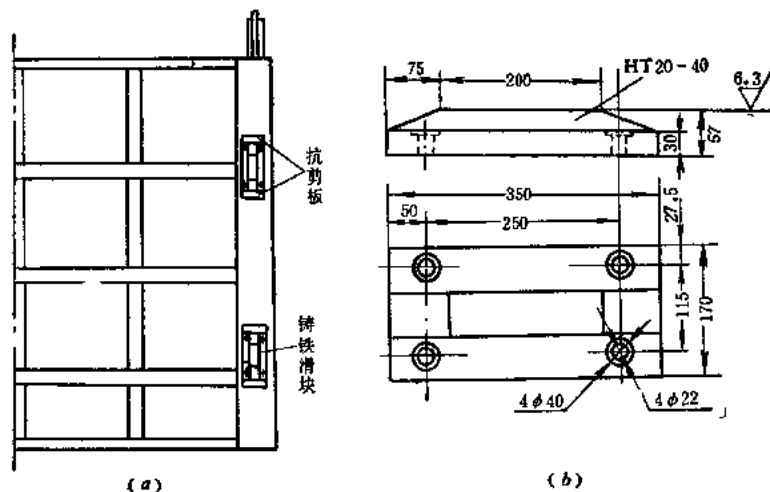


图 6-2 金属滑道的行走支承  
(a)滑块在门叶上的布置; (b)滑块结构图(单位: mm)

金属滑道接触应力的验算应根据其构造、形状和接触特性进行计算。当滑道与轨道之间是平面接触时,仍可按式(6-1)计算,但容许承压应力应根据滑道与轨道使用的材料而定。

闸门在启闭过程中,滑动支承连接螺栓因摩擦阻力而受剪,其应力可按下式计算:

$$\tau = \frac{fP}{\sum F} \leq [\tau] \quad (6-2)$$

式中  $f$  ——摩擦系数,可按表9-1采用;

$\sum F$  ——在水压力计算范围内螺栓的截面积之和;

$P$  ——水压力, 闸门底槛以上1m长度内的总水压力, N。

## (二) 胶木滑道

### 1. 胶木滑道的构造

压合胶木(木材层积塑料)具有较高的抗压能力和较低的摩擦系数,它与不锈钢轨道组成摩擦件时是较理想的滑动支承,应用广泛。

闸门用压合胶木(木材层积塑料)的物理机械性能见表3-21。

胶木滑道支承的工作面,应是压合胶木顺木纹方向的端面(图6-3)。胶木压入夹槽前经干燥处理后,其含水率不得大于5%。工作面应由三条压合胶木组成,其总宽度一般为100~150mm。三条胶木的总宽度应比夹槽宽度大1.3%~1.7%,这样可以使胶木受到足够的横向夹紧力以提高承压面的强度。胶木滑道夹槽与胶木的公差配合可取 $\frac{H8}{t7}$ 。胶木压入后的加工粗糙度应达到1.6/。

图6-4为可拆式胶木滑道,这种型式通常只用于中小型闸门。

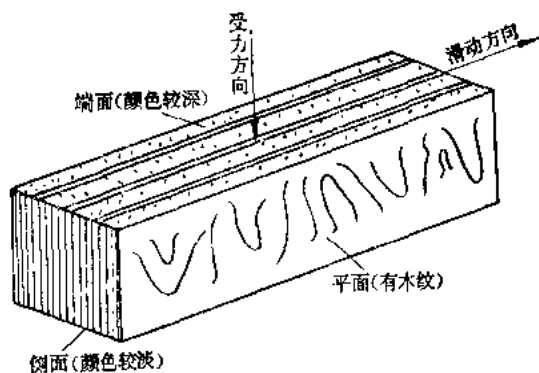


图 6-3 压合胶木

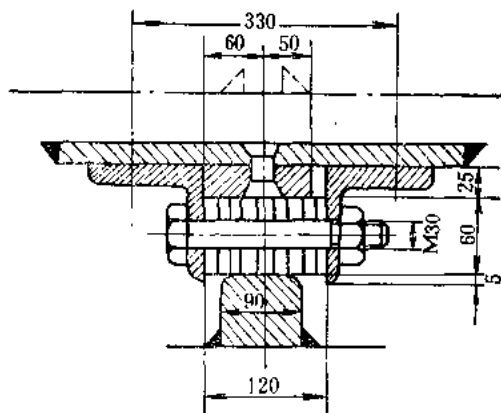


图 6-4 可拆式胶木滑道(单位: mm)

图6-5为整体铸造式胶木滑道,这种型式大型闸门使用较为普遍。

胶木加工前,应将胶木放在75~85℃的石蜡溶液中干燥40~80h,脱水干燥加工后,胶木及夹槽面应涂一层冷固性2127酚醛树脂,胶木压入夹槽后与槽底应严密无间隙,用塞尺检查,两端30mm内、20mm宽的局部间隙不应超过0.2mm。然后进行工作表面的最后加工,其粗糙度可达到0.8/,并使工作面低于夹槽面约5mm。

加工装配后再涂黄油封闭保护,并放置通风干燥处,以免爆烈或吸水膨胀。

支承胶木滑道的钢轨表面通常做成圆弧形,使其与胶木滑道成线接触(见图6-6)。为了减少摩擦力,在钢轨表面上堆焊一层3~5mm厚的不锈钢,或在轨顶焊上一条不锈钢板条,然后加工到 $R_a=1.6\sim0.8\mu$ 的粗糙度。加工后不锈钢厚度应不小于2~3mm,轨



表 6-1 钢轨的工作表面宽度和圆弧半径

支承压力( $\times 10^4 \text{Pa}$ )	1000以下	1000~2000	2000~4000
轨顶圆弧半径 $R(\text{cm})$	10	15	20
轨头设计宽度 $b(\text{cm})$	2.5	3.5	4

头设计宽度  $b$  和轨顶圆弧半径  $R$  应根据胶木和轨面相接触的单位长度上的支承压力按表 6-1 来决定。

钢轨底面宽度  $B$  (图 6-6b) 应根据混凝土容许承压强度 (表 3-43) 决定。钢轨高度  $h$  不应小于  $B/3$ 。

由于压合胶木与轨道间的摩擦系数随滑道的单位长度上的压力的增加而减少, 所以采用的单位线荷载不宜过低, 一般选用  $1.5 \sim 4.0 \times 10^4 \text{N/cm}$ , 如超过  $4 \times 10^4 \text{N/cm}$  时, 应对材料、制作等作专门研究。

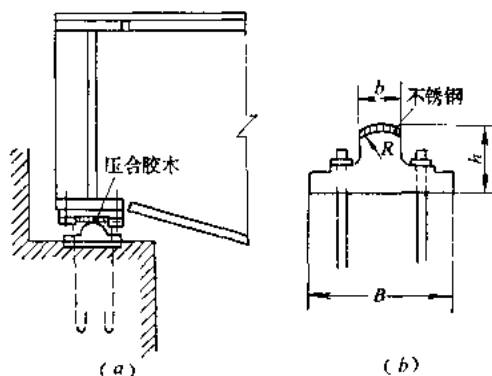


图 6-6 胶木滑道的布置和轨道结构尺寸  
(a) 胶木滑道的布置; (b) 轨道结构尺寸

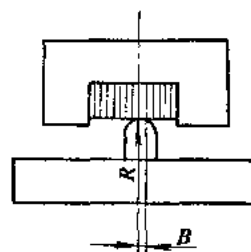


图 6-7 胶木滑道与弧面轨道接触计算图

## 2. 胶木滑道与弧面轨道之间最大接触应力计算

滑道与弧面轨道相接触 (见图 6-7), 其最大接触应力按下式计算:

$$\sigma_{\max} = 1.27 \frac{q}{2B} = \frac{1.27 q}{2 \times 0.00191 \sqrt{qR}} = 332.5 \sqrt{\frac{q}{R}} \leq [\sigma_t] \quad (6-3)$$

式中  $q$  ——滑道上单位长度计算荷载,  $\text{N/cm}$ ;

$B$  ——轨道与滑道接触宽度的一半,  $\text{cm}$ , 其值用下式计算:

$$B = 0.00191 \sqrt{qR} \quad (6-4)$$

公式(6-4)是按胶木的顺木纹方向弹性模量  $E = 31700 \text{MPa}$ , 泊桑比  $\mu = 0.475$  推导而来的;

$R$  ——轨道工作表面的半径,  $\text{cm}$ ;

$[\sigma_t]$  ——胶木的容许接触应力, 一般可取  $[\sigma_t] = 500 \text{MPa}$ 。

## 3. 夹槽的强度计算

(1) 压合胶木压入夹槽时所产生的侧向荷载的计算。压合胶木以公盈尺寸压入夹槽时, 在夹槽两侧产生的压力按下式计算:

$$P = E_e s h \quad (6-5)$$

式中  $P$  ——作用在夹槽两侧单位长度上的荷载,  $\text{N/cm}$ ;

$E_e$  ——压合胶木沿层压方向的弹性模量;

$$E_s = (2500 \sim 3500) \text{MPa}$$

$\varepsilon$  —— 压合胶木宽度的公盈量与夹槽宽度的比值;

$h$  —— 夹槽中胶木的高度, cm。

(2) 按挤压力  $P$  对夹槽断面 I—I 和 II—II (图 6-8) 进行强度计算:

$$\text{I—I 断面:} \quad M_1 = \frac{Ph}{2} \quad (6-6)$$

$$\sigma_{1ux} = \frac{3Ph}{\delta_1^3} \quad (6-7)$$

$$\tau_1 = \frac{P}{\delta_1} \quad (6-8)$$

则 I—I 断面的主应力为:

$$\sigma_{1-1} = \sqrt{\sigma_{1ux}^2 + 3\tau_1^2} \quad (6-9)$$

$$\text{II—II 断面:} \quad \sigma_{11ux} = \frac{3P(h + \delta_2)}{\delta_2^3} \quad (6-10)$$

$$\sigma_p = \frac{P}{\delta_2} \quad (6-11)$$

则 II—II 断面的主应力为:

$$\sigma_{11-11} = \sigma_{11ux} + \sigma_p \leq [\sigma] \quad (6-12)$$

式 (6-6) 至式 (6-12) 中符号  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $h$  的意义见图 6-8, 其余同前。

#### 4. 可拆式滑道螺栓的强度验算

图 6-4 是可拆式胶木滑道, 制造简单, 拆卸方便, 一般用于中小工程, 其侧向挤压应力是靠螺栓的预紧力来保证。

若侧向挤压应力按 20MPa 考虑, 则每一个螺栓受拉力  $P_0$  及扭矩  $M_x$  按下列公式计算:

$$P_0 = \left( ah - \frac{\pi}{4} d_0^2 \right) \times 200 \quad (\text{N}) \quad (6-13)$$

$$M_x = \frac{1.1}{2} d P_0 f \approx 0.1 d P_0 \quad (\text{N} \cdot \text{cm}) \quad (6-14)$$

式中  $a$  —— 螺栓间距, cm;

$h$  —— 压合胶木的高度, 见图 6-8, cm;

$d$  —— 螺栓直径, cm;

$f$  —— 摩擦系数, 式中  $f = 0.18$ ;

$d_0$  —— 螺孔直径, cm。

螺栓安装时的强度按下式验算:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma'] \quad (6-15)$$

$$\text{式中 } \sigma = P_0 / \frac{\pi}{4} d_0^2;$$

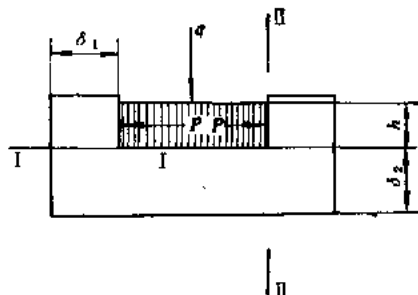


图 6-8 胶木滑道夹槽图

$$\tau = M_x / 0.2d_1;$$

$d_1$ ——螺栓根部直径，即螺栓净直径，cm；

$[\sigma']$ ——螺栓允许拉应力，按表3-38采用。

螺栓在滑道工作时的强度可按式验算：

$$\sigma = \frac{P + 0.05qa}{\frac{\pi}{4}d_1^2} \leq [\sigma'] \quad (6-16)$$

式中  $q$ ——滑道的单位线荷载，N/cm；

其余符号意义同前。

#### 5. 胶木滑道的主要数据

胶木滑道的主要数据（符号参见图6-5）见表6-2。表6-2中，紧固螺栓全部采用M24，螺栓的抗剪强度须满足：

$$\tau = \frac{Pf}{\Sigma F} \leq [\tau] \quad (\text{Pa}) \quad (6-17)$$

式中  $P$ ——压合胶木的工作荷载，N；

$f$ ——压合胶木与不锈钢的摩擦系数，按表9-1采用；

$\Sigma F$ ——各螺栓抗剪面积之和， $\text{cm}^2$ ；

$[\tau]$ ——螺栓的抗剪许用应力，按表3-38采用。

表 6-2 胶 木 滑 道 的 主 要 数 据

序 号	工作荷载 (10 <sup>4</sup> N)	L	n	a	l	K	b	c	每套重量 (kg)
1	150	500	2	180	70	1	300	100	131
2	210	700	2	280	70	1	500	100	183
3	300	1000	3	270	95	2	400	100	263
4	360	1200	3	340	90	2	500	100	313
5	450	1500	4	330	90	2	650	100	392
6	510	1700	5	300	100	2	750	100	444
7	600	2000	6	300	100	2	900	100	522

注 序号1~3不设抗剪板，序号4~7须设抗剪板。

### 三、滚轮式行走支承

#### （一）概述

由于滑动式支承的摩擦力较大，为了减少启闭力，可以采用滚轮式支承，滚轮式支承的摩擦阻力比滑动式支承约小（3~7）倍。

这种支承型的结构比较复杂，自重较大，造价也比较高，但是由于压合胶木的摩擦系数不够稳定，当承压时间较长时，存在着滞留现象，即摩擦力加大很多；胶木的老化问题难于解决，目前生产胶木的厂家不多，一般中小型工程订货困难，所以轮式支承仍得到广泛的应用。

滚轮式支承结构的型式有：简支轮、悬臂轮、柱铰台车、弧面台车和平衡台车等。

下面只介绍悬臂轮和简支轮两种常用的行走支承(见图6-9)。

悬臂式滚轮的优点是轮子安装和检修比较方便,所需闸槽深度较小,但是悬臂式滚轮增大了边梁外侧腹板的支承压力并使边梁受扭,悬臂轴的弯矩也较大,因此,一般情况下每个轮子的荷载不宜过大。但采取一些必要的措施(例如加强边梁等),则每个轮压可达到1.5MN(国内最大已达到3.2MN)。

当闸门的水头和孔口都较大时,宜将轮子装设在双腹式边梁的两块腹板之间(图6-9b)。这种简支式滚轮避免了上述悬臂式滚轮的缺点,但所需闸槽深度稍有增加。我国目前很多大中型水工建筑物进水口闸门大都用这种型式。这种型式一般情况下适用于每个轮压不大于2.5MN,且闸门的跨度不大于10~12m。

## (二) 轮子的计算

轮子的强度计算主要包括线接触应力和点接触应力。圆柱形滚轮与平面轨道的接触为线接触;圆柱形或圆锥形滚轮与弧形轨头的轨道、或双曲率的滚轮与平面轨头的轨道的接触是点接触。

### 1. 线接触应力计算

$$\sigma_{\max} = 0.418 \sqrt{\frac{PE}{bR}} \leq 2.5\sigma_s \quad (6-18)$$

式中  $P$ ——作用在一个滚轮上的荷载, N, 该荷载等于设计轮压乘以不均匀系数;

$b$ ——轮缘宽度, cm;

$R$ ——滚轮的半径, cm;

$\sigma_s$ ——两种接触材料中较小的屈服点, Pa, 选用 $\sigma_s$ 时, 应注意与材料表面的淬火硬度有关;

$E$ ——材料的弹性模量, Pa。

当轨道与轮子采用不同的材料时,  $E$ 取合成弹性模量 $E'$ 进行计算:

$$E' = \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2} \quad (6-19)$$

由公式(6-18)可知, 当选用材料的屈服强度 $\sigma_s$ 已知时,  $\frac{P}{bR}$ 即为定值, 以 $Z$ 表示:

$$Z = \frac{P}{bR} = \left( \frac{2.5}{0.418} \sigma_s \right)^2 \times \frac{1}{2.1 \times 10^6} = 1.7 \times 10^{-5} \sigma_s^2 \quad (6-20)$$

几种常用轮子材料的 $Z$ 值列于表6-3。

### 2. 点接触应力计算

$$\sigma = \xi \sqrt{\frac{PE^2}{R_1^2}} \leq \sigma_s \quad (6-21)$$

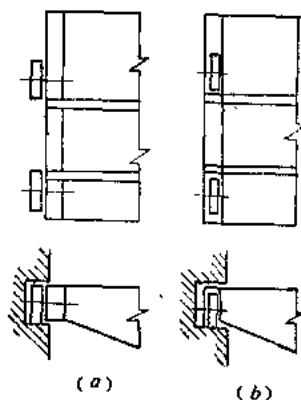


图 6-9 滚轮式支承  
(a)悬臂轮; (b)简支轮



表 6-3

材 料	45号	ZG25	ZG35	ZG45	ZG55 II ZG35CrMnSi	ZG50Mn2 QT	ZG35CrMo
$\sigma_s$	3600	2400	2800	3200	3500	4500	5500
Z	220	98	133	174	208	345	515

当 $R_1$ 与 $R_2$ 之比在0.3~0.8之间时,点接触应力也可按下列近似公式计算,其误差约为2%:

$$\sigma_{max} = 0.24 \sqrt[3]{PE^2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^2} \leq 4\sigma_s \quad (6-22)$$

两式中  $R_1$ 、 $R_2$ ——两接触面的半径,  $R_2$ 为大值, cm,  $R_1$ 为小值, cm;

$\xi$ ——系数,由 $\frac{R_1}{R_2}$ 比值而定,按表6-4选用。

表 6-4

系 数 值

$\frac{R_1}{R_2}$	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10
$\xi_1$	0.078	0.084	0.092	0.101	0.112	0.122	0.139	0.162	0.215	0.256	0.330
$\xi_2$	0.089	0.096	0.101	0.110	0.117	0.122	0.128	0.144	0.164	0.184	0.194

注  $\xi_1$ ——接触面中心处的应力系数;

$\xi_2$ ——接触面的椭圆长径末端处的应力系数。

### (三) 轮子材料

轮子一般用铸钢制成,直径小于400mm的轮子也可用铸铁制成。当轮子的荷载较大(超过 $20 \times 10^4 \text{ N}$ )时,铸铁轮子的尺寸就显得太大,必须采用碳钢或合金钢铸造。轮子荷载在 $120 \times 10^4 \text{ N}$ 以下时,可选用普通碳素铸钢,超过 $120 \times 10^4 \text{ N}$ 则可选用合金铸钢,如ZG50Mn2、ZG35CrMo、ZG35CrMnSi等。轮子的表面还可根据需要,进行表面硬化处理,以提高局部强度。对合金钢的热处理方法,应从工艺方面慎重考虑,以达到各项设计要求。一般对上述钢号要求表面硬度达到HB=300~450。

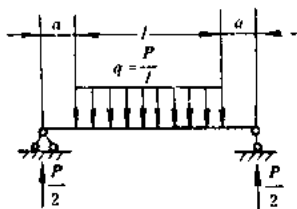


图 6-10 简支式轮轴受力计算简图

理,以提高局部强度。对合金钢的热处理方法,应从工艺方面慎重考虑,以达到各项设计要求。一般对上述钢号要求表面硬度达到HB=300~450。

(四) 轮轴的弯曲应力、剪应力、轴套的承压应力、轴承座的局部紧接承压应力计算

#### 1. 简支式(图6-10)

(1) 轮轴的弯曲应力:

$$\sigma = \frac{P(4a+l)}{0.785d^3} \leq [\sigma] \quad (\text{Pa}) \quad (6-23)$$

(2) 轮轴的剪应力:

$$\tau = \frac{8P}{3\pi d^3} \leq [\tau] \quad (\text{Pa}) \quad (6-24)$$

(3) 轴套的承压应力:

$$\sigma_{cs} = \frac{P}{dl} \leq [\sigma_{cs}] \quad (\text{Pa}) \quad (6-25)$$

(4) 轴承座的局部紧接承压应力:

$$\sigma_{cl} = \frac{P}{2d\delta} \leq [\sigma_{cl}] \quad (\text{Pa}) \quad (6-26)$$

式中  $P$ ——滚轮上的荷载, N;

$d$ ——轴径, cm;

$l$ ——轴套长度, cm;

$\delta$ ——轴承承压板一侧的总厚度, cm.

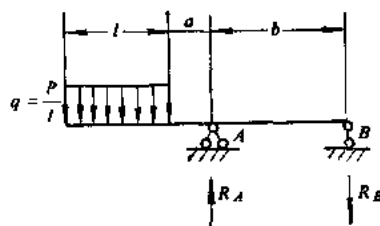


图 6-11 悬臂式轮轴受力计算简图

2. 悬臂式 (图6-11)

(1) 轮轴的弯曲应力:

$$\sigma = \frac{P(2a+l)}{0.2d^3} \leq [\sigma] \quad (\text{Pa}) \quad (6-27)$$

(2) 轮轴的剪应力:

$$\text{当 } b \geq a + 0.5l \text{ 时: } \tau = \frac{16P}{3\pi d^3} \leq [\tau] \quad (\text{Pa}) \quad (6-28)$$

(3) 轴套的承压应力:

$$\sigma_{cs} = \frac{P}{dl} \leq [\sigma_{cs}] \quad (\text{Pa}) \quad (6-29)$$

(4) 轴承座的局部紧接承压应力:

$$\sigma_{cl} = \frac{R_A}{d\delta} \leq [\sigma_{cl}] \quad (\text{Pa}) \quad (6-30)$$

式中  $R_A$ ——A处轴承座的反力, N, 其值为:

$$R_A = \frac{P}{b}(0.5l + a + b) \quad (6-31)$$

$\delta$ ——A处轴承承压座板的总厚度, cm;

其它符号意义同前。

(五) 轴套

除采用青铜轴套外, 目前比较广泛采用胶木轴套 (MCS-2-1)。

1. 胶木轴套的尺寸选择 (图6-12)

(1) 轮毂内径的加工精度宜为 H8~H9。胶木轴套的加工工艺一般是先形成外圆 (按公差) 压入轮毂后再按公差加工内圆, 这样较能达到设计的要求, 用得较广。轴套外径的压入公差可取其直径的 (0.5~1.0) %。

(2) 胶木轴套压入后, 内径与轴的公差配合对于检修闸门宜为  $\frac{H_9}{d_{11}}$ ; 如轴套经常处

于水中工作时, 容易出现抱轴现象, 其公差配合可选用  $\frac{H_9}{h_{11}}$ 。胶木轴套的外径  $D$  (图6-12) 可根据轴套的内径  $d$  按表6-5选用。

表 6-5 胶木轴套内径与外径的关系值

$d$ (mm)	<50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300	300~400	400~500	500~600	600~750
$D$ (mm)	$d+10$	$d+15$	$d+20$	$d+25$	$d+30$	$d+35$	$d+40$	$d+45$	$d+50$	$d+(60\sim70)$

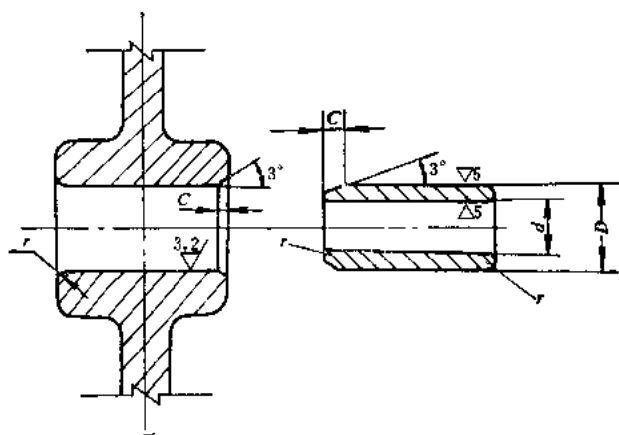


图 6-12 胶木轴套与轮毂的配合关系

(3) 其他有关尺寸如下:  $c=0.05d$  ( $d$  为轴径);  $r=2\sim5\text{mm}$ 。

轴套长度  $l$  的选择, 必须满足式 (6-25) 或式 (6-29) 的要求。轴套的加工工艺, 有的工厂为内外圆按公差一次形成, 再压入轮毂, 按此工艺流程的轴套公差列于表6-6。

胶木轴套在机械加工前, 应严格测定其含水率, 如含水率大于 4% 时, 应在石腊炉或电烘箱进行干燥。机械加工后, 应立即进行装配, 设计时, 应考虑有密封和润滑措施。轴套在未装配时, 应放入机械润滑油中或放置干燥通风处, 较长时间不使用, 则应采取封闭保护措施, 严防潮湿。

## 2. 胶木轴套压入、压出轮毂的力计算

轴套压入轮毂或自轮毂压出, 一般采用液压机。在压入轮毂前, 在配合表面应涂以润滑油, 压入的速度不应超过  $5\text{mm/s}$ 。

压出或压入力按下式计算:

$$P_{\text{压出}} = f_{\text{压出}} P_{\text{max}} \pi d l \quad (\text{N}) \quad (6-32)$$

$$P_{\text{压入}} = f_{\text{压入}} P_{\text{max}} \pi d l \quad (\text{N}) \quad (6-33)$$

式中  $f_{\text{压出}}$ ——钢对压合胶木的摩擦系数取 0.33;

$f_{\text{压入}}$ ——钢对压合胶木的摩擦系数取 0.54;

$P_{\text{max}}$ ——压入 (出) 时, 作用于轴套上的比压值,  $\text{Pa}$ ,

$$P_{\text{max}} = \frac{2E_1 E_2 \delta}{E_1 + E_2} \frac{1}{d} \quad (\text{Pa}) \quad (6-34)$$

表 6-6

胶木轴套的公差配合(内外圆一次加工成形)

轴的直径  $d_1$	轴 套						轮 毅 内 径  $H_1$	压 紧 公 盈		轴套压紧后与 轴 的 间 隙	
	内 径			外 径				最 大	最 小	最 大	最 小
	公称尺寸	上偏差	下偏差	公称尺寸	上偏差	下偏差					
50	50	+0.30	+0.25	65	+0.25	+0.20	65	0.25	0.15	0.40	0.08
60	60	+0.36	+0.30	75	+0.30	+0.24	75	0.30	0.18	0.48	0.10
70	70	+0.41	+0.35	85	+0.35	+0.29	85	0.35	0.23	0.48	0.10
80	80	+0.46	+0.40	95	+0.40	+0.34	85	0.40	0.28	0.48	0.10
90	90	+0.52	+0.45	105	+0.45	+0.38	105	0.45	0.31	0.56	0.12
100	100	+0.57	+0.50	120	+0.50	+0.43	120	0.50	0.36	0.56	0.12
110	110	+0.62	+0.55	130	+0.55	+0.48	130	0.55	0.41	0.56	0.12
120	120	+0.67	+0.60	140	+0.60	+0.53	140	0.60	0.46	0.56	0.12
130	130	+0.73	+0.65	150	+0.65	+0.57	150	0.65	0.49	0.64	0.13
140	140	+0.78	+0.70	160	+0.70	+0.62	160	0.70	0.54	0.64	0.13
150	150	+0.83	+0.75	175	+0.75	+0.67	175	0.75	0.59	0.64	0.13
160	160	+0.88	+0.80	185	+0.80	+0.72	185	0.80	0.64	0.64	0.13
170	170	+0.93	+0.85	195	+0.85	+0.77	195	0.85	0.69	0.64	0.13
180	180	+0.98	+0.90	205	+0.90	+0.82	205	0.90	0.74	0.64	0.13
190	191	+0.04	-0.05	216	-0.05	-0.14	215	0.95	0.77	0.72	0.15
200	201	+0.09	0.00	226	0.00	-0.09	225	1.00	0.82	0.72	0.15
210	211	+0.14	+0.05	236	+0.05	-0.04	235	1.05	0.87	0.72	0.15
220	221	+0.19	+0.10	246	+0.10	+0.01	245	1.10	0.92	0.72	0.15
230	231	+0.24	+0.15	256	+0.15	+0.06	255	1.15	0.97	0.72	0.15
240	241	+0.29	+0.20	266	+0.20	+0.11	265	1.20	1.02	0.72	0.15
250	251	+0.34	+0.25	281	+0.25	+0.16	280	1.25	1.07	0.72	0.15
260	261	+0.39	+0.30	291	+0.30	+0.21	290	1.30	1.12	0.72	0.15
270	271	+0.45	+0.35	301	+0.35	+0.25	300	1.35	1.15	0.80	0.17
280	281	+0.50	+0.40	311	+0.40	+0.30	310	1.40	1.20	0.80	0.17
290	291	+0.55	+0.45	321	+0.45	+0.35	320	1.45	1.25	0.80	0.17
300	301	+0.60	+0.50	331	+0.50	+0.40	330	1.50	1.30	0.80	0.17
350	351	+0.85	+0.75	381	+0.75	+0.65	380	1.75	1.55	0.80	0.17
400	402	+0.12	0.00	442	0.00	-0.12	440	2.00	1.76	0.93	0.19
450	452	+0.37	-0.25	492	+0.25	+0.13	490	2.25	2.01	0.93	0.19
500	502	+0.62	-0.50	552	+0.50	+0.38	550	2.50	2.26	0.93	0.19
550	552	+0.89	-0.75	602	+0.75	+0.61	600	2.75	2.47	1.05	0.21
600	603	+0.14	0.00	653	0.00	-0.14	650	3.00	2.72	1.05	0.21
650	653	+0.39	+0.25	703	+0.25	+0.11	700	3.25	2.97	1.05	0.21
700	703	+0.64	+0.50	753	+0.50	+0.30	750	3.50	3.22	1.05	0.21

说明: (1)尺寸单位: mm; (2)本表适用于胶木套比压 $\leq 400 \times 10^6 \text{ Pa}$ ; (3)本表的轴按 $d_{11}$ 计算。如轴套经常处于水中,轴可选用 $b_{11}$ 或其他; (4)本表系按内外圆加工完后,再压入轮毂的公差。对于车外圆压入后车内圆的公差一般按 $\frac{H_1}{d_{11}}$ 加工,轴套经常处于水中,工作时按 $\frac{H_1}{b_{11}}$ 加工。

$\delta$  ——轴套外径的公盈值, cm;

$d$  ——轴套外径, 亦即轮毂内径, cm;

$l$  ——轴套的长度, cm;

$E_1$  ——压合胶木的弹性模量,

$$E_1 = (25000 \sim 35000) \times 10^4 \text{ Pa}; \quad (6-35)$$

$E_2$  ——轮毂材料的弹性模量, Pa。

#### (六) 调整轮子安装高度的措施

##### 1. 浮动支承板

在闸门的边梁腹板上, 开一孔径, 其直径大于轴径10~15mm, 轴的支承板作为单件另行加工, 以达到配合的公差要求, 当闸门组装时, 将轮子调整就位后, 再将轴的支承板就位, 并焊于门叶边梁腹板上。

##### 2. 偏心轴

图6-13为一偏心轴, 轮子的轴心与支承板上的轴孔中心有少许偏差(一般用10~20mm), 偏心轴的偏心距  $l = \frac{1}{2}(d_2 \sim d_0)$ 。安装时, 利用偏心轴的转动, 调整轮子的高度, 调整完毕, 用螺栓将轴固定在支承板上。

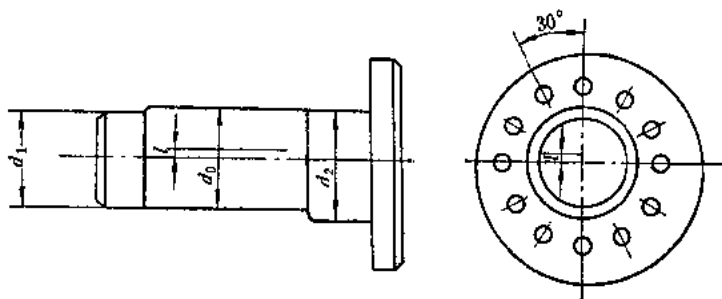


图 6-13 偏心轴

#### (七) 结构图例及尺寸

##### 1. 悬臂滚轮

悬臂滚轮的结构尺寸可参照图6-14及表6-7选用。

##### 2. 筒支轮

筒支轮的结构尺寸可参照图6-15及表6-8选用。

#### (八) 反向支承

平面闸门启闭时, 为了防止闸门在闸槽中前后碰撞并减小门下过水时的振动, 需设置反向支承。它承受与主轮载荷方向相反的作用力, 这些作用力有由偏心(吊点与闸门重心之间的偏心)拉力作用下闸门发生前后倾斜时的反力以及闸门启闭时振动的撞击力。反向支承设置在主轮的背面, 每扇闸门一般采用4个。它有反轮和滑块两种型式(见图6-16)。对于跨度较小、重要性较低或静水中启闭的闸门, 往往采用图6-16(d)的型式: 仅在门叶上安设滑块; 对于跨度较大的露顶闸门, 往往采用图6-16(a)的固定轴反轮。这两种反向支承滑块或反轮与反轨间隙应保持10~20mm。对于跨度较大、水头较高、动水启闭

表 6-7

悬臂轮的主要数据

工作荷载 ( $\times 10^4 \text{ N}$ )	尺 寸 (mm)															总 重 (kg)
	$D$	$b$	$l_1$	$l_2$	$B$	$l$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$c$	$K$	$m$	$t$	$h$	
10	350	300	100	20	60	90	80	110	60	M35 $\times$ 4	16	18	30	80	220	42
20	400	325	125	25	80	130	110	140	90	M48 $\times$ 5	16	24	30	120	280	74
30	500	350	140	20	90	140	130	160	100	M48 $\times$ 5	16	14	30	140	320	128
30	500	350	150	29	90	140	130	160	100	M48 $\times$ 5	16	28	30	140	320	129
40	600	400	150	30	120	160	150	190	120	M56 $\times$ 5.5	18	16	30	160	380	213
40	600	400	170	30	120	160	150	190	120	M56 $\times$ 5.5	18	34	30	160	380	214
50	700	450	175	29	120	190	170	210	120	M64 $\times$ 6	20	20	30	200	420	309
55	800	500	175	31	140	190	180	220	120	M64 $\times$ 6	23	20	30	200	440	419
60	900	500	200	35	150	200	190	220	130	M80 $\times$ 6	23	20	30	200	440	523
75	1000	600	210	32	160	230	210	250	150	M110 $\times$ 6	25	22	30	260	500	734
95	1100	600	240	34	160	240	230	280	200	M140 $\times$ 6	30	26	30	320	560	942
115	1200	700	260	38	170	270	250	300	240	M140 $\times$ 6	30	30	36	360	600	1317
135	1300	750	280	43	170	290	270	320	270	M140 $\times$ 6	30	32	36	360	640	1484

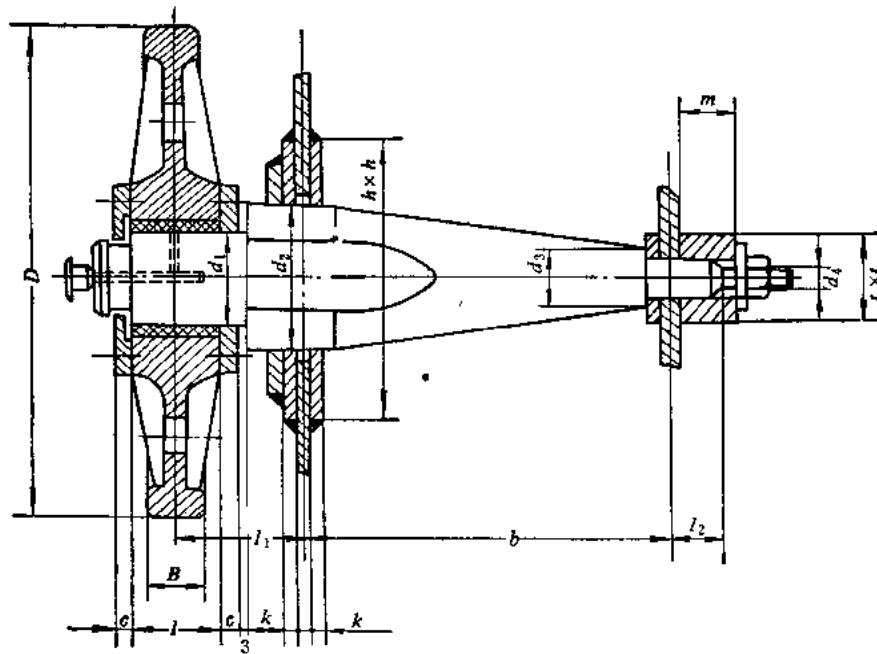


图 6-14 悬臂滚轮结构尺寸

的闸门、门顶需要溢水的闸门以及电站的尾水闸门，则它们的反轮装置皆应有预压力以保证门叶挤靠在反轨上，以免除闸门在启闭时发生撞击和振动，此时可采取图6-16(b)或

表 6-8

筒支轮 (线接触) 的主要数据

项 目  序 号	主 要 尺 寸 (mm)						每个轮子额定容量(t)				每 套 重 量 (kg)
	D	d	l	b	L	a	ZG45-55	ZG35Cr MnSi	ZG50 Mn	ZG35 CrMo	
							轴45	轴40Cr			
1	600	110	220	120	275	27.5	46	75	104	104	287
2	600	120	240	140	295	27.5	60	87	130	130	353
3	700	140	240	140	300	30.0	87	100	168	168	461
4	700	140	280	160	343	31.5	78	115	170	170	478
5	700	160	280	180	345	32.5	108	130	220	225	673
6	700	160	320	200	390	35	100	145	214	214	660
7	800	160	280	160	345	32.5	110	135	205	205	742
8	800	160	300	180	390	35	106	150	230	230	723
9	800	180	320	200	393	36.5	136	166	255	255	821
10	900	180	260	155	343	41.5	120	135	233	233	525
11	900	180	320	180	393	36.5	138	165	280	288	893
12	900	200	340	210	413	36.5	168	205	340	335	1121
13	1000	200	340	200	413	36.5	172	207	340	340	1231
14	1000	240	360	240	500	70.0	213	260	430	433	1187
15	1100	240	360	220	500	70.0	215	260	430	433	1259
16	1200	250	460	250	600	70.0	234	310	520	515	

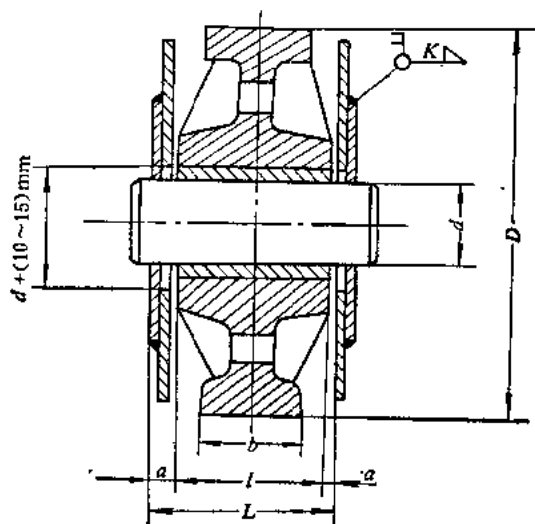


图 6-15 筒支轮结构尺寸

(c) 的型式, (b) 图是通过弹簧产生预压力, (c) 图是通过一偏铰和橡皮产生预压力。

图6-16 (c) 形式的预压力为:

$$P_1 = \frac{P_2(a+b)}{a} \quad (6-36)$$

式中  $P_1$ ——为缓冲橡皮的预压力, N;

$P_2$ ——作用在每一个反轮上的预压力, N;

高水头闸门, 每扇门的总预压力可取  $(20 \sim 40) \times 10^4 \text{ N}$ ;

中水头闸门, 每扇门的总预压力可取  $(6 \sim 12) \times 10^4 \text{ N}$ ;

尾水闸门则可按止水上预压力需  $50 \text{ N/cm}$  的线压强来计算。

缓冲橡皮的预压力  $P_1$  可按式计算:

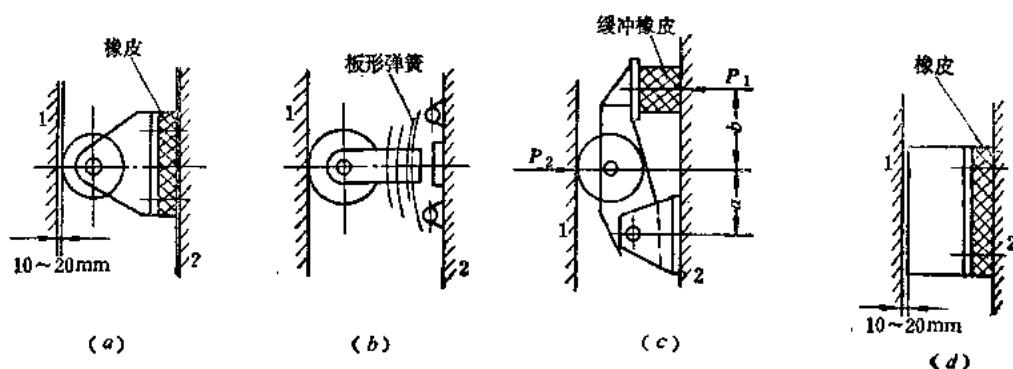


图 6-16 反向支承装置

1—门槽反轨；2—闸门门体

$$P_1 = \frac{\Delta L}{L} EF \quad (6-37)$$

式中  $\Delta L$ ——橡皮的压缩量, mm;

$L$ ——橡皮在自由状态的高度, mm;

$F$ ——橡皮的横切面面积,  $\text{cm}^2$ ;

$E$ ——橡皮的弹性模量, 可取  $(20 \sim 80) \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

反向支承除了预压力外, 在启闭过程中, 尚有下列三种工作荷载:

(1) 在静水中启闭的闸门 (如图6-17a所示), 每个反向支承所承受的荷载是由起吊中心与闸门重心的偏心距  $e_1$  所引起的, 可按式 (6-38) 计算:

$$R_{D1} = \frac{Ge_1}{2a} \quad (\text{N}) \quad (6-38)$$

式中  $G$ ——门重, kg;

$e_1, a$ ——如图6-17(a)所示, cm。

(2) 动水中启闭的闸门 (如图6-17b所示), 每个反向支承所承受的荷载是起吊中心与闸门重心和主支承摩擦阻力的偏心距  $e_1$  和  $e_2$  所引起的, 可按式 (6-39) 计算:

$$R_{D2} = \frac{Ge_1 + (T_1 + T_2)e_2}{2a} \quad (\text{N}) \quad (6-39)$$

式中  $T$ ——摩擦阻力, N;

$e_1, e_2, a$ ——如图6-17(b)所示, cm。

(3) 当闸门开到一定程度, 水压力合力  $P$  已降到下支承点以下时 (如图6-17c、d所示) 按式 (6-40) 计算:

$$R_{D3} = \frac{PS - Ge_1 - (T_1 + T_2)e_2}{2a'} \quad (\text{N}) \quad (6-40)$$

式中  $P$ ——水压力的合力, N;

其它符号如图 (6-17c、d) 所示。

反轮装置的尺寸通常按构造确定, 图6-18所示反轮装置其主要尺寸列于表6-9, 可供



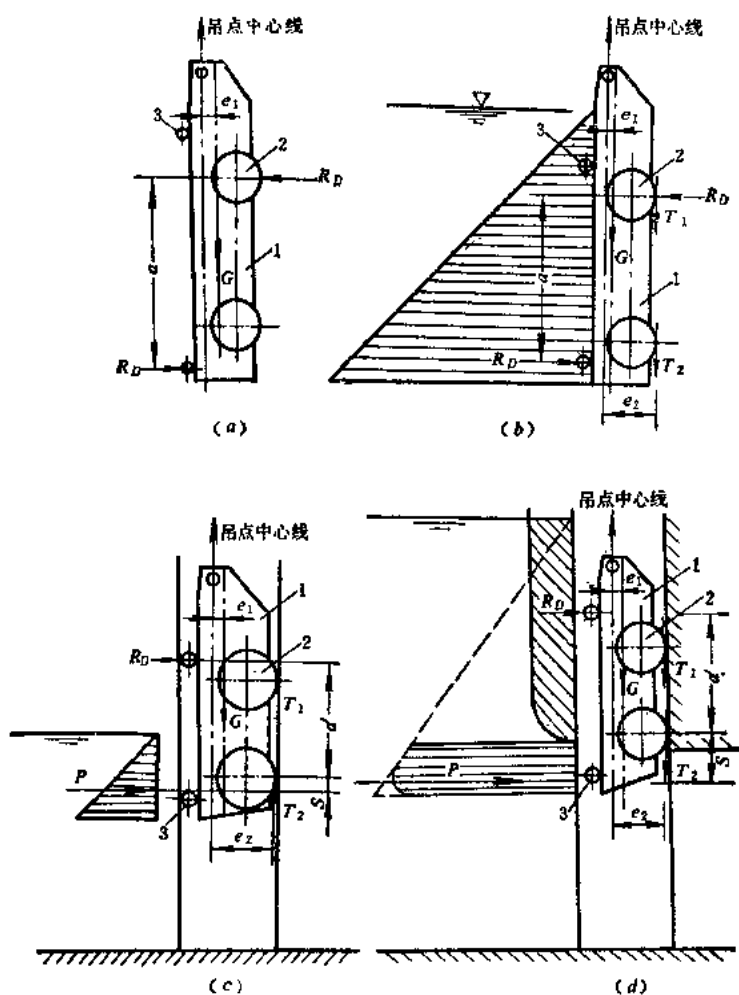


图 6-17 反向滚轮受力情况

1—门叶；2—主轮；3—反轮

设计时参考。

#### (九) 侧向支承

弧形闸门和平面闸门启闭时，为了防止闸门在门槽中因左右倾斜而被卡住，需设置侧向支承。侧向支承的布置形式见图6-19所示。图中为平面闸门的情况，对于弧形闸门也是一样的。侧轮应设在闸门的两侧，每侧上下两个，侧轮的间距应尽量大些。

在潜孔闸门中，由于孔口上部胸墙的影响，侧轮应设在闸门两侧的闸槽内（图6-19a）；在露顶闸门中侧轮可以设在孔口之间闸门边部的构件上（图6-19b、c）。侧向支承与其埋设轨道的间隙为10~20mm。在小型闸门上，大都采用（c）型，比较简易，在门叶上安装一段角钢就行了。较大的闸门则以采用（a）、（b）型为宜。

侧轮装置的尺寸通常也按构造确定，图6-20为槽内式侧轮装置，其主要尺寸列于表6-10；图6-21为槽外式侧轮装置，其主要尺寸列于表6-11，供设计时参考。

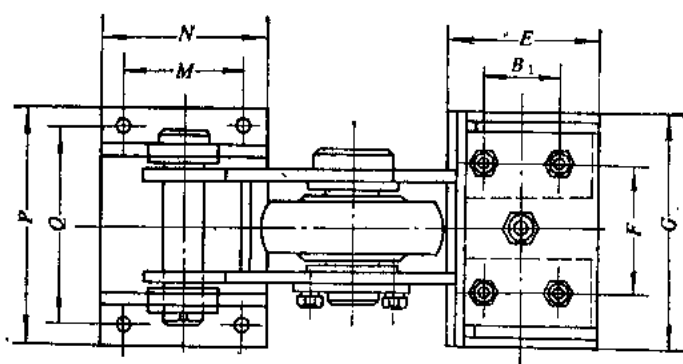
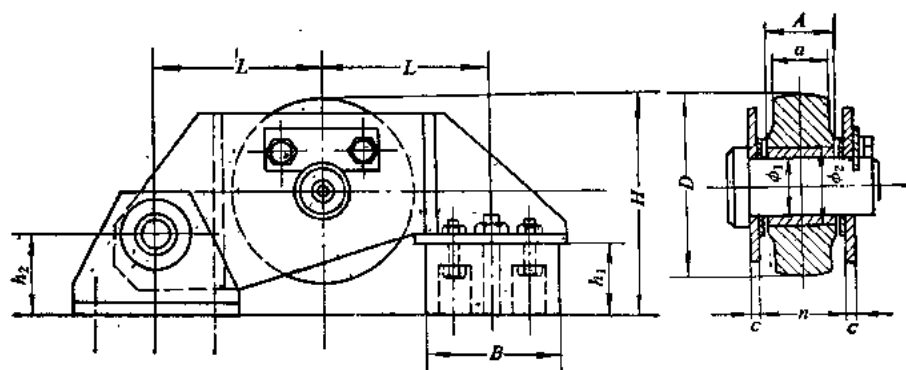


图 6-18 反轮装置

表 6-9

反 轮 装 置 主 要 数 据

序 号	最大负荷 ( $\times 10^4 \text{ N}$ )	主 要 尺 寸 (mm)									
		D	$\phi_1$	$\phi_2$	A	a	n	c	H	$h_1$	$h_2$
1	0.793	150	40	50	45	30	55	12	180	70	75
2	1.382	200	45	55	50	35	60	12	230	70	80
3	2.239	250	50	60	60	50	70	16	285	100	90
4	3.173	300	55	65	65	55	75	18	330	100	100

序 号	最大负荷 ( $\times 10^4 \text{ N}$ )	主 要 尺 寸 (mm)										重 量 (kg)
		L	B	$B_1$	E	F	G	M	N	P	Q	
1	0.793	150	130	60	150	110	220	100	140	200	160	
2	1.382	185	160	75	180	120	240	120	180	230	180	
3	2.239	220	180	90	220	140	280	140	200	260	210	
4	3.173	260	180	100	220	140	260	140	200	260	210	

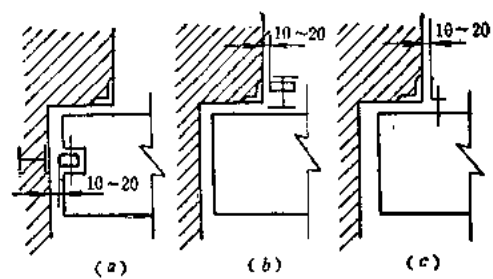


图 6-19 侧向支承布置 (单位: mm)

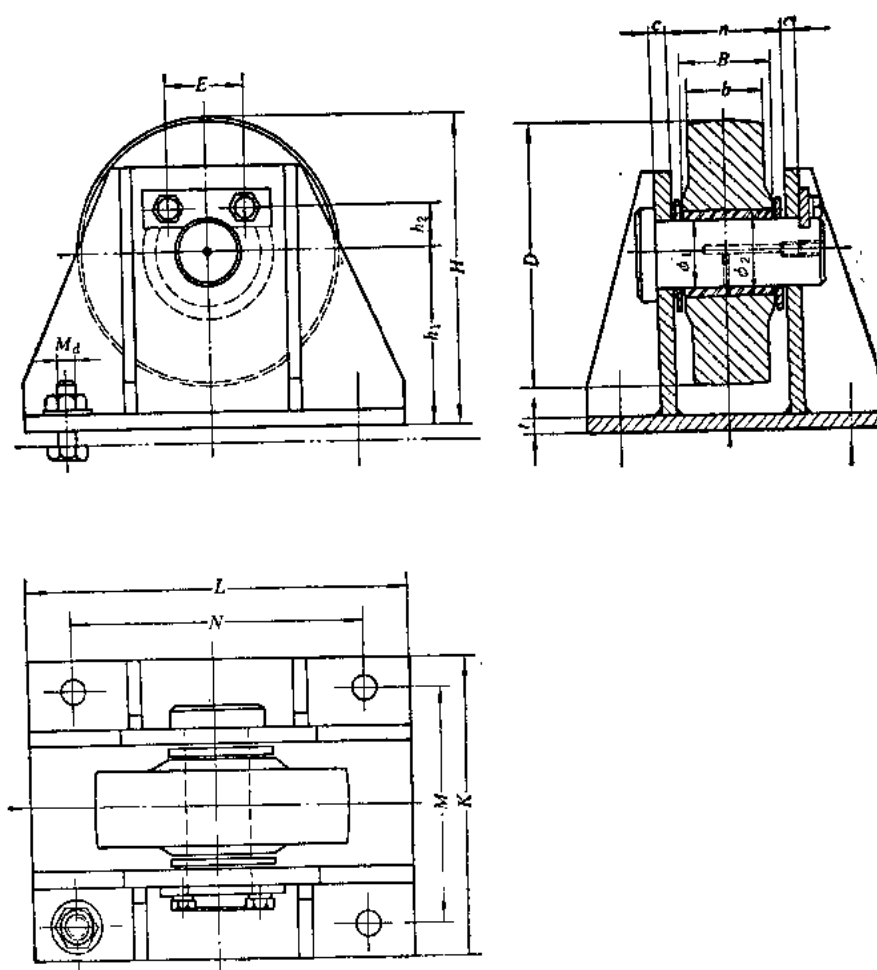


图 6-20 槽内式侧轮

表 6-10

槽内式侧轮的主要尺寸

主 要 尺 寸 (mm)																	重量	最大荷载
D	H	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	E	M <sub>d</sub>	B	b	φ <sub>1</sub>	φ <sub>2</sub>	t	n	c	L	N	M	K	(kg)	(×10 <sup>4</sup> N)
150	175	100	30	60	M20	45	30	40	50	12	55	12	220	170	150	190		0.793
200	225	125	31.5	60	M20	50	40	45	55	14	60	14	240	170	150	200		1.382
250	280	155	33	60	M24	60	50	50	60	16	70	16	320	240	190	260		2.239
300	330	180	34.5	60	M24	65	55	55	65	18	75	18	350	270	220	300		3.173
350	385	210	45	90	M24	75	60	70	85	20	85	20	400	300	240	300		4.269
400	435	235	46.5	90	M24	85	65	75	90	20	95	20	460	330	250	350		5.528

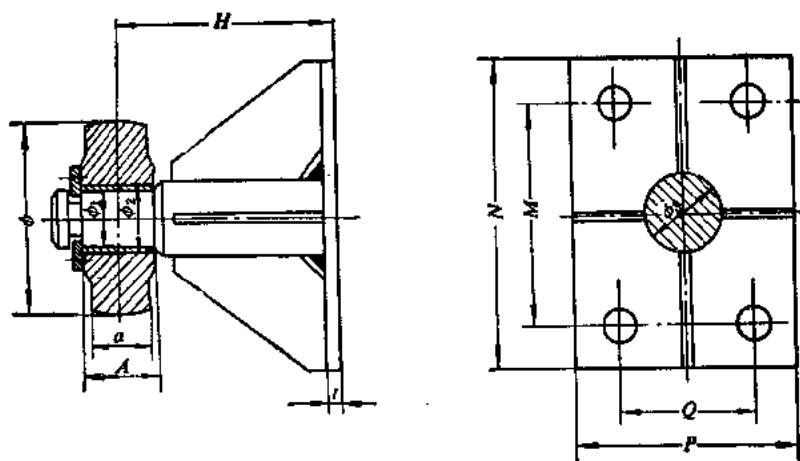


图 6-21 槽外式侧轮

表 6-11

槽外式侧轮的主要尺寸

序 号	最 大 负 荷 (×10 <sup>4</sup> N)	主 要 尺 寸 (mm)												重 量 (kg)
		φ	φ <sub>1</sub>	φ <sub>2</sub>	φ <sub>3</sub>	A	a	H	N	M	P	Q	t	
1	0.793	150	45	55	65	60	50	130	250	170	180	110	12	
2	1.382	200	60	70	80	60	50	130	250	180	180	110	12	
3	1.382	200	60	70	90	60	50	150	300	200	190	110	14	
4	1.382	200	60	70	90	60	50	180	300	200	190	110	16	
5	1.382	200	60	70	90	60	50	200	300	200	190	110	20	
6	2.239	250	70	85	95	90	70	180	310	220	240	160	16	
7	2.239	250	70	85	95	90	70	200	310	220	240	160	20	
8	2.239	250	70	85	95	90	70	220	310	220	240	160	20	
9	3.173	300	80	95	110	90	80	200	420	320	300	200	20	
10	3.173	300	80	95	110	90	80	220	420	330	300	210	20	
11	3.173	300	80	95	110	90	80	220	420	330	300	210	20	
12	4.269	350	90	105	120	110	90	250	450	330	320	220	30	
13	5.528	400	110	125	130	120	100	300	500	400	370	270	30	

## 第二节 弧形闸门的支铰装置

### 一、概述

弧形闸门的支铰装置,承受主框架支臂传来的水压力 and 闸门活动部分的重量,并传递给基础部分(闸墩),同时支铰装置还要保证闸门活动部分可靠的转动。

#### (一) 支铰的种类

支铰的型式有下列四种:

- (1) 圆柱铰(图6-22a);
- (2) 双圆柱铰(图6-22c及图6-32);
- (3) 圆锥铰(图6-22b);
- (4) 球形铰(图6-22c)。

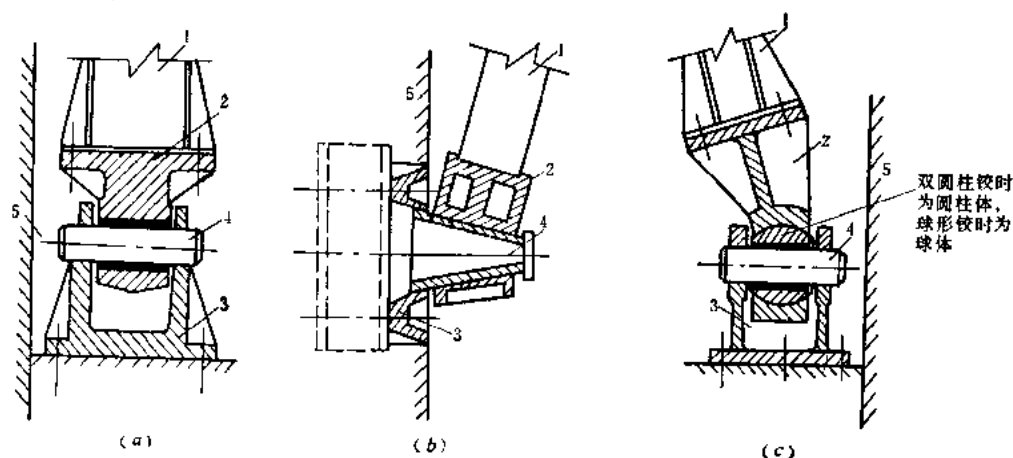


图 6-22 弧形闸门的支铰结构

(a)圆柱铰; (b)圆锥铰; (c)球铰、双圆柱铰  
1—支臂; 2—铰链; 3—铰座; 4—轴; 5—闸墩

圆柱铰构造简单,制造及安装方便,同时比较理想地符合主框架计算时之铰接的假设,应用比较广泛,但当闸门支臂为倾斜时,横向荷重过大,对这种铰的受力不好。

双圆柱形铰铰轴使铰链不仅能绕水平轴转动(闸门启闭时圆柱形衬垫随铰链一起转动),而且还能绕圆柱形衬垫在门架平面内稍微转动。这样就符合门架支承处为铰接的假定。因为这种铰轴构造复杂,仅适用于跨度较大的闸门。

圆锥铰适用于大跨度斜支臂的弧形闸门,支臂垂直于锥形轴的表面,受力情况好,但铸件形状复杂,制作安装难度都较大,自重也大。

球形铰铰轴仍为圆柱形,轴套为球面,这样就符合框架支承处为铰接的假定。这种形式能适应在主横梁受水压力作用变形时,支臂支承处轴套承压应力不至过于集中。由于制造复杂,在中小型工程中未能得到广泛的使用。

支铰由两部分组成:活动部分亦称铰链,与闸门支臂连接,并随闸门一起绕铰轴转

动；固定部分包括铰座与铰轴，用螺栓与闸墩或闸墩上的牛腿连接。

## (二) 铰链的种类

铰链通常也有两种类型：

(1) 顶压式铰链：将铰链的顶板与弧形闸门支臂的端板直接顶压并用粗制螺栓相连（图6-22a、c），其制造和安装比较简单，适用于承受单向水头的闸门；

(2) 套剪式铰链：将铰链顶部铸成同支臂末端适合的轮廓形状，将支臂末端套进铰链顶部的腹板上，并用精制螺栓将支臂的腹板连在铰链的腹板上（图6-23）。这种型式连接牢靠，适用于承受单向水头或双向水头的闸门。

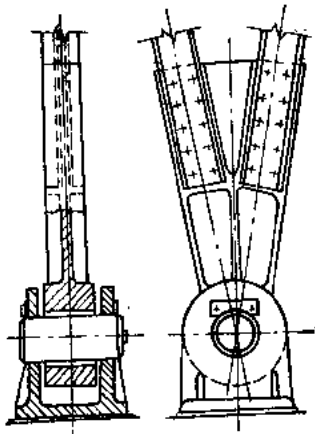


图 6-23 套剪式铰链

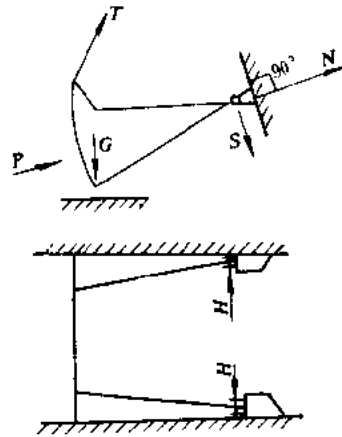


图 6-24 支铰的受力情况

## (三) 支铰的受力分析

作用在支铰上的力，是由水压力、闸门自重及启门力对支铰作用的总和，计算时取最大值，这个总作用力可以分为三个分力（图6-24）：

$N$ ——通过铰中心垂直于铰轴线及支承混凝土表面；

$S$ ——平行于支承混凝土表面；

$H$ ——沿铰轴方向（即侧推力）。

上述各分力如用计算法，侧推力 $H$ 为两主框架侧推力之代数和， $N$ 和 $S$ 是两主框架支承反力 $V$ 之合力在垂直于和平行于支承平面上的分力，但与主框架计算中的支承反力方向相反。

图6-25为求 $N$ 和 $S$ 的图解法。图中  $P$ 为总水压力之半； $T$ 为启门力之半； $G$ 为闸门自重之半； $R$ 为 $T$ 与 $G$ 之合力； $F$ 为 $P$ 与 $R$ 之合力。

## 二、圆柱铰的计算

### (一) 铰链支承板的验算

主要验算（图6-26中）截面 $A-A$ 的弯曲应力：

$$\text{截面 } A-A \text{ 的弯矩} \quad M_A = 0.5Na \quad (6-41)$$

$$\text{截面 } A-A \text{ 的抵抗矩} \quad W_A = \frac{b\delta^2}{6} \quad (6-42)$$

$$\sigma = \frac{M_A}{W_A} \leq [\sigma] \quad (6-43)$$

式中  $b$  ——支承板的宽度。

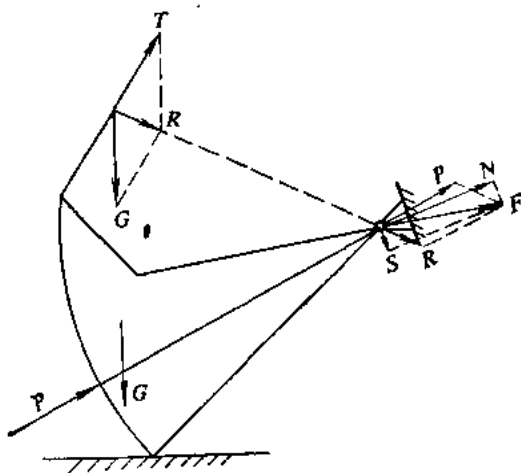


图 6-25 支铰的作用力分析

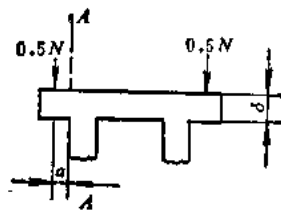


图 6-26 铰链支承板计算图

## (二) 铰座下混凝土压应力的校核 (图6-27)

### 1. 由 $N$ 力所产生的压应力

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \quad (6-44)$$

式中  $A$  ——铰座底板的面积。

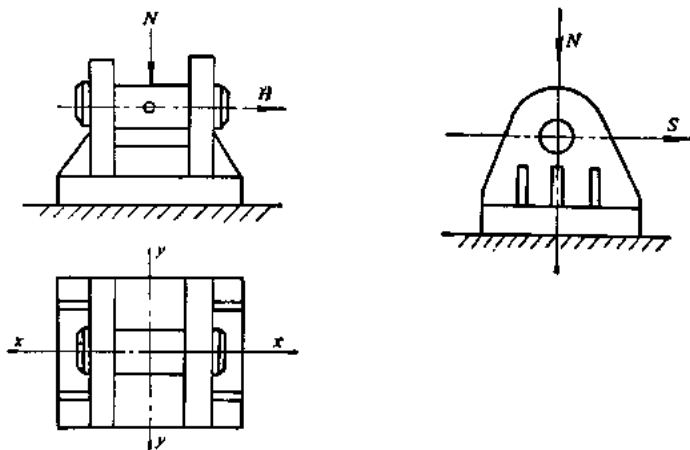


图 6-27 铰座下混凝土所受的压应力

### 2. 由 $S$ 力产生的弯曲应力

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W_x} \quad (6-45)$$

式中  $M_s$  ——由  $S$  力所产生的力矩；

$W_x$  ——座板对  $x$  轴的抵抗矩。

### 3. 由 $H$ 力产生的弯曲应力

$$\sigma_H = \frac{M_H}{W_y} \quad (6-46)$$

式中  $M_H$ ——由  $H$  力所产生的力矩;

$W_y$ ——座板对  $y$  轴的抵抗矩。

混凝土表面受的总压应力:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_s + \sigma_H \leq [\sigma_k] \quad (6-47)$$

式中  $[\sigma_k]$ ——混凝土的承压容许应力, 见表 3-43。

根据式 (6-47) 便可确定底板的面积。

(三) 铰座底板中的弯曲应力校核 (图 6-28)

支承点处的弯矩:

$$M_s = \frac{\sigma_N C'}{2} \quad (6-48)$$

跨中弯矩:

$$M = \frac{\sigma_N l^2}{8} - M_s \quad (6-49)$$

用  $M_s$  或  $M$  (其中较大者), 验算弯曲应力:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma] \quad (6-50)$$

$$W = \frac{\delta^2}{6}$$

(四) 铰轴的计算

铰轴的直径  $d$ , 一般采用 200~300mm, 其计算方法基本上与平面钢闸门滚轮轮轴的计算方法相同。

由于圆柱铰结构比较简单, 制造安装均较方便, 因此是目前用得最多的一种支铰装置。表 6-12 列出了几种承载能力的圆柱形支铰基本尺寸 (参阅图 6-29), 供设计人员选择参考。

表 6-12 圆柱形支铰基本尺寸表

承载能力 ( $\times 10^4 \text{ N}$ )	$H$ (mm)	$h$ (mm)	$h_1$ (mm)	$D$ (mm)	$a$ (mm)	$a''$ (mm)	$b$ (mm)	$b''$ (mm)
60	300	400	300	140	500	450	580	600
80	340	460	340	160	500	500	580	650
100	380	510	380	180	600	550	650	680
120	400	550	400	200	640	590	680	720
140	420	580	420	220	660	620	730	780
160	440	600	440	230	680	640		820
200	500	640	500	250	700	680	890	900
240	540	660	540	270	740	700	900	1000

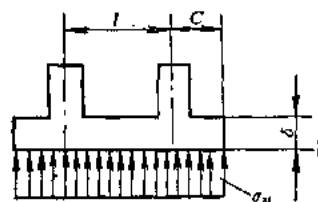


图 6-28 铰座底板中的弯曲应力



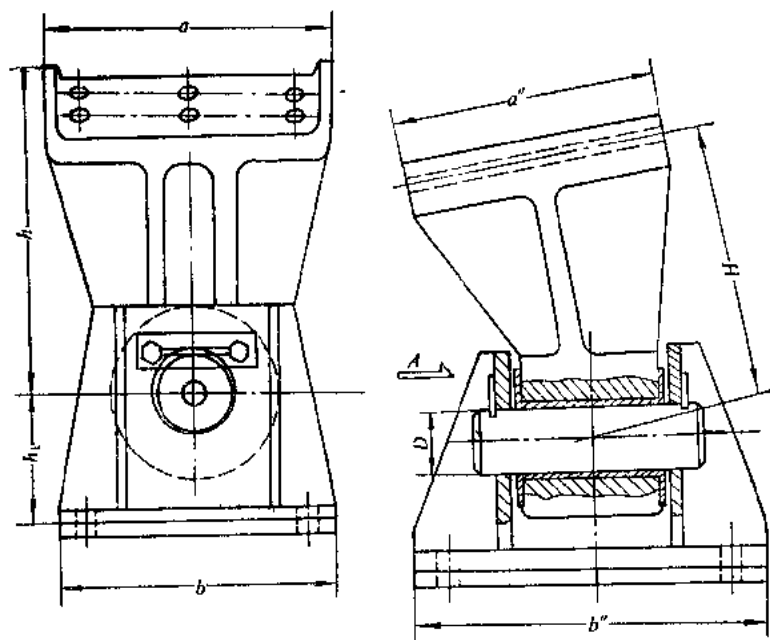


图 6-29 圆柱形支铰简图

### 三、圆锥铰的计算 (图6-30)

(一) 轴套的承压应力

$$\sigma_{cs} = \frac{N}{d_p l} \leq [\sigma_{cs}] \quad (6-51)$$

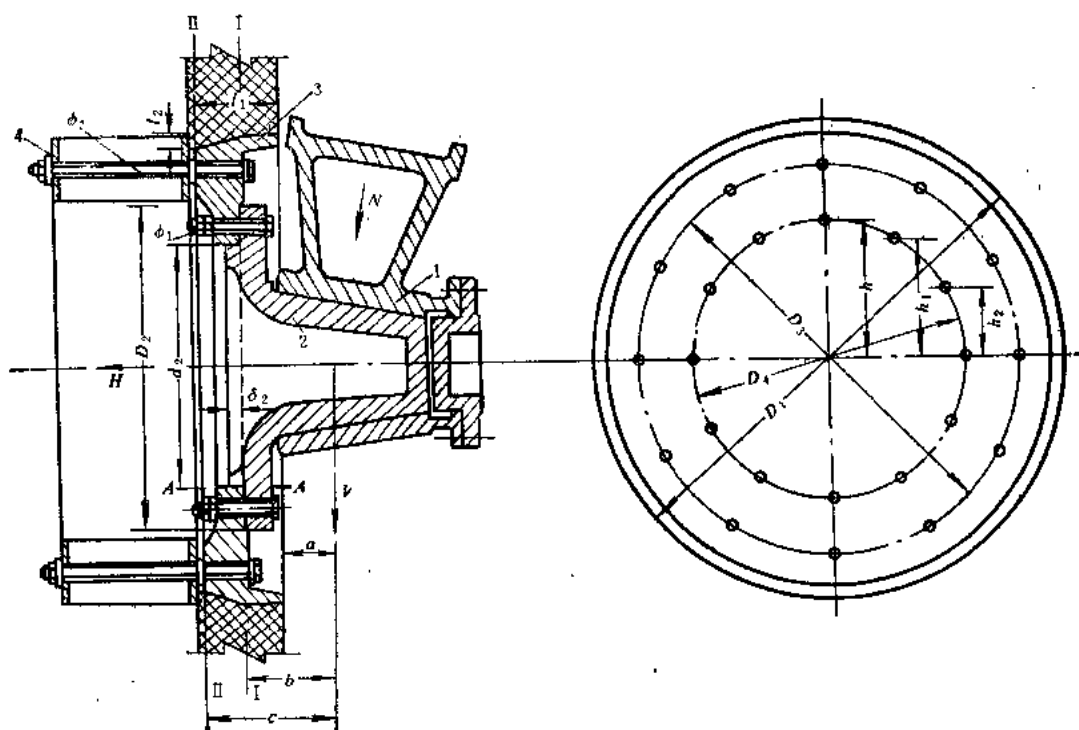


图 6-30 圆锥铰的计算图

1—轴套; 2—轴; 3—支承环; 4—基础环

式中  $d_s$ ——轴套的平均内径;

$l$ ——轴套长度;

$N$ ——垂直于铰轴的支承反力;

$[\sigma_s]$ ——轴套的承压容许应力按表3-41采用;

(二) 轴的弯曲应力

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma] \quad (6-52)$$

$$M = Va \quad (6-53)$$

$$W = \frac{0.1(D^4 - d^4)}{D} \quad (6-54)$$

式中  $D$ 、 $d$ ——最大弯矩处轴断面的外径与内径;

$V$ 、 $a$ 的意义见图6-30.

(三) 轴的剪切应力

$$\tau = \frac{VS}{2I\delta} \leq [\tau] \quad (6-55)$$

式中  $S$ ——半个空心轴的面积矩;

$$S = \frac{D^3 - d^3}{12}$$

$I$ ——空心轴的惯性矩

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$$

$\delta$ ——空心轴的壁厚;

$D$ ——空心轴外径;

$d$ ——空心轴内径, 如图6-31所示.

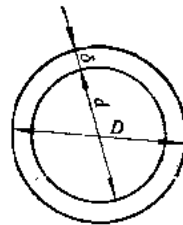


图 6-31 空心轴断面图

(四) 轴与支承环在 I-I 断面处的压应力

$$\sigma = \frac{nF[\sigma_1]}{\frac{\pi(D_1^2 - d_1^2)}{4} - nF_1} \leq [\sigma] \quad (6-56)$$

式中  $n$ ——轴与支承环连接螺栓个数;

$F$ ——连接螺栓的断面积;

$[\sigma_1]$ ——连接螺栓的容许拉应力;

$F_1$ ——螺栓孔的断面积;

$D_1$ ——轴的最大外径;

$d_1$ ——支承环的内径.

(五) 轴与支承环在图6-30断面 A—A 的局部紧接承压应力

$$\sigma_{H1} = \frac{V}{d_2\delta_2} \leq [\sigma_{H1}] \quad (6-57)$$

式中  $\delta_2$ ——接触宽度.

#### (六) 轴与支承环连接螺栓的验算

$$\sigma = \frac{M_1}{W_1} \leq [\sigma] \quad (6-58)$$

式中  $M_1$ ——由力  $V$  在断面  $I-I$  处所产生的力矩;

$$M_1 = Vb$$

$b$  值如图6-30所示;

$W_1$ —— $n$ 个 $\phi_1$ 螺栓断面的抵抗矩;

$$W_1 = \frac{I_1}{h}$$

$I_1$ —— $n$ 个 $\phi_1$ 螺栓断面对中轴的转动惯量;

$$I_1 = 2[A(h^2 + 2h_1^2 + 2h_2^2)]$$

$h, h_1, h_2$ 见图6-30。

#### (七) 支承环与基础环连接螺栓的验算

$$\sigma = \frac{M_2}{W_2} \leq [\sigma] \quad (6-59)$$

式中  $M_2 = Vc$ ,  $c$ 值如图6-30所示;

$W_2$ —— $n$ 个 $\phi_2$ 螺栓断面的抵抗矩, 其计算同前。

#### (八) 与支承环相接触的混凝土承压强度的验算

1. 由力  $V$  产生的压应力

$$\sigma = \frac{V}{D_1 l_1} \leq [\sigma_k] \quad (6-60)$$

式中  $D_1$ ——支承环的外径;

$l_1$ ——支承环的宽度。

2. 由力  $H$  产生的压应力

$$\sigma = \frac{H}{\pi D_1 l_2} \leq [\sigma_k] \quad (6-61)$$

式中  $H, l_2$ ——见图6-30;

$[\sigma_k]$ ——混凝土承压容许应力, 见表3-43。

#### 四、球形铰的计算

球形铰除球与球座间的压应力外, 其他部分的计算, 可参照圆柱铰进行。

球与球座间的压应力按下式进行计算:

$$\sigma = m \frac{P}{R} \leq [\sigma] \quad (6-62)$$

式中  $R$ ——球座表面半径, cm;

$P$ ——球铰所承受的荷载, N;

$[\sigma]$ ——容许抗压应力, 按表3-39采用;

$m$ ——与 $\phi$ 角有关的系数, 角 $\phi$ 为球与球座沿轴向包角的一半见图6-32,  $m$ 按下式计算或按表6-13采用,

$$m = \frac{3}{2\pi(1 - \cos^3 \phi)} \quad (6-63)$$

### 五、双圆柱铰的计算

双圆柱铰的铰链与双圆柱间的压应力可按式计算:

$$\sigma = m_1 \frac{P}{Rl} \leq [\sigma] \quad (6-64)$$

式中  $P$ ——双圆柱铰所受荷载, N;

$R$ ——双圆柱表面的半径, cm;

$l$ ——双圆柱的长度, cm;

$[\sigma]$ ——容许抗压应力, 按表3-39采用;

$m_1$ ——与 $\phi$ 角有关的系数,  $\phi$ 角为铰链与双圆柱包角的一半(图6-32),  $m_1$ 可按式计算或按表6-14采用:

$$m_1 = \frac{1}{\sin \phi \cos \phi + \frac{\pi \phi}{180}} \quad (6-65)$$

双圆柱铰其他部分的计算可参照圆柱铰进行。

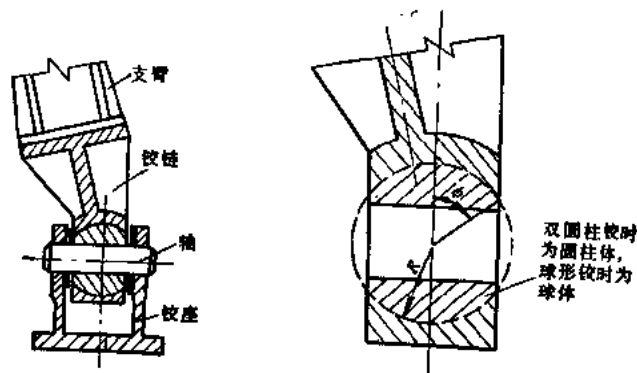


图 6-32 球形铰和双圆柱铰的构造型式

表 6-14

$\phi$	90°	75°	60°	45°	30°	15°
$m_1$	0.637	0.641	0.676	0.778	1.05	1.95

## 第三节 充 水 设 备

### 一、概述

充水设备的型式很多, 设置的位置也不同, 有的设置在闸门门叶上, 有的设置在闸墙上, 有的分段闸门利用节间充水, 有的利用闸门局部开启来充水。现分述如下:

### (一) 旁通阀充水平压方式 (见图6-33)

旁通阀充水方式是在闸孔外侧的混凝土闸墩内埋设管路连通门孔上下游两侧, 在管路适当部位设置闸阀控制水流。闸阀可设置在廊道内或专设的阀室内。

旁通阀充水平压不与门叶发生关系, 简化了门叶结构。旁通阀直径的大小可根据充水量、充水时间及下游漏水量来选择, 不受闸门结构的限制。但本方式使水工布置复杂, 操作维修不便, 运行单位不欢迎, 应尽量避免采用。

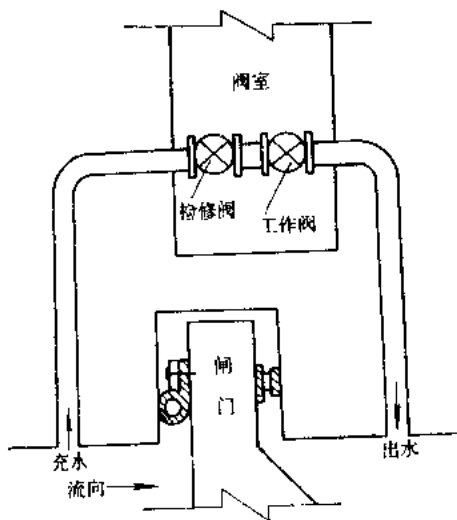


图 6-33 旁通阀充水平压方式

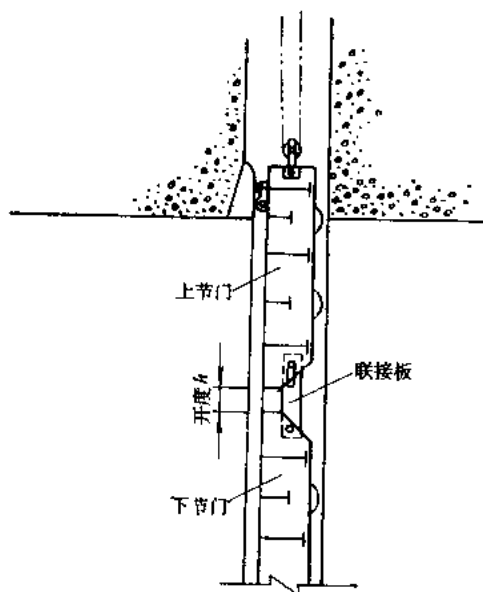


图 6-34 闸门节间充水平压方式

### (二) 闸门节间充水平压方式 (图6-34)

节间充水平压方式是将分节的闸门, 其中两节之间设有长形孔联接板, 将门叶做成活动联结。启门时两节之间可拉开特定的间隙, 由此窄长的间隙断面进行充水平压。

节间充水平压方式的最大优点在于充水断面大, 充水量大, 能够适应充水容积大、下游漏水量大的要求。使闸门操作水头差大大减少, 从而可降低启闭机的启门容量, 节省投资。但使门型结构稍复杂。有条件时, 应考虑采用。

### (三) 小开度提门充水平压 (图6-35)

小开度提门充水平压一般适用于孔口较小, 闸门上设充水装置较困难或采用滚动轴承的主轮支承或动水启门的水头较小, 增加启闭机容量不大的情况下选用。也有由于充水量较大, 采用其它充水方式尚存在着无法解决的矛盾情况下, 选用小开度提门充水平压。一般不宜采用。

### (四) 大门开小门的平压方式 (图6-36)

大门开小门的充水平压方式是将充水口设在闸门面板上, 以适应闸门为上游止水的要求, 并在闸门的梁格内设置小门及其门槽。小门的设置位置可根据布置的需要设在上节闸门的上、中主梁之间或下、中主梁之间。因而其尺寸受主梁高度的限制, 并对主梁的距离有相应的要求。由于小门门槽设在大门梁格之内, 使大门的门叶结构比较复杂, 给设计、

制造增加一些麻烦。本充水平压方式一般用于静水启闭的闸门较为适宜。如闸门需动水关闭，则不能利用水柱，需要专设加重块或机械压力。

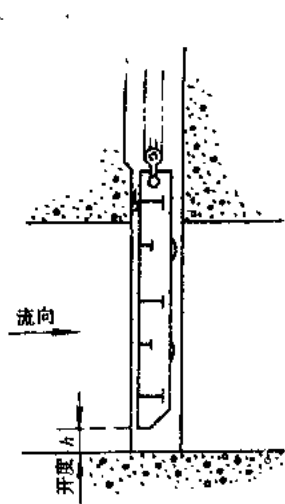


图 6-35 小开度提门充水平压

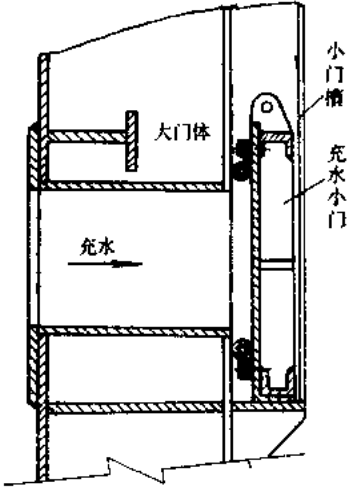


图 6-36 大门开小门的平压方式

(五) 闸门上设充水阀的平压方式 (图6-37至图6-40)

设充水阀的平压方式，由于充水孔多是设在闸门本身的顶主梁上，经一弯形管将水泄入下游。平压装置不与水工布置发生关系，所以可简化水工布置，减少工程费用。此平压方式的充水阀门的开启与闸门本身的开启应有联动机构，在启闭机上须设充水闸门启闭的

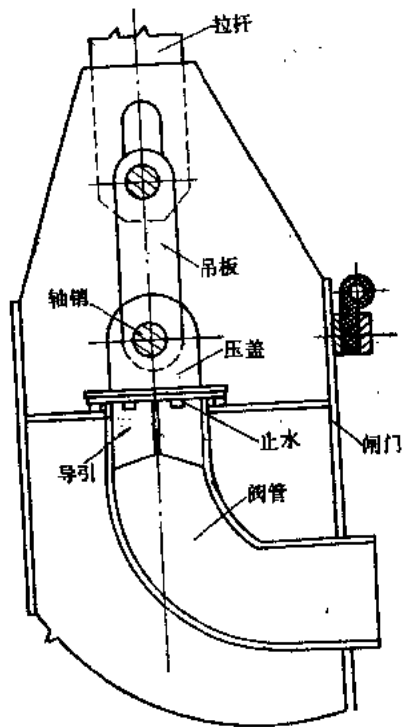


图 6-37 盖板式充水阀

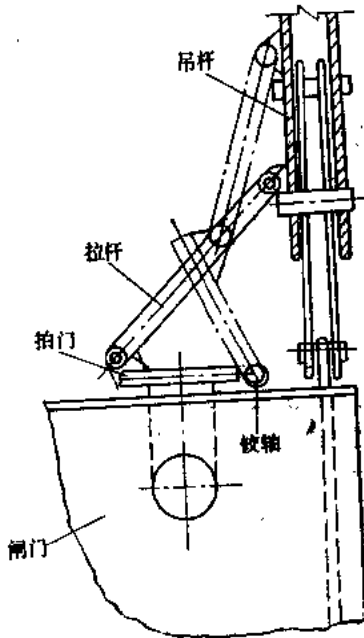


图 6-38 拍门式充水阀

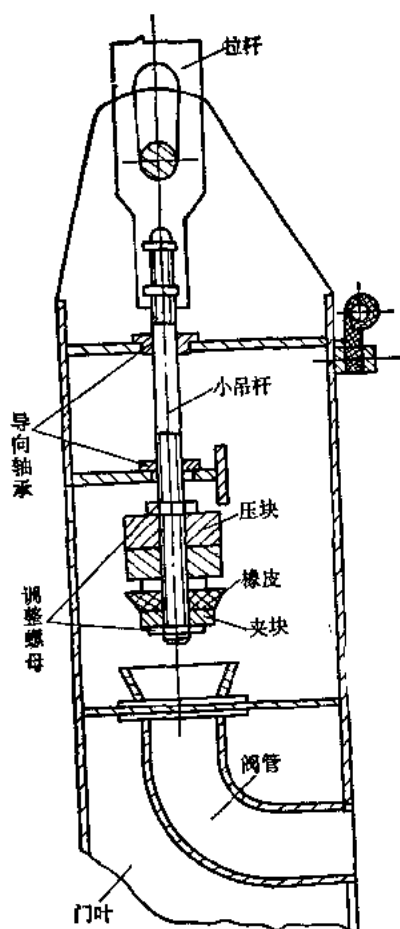


图 6-39 用于下游止水的柱塞式充水阀

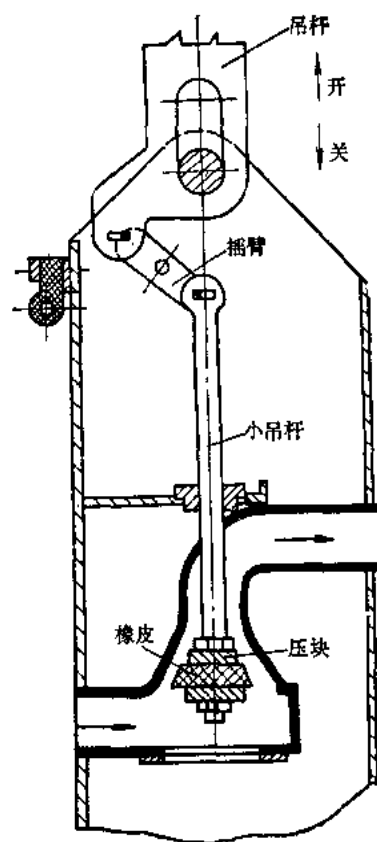


图 6-40 用于上游止水的柱塞式充水阀

行程控制开关，这种平压方式操作维修比较方便，在工程上应用较为广泛。本节着重介绍这种充水平压方式的结构及其计算。

图6-37至图6-40是设置在门体上的几种常用的充水设备结构示意图，其中图6-37至图6-39适用于下游止水的闸门，图6-40适用于上游止水的闸门。

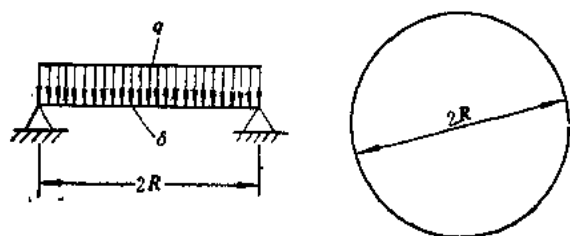


图 6-41 阀盖计算简图

## 二、结构计算

### 1. 阀盖计算

阀盖上承受的荷载按阀盖上部的的水柱压力均匀作用于阀盖上考虑。阀盖的支承条件按四周简支的圆形板考虑，其受力简图见图6-41。

阀盖的计算厚度  $\delta$  为：

$$\delta = \frac{R}{\sqrt{\frac{[\sigma]}{1.24 q}}} \quad (6-66)$$

式中  $\delta$  —— 阀盖的厚度, cm;

$R$  —— 阀盖圆半径, cm;

$q$  —— 作用于阀盖上的水压力强度, Pa;

$[\sigma]$  —— 阀盖材料的容许应力, Pa, 按表3-39采用。

阀盖顶部设置吊耳板或加劲板, 故阀盖的挠度计算可以省略。

## 2. 阀管计算

作用于阀管的荷载, 主要是内水压力 (或外水压力), 其阀管的强度及稳定可按式计算:

(1) 阀管的主要荷载为内水压力, 则阀管外壁的厚度为

$$\delta = \frac{qR}{[\sigma]} \quad (6-67)$$

式中  $q$  —— 内水压力强度, Pa;

$R$  —— 阀管内半径, cm;

$[\sigma]$  —— 阀管材料的容许应力, Pa, 按表3-39选用。

(2) 阀管的主要荷载为外水压力时, 则需核算阀管管壁的强度与稳定。

强度:

$$\delta \geq \frac{qR}{[\sigma]} \quad (6-68)$$

稳定:

$$\delta \geq \sqrt[3]{\frac{4K(1-\mu^2)qR^3}{E}} \quad (6-69)$$

式中  $q$  —— 阀管的外水压力, Pa;

$R$  —— 阀管外半径, cm;

$K$  —— 安全系数,  $K=2$ ;

$\mu$  —— 阀管材料的泊桑比;

$E$  —— 阀管材料的弹性模量, Pa;

$[\sigma]$  —— 阀管材料的容许应力, Pa, 按表3-39采用。

## 第四节 止 水 装 置

### 一、止水装置的作用与要求

止水的作用是在闸门关闭后, 堵塞门叶与闸孔周界的空隙, 以阻止漏水。闸门止水装置宜设在闸门活动部分上, 以便维修更换。如需将止水安设在埋件上 (例如, 深孔弧形闸门), 则应提供其维修更换的条件。各部位的止水装置应具有连续性和严密性。止水按其装设的部位不同, 可分为顶止水、侧止水、底止水和中间止水。



底止水的工作通常是由闸门自重的挤压来保证，侧、顶止水的工作绝大多数情况下是由上游水压力的挤压来保证。只有特殊构造的止水需要外加压力（机械的、油压的、气压的）来保证它的工作。

止水失效，不仅闸门严重漏水，而且会引起“缝隙气穴”，导致闸门及埋设件的气蚀及冲刷损坏。顶止水失效时，则顶止水和胸墙之间产生射流，门叶及闸槽经受高速水流的冲击，造成闸门振动。中低水头工作的闸门，由于止水效果不好，在闸门全关的情况下，在产生严重漏水的同时，闸门产生振动，并会发出怪叫声。止水装置的设置及效果的好坏，直接影响闸门的工作性能，严重者会造成闸门的失事，因此，止水装置的结构型式和工艺设计必须引起注意。

止水装置的设计应尽可能满足下列要求：

- (1) 闸门关闭时能可靠而严密地止水；
- (2) 闸门在任何工作位置，均应防止由于漏水而引起闸门的有害振动；
- (3) 启闭闸门时，尽可能减少止水摩阻力，以减轻磨损，降低启闭力；
- (4) 结构简单，经久耐用，操作维修方便。

止水材料要求富于弹性，并有足够的强度，常用的止水材料有木材、橡皮，也有金属，目前工程实践中用得最多的止水材料是橡皮。

## 二、止水橡皮的几何形状和尺寸

止水橡皮的几何尺寸及物理机械性能见第三章第一节闸门止水，如何选择止水橡皮简单介绍于下：

(1) 圆头P型橡皮（图3-1P60-A、P45-A），常用于顶止水和侧止水。P60-A适用于孔口大的闸门，P45-A适用于孔口中、小的闸门。

(2) 方头P型橡皮（图3-1P60-B及P45-B），适用于潜孔弧形闸门的顶止水和侧止水。P60-B适用于孔口大的闸门，P45-B适用于孔口中、小的闸门。

(3) 条形橡皮（图3-1I130-20及I110-16），适用于底止水。

(4) 角型橡皮（图3-1L8-A），常用于露顶弧门的侧止水。

(5)  $\Omega$ 型橡皮（图6-42），一般用于弧形闸门双道顶止水时的固定在门楣上的一道顶止水。

(6)  $\phi$ 型和双P型橡皮（图6-43），适用于承受双向水压的闸门的侧止水。

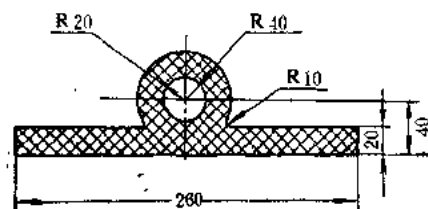


图 6-42  $\Omega$ 型橡皮（单位：mm）

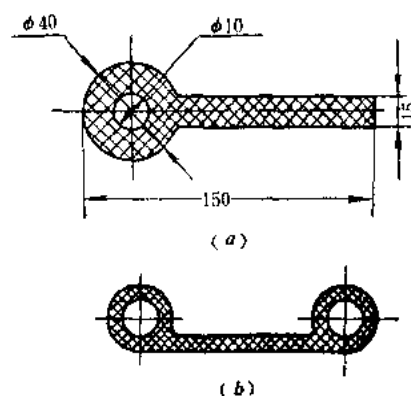


图 6-43 双向侧止水

(a)  $\phi$ 型橡皮；(b) 双P型橡皮

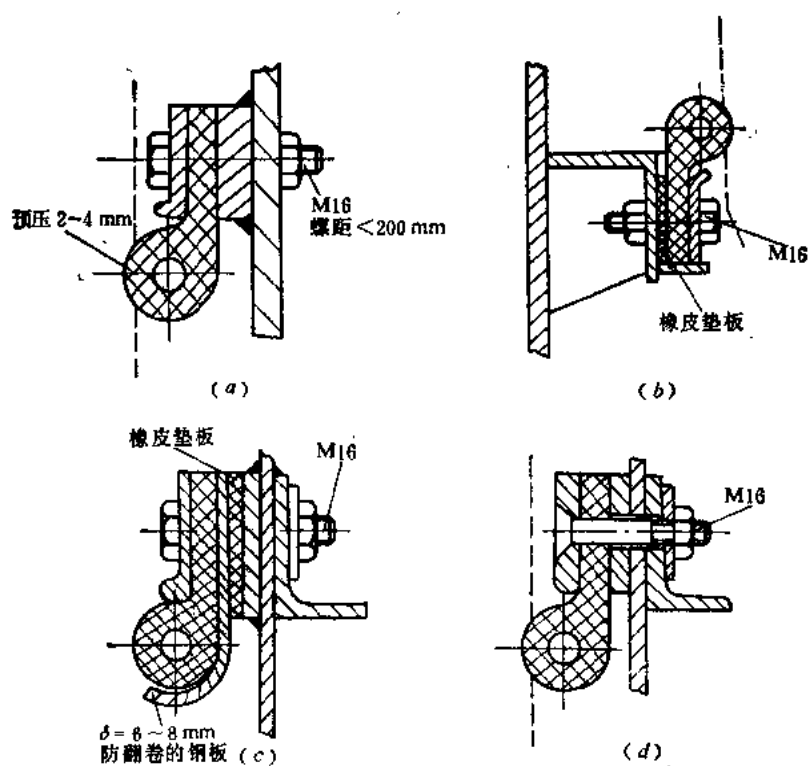


图 6-44 平面闸门的顶止水结构

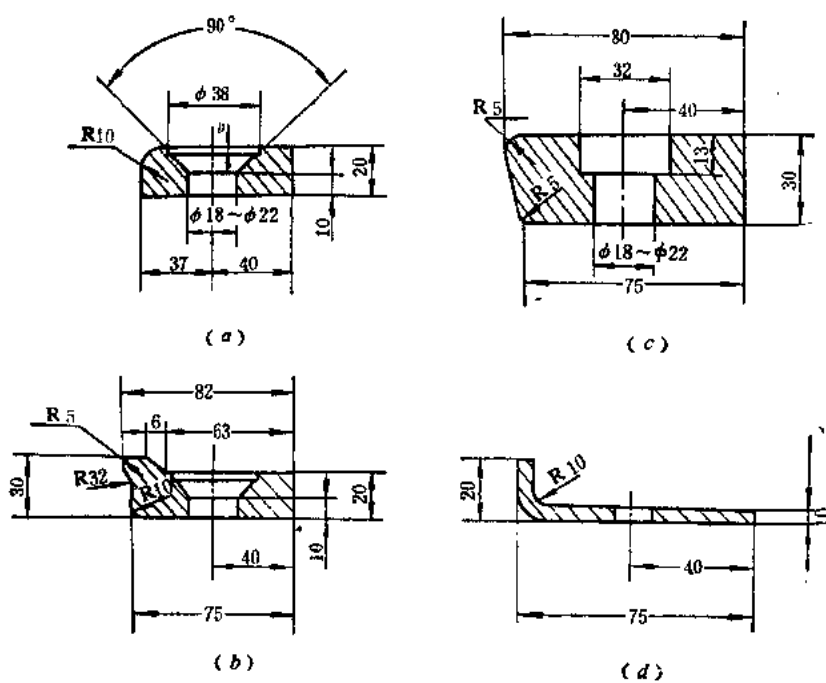


图 6-45 止水压板 (单位: mm)

(7) 转角止水, 用于顶、侧止水的连接处。

### 三、止水装置的一般构造

#### (一) 顶止水

(1) 平面闸门的顶止水结构如图6-44所示。图6-44(a)、(c)、(d)是布置在闸门迎水面的顶止水结构图, 图(b)是布置在闸门背水面的顶止水结构图。为达到较好的止水效果, 应考虑一定的预压缩量, 预压缩量一般取 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 。为了保证止水平面的平直, 一般止水垫板要采用较厚的钢板, 并焊固在门叶上, 如图6-44(a)所示; 但也有采用薄钢板的, 则一般需要另加一层橡皮垫, 用以调整止水平面的平整。

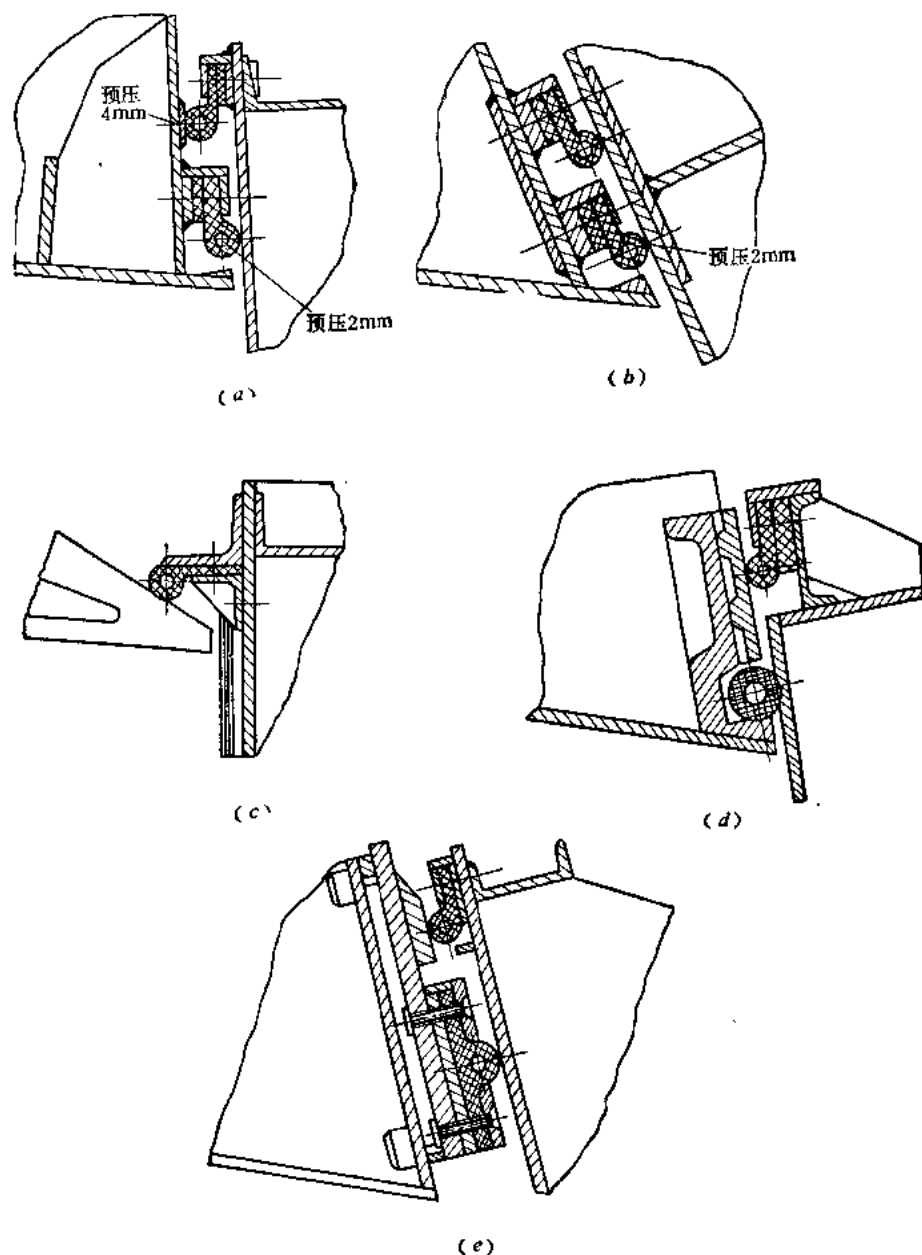


图 6-46 弧形闸门顶止水

为了防止闸门在启闭过程中顶止水的翻卷，顶止水压板可以作成如图6-45(d)的型式。止水压板的厚度不宜小于10mm，小型闸门可适当减薄。

在深水潜孔闸门中，止水摩阻力较大，同时高压水流对顶止水的冲击也大，为了防止顶止水的翻卷，其顶止水的结构型式也可参照图6-44(c)所示。

固定止水的螺栓直径常用 $\phi 16 \sim \phi 20\text{mm}$ ，螺栓间距宜小于200mm。

(2) 弧形闸门的顶止水结构如图6-46所示。潜孔弧形闸门的顶止水宜设置两道，即门叶上和门楣上各一道，如图6-46(a)、(b)、(d)、(e)所示。

## (二) 侧止水

(1) 平面闸门的侧止水结构如图6-47所示。

(2) 露顶弧形闸门的侧止水结构如图6-48(a)、(c)、(d)所示。潜孔弧形闸门的侧止水结构如图6-48(b)所示。

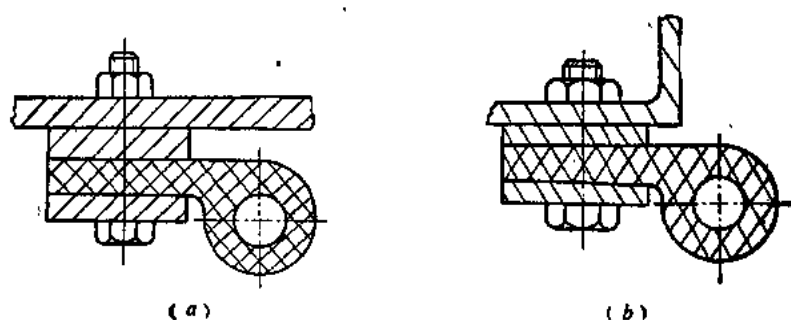


图 6-47 平面闸门的侧止水

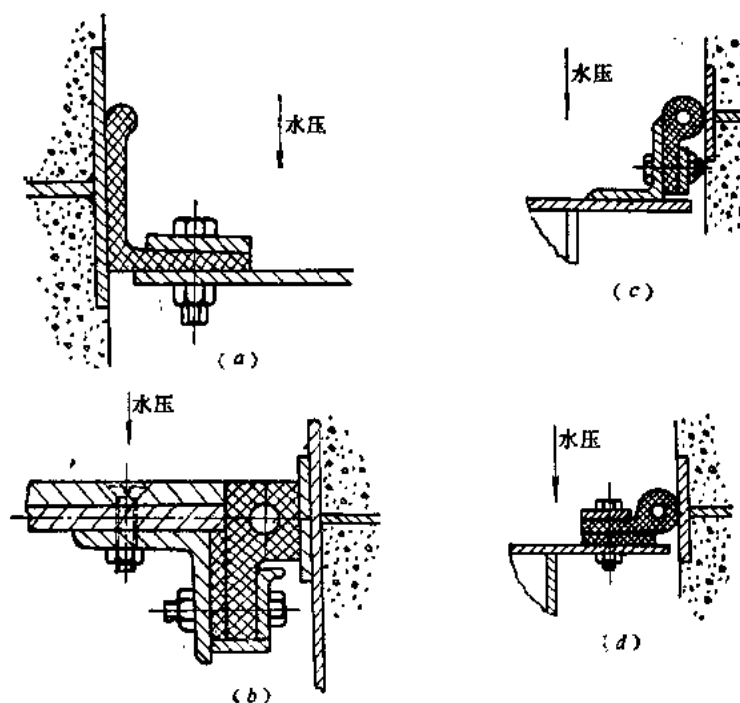


图 6-48 弧形闸门的侧止水

(3) 露顶平面闸门的 $\phi$ 型双向侧止水结构如图6-49所示。

(4) 有双向水头的露顶式平面闸门和胸墙设在水位超过门顶一面的潜孔式平面闸门的双P型双向侧止水结构如图6-50。

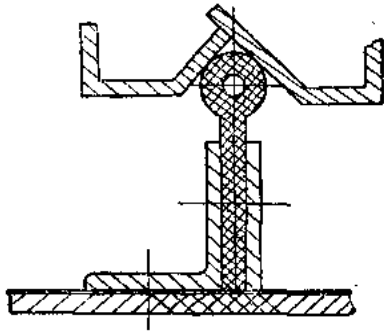


图 6-49  $\phi$ 型双向侧止水结构

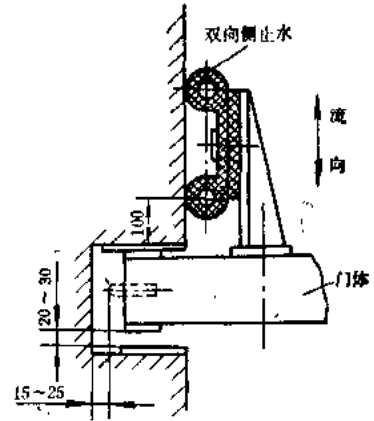


图 6-50 双P型双向侧止水结构 (单位: mm)

(三) 底止水

(1) 平面闸门底止水结构如图6-51所示。

(2) 弧形闸门的底止水结构如图6-52所示。

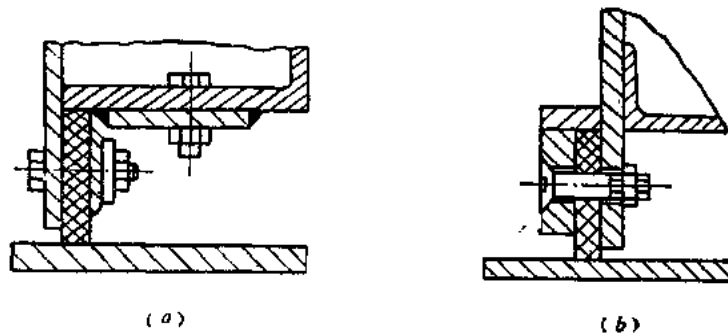


图 6-51 平面闸门底止水

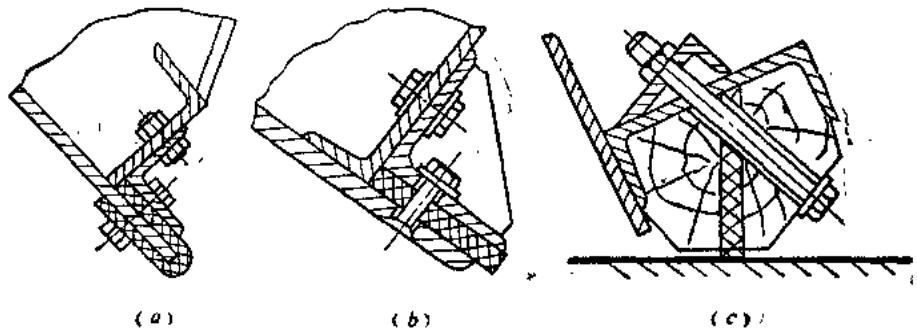


图 6-52 弧形闸门底止水

为防止闸门底部产生渗漏，应使底止水与底槛的接触面压应力 $\sigma$ ，满足：

$$\sigma \geq 0.12\gamma H_0 (\text{Pa}) \quad (6-70)$$

式中  $\gamma$  ——水的容重， $\text{t/m}^3$ ；

$H_0$  ——由底槛算起的水头， $\text{m}$ 。

由式(6-70)可确定底止水橡皮的厚度。

#### (四) 中间止水

中间止水的结构如图6-53所示。图中(a)图、(b)图适用于叠梁门或节间充水的平面闸门；(c)图仅适用于上、下两段门体是固定连接的情况。

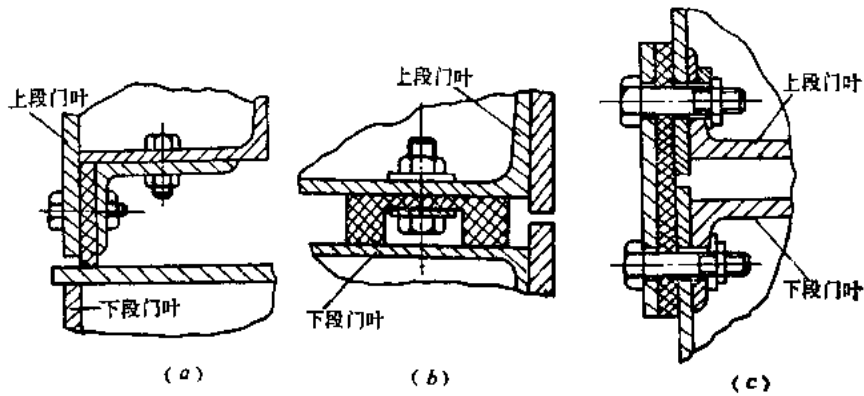


图 6-53 中间止水

#### (五) 其它

底侧止水连接详图如图6-54所示。

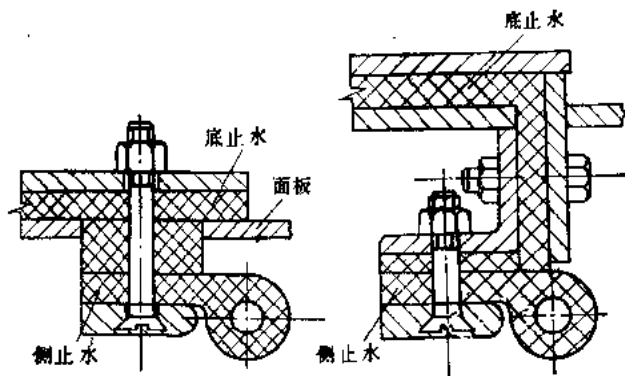


图 6-54 底侧止水连接详图

## 第五节 焊接和螺栓连接

### 一、焊接的构造要求和计算

#### 1. 构造要求

在钢闸门焊接连接的设计中,焊缝的布置应尽量对称于构件的重心。不得任意加大焊缝,并应尽量避免焊缝立体交叉和在一处集中多条焊缝。闸门活动部分的结构,不得采用间断焊缝。对承受动载或在低温下工作的闸门,其主梁翼缘与腹板间和主梁腹板与边梁腹板间的T形焊缝,应予焊透。腹板边缘应根据板厚和施焊条件进行加工。并在闸门结构及焊接件设计中应考虑施焊的方便、焊条角度的要求及烟雾的顺利逸出。钢材的焊接结构一般注意事项见表6-15,常用手工电弧焊焊缝型式、标法及尺寸见表6-16。

#### 2. 焊缝强度计算

各种焊缝的强度计算公式见表6-17,计算出的应力值应小于容许应力,焊缝的容许应力见表3-37。

#### 3. 焊条选择的基本要求

同类钢材焊接时焊条选择要点见表6-18,异种钢、复合钢板焊接时焊条选择要点见表6-19。

### 二、螺栓连接的构造要求和计算

#### 1. 构造要求

(1) 普通螺栓连接一般用半精制螺栓。承受动荷载的剪力时,宜采用铰制孔螺栓。

(2) 当计算和构造要求不宜采用普通螺栓连接,而在制造、安装方面又有条件时,宜采用高强螺栓。高强螺栓孔应采用钻成的孔,孔径比螺栓公称直径大1~2mm,同时,高强螺栓连接范围内,构件接触面的处理方法应在施工图中说明。

(3) 每一杆件在节点上以及接头的一边,永久性的螺栓一般不少于两个。

(4) 螺栓的距离应符合表6-20的要求。

#### 2. 螺栓连接计算

(1) 普通螺栓连接计算。每个螺栓的容许承载力,按下列公式计算:

$$\text{抗剪承载力} \quad [N_1] = n_f \frac{\pi d^2}{4} [\tau^1] \quad (6-71)$$

$$\text{承压承载力} \quad [N_2] = d \sum \delta [\sigma_c^1] \quad (6-72)$$

$$\text{抗拉承载力} \quad [N_3] = \frac{\pi d_o^2}{4} [\sigma_t^1] \quad (6-73)$$

式中  $[N_1]$ 、 $[N_2]$ 和 $[N_3]$ ——每个螺栓的抗剪、承压和抗拉容许承载力;

$[\tau^1]$ 、 $[\sigma_c^1]$ 和 $[\sigma_t^1]$ ——螺栓的抗剪、承压和抗拉容许应力,按表3-38采用;

$n_f$ ——每个螺栓的受剪面数目;

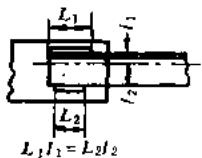
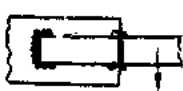
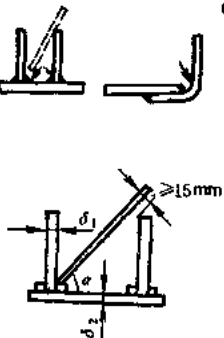
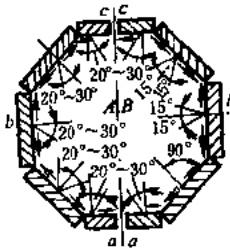

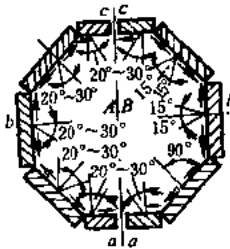



















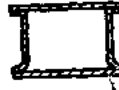
$d$ ——螺栓杆的外径;

$d_o$ ——螺栓螺纹处的内径;

$\sum \delta$ ——同一受力方向连接板件的总厚度。

表 6-15

钢材的焊接结构一般注意事项

注 意 事 项	不 好 的 设 计	改 进 后 的 设 计
考虑最有效的焊接位置, 以最小的焊接量达到最大的效果		
考虑焊接时操作方便。一般情况下要保证焊接作业的最小间隙与操作时焊条的适当角度。如果结构特殊, 无法满足此要求时, 可用煨弯焊条等措施进行焊接	 <p>焊接操作最小空间和在各种位置焊接时焊条对焊件的角度</p> <p> <math>\delta_1 = \delta_2, \alpha = 45^\circ</math>  <math>\delta_1 &gt; \delta_2, \alpha &lt; 45^\circ</math>  <math>\delta_1 &lt; \delta_2, \alpha &gt; 45^\circ</math> </p> <p>           A: 使用厚涂料焊条时            B: 使用薄涂料焊条时            a——平焊            b——立焊            c——仰焊         </p> 	 
在焊接的端部产生锐角的地方, 应尽量使角度变缓		
不宜采用薄而带锐角的板料作为加固筋, 在焊缝处锐角必须去掉, 因为锐角在焊接时, 板易熔化。同时注意, 加固筋过多, 反而容易造成裂纹		
避免焊缝坡口的过分集中(减少变形, 防止裂纹)	     	      <p>最小 100</p>
尽可能使焊缝的排列对称于截面的重心		
尽可能使焊缝位置有可能在焊接前, 将所有要焊接的工件, 用焊住几点的办法预先装配在一起		




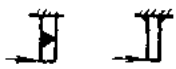

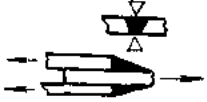
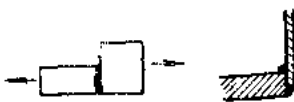

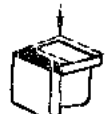

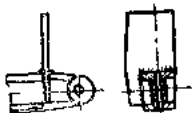
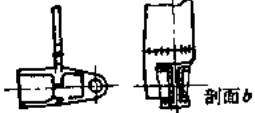
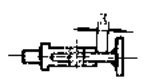


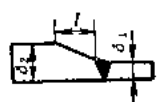
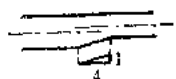

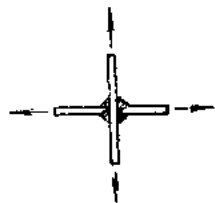
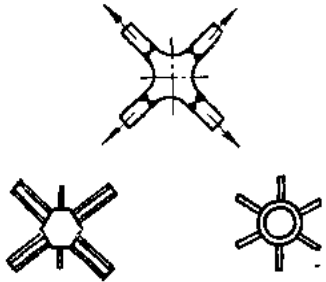


注 意 事 项	不 好 的 设 计	改 进 后 的 设 计
受弯曲的焊缝, 未焊的一侧不要放置在拉应力区		
受变应力的焊缝, 焊缝不宜凸出, 宜平缓, 背面补焊, 最好焊缝表面切平。避免用搭接型式, 要用时可用长底的填角焊缝		
避免将焊缝设计在应力容易集中的地方, 特别是重要部件, 或承受反复载荷的焊接件, 更应注意这一点 重要的法兰盘采用改进后的设计结构		
焊后需要加工的工件 焊缝不要布置在加工面上		
合理布置构件的相互位置, 以保证焊接件的刚性		
毛坯上与其他件连接的部分应离开焊缝至少 3mm		
厚度不同的钢板进行焊接时, 要有一定的斜度 $l \geq 3(\delta_1 + \delta_2)$		
在某些特别重要的焊接件中, 焊接厚度不同的钢板时必须使两者中心线一致, 以避免产生弯曲力矩		
传动部件(或其他承受冲击的构件)中的交叉点应避免十字形交叉结构, 因为这样的交叉点焊缝过分集中, 容易产生焊接应力, 同时熔化的金属过多, 还需加工, 制造也很困难		
提高材料的利用率。 确定部件的形状和尺寸时, 必须考虑材料的合理利用		

表 6-16

常用手工电弧焊缝型式、标法及尺寸

(GB324-64, GB985-67)

型 式	标 法	型 式	标 法	型 式	标 法
(1)		(9)		(17)	
(2)		(10)		(18)	
(3)		(11)		(19)	
(4)		(12)		(20)	
(5)		(13)		(21)	
(6)		(14)		(22)	塞焊
(7)		(15)		(23)	堆焊
(8)		(16)			





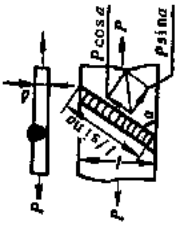




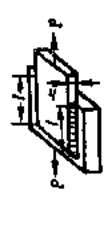

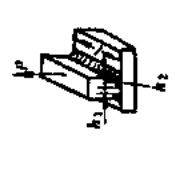



续表

[illegible]

注 对于剪切边, 刨边和有胎具装配时, 可有间隙 C, 对焊透性有利; 其他, 如气切边, 要求精度不高的, 手工装配时, 一般不留间隙 C。

表 8-17

焊缝的强度计算

	$\sigma = \frac{P}{hl}$		$\sigma = \frac{P}{(h_1 + h_2)l}$		$\sigma = \frac{0.707 P}{hl}$		$\sigma = \frac{0.707 P}{hl}$		$\sigma = \frac{P \sin^2 \alpha}{\delta l}$ $\tau = \frac{P \sin \alpha \cos \alpha}{\delta l}$
	$\sigma = \frac{6M}{hl^2}$		$\sigma = \frac{3\delta M}{lh(3\delta^2 - 6\delta h + 4h^2)}$		$\sigma = \frac{1.414 P}{(h_1 + h_2)l}$		$A: \sigma = \frac{1.414 P}{(h_1 + h_2)l}$ $B: \sigma = \frac{1.414 Ph_2}{h_1(h_1 + h_2)}$		$\sigma = \frac{0.707 P}{hl}$
	$\sigma = \frac{P}{hl}$		$\sigma = \frac{P}{(h_1 + h_2)l}$		$\sigma = \frac{0.354 P}{hl}$		$\sigma = \frac{0.707 P}{hl}$		$\sigma = \frac{6PL}{lh^2}$ $\tau = \frac{P}{lh}$


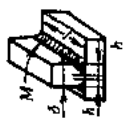

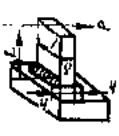
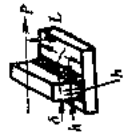



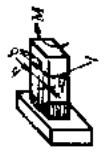

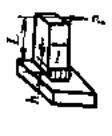
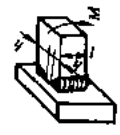


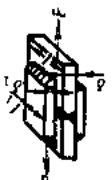
 $\sigma = -\frac{6M}{hl^2}$	 $\sigma = -\frac{3M}{hl(3\delta^2 - 6\delta h + 4h^2)}$	 $\sigma = -\frac{1.414M}{hl(\delta + h)}$	 $\text{平均 } \tau = \frac{0.707p}{hl}$ $\sigma_{\max} = \frac{p}{hl(\delta + h)} \cdot \sqrt{2L^2 + (\delta + h)^2}$	 $\sigma = -\frac{3\delta pL}{hl(3\delta^2 - 6\delta h + 4h^2)}$ $\tau = -\frac{p}{2lh}$
 $\sigma = -\frac{4.24M}{hl^2}$	 $\sigma = -\frac{6M}{hl^2}$	 $\sigma = -\frac{5.66M}{hD^2\pi}$	 $\tau = -\frac{M}{2(\delta - h)(l - h)h}$	 $\sigma = -\frac{4.24M}{hl[\delta^2 + 3l(\delta + h)]}$
 $\text{平均 } \tau = \frac{0.707p}{hl}$ $\sigma_{\max} = \frac{4.24pL}{hl^2}$	 $\sigma = -\frac{3M}{hl^2}$	 $\tau = \frac{2.83M}{hD^2\pi}$	 $\sigma = \frac{3pL}{hl^2}$ $\tau = -\frac{p}{2hl}$	 $\text{角焊 } \sigma = -\frac{1.414p}{2\delta_1 l_1 + \delta L}$ $\text{对焊 } \sigma = -\frac{p}{2\delta_1 l_1 + \delta L}$

表 6-18

同类钢材焊接时焊条选择要点

分 类	要 点
考虑工件的物理、机械性能和化学成分	<p>(1)从等强度的观点出发,选择满足机械性能的焊条;或结合母材的可焊性,改用不等强度而可焊性好的焊条,但改变焊缝结构形式,以满足等强度、等刚度要求;</p> <p>(2)使其合金成分符合或接近母材;</p> <p>(3)母材化学成分中含碳、硫、磷有害杂质较高时,应选择抗裂性和抗气孔能力较好的焊条。建议选用钛钙渣系、钛铁矿渣系焊条,如果尚不能解决,可选用低氢型焊条;</p> <p>必须说明,焊件对强度等机械性能和化学成分的要求并不是均衡的,有的焊件可能偏重于强度等方面的要求,如选用结构钢焊条时,则首先侧重从等强度观点出发;有的焊件又可能偏重于化学成分方面的要求,如对于耐热钢、不锈钢和堆焊等焊条的选择,通常侧重于考虑焊条与焊缝应有同样的化学成分;也可能两者的要求均很严格,因而在选用焊条时,应分清主次,综合起来考虑</p>
考虑工件的工作条件和使用性能	<p>(1)在承受动载荷或冲击载荷情况下,除了要求保证抗拉强度之外,对冲击韧性、延伸率均有较高要求,应选用低氢型、钛钙型、锰型、氧化铁渣系焊条;</p> <p>(2)在腐蚀介质中工作的,必须分析介质种类、浓度、工作温度以及区分是一般腐蚀还是晶间腐蚀等,从而选择合适的不锈钢焊条;</p> <p>(3)在受磨损条件下工作时,须区分是一般磨损,还是受冲击磨损,是在常温下磨损,还是在高温下磨损等,以选用合适的耐磨焊条;</p> <p>(4)处在低温或高温下工作的工件,应选择能保证低温或高温机械性能的焊条</p>
考虑工件几何形状的复杂程度、刚度大小,焊接坡口的制备情况和焊接部位所处的位置等	<p>(1)形状复杂或大厚度的工件,由于它的焊缝金属在冷却收缩时产生的内应力大,容易产生裂纹,因此,必须选用抗裂性强的焊条,如锰型渣系、氧化铁渣系焊条;</p> <p>(2)受条件限制,焊接部位所处的位置不能翻转,就必须选用能在任何空间位置进行焊接的焊条。例如立焊和仰焊时建议按钛型渣系、钛铁矿渣系焊条顺序选用;</p> <p>(3)受条件限制,某些焊接部位难以清理干净,就应考虑选用氧化性强、对铁锈、氧化皮和油污不如碱性焊条敏感的酸性焊条,以免产生气孔等缺陷</p>
考虑施焊工地设备	如没有直流焊机,就不宜选用直流电源的焊条,而应选用交流电源的焊条。某些钢材(如珠光体耐热钢)需焊后消除应力热处理,但受设备条件限制(或本身结构限制)不能进行热处理而改用非母体金属材料焊条(如奥氏体不锈钢焊条),就可不必焊后热处理,则宜选用此种焊条
考虑改善焊接工艺和保护工人身体健康	在酸性焊条和碱性焊条都可以满足要求的地方,应尽量采用酸性焊条
考虑节约	在使用性能相同的情况下,应尽量选择价格较低的酸性焊条,而不选碱性焊条;在酸性焊条中又以钛型、钛钙型为贵,根据我国矿藏资源情况,应大力推广钛铁矿型药皮的焊条

表 6-19

异种钢、复合钢板焊接时焊条选择要点

分 类	要 点
一般碳钢和低合金钢之间的焊接	<p>(1)应使焊接接头的强度大于被焊钢材中最低的强度;</p> <p>(2)应使焊接接头的塑性和冲击韧性也不低于被焊钢材;</p> <p>(3)考虑防止焊接裂纹,焊前应根据异种钢中可焊性较差的材料选取相应的焊件预热温度和焊接工艺</p>
低合金钢和奥氏体不锈钢之间的焊接	<p>(1)一般选用含铬镍比母材高、塑性、抗裂性较好的奥氏体钢焊条,如 TB18-8-2、TB18-8-7等焊条;</p> <p>(2)对于不重要的该类异种钢结构,也可选用与不锈钢相应的焊条</p>

续表

分 类	要 点
不锈钢复合钢板的焊接	<p>(1) 推荐使用基层、过渡层、复合层三种不同性能的焊条;</p> <p>(2) 一般情况下, 复合钢板的基层与腐蚀性介质不直接接触, 故这一层常用碳钢、低合金钢等结构钢, 所以基层的焊接可选用相应等级的结构钢焊条;</p> <p>(3) 过渡层处于两种不同材质的交界处, 和异种钢焊接时相同, 应选用含铬镍比复合层高, 塑性、抗裂性较好的奥氏体钢焊条;</p> <p>(4) 复合层直接与腐蚀性介质接触, 可选用相应的奥氏体钢焊条</p>

表 6-20

螺栓的容许距离

名 称	位 置 和 方 向	最大容许距离 (取两者的较小值)	最小容许距离
中 心 间 距	外 排	$8d$ 或 $12\delta$	$3d$
	中 间 排	构件受压力 $12d$ 或 $18\delta$	
		构件受拉力 $16d$ 或 $24\delta$	
中心至构件边缘距离	顺 内 力 方 向		$2d$
	垂 直 内 力 方 向	切 割 边 $4d$ 或 $8\delta$	$1.5d$
		轧 制 边	$1.2d$

注 (1)  $d$  为螺栓的孔径,  $\delta$  为外层较薄板件的厚度;

(2) 钢板边缘与刚性构件(如角钢、槽钢等)相连的螺栓的最大间距, 可按中间排的采用。

承受轴心力的连接所需普通螺栓的数目, 应按下列公式计算:

1) 抗剪连接:

$$n \geq \frac{N}{[N_{min}]} \quad (6-74)$$

式中  $n$ ——传递  $N$  力所需螺栓的数目; $[N_{min}]$ ——按式(6-71)、式(6-72)计算的螺栓容许承载力中的较小值。

2) 螺栓受拉连接:

$$n \geq \frac{N}{[N_t]} \quad (6-75)$$

式中  $[N_t]$ ——按公式(6-73)计算的螺栓抗拉容许承载力。

当采用下列形式的连接时, 普通螺栓的数目应按计算增加10%:

(a) 一个构件借助填板或其它中间板件与另一构件连接时;

(b) 用拼接板的单面连接或采用不对称搭接连接时。

当利用短角钢连接型钢(角钢或槽钢)的外伸肢时, 在短角钢两肢中的一肢上, 所用的普通螺栓数目应按计算增加50%。

(2) 高强螺栓连接。在抗剪连接中每个高强螺栓的容许承载力应按下式计算:

$$[N^v] = 0.7n_m f P \quad (6-76)$$

式中  $n_m$ ——传力摩擦面数目; $f$ ——摩擦系数, 按表6-21采用;

表 6-21

摩 擦 系 数  $f$  值

在连接处构件接触面的处理方法	构 件 的 钢 号	
	3 号 钢	16 锰钢或16 锰桥钢
喷 砂	0.45	0.55
喷砂(或酸洗)后涂无机富锌漆	0.35	0.40
轧制表面、钢丝刷清理浮锈(或未经处理但轧制表面干净)	0.30	0.35

表 6-22

高强螺栓的预拉力 $P$ 值 ( $\times 10^4 N$ )

螺 栓 的 钢 号	螺 栓 公 称 直 径		
	M20	M22	M24
45号钢	12	15	17.5
40硼钢	16	20	23

$P$ ——高强螺栓的预拉力,应按表6-22采用。

当高强螺栓连接同时承受摩擦面间的剪切和螺栓轴线方向的外拉力时,每个高强螺栓的抗剪容许承载力仍应按公式(6-76)计算,但应以 $P-1.4T$ 代替 $P$ , $T$ 为每个高强螺栓在其轴线方向所受的外拉力,此拉力不应大于预拉力 $P$ 的70%。

连接所需的高强螺栓数目应按下列公式计算:

$$n \geq \frac{N}{[N']} \quad (6-77)$$

式中  $N$ ——作用于连接的轴心力;

$n$ ——传递 $N$ 力所需的高强螺栓数目;

$[N']$ ——按公式(6-76)计算的高强螺栓的容许承载力。

当利用短角钢来连接型钢(角钢或槽钢)的外伸肢时,在短角钢两肢中的一肢上,所用的高强螺栓数目应按计算增加50%。

高强螺栓连接的轴心受拉和轴心受压构件应按下列公式计算强度:

$$\sigma = \frac{N'}{A_i} \leq [\sigma] \quad (6-78)$$

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq [\sigma] \quad (6-79)$$

式中  $N' = N \left( 1 - 0.4 \frac{n_1}{n} \right)$ ;

$N$ ——构件的轴心力;

$n$ ——构件与节点板或拼接板一端连接的高强螺栓数目;

$n_1$ ——所计算截面(最外列螺栓处)上高强螺栓的数目。

如构件尚有非高强螺栓孔削弱时,还应按公式(4-56)计算削弱截面的强度。

高强螺栓所用材料及其抗拉强度的要求见第三章。



## 第七章 闸槽与埋设件

### 第一节 平面闸门门槽型式的选择

#### 一、概述

水流经过门槽段, 由于边界突变, 在一定条件下将产生空穴现象, 导致空蚀破坏。门槽段发生空穴水流的影响因素很多, 它与泄水建筑物的总体布置、门槽型式、门槽段的压力和流速、闸门底缘型式和门后通气情况等因素有关。

为了有效地防止门槽段产生空蚀, 除注意选用合理的门槽型式外, 尚应结合具体工程实际, 综合考虑上述各项因素, 采取必要的相应措施。

#### 二、门槽型式

泄水系统平面闸门的门槽型式, 一般选用I型及II型门槽, 其适用范围和体形参数见表7-1。

当门槽附近边界体形特殊, 流态复杂或要求经常部分开启的工作闸门门槽, 上述两种槽型无法适应时, 可参照已建工程的运行经验或通过水工模型试验选择合适的门槽型式, 以谋求增加门槽段水流空穴数 $K$ 值的合理措施或其它方法。

当水流空穴数 $K < 0.6$  (约相当于水头高于60m, 或流速大于30m/s) 时, 除选用II型门槽或其它特殊槽型外, 根据工程具体情况, 在门槽上, 下游一定范围内, 宜采用钢板、低水灰比的高标号混凝土或其他抗蚀护面材料衬护; 施工时要求体形准确, 表面平整。

#### 三、水流空穴数的计算和初生空穴数的定义

##### 1. 水流空穴数计算

$$K = \frac{H_1 + H_a - H_v}{V_1^2 / 2g} \quad (7-1)$$

式中  $H_1$ ——紧靠门槽上游附近的断面平均压力, 以 $\text{mH}_2\text{O}$ 计,  $1\text{mH}_2\text{O} = 10^4\text{Pa}$ ;

$H_a$ ——大气压力, 以 $\text{mH}_2\text{O}$ 计,  $1\text{mH}_2\text{O} = 10^4\text{Pa}$ , 见图7-1;

$H_v$ ——汽化压力, 以 $\text{mH}_2\text{O}$ 计,  $1\text{mH}_2\text{O} = 10^4\text{Pa}$ , 见图7-2;

$V_1$ ——紧靠门槽上游附近的断面平均流速,  $\text{m/s}$ ;

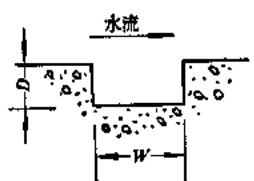
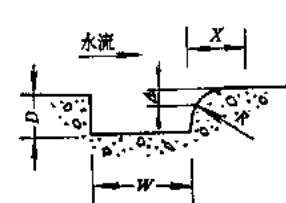
$g$ ——重力加速度,  $9.81\text{m/s}^2$ 。

##### 2. 初生空穴数

如门槽形状不变, 而水流空穴数降低到某一数值时, 则门槽段边界将发生空穴现象。这一数值称为该门槽体形的初生空穴数, 通常以 $K_i$ 表示。不同体形的门槽具有不同的初生空穴数。

根据实际工程中门槽附近的水流空穴数 $K$ , 可选用合适的门槽型式。若 $K_i < K$ , 则这种型式的门槽一般不致于发生空穴。 $K > K_i$ 的安全裕度, 可根据闸门的重要性及工作条件

表 7-1

槽型	图 型	门槽几何形状的参数	适 用 范 围
I		<p>(1) 较优宽深比:  <math>\frac{W}{D} = 1.6 \sim 1.8</math></p> <p>(2) 合宜宽深比:  <math>\frac{W}{D} = 1.4 \sim 2.5</math></p> <p>(3) 门槽初生空穴数的经验公式为:  <math display="block">K_i = 0.38 \left( \frac{W}{D} \right)</math>           (公式适用范围为 <math>\frac{W}{D} = 1.4 \sim 3.5</math>)</p>	<p>(1) 泄水孔事故门门槽和检修门门槽;</p> <p>(2) 水头低于12m的溢流坝堰顶工作闸门门槽;</p> <p>(3) 电站进水口事故、快速闸门门槽;</p> <p>(4) 泄水孔工作门门槽, 当水流空穴数 <math>K</math> 大于1.0 (约相当于水头低于30m或流速小于20m/s) 时</p>
II		<p>(1) 合宜宽深比 <math>\frac{W}{D} = 1.5 \sim 2.0</math></p> <p>(2) 较优错距比 <math>\frac{D}{W} = 0.05 \sim 0.08</math></p> <p>(3) 较优斜坡 <math>\frac{d}{x} = \frac{1}{10} \sim \frac{1}{12}</math></p> <p>(4) 较优圆角半径 <math>R = 30 \sim 50</math> mm            或圆角比 <math>\frac{R}{D} = 0.10</math></p> <p>(5) 门槽初生空穴数 <math>K_i = 0.4 \sim 0.6</math>            (可根据已有科研成果及工程实例类比选用)</p>	<p>(1) 泄水孔工作门门槽, 其水流空穴数 <math>K &gt; 0.6</math> (约相当于水头为30~50m或流速为20~25m/s) 时;</p> <p>(2) 高水头短管道事故门门槽, 其水流空穴数 <math>1.0 &gt; K &gt; 0.4</math> 时;</p> <p>(3) 要求经常部分开启, 其水流空穴数大于0.8的工作门门槽;</p> <p>(4) 水头高于12m, 其水流空穴数大于0.8的溢流坝堰顶工作门门槽</p>

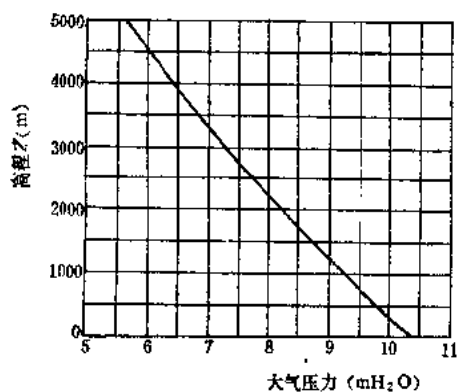


图 7-1 大气压力与高程的关系曲线

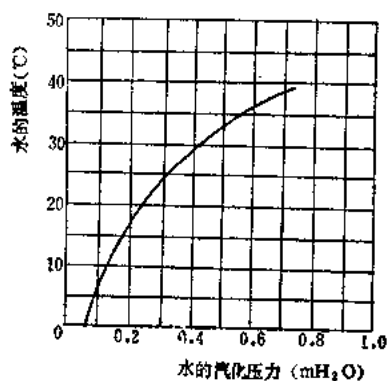


图 7-2 水的汽化压力与温度的关系曲线

选取安全系数 $n=1.2\sim 1.5$ , 使 $K\geq nK_i$ 。

#### 四、门槽设计选型要点

从大量的工程实际调查着手, 总结出的平面闸门门槽空蚀规律对于平面闸门门槽型式的选择与设计, 具有重要意义。这些规律的要点是:

(1) 泄洪闸门门槽因流速较高, 若设计不当, 较易发生空蚀; 电站进水口快速闸门门槽因流速较低, 发生空蚀的实例较少;

(2) 工作闸门门槽因流速较高、压坡线较低而又运用频繁, 故发生空蚀的实例较多; 事故闸门门槽因压坡线较高, 运行机会较少, 故发生空蚀的实例也少;

(3) 位于溢流坝坝顶的闸门槽, 水流经过门槽又受坝顶曲率影响, 使压力降叠加, 较易形成空穴水流, 导致空蚀破坏;

(4) 凡经常局部开启的闸门槽其底缘较易发生空蚀, 特别是高水头压力管道, 当闸门局部开启时, 在水流呈明流流态而又通气不足的情况下, 更容易发生空蚀;

(5) 运行水头超过30m以上的矩形方角门槽容易发生空蚀;

(6) 凡闸门槽宽深比大于2.5或介于0.8~1.2左右时, 容易发生空蚀;

(7) 凡闸门底缘斜面迎向下游, 刀形止水使水流分离点处于门槽上游端附近者, 当闸门局部开启时, 底缘扰动门槽内水流, 加剧漩涡涡量, 增强紊动能源, 较易促使发生空穴水流而引起空蚀; 当底缘斜面迎向上游, 水流分离点处于门槽下游端附近时, 则门槽内水流流态较好, 不容易发生空蚀。

总之, 防止门槽空蚀的有效措施是一项综合性的措施。在既定的总体布置下, 合理选择门槽型式是首要的措施。其次, 还可采用设置合宜的收缩压板、通气孔、通气槽或超空穴门槽以及合适的抗空蚀材料, 保证施工质量和制定合理的操作规程等综合措施。设计门槽时可先按一般水力学方法计算门槽前的水流空穴数, 选择 $K_i < K$ 的门槽型式。

决定门槽空蚀的主导因素是门槽宽深比与错距比, 其次是斜坡与圆角半径, 这些参数选择见表7-1。

## 第二节 闸槽埋设件的一般规定与要求

闸槽埋设件有主轨、反向轨、侧轨、水封座板, 门楣、护角和护面, 底槛, 闸门锁定器等埋设件, 以及为了防止结冰而埋设的加热器的埋设件。

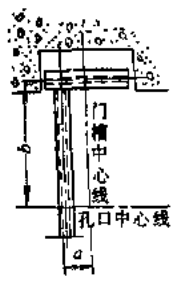
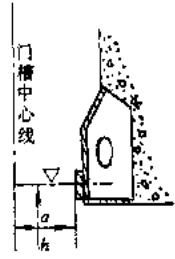
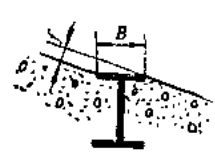

设计埋设件时应考虑土建施工时混凝土浇筑对埋设件的变形, 安装时便于调整埋设件精度等因素进行综合考虑。

闸门埋件一般采用二期混凝土安装。在保证质量的前提下可采用一期混凝土安装; 有条件时, 也可采用预制门槽安装。为安装闸门埋件预留的二期混凝土部分, 应有足够的尺寸, 一般留400~600mm。

对于安装、调整、定位和固定埋件用的锚筋, 其直径一般不小于 $\phi 16\text{mm}$ , 其伸出一期混凝土的长度一般不小于150mm, 其间距不大于500mm, 与固定埋件的螺栓的搭焊长度不小于160mm。对于低水头小孔口闸门的门槽埋件所用的锚筋, 其直径及外伸长度可适

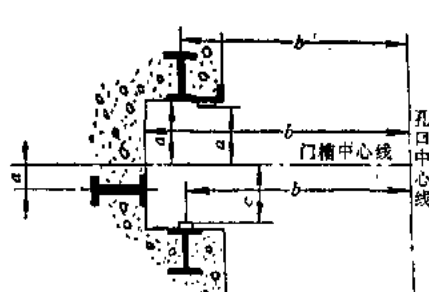
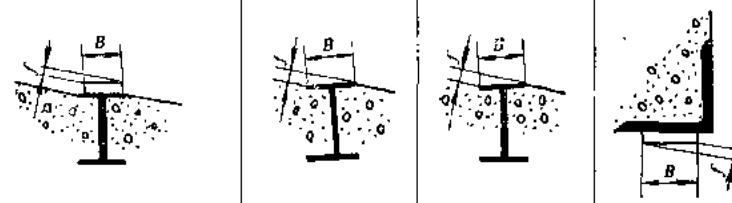
表 7-2

平面闸门门槽埋件安装的允许偏差 (单位: mm)

序 号	埋 件 名 称		底 槽	门 槽
	简 图			
1	对门槽中心线 $a$	工作范围内	$\pm 5$	$+2$ $-1$
		工作范围外		
2	对孔口中心线 $b$	工作范围内	$\pm 5$	
		工作范围外		
3	高 程	$\nabla$	$\pm 5$	
4	门槽中心对底槽面的距离 $h$			$\pm 3$
5	工作表面一端对另一端的高差	$L \geq 10000$	3	
		$L < 10000$	2	
6	工作表面波状不平度	工作范围内	2	2
		工作范围外		
7	工作表面组合处的错位	工作范围内	1	0.5
		工作范围外		
8	工作表面扭曲 $f$	简 图		
		工作范围内表面宽度	$B < 100$	1
			$B = 100 \sim 200$	1.5
			$B > 200$	2
			所有宽度	
		工作范围外允许增加值		

注 (1)  $L$  为闸门宽度; (2) 构件每米至少应测一点; (3) 胸墙下部系指和门框组合处; (4) 门槽工作范围高度: 静水启闭闸门为孔口高; 动水启闭闸门为承压主轨高度; (5) 侧轮如为预压式弹性装置, 则侧轨偏差按图纸规定; (6) 组合处错位应磨成缓坡。

续表

序 号	主 轨		侧 轨	反 轨	侧止水座板			
	加 工	不 加 工						
	简 图							
1	对门槽中心线 $\alpha$	工作范围内	$\begin{matrix} +2 \\ -1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +3 \\ -1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \pm 5 \\ \pm 5 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +3 \\ -1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +2 \\ -1 \end{matrix}$	
		工作范围外	$\begin{matrix} +3 \\ -1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +5 \\ -2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +5 \\ -2 \end{matrix}$			
2	对孔口中 心线 $b$	工作范围内	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 5$	$\pm 3$	$\pm 3$	
		工作范围外	$\pm 4$	$\pm 4$	$\pm 5$	$\pm 5$		
3	高 程	$\nabla$						
4	门楣中心对底槛面的距离 $h$							
5	工作表面 一端对另一 端的高差	$L \geq 10000$						
		$L < 10000$						
6	工作表面 波状不平度	工作范围内					2	
		工作范围外						
7	工作表面组 合处的错位	工作范围内	0.5	1	1	1	0.5	
		工作范围外	1	2	2	2		
8	工 作 表 面 扭 曲	简 图						
		工作范 围内表 面宽度	$B < 100$	0.5	1	2	2	1
			$B = 100 \sim 200$	1	2	2.5	2.5	1.5
			$B > 200$	1	2	3	3	
			所有宽度					
		工作范围外允许增加值	2	2	2	2		

续表


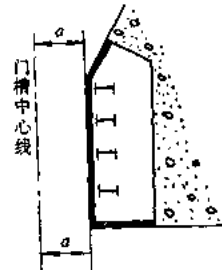
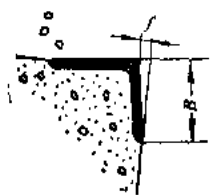
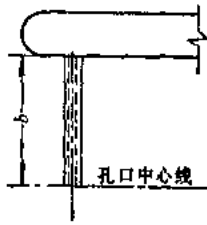
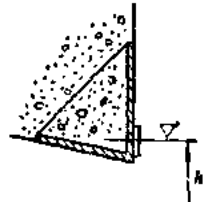
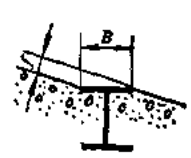
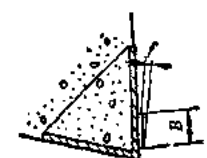
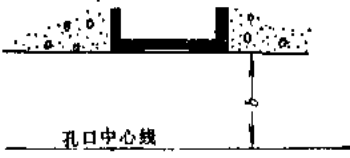
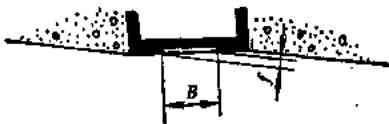
序 号	埋 件 名 称		护 角 兼 作 侧 轨	胸 墙			
				兼 作 止 水		不 兼 作 止 水	
				上 部	下 部	上 部	下 部
	简 图						
1	对门槽中 心 线 a	工作范围内	$\pm 5$	+5 -0	+2 -1	+8 -0	+2 -1
		工作范围外	$\pm 5$				
2	对孔口中 心 线 b	工作范围内	$\pm 5$				
		工作范围外	$\pm 5$				
3	高 程	$\nabla$					
4	门楣中心对底槛面的距离h						
5	工作表面 一端对另一 端的高差	$L \geq 10000$					
		$L < 10000$					
6	工作表面 波状不平度	工作范围内		2	2	4	4
		工作范围外					
7	工作表面组 合处的错位	工作范围内	1	1	1	1	1
		工作范围外	2				
8	工 作 表 面 扭 曲 f	简 图					
		工作范 围内表 面宽度	$B < 100$	2			
			$B = 100 \sim 200$	2.5			
			$B > 200$	3			
			所有宽度				
		工作范围外允许增加值		2			

表 7-3

弧形闸门埋件安装的允许偏差(单位: mm)

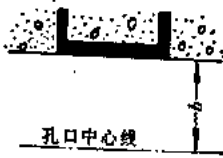

序 号	埋 件 名 称		底 槛	门 楣
	简 图			
1	里 程		$\pm 5$	+2 -1
2	高 程		$\pm 5$	
3	门 楣 中 心 至 底 槛 面 的 距 离 $h$			+3
4	对 孔 口 中 心 线 $b$	工作范围内	$\pm 5$	
		工作范围外		
5	工作表面一端对另一端的偏差	$L \geq 10000$	3	
		$L < 10000$	2	
6	工作表面波状不平度		2	2
7	工作表面组合处的错位		1	0.5
8	侧止水座板和侧轮导板中心线的曲率半径			
9	工 作 表 面 扭 曲 $f$	简 图		
		工作范围		
		$B < 100$	1	1
		$B = 100 \sim 200$	1.5	1.5
		$B > 200$	2	
		工作范围外允许增加数值		

续表

序 号	埋 件 名 称		侧 止 水 座 板	
			潜 孔 式	露 顶 式
	简 图			
1	里 程			
2	高 程			
3	门 楣 中 心 至 底 槛 面 的 距 离 $h$			
4	对孔口中 心 线 $b$	工作范围内	$\pm 2$	$+3$ $-2$
		工作范围外	$+4$ $-2$	$+6$ $-2$
5	工作表面 一端对另一 端的高差	$L \geq 10000$		
		$L < 10000$		
6	工作表面波状不平度		2	2
7	工作表面组合处的错位		1	1
8	侧止水座板和侧轮导板中心线的曲率半径		$\pm 5$	$\pm 5$
9	工 作 表 面 扭 曲 $f$	简 图		
		工作范围 内表面 宽度	$B < 100$	1
			$B = 100 \sim 200$	1.5
			$B > 200$	2
		工作范围外允许 增 加 数 值		2



续表

序 号	埋 件 名 称		侧 轮 导 板		
	简 图				
1	里 程				
2	高 程				
3	门 楣 中 心 至 底 槛 面 的 距 离 $h$				
4	对孔口中 心 线 $b$	工作范围内	+3 -2		
		工作范围外	+6 -2		
5	工作表面 一端对另一 端的高差	$L \geq 10000$			
		$L < 10000$			
6	工作表面波状不平度		2		
7	工作表面组合处的错位		1		
8	侧止水座板和侧轮导板中心线的曲率半径		$\pm 5$		
9	工 作 表 面 扭 曲 $f$	简 图			
		工作范 围内表 面宽度	$B < 100$		2
			$B = 100 \sim 200$		2.5
			$B > 200$		3
		工作范围外允许 增加数值			2

注: (1)  $L$  为闸门宽度; (2) 安装时门楣一般为最后固定, 故门楣位置宜按门叶实际位置进行调整; (3) 工作范围指孔口高度; (4) 构件每米至少测一点; (5) 潜孔式侧止水座板如为不锈钢, 其组合处错位为  $0.5\text{mm}$ ; (6) 组合处错位应磨成缓坡。

当减小。

固定埋件的螺栓与一期混凝土的锚筋连接时，应考虑调整的余地。调整可采用螺栓或花篮螺栓、手摇千斤顶以及垫片等方法。

闸槽埋设件安装的允许偏差应符合表 7-2 的规定。

设计埋设件时，应考虑制造、运输和安装对长度的限制及其本身刚度的要求进行分段。一般铸造轨道的分段长度为 3~5m；标准轨道的分段长度为 10~12m；小型闸门的轨道多采用普通型钢或由型钢焊成的轨道，其分段长度也不宜超过 6m。

电站进水口利用水柱下降的事故闸门，胸墙和门楣的相关尺寸，一般按图 7-3 所示尺寸采用。

潜孔式平面工作闸门和事故闸门门槽的主轨埋设高度，一般应比孔口高度增加 0.5~1.0 倍，在设计中，工作闸门取大值，检修闸门取小值。其上部可用轻型辅助轨道。

多泥沙河流上的排砂泄水孔闸门的门槽埋件及其附近的衬护，应结合抗磨损和抗空蚀的要求进行设计。一般可在闸槽两侧衬护钢板、铸铁板或辉绿岩铸石等。

当水流中有大量推移质过闸时，闸孔底部应采取相应的衬护措施，可在闸底板上采用高标号混凝土，喷环氧砂浆以及铺设轨道。

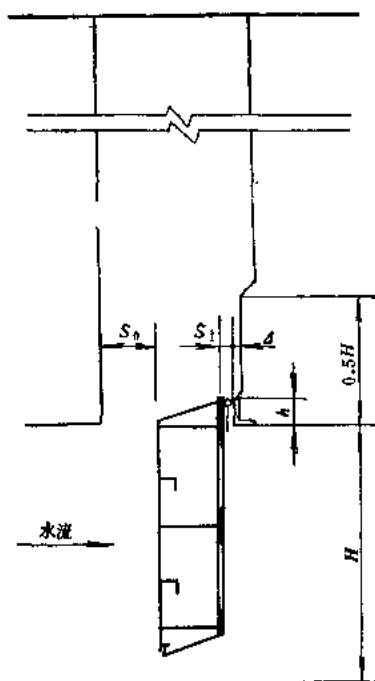


图 7-3 利用水柱下降的闸门、门槽胸墙和门楣的相关尺寸

(1)  $S_2 \geq 5S_1$ ; (2)  $D = 100\text{mm}$  或  $D \approx S_1$ ; (3)  $h = (0.05 \sim 0.1)H$  但不小于 300mm; (4)  $S_1$  尽量小

### 第三节 埋 设 件 设 计

#### 一、主轮的轨道

##### (一) 主轮轨道的型式与构造

根据轮压的大小，主轮轨道可以采用图 7-4 所示的不同型式。轮压在  $20 \times 10^4 \text{N}$  以下时，可用轧成工字钢，如图 7-4(a) 所示；轮压为  $(20 \sim 50) \times 10^4 \text{N}$  时，轨道可由三块钢板焊成，如图 7-4(b) 所示的截面或用重型钢轨、起重机钢轨，如图 7-4(c) 所示；轮压力在  $50 \times 10^4 \text{N}$  以上时，则需要采用铸钢轨道，如图 7-4(d) 所示。为了提高轨道的侧向刚度，通常把主轮轨道与门槽的护角角钢连接起来。

##### (二) 主轮轨道的计算

轨道与主轮的接触应力按第六章第一节计算。主轨强度可按下述 1 进行近似验算，也可将轨道作为弹性地基梁按下述 2 进行验算。

##### 1. 近似算法（方法 1）

该法假定集中荷载沿梁高两侧按 1:1.5 的扩散角分布传递，

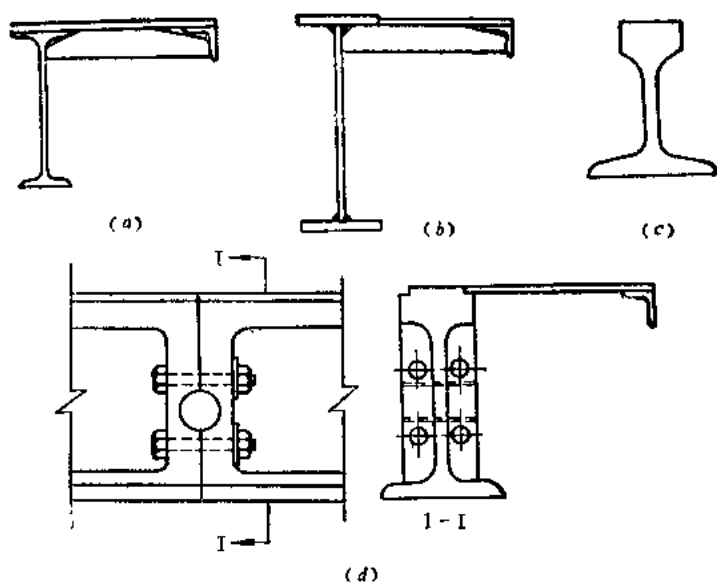


图 7-4 主轮轨道型式

如图7-5所示。

(1) 轨道底板的混凝土承压应力:

$$\sigma_k = \frac{P}{3h_k B_k} \leq [\sigma_k] \quad (\text{Pa}) \quad (7-2)$$

当相邻两滚轮的中心距小于 $3h_k$ 时, 按下式近似计算:

$$\sigma_k = \frac{P}{B_k L} \leq [\sigma_k] \quad (\text{Pa}) \quad (7-3)$$

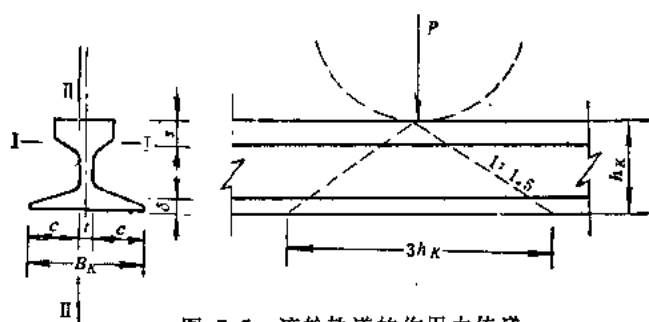


图 7-5 滚轮轨道的作用力传递

式中  $P$ ——轮压, N;  
 $h_k$ ——轨道高度, cm;  
 $B_k$ ——轨道底板宽度, cm;  
 $L$ ——相邻两滚轮的中心距, cm;  
 $[\sigma_k]$ ——混凝土的容许承压应力按表 3-43 选用。

(2) 轨道横断面的弯曲应力:

$$\sigma = \frac{3Ph_k}{8W_k} \leq [\sigma] \quad (\text{Pa}) \quad (7-4)$$

式中  $W_k$ ——轨道截面抵抗矩,  $\text{cm}^3$ ;

$[\sigma]$ ——抗弯容许应力按表3-39采用;

其余符号同前。

(3) 轨道颈部(图7-5中截面I-I)的局部承压应力:

$$\sigma_{\text{ca}} = \frac{P}{3St} \leq [\sigma_{\text{ca}}] \quad (\text{Pa}) \quad (7-5)$$

式中  $S$  —— 颈部至轨面的距离, cm;

$t$  —— 颈部厚度, cm;

$[\sigma_{\text{ca}}]$  —— 局部承压容许应力, 按表3-39采用。

(4) 轨道底板 (图7-5中截面II-II) 的弯曲应力:

$$\sigma = 3\sigma_k \frac{C^2}{\delta^2} \leq [\sigma] \quad (\text{Pa}) \quad (7-6)$$

式中  $C$  —— 底板悬臂段长度, cm;

$\delta$  —— 底板厚度, cm;

$[\sigma]$  —— 抗弯容许应力, 按表3-39采用;

$\sigma_k$  —— 见式(7-3)计算值。

## 2. 按方法2验算

在轨道计算中, 主要核算轨道头部与腹板之间的承压应力以及轨道与混凝土之间的承压应力, 在轮压  $P$  作用下, 轨道底部的承压应力分布可视为三角形 (图7-6)。沿轨道分布长度的一半  $a$  值, 建议按下式计算:

$$a = 3.3 \sqrt{\frac{EJ_x}{E_k b}} \quad (7-7)$$

式中  $EJ_x$  —— 钢轨的刚度其中  $E$  为钢轨的弹性模量;

$J_x$  —— 钢轨对自身中和轴  $x-x$  轴的截面惯性矩;

$b$  —— 钢轨的底部宽度;

$E_k$  —— 轨底混凝土的弹性模量, 见表7-4。

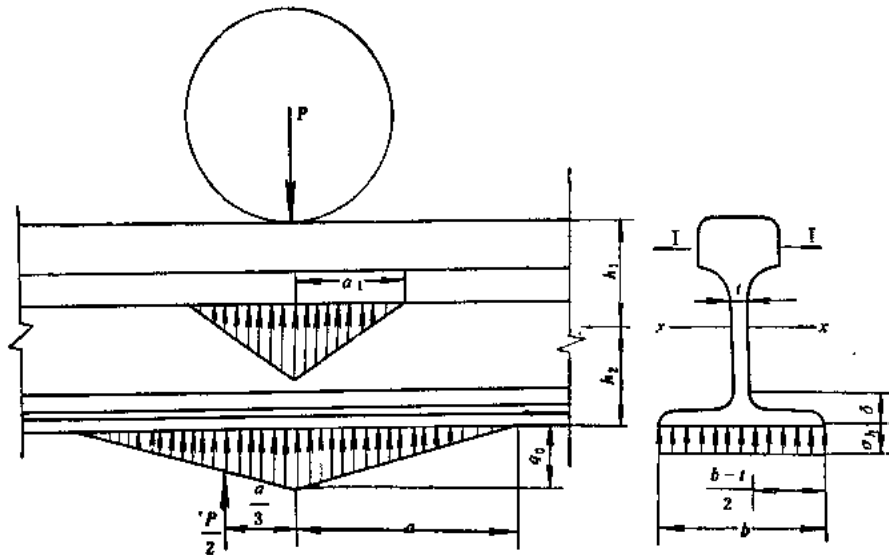


图 7-6 按弹性地基梁计算轨道的受力图

表 7-4

混凝土的弹性模量

混凝土标号	75	100	150	200	250	300
弹性模量 $E_h(\text{Pa})$	$1.55 \times 10^{10}$	$1.85 \times 10^{10}$	$2.3 \times 10^{10}$	$2.6 \times 10^{10}$	$2.85 \times 10^{10}$	$3.0 \times 10^{10}$

由图7-6可知,  $P=2aq_0b/2=aq_0b$ , 所以在轮压作用下, 轨底与混凝土间的最大承压应力 $\sigma_k$ 可按式计算:

$$\sigma_k = \frac{P}{ab} \leq [\sigma_k] \quad (7-8)$$

轨道头部与其腹板之间的局部承压应力分布情况和计算方法与上述相同, 因轨道头部与其腹板的弹性模量相同, 所以 $a_1$ 为:

$$a_1 = 3.3 \sqrt[3]{\frac{J_1}{t}} \quad (7-9)$$

式中  $a_1$ ——轮压在轨道腹板上缘分布长度的一半;

$J_1$ ——轨道头部对其自身中和轴I—I的截面惯性矩。

轨道头部与其腹板之间的局部承压应力按下式验算:

$$\sigma_{cd} = \frac{P}{a_1 t} \leq [\sigma_{cd}] \quad (7-10)$$

式中  $a_1$ ——按式(7-9)计算, cm;

$t$ ——轨道腹板厚度, cm;

$[\sigma_{cd}]$ ——局部承压容许应力, 按表3-39采用。

轨道的弯曲应力可按倒悬臂梁验算, 由图7-6的荷载分布图推算得:

$$\text{弯矩: } M = \frac{Pa}{6} \quad (\text{J}) \quad (7-11)$$

弯曲应力为:

$$\text{轨顶: } \sigma = \frac{Pah_1}{6J_x} \leq [\sigma] \quad (7-12)$$

$$\text{轨底: } \sigma = \frac{Pah_2}{6J_x} \leq [\sigma] \quad (7-13)$$

式中 $h_1$ 及 $h_2$ 的意义见图7-6所示。

轨道底板的弯曲应力为:

$$\sigma = \pm \frac{3\sigma_k(b-t)^2}{4\delta^2} \quad (7-14)$$

式中  $[\sigma]$ ——抗弯容许应力, 按表3-39采用;

其余符号如图7-6所示。

## 二、胶木滑道的支承轨道

### 1. 胶木滑道轨道的尺寸

胶木滑道轨道的轨头设计宽度 $S$ 和轨顶弧面半径 $R$ (见图7-7)可按表6-1采用。

## 2. 胶木滑道支承轨道的验算 (见图7-7)

(1) 轨道底板的混凝土承压应力:

$$\sigma_k = \frac{q}{B_k} \leq [\sigma_k] \quad (\text{Pa}) \quad (7-15)$$

式中  $q$ ——胶木滑道单位长度荷载, N/cm;

其余符号见图7-7。

(2) 轨道底板弯曲应力

$$\sigma = 3\sigma_k \frac{C^2}{\delta^2} \leq [\sigma] \quad (\text{Pa}) \quad (7-16)$$

式中  $\sigma_k$ ——混凝土的承压应力, Pa;

$C, \delta$ ——见图7-7所示, cm;

$[\sigma]$ ——抗弯容许应力按表3-39采用, Pa。

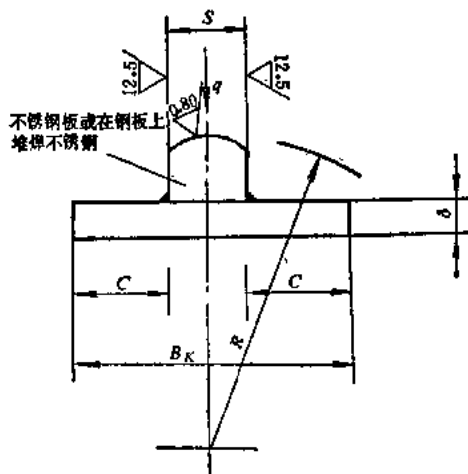


图 7-7 胶木滑道轨道尺寸

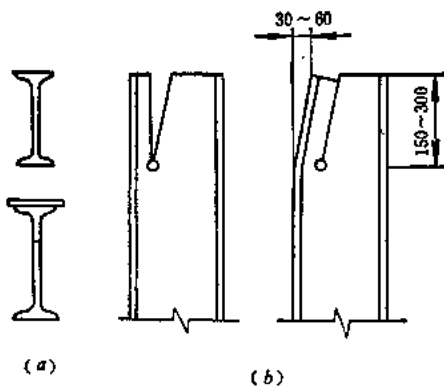


图 7-8 反轮和侧轮的轨道 (单位: mm)

(a) 轨道断面; (b) 轨道顶端构造

## 三、反轮和侧轮的轨道

反轮和侧轮的轨道通常采用轧成的工字钢 (图7-8), 其尺寸视闸门大小一般按构造要求选择, 主要是使它在安装和浇筑混凝土时保证有足够的刚度。

为了便于把闸门引入闸槽, 常将反轮和侧轮轨道的上端做成斜角 (图7-8b)。为此, 通常把轨道上端的腹板切去一部分, 切割的尺寸如图7-8(b)所示, 再将轨道的翼缘弯到剩下的部分上焊接起来。

## 四、止水下面的埋件

### 1. 侧止水埋件

侧止水下面的埋件可用角钢、槽钢等 (图7-9), 安装时要求平直, 使侧止水能够全面贴紧到它的表面, 以防漏水。在重要的闸门中, 为了减少启闭闸门时的摩擦和止水橡皮

### 2. 底止水埋件

与闸门底部相接触的门槛埋件如图7-10所示。闸门门槛埋件一般采用工字形断面, 如

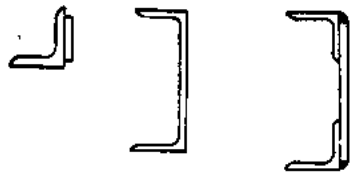


图 7-9 侧止水下面的埋件截面型式

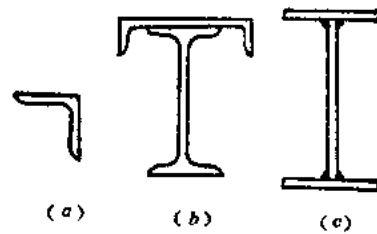


图 7-10 底部止水下的埋件截面型式

图7-10(c)；当水头较高时，为增加底槛埋件与混凝土的接触面并使其嵌固良好，底槛埋件的断面尺寸应适当增大，如图7-10(b)；低水头小孔口闸门的底槛埋件可适当简化，如图7-10(a)。

### 3. 顶止水埋件

在潜孔闸门中，与顶止水相接触的门楣构造如图7-11所示。关闭闸门时，为了引导顶止水到工作位置，在门楣上部设置了倾斜段，图中的隔板间距一般为700~1200mm。

潜孔闸门在需要借助水柱压力才能关闭时，胸墙和门楣的相关尺寸见图7-3所示。

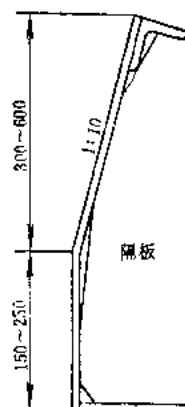


图 7-11 潜孔闸门门楣型式（单位：mm）

## 第八章 拦污栅

### 第一节 拦污栅的用途及布置型式

#### 一、拦污栅的用途与要求

拦污栅安设在引水道进口处，用以拦阻水流所挟带的污物（树枝枯叶、杂草和浮冰等），不让污物进入引水道，以保护水轮机、闸门、阀及管道等不受损害，使水轮机组或其他结构顺利地运行。

设置拦污栅时，应根据所处河道的污物性质、数量、河道地形及气温条件，厂房进口拦污栅，还应根据机组型式来加以综合考虑。尽量利用水流与地形条件来避免和减轻污物对拦污栅的威胁。设计拦污栅的结构，要考虑水流平顺、水头损失小、清污方便，并便于安装、拆修和更换。在洪水季节，大量污物和漂浮物涌向进水口时，拦污栅必须具备足够的强度和刚度。

#### 二、拦污栅的型式及布置

##### 1. 型式

拦污栅可分为固定式、移动式 and 回转式三种。固定式拦污栅的支承梁两端埋设在或用锚栓固定于混凝土墩墙中。这种型式多用作浅水拦污栅，它的结构比较简单，无需起吊设备，由于不能提出孔口，不便于检修和维护，同时需要专门的清理设备才能清除杂物。移动式拦污栅设有支承行走装置，可将拦污栅提出槽，既便于拦污栅的检修维护，也便于提栅清理，因此移动式拦污栅使用得比较普遍。回转式拦污栅是一种旋转式的新型拦污栅，这种拦污栅具有拦阻和清除污物的双重功能，适用于引水流量较小的浅式进水口。

移动式拦污栅根据设置在水下位置的不同，可分为深式和浅式两种。深式拦污栅位于深水之中，所受冰块和污物堵塞的机会较浅式进水口要少些。

##### 2. 布置

拦污栅一般布置在工作闸门和检修闸门的上游。在水轮机压力管进水口的拦污栅，栅面距进水口中心的距离至少为进水口高度的80%，以免影响水流流态增加水头损失。个别情况也有将拦污栅设置在工作闸门和检修闸门之间的。这时拦污栅因受空间尺寸的限制，常只能垂直放置。在深式进水口上往往把拦污栅和检修门放在一个闸槽内，使布置更形紧凑，因两者不同时使用。

拦污栅可以垂直设置，也可以倾斜设置，倾斜设置的拦污栅大都用于人工清污，它与水平面的夹角一般宜在 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间。倾斜式拦污栅，由于扩大了过水断面而降低了过栅流速及水头损失，并便于清污。

拦污栅在平面上的布置形状有直线形、折线形、曲线形和圆形数种。浅式进水口往往采用直线形（或称平面式）；而深式进水口则为了使过栅流速降低而往往采用半圆形、多



边形或拱形（图8-1），以获得较大的过水面积。

布置拦污栅需考虑下列诸因素：

- （1）进水口的型式、用途、位置及其在水下深度；
- （2）水库的大小、等级及引水方式；
- （3）管道的流量及允许过栅流速，它们决定了拦污栅的面积；
- （4）水流所挟带污物的性质、大小及数量；水轮机、闸门或阀的类型、尺寸及数量；它们与拦污栅的容许间隙有关，也与清理机械有关；
- （5）当地气温条件，冬季库水位变动情况，根据这一因素，可以考虑防冻措施等；
- （6）清污方法和更换方法；
- （7）制作与运输条件；
- （8）鱼类问题。

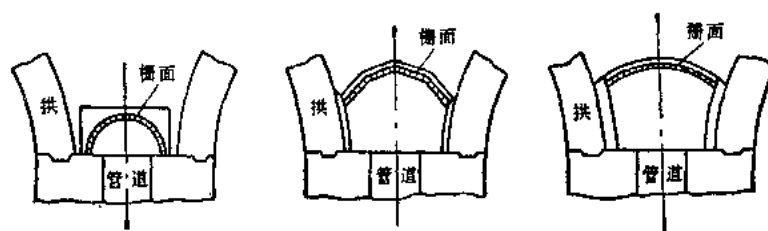


图 8-1 深式进水口拦污栅的型式

## 第二节 拦污栅的结构

### 一、平面式拦污栅

由于平面式拦污栅结构简单，制造、安装方便，在工程上得到广泛的应用。

拦污栅是由栅体和栅槽埋件所组成。

拦污栅的栅体是由栅叶和支承框架所构成，栅叶拦阻污物并将其荷载传给支承框架。

#### 1. 栅叶

拦污栅栅叶根据拦污孔口的大小，可由一块或若干块组成，每块栅叶则由直立的栅条组成。每块栅叶宽为1~3m，这样便于拆装。如拦污栅较高，可沿高度方向分为数节，每节高度不宜小于宽度的1/3，亦不大于5m。

栅条一般采用扁钢，个别的也采用圆钢。栅条截面高度不宜大于12倍栅条的厚度，也不宜小于50mm。栅条的侧向支承间距，不宜大于70倍栅条的厚度。栅条厚度一般为8~12mm。

栅条连接方式有螺栓连接和焊接两种，如图8-2所示。

焊接的优点是制造简单，并且可把垂直栅片放成各种角度，以与水流方向相一致。但当个别栅条受到损坏时更换不便。焊接结构在工程上的应用较为广泛。

#### 2. 栅条的净距

栅条的净距 $S$ 不宜过大，过大会通过有害污物；也不宜过小，过小易使拦污栅堵塞。

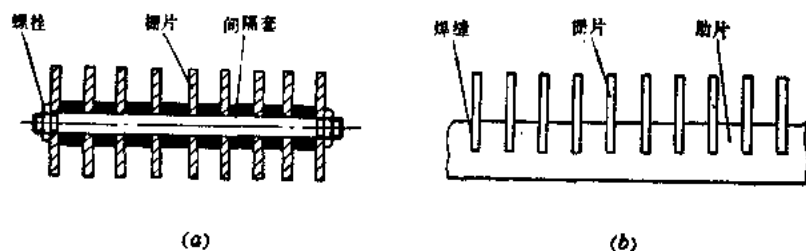


图 8-2 拦污栅构造图  
(a)螺栓连接; (b)焊接连接

栅条净距常由下列几个因素来确定:

- (1) 水轮机的型式及转轮直径的几何尺寸;
- (2) 防止鱼类通过的最小尺寸;
- (3) 污物的性质、大小与数量。

表 8-1 所列数据可供参考。

表 8-1 确定栅条净距的因素

确定的因素		栅条净距 $S$ (mm)
水轮机型式	轴流式	$D/20$ , 约在50~150mm之间
	混流式	$D/30$ , 约在32~100mm之间
	冲击式	根据喷嘴出口尺寸确定: $\frac{1}{5}d$ , 约在20~65mm之间
防止鱼类通过		约在15~25mm之间(最好采用网筛)
泄水道上		150~300mm

注 表中 $D$ ——水轮机转轮直径,  $d$ ——喷嘴直径。

对于引水发电系统的拦污栅, 在满足保护机组的前提下, 栅条的净距应尽量加大, 以便于清污和减小水头损失。

### 3. 支承框架

支承框架的结构与平面闸门的承重结构大体相似, 它主要包括主横梁、起重桁架、边梁及支承等。当主梁高度较大时, 为了增加拦污栅的横向刚度, 可在主梁间加设横向连系杆。拦污栅多在静水条件下起落, 故其支承一般采用滑动式。如进水口的高度较大, 为了便于安装及运输检修, 可以分节设置。其节与节之间的连接可在边梁腹板上用铰轴相连, 并应考虑拦污栅的锁定。

### 4. 栅槽埋设件

拦污栅槽的埋件是由埋在混凝土内的支承轨道及保护栅槽混凝土边棱的埋设件所构成。拦污栅槽埋件的作用与闸门槽埋件一样, 承受着由栅叶传来的荷载并传递至水工建筑物

上。但拦污栅槽埋件结构较闸门槽埋件结构简单，且安装精度亦较低。图 8-3 (a)、(b) 为两种移动式拦污栅槽的实例。

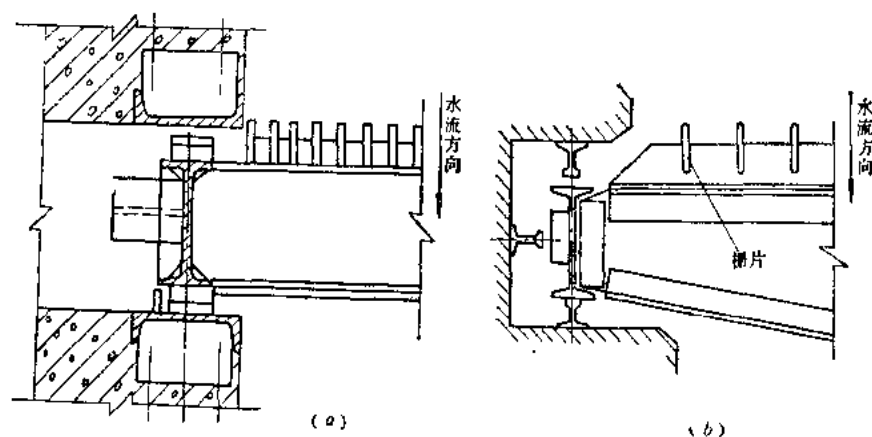


图 8-3 移动式拦污栅槽

## 二、回转式拦污栅

近年来新疆水利水电勘测设计院设计的回转式拦污栅既能拦污捞冰，又能代替清污机清污，效果较好。但这种拦污栅主要适用于水头较小的引水式电站，布置在前池闸房外面的进水口处。拦污栅倾斜布置，与水平夹角  $\alpha=63\sim70^\circ$  为优，总体布置见图 8-4。现介绍如下：

### 1. 结构布置

回转式拦污栅由固定框架、转动栅叶、板式滚子链、动力传动装置、张紧轮和防冻管路系统等部分组成。该栅由设在闸墩上的电动机驱动，经变速传动装置，带动固定在竖梁上部的链轮转动（见图 8-5），由链轮的转动来带动板式滚子链回转，各个栅叶是通过支承板

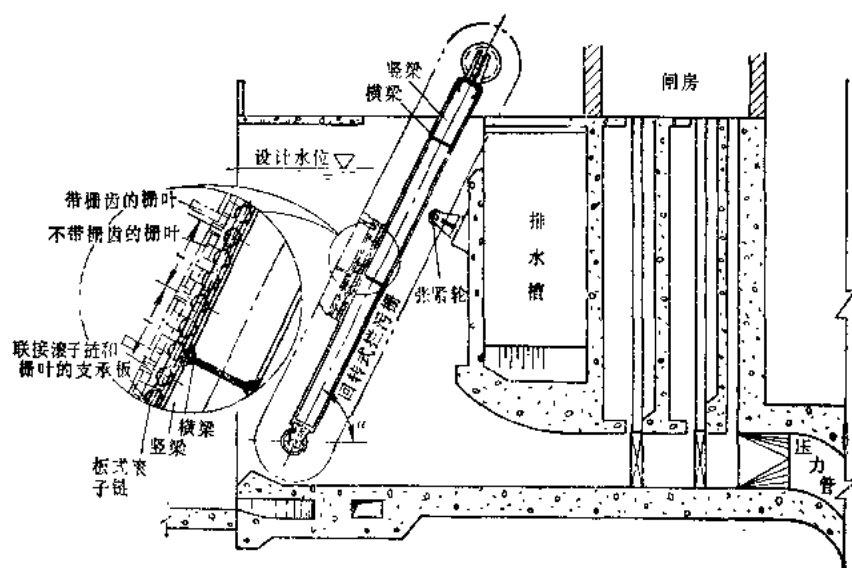


图 8-4 回转式拦污栅总体布置

装配在板式滚子链上的（见图 8-6），所以板式滚子链的回转也就带动栅叶回转，冰和污物即由栅叶上的栅齿在回转中捞出水面，并转过链轮顶部，降落到坡度较大的排污槽中，自动滑落到泄水道。

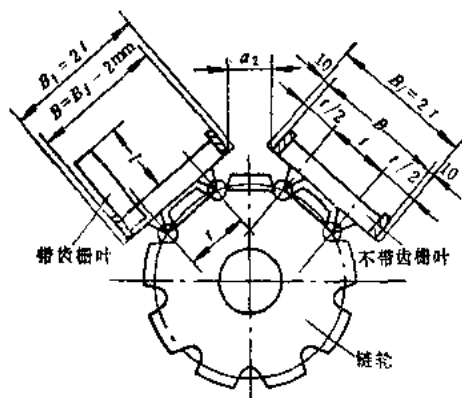


图 8-5 链轮传动装置

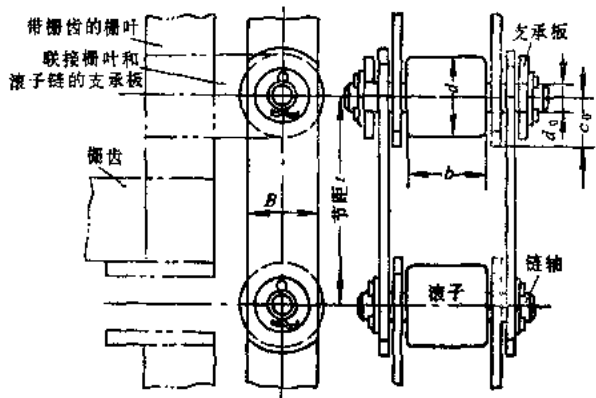


图 8-6 板式滚子链与栅叶的连接

## 2. 结构计算

（1）横梁和竖梁。固定框架的横梁、竖梁及栅叶，按栅前栅后 2 m 水头差计算其强度、刚度和稳定。框架一般采用 3 个横梁式布置，竖梁的个数与栅叶的支承——板式滚子链的条数相等。按构造需要所选择的栅叶断面，采用 2 个竖梁、2 条板式滚子链支承，栅叶强度尚有余。大跨度的回转式拦污栅，双边驱动时，必须采用 4 个竖梁和 4 条板式滚子链布置。

横梁与竖梁同高，为了使栅叶回转到链轮（固定在竖梁顶部）上过渡平顺，其计算梁高度  $h$  由  $h = D - d$  确定， $D$  是链轮节圆直径； $d$  是板式滚子链的滚子直径。横梁的计算跨度为  $L_j = L_0 + 2c$ ， $L_0$  为孔口净跨， $c$  是横梁埋入混凝土中的长度；当  $L_0 \leq 8\text{m}$  时， $c \geq L_0/50 \sim L_0/40$ ，且  $c \geq 0.1\text{m}$ 。

（2）板式滚子链。板式滚子链是带动栅叶回转和把荷载传递到固定框架竖梁上去的一个重要部件。滚子和滚轴是按回转式拦污栅在设计水头下所分配的荷载计算其强度，链板是按回转时起栅力计算其强度。板式滚子链的各尺寸比例关系见表 8-2 和图 8-6。

板式滚子链的节距  $t$  的大小，决定了栅叶计算高度  $B_j$  的大小，也决定了链轮节圆直径  $D$  的大小，同时也决定了固定框架梁的高度  $h$ 。一般采用  $B_j = 2t$ ，栅叶个数以偶数为好，

表 8-2 板式滚子链的各尺寸比例关系

滚子直径 $d(\text{mm})$	滚子长度 $b(\text{mm})$	滚轴直径 $d_0(\text{mm})$	链板宽 $B(\text{mm})$	$c$ (mm)
60	50	20	40	30.0
70	60	25	50	37.5
80	70	30	60	45.0

半数栅叶为带栅齿的，半数为不带栅齿的，相间装配在板式滚子链上。

(3) 链轮。链轮节圆直径  $D$  与板式滚子链节距  $t$  (也是链轮节距) 的关系式为： $D = t_{\text{arc}}(180^\circ/2)$ 。从式中可以看出： $D$  值的大小与  $t$  值和链轮齿数  $Z$  成正比。当  $B_f = 2t$  时，采用最小的  $Z$  值，可使  $D$  值相应减小。链轮的许用最小齿数  $Z_{\min} = 9$ ，一般荐用齿数  $Z = 9 \sim 13$ 。链轮端面齿形一般采用凹形端面齿形，当  $B_f = 2t$  时的  $B_f$ 、 $t$ 、 $Z$  与  $D$  的关系见表 8-3。

表 8-3 $B_f = 2t$ 时的 $B_f$ 、 $t$ 、 $Z$ 与 $D$ 的关系								
$B_f = 2t$	400	420	440	460	480	500	520	540
$D$	200	210	220	230	240	250	260	270
$t$	200	210	220	230	240	250	260	270
$Z$								
9	584.8	614.0	643.2	672.5	701.7	731.0	760.2	789.4
11	709.9	745.4	780.9	816.4	851.9	887.4	922.9	
13	835.7	877.5	919.3					

### 3. 动力计算

电动机的计算容量按下式确定

$$N_j = \frac{P_0 V_x}{6120 \eta} \quad (\text{kW}) \quad (8-1)$$

式中  $P_0$ ——回转时的起栅力，N；

$V_x$ ——栅叶回转线速度，m/min；

$\eta$ ——总传动效率， $\eta_{\max} = 0.80 \sim 0.85$ 。

电动机铭牌容量  $N \geq N_j$ ，并应采用新型号 Y 型，转速选用  $n_s = 750 \text{r/min}$  左右为好。

## 第三节 拦污栅的水头损失及容许流速

### 一、水头损失

水流通过金属栅条的水头损失按下式计算：

$$h_{w1} = \beta \left( \frac{b}{S} \right)^4 \frac{V^3}{2g} \sin \alpha \quad (8-2)$$

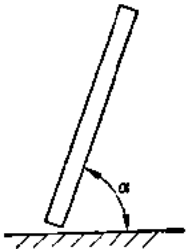


图 8-7 栅面与水平面的夹角

式中  $b$ ——栅条厚度，m；

$S$ ——栅条间净距，m；

$V$ ——栅前行近流速，m/s；

$g$ ——重力加速度， $9.8 \text{m/s}^2$ ；

$\alpha$ ——栅面与水平面所成的夹角，见图 8-7；

$\beta$ ——栅条形状系数，见表 8-4，栅条形状见图 8-8 所示。

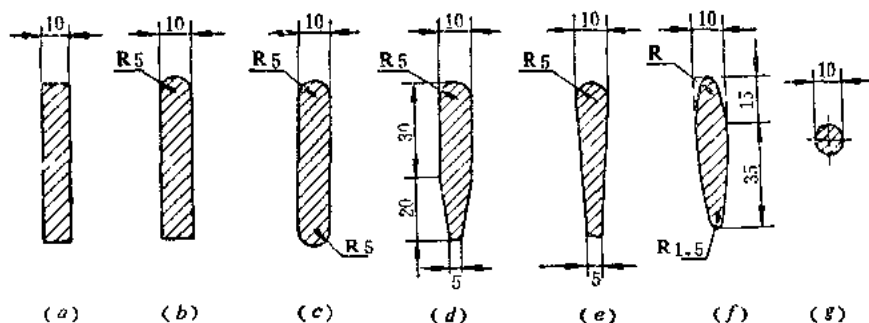


图 8-8 栅条断面形状图 (单位: mm.)

表 8-4 栅条形状系数

栅条形状	(a)图	(b)图	(c)图	(d)图	(e)图	(f)图	(g)图
$\beta$	2.42	1.83	1.67	1.03	0.92	0.76	1.79

上式是按拦污栅上没有附着物的情况建立的, 所以在实际应用中必须增加一定的水头损失, 一般情况增加值可达计算值的 3 倍。特殊情况不在此范围内, 而应按事故堵塞拦污栅引起的水头损失考虑。

图8-9所示为水流通过拦污栅的情况。图(a)为水流向倾斜流入栅条的情况; 图(b)为水流向与栅条轴线相重合的情况。从图中可以看出, 水流通过拦污栅时, 由于栅条使水流断面收缩, 所以流速加快, 流出栅面后流速又减慢, 因而又造成水头损失。

如果流向拦污栅的水流方向与栅条成一夹角, 则栅中损失便会增加。图8-10列出一些试验资料 (试验条件为  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$ , 栅条断面为矩形, 尺寸为  $10 \times 50\text{mm}$ )。为了减少水头损失, 应使水流方向与栅片轴线相重合。

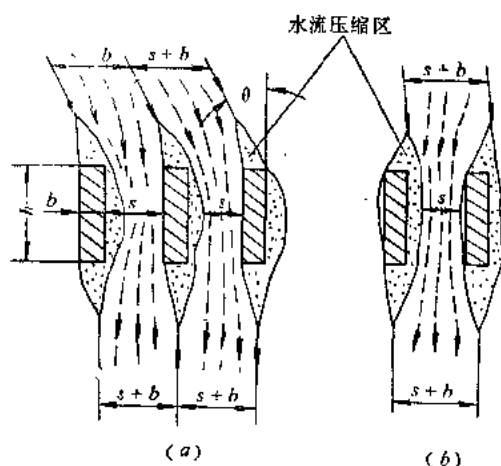


图 8-9 水流通过拦污栅的情况  
(a)水流向倾斜流入栅条; (b)水流向与栅条轴线相重合

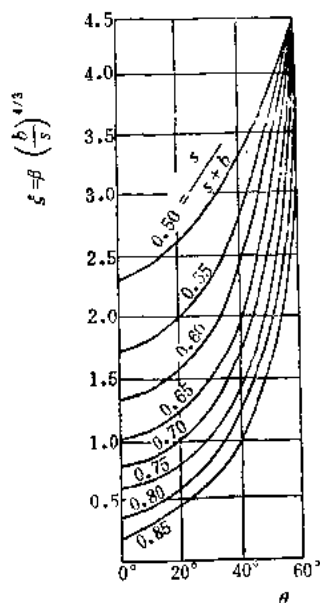


图 8-10 水流倾斜行近拦污栅时的水头损失

拦污栅的总水头损失，尚须包括水流经过支承框架的水头损失，而且支承框架所引起的水头损失远比栅条引起的水头损失要大。对钢筋混凝土支承框架（矩形断面）的水头损失约等于：

$$h_{w2} = 0.01 \times 10^{-3} Q \quad (\text{m}) \quad (8-3)$$

式中  $Q$ ——流量， $\text{m}^3/\text{s}$ 。

## 二、容许流速

为了保护拦污栅不受冰块和漂木的撞击，减少污物对拦污栅的堵塞机会，所以要限制栅前水流的行进流速。水流速度大，则水头损失大，清污困难，但拦污栅过水断面可以缩小，造价可以降低。反之，则水头损失小，清污容易，但拦污栅过水断面增大，拦污栅造价增大。一般来说，拦污栅应有足够的过水断面，其过栅流速在实际应用中常采用表8-5数值。

表 8-5 容 许 的 过 栅 流 速		
拦 污 栅 的 布 置 情 况 及 清 污 方 式		过 栅 流 速 (m/s)
浅 式 进 水 口	人工清污	0.6~0.8
	机械清污 (包括提栅清污)	1~1.25(当水流偏斜地流入时不超过1 m/s)
深 式 进 水 口	考虑清污	1~1.2(在个别情况下经过讨论也可达3~4 m/s)
	不考虑清污	0.5
在 泄 水 管 道 上		3~4

## 第四节 拦污栅的结构计算

### 一、设计荷载

拦污栅的设计荷载，一般要根据河流中污物的性质、数量以及清污方法来加以具体确定。根据规范规定，引水发电系统的拦污栅，一般采用水位差2~4m设计。为了确保拦污栅运行的安全，支承框架的荷载设计标准，可以略大于栅条的荷载设计标准。

拦污栅除承受局部堵塞的假定荷载外，有时需考虑漂浮物或潜没物体对拦污栅的撞击荷载作为校核荷载。根据动量守恒定律，可得撞击荷载  $P$  为：

$$P = \frac{mv}{nt} \quad (8-4)$$

式中  $P$ ——撞击力，N；

$v$ ——行进流速，m/s；

$t$ ——时间，可假定  $t=0.1\text{s}$ ；

$m$ ——漂浮物或潜没物体的质量， $\text{kg} \cdot \text{s}^3/\text{m}$ ；

$n$ ——受力栅条的数量。

## 二、栅条的强度计算

### 1. 每根栅条的单位长度荷载 $q$

$$q = 0.1 S_0 H \quad \text{N/cm} \quad (8-5)$$

式中  $S_0$ ——栅条的间距, cm;

$H$ ——设计水头, m。

如果考虑漂浮物或潜没物体的撞击力时, 可将撞击力施加于栅条的最不利位置, 另外再加上在正常工作状态下的水头损失所产生的均布荷载。

### 2. 强度计算

栅条的强度计算与一般梁的计算相同, 当求得弯矩  $M_{\max}$  时, 则栅条的弯曲应力为:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma] \quad (8-6)$$

式中  $W_x$ ——矩形栅条的抗弯截面模量,  $\text{cm}^3$ ;

$$W_x = \frac{bh^3}{6}$$

当栅条中间开螺栓孔时, 则矩形栅条的抗弯截面模量为:

$$W_x = \frac{b(h^3 - d^3)}{6h}$$

其中  $b$ ——栅条厚度, cm;

$h$ ——栅条截面的高度, cm;

$d$ ——螺栓孔的直径, 如图8-11;

$[\sigma]$ ——栅条拉伸和压缩的容许应力, Pa。

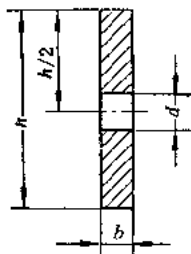


图 8-11 栅条中的螺栓孔

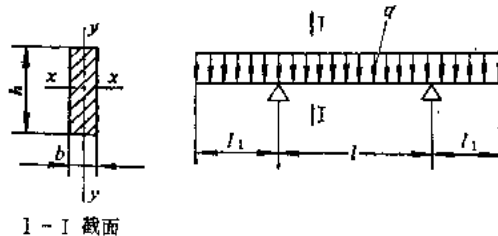


图 8-12 作用在栅条上的荷载

### 3. 稳定计算

栅条截面薄而高, 容易失去稳定, 因此栅条整体稳定的临界荷载  $P_{KP}$  与实际工作荷载  $Q$  之比 (即稳定安全系数  $K$ ) 应大于或等于 2:

$$P_{KP}/Q = K \geq 2 \quad (8-7)$$

式中  $Q$ ——实际工作荷载, N;

$$Q = ql; \quad (8-8)$$

$q$ ——栅条单位长度上的荷载, N/cm;

$l$ ——栅条荷载跨度, cm;

$P_{KP}$ ——栅条整体稳定的临界荷载, N。

长方形断面的栅条临界荷载分别按下列公式计算:

(1) 当简支梁上作用均布荷载时 (如图8-12所示):



$$P_{KP} = \frac{23.3}{l_1^2} \sqrt{EI_y G I_d} \quad (\text{N}) \quad (8-9)$$

(2) 当悬臂梁作用均布荷载时:

$$P_{KP} = \frac{12.85}{l_1^2} \sqrt{EI_y G I_d} \quad (\text{N}) \quad (8-10)$$

(3) 当集中荷载作用在简支梁跨中时:

$$P_{KP} = \frac{16.93}{l_1^2} \sqrt{EI_y G I_d} \quad (\text{N}) \quad (8-11)$$

(4) 当悬臂梁端部作用集中荷载时:

$$P_{KP} = \frac{4.01}{l_1^2} \sqrt{EI_y G I_d} \quad (\text{N}) \quad (8-12)$$

式中  $q$  —— 栅条单位长度上的荷载, N/cm;

$l$  —— 荷载跨度, cm;

$l_1$  —— 悬臂长度, cm;

$E$  —— 钢材的弹性模量  $2.1 \times 10^{11}$ , Pa;

$G$  —— 钢材的剪切弹性模量  $8.1 \times 10^{10}$ , Pa;

$I_y$  —— 栅条截面对  $y-y$  轴的惯性矩:

$$I_y = \frac{hb^3}{12} \quad (\text{cm}^4)$$

当栅条截面中间开有螺栓孔时:

$$I_y = \frac{b^3(h-d)}{12} \quad (\text{cm}^4)$$

其中  $d$  —— 螺栓孔的直径, cm;

$I_d$  —— 栅条截面的抗扭惯性矩:

$$I_d = \frac{hb^3}{3} \quad (\text{cm}^4)。$$

### 三、支承框架计算

支承框架结构各构件的计算与平面闸门的梁系构件计算相类似, 这里不再赘述。

## 第五节 拦污栅的清污

拦污栅的清污方法有人工清污和机械清污两种。小型水电站一般都采用人工清污, 但很多电站的运行人员都反映清污工作繁重, 而且效果不好, 洪水季节经常发生因拦污栅堵塞而停电, 为此有必要发展机械清污。

人工清污适用于浅式进水口, 一般栅前水深不宜超过4m。当进水口较深时, 可以采用双道拦污栅, 轮流将拦污栅起吊至平台上用人工加以清理。

当河道中漂浮物较多时, 可以设置导漂或浮网。导漂装置与水流的夹角不宜大于 $30^\circ$ 。如果河道中杂草或者半沉半浮的污物较多时, 要以清为主。有些河道中的污物随着季节变更而改变污物的性质, 很难决定污物性质的主次, 所以要综合考虑采取清污的措施。

## 第九章 启闭力计算与启闭机选择

### 第一节 概 述

闸门的启闭设备直接影响闸门的安全运行,也关系着电站大坝和厂房的安全及水能的有效利用。因此必须正确地选择启闭设备的型式和容量。需要指出,闸门的启闭设备也是起重机械的一种,但它具有荷载变化大、启闭速度低以及需要适应闸门启闭的特殊要求等一系列特点。影响闸门启闭力的因素很多,主要有闸门自重、摩擦力、静水作用力、动水作用力以及因启闭加速度引起的惯性力。

在多泥砂水流中工作的闸门,计算启闭力时应做专门研究。一般除考虑水压外,还应考虑泥砂影响,包括:泥砂引起的支承、止水摩阻力;泥砂与闸门间的粘着力和摩擦力;门上淤积泥砂的重量等。粘着系数和摩擦系数可通过试验确定。此外,还应适当加大安全系数,以克服泥砂局部阻塞增加的阻力。计算小型工程的闸门的启闭力时,安全系数应适当加大。

水利水电工程中常用的启闭设备通常按下列方法分类:

#### 一、按动力来源分类

##### 1. 人力操纵

人力操纵适用于小尺寸而不要求快速关闭的闸门上以及缺乏电力的地方。对于以水力操纵或电力操纵的坝顶闸门,为了坝身的安全,也往往辅以人力操纵设备。

##### 2. 水力操纵

水力操纵有三种不同的情况:

(1) 单纯的、不带控制性的水力操纵。它适用于单纯的防洪水库或综合性的低水头水库上。当闸门布置在使管理人员不易接近的坝顶上时,也往往采用单纯的水力操纵。它的优点是能自动启闭,不需要经常管理,维护费用少,工程简单。缺点是不能按下游河床容量或下游的需要供水,不能充分利用防洪库容,以致不能保持水能达到最大有效的利用。

(2) 带控制性的水力操纵:如屋顶门、鼓形门、环形门的操纵设备即是。在这些情况下,水流是通过机械系统的控制来工作的,因而可以保持闸门在任何开度,以调节水位、流量。

(3) 水力自动操纵。它利用机械装置来反映坝上游水位的变化而自动调整闸门开度。

##### 3. 电力操纵

由于电力操纵简单方便,是目前应用最为广泛的操作方式。

## 二、按安装方法分类

### 1. 固定式

固定式安装适用于闸门安设数量不多或要求快速遥控的情况。有时是闸门的特征规定了必需采用固定式启闭机，例如辊筒门以及各种油压操纵的闸门。

### 2. 移动式

移动式安装适用于闸门安设数量较多或闸门不要求快速启闭的情况，例如检修门，洪峰历时较长的坝顶门等，一般当闸门安设数量在4孔以上时就可以考虑选用移动式启闭机，不过在选择时应进行经济比较，在经济比较中除了操纵设备的造价及维护费用外，同时还应该考虑相应的附属工程如工作桥、闸墩等费用。一般说来，当闸门的数量超过6孔时采用移动式启闭机是比较经济的。采用移动式启闭机还有一个好处，就是在施工期间可以利用它来为建筑安装服务。必须指出，采用移动式启闭机时至少要同时安装2台互为备用。其次是移动式启闭机不能远距离操纵。

## 三、按动力传送方式分类

### 1. 液压传动

液压传动适用于深水事故门和工作门上。它能快速启闭或保持闸门在任意开度而对于震动起阻滞作用，其缺点是在启闭能力和行程上受到一定限制。

### 2. 机械传动

机械传动的传动方式很多，有皮带传动、链条传动、齿轮传动和蜗轮传动等，通常以后两种居多。

## 四、按操作方法分类

### 1. 近距操纵

近距操纵适用于闸门不要求快速启闭或非经常运用的情况，如检修门，洪峰历时较长的坝顶门。

### 2. 远距操纵

远距操纵适用于事故门。为了保护引水建筑物和电站机组的安全，避免事故扩大，这时设置在引水建筑物进口的闸门便需要远距离操纵，以保证快速关闭。在洪峰历时短而频繁出现的坝顶闸门上或经常运用的工作闸门上，也需要利用远距离控制。

## 五、按牵引方式分类

### 1. 索式

索式通常用钢丝绳牵引，因其连接方便，适应性强、自重小、价格低、维护简单，故目前应用最为广泛。

### 2. 链式

链式有环式链和片式链，链式牵引比较坚固，使用寿命较长，但自重大、价格高、制造麻烦，故目前国内很少采用。

### 3. 杆式

杆式有齿杆、螺杆和活塞杆。杆式牵引的最大优点是能拉能压，对某些需要闭门力的闸门特别适用。当闸门的提升高度不大时，杆长有限，加工不太困难，目前用得也很广泛。

## 第二节 平面闸门启闭力的计算

计算闸门的启闭力时,一般先计算闭门力,确定闸门是否需要加重再计算启门力,这样可以避免不必要的反复。当利用水柱压力关闭闸门时,需要计算它在接近全关时的持住力。

### 一、动水中启闭的闸门

动水中启闭的闸门,特别是潜孔闸门,在水压力的作用下,由于摩阻力大,有时仅靠自重就不能关闭,因此必须分别计算闭门力和启门力。这种闸门启闭力的确定,除闸门自重外,还有由于水压力作用而在滚轮或滑道支承处产生的摩擦阻力 $T_{ad}$ ,止水摩擦阻力 $T_{az}$ ,闭门时在门底的上托力 $P_t$ ,启门时由于门底水流形成部分真空而产生的下吸力 $P_x$ ,有时还有门顶上的水柱压力 $W_z$ 等。

动水中启闭的闸门(包括露顶闸门和潜孔闸门)启闭力按下面的公式计算:

#### 1. 闭门力计算

$$F_w = n_r(T_{ad} + T_{az}) - n_o G + P_t \quad (\text{N}) \quad (9-1)$$

计算结果为“正”值时,需要加重闸门才能关闭(加重方式有加重块、水柱或机械下压力等);为“负”值时,依靠自重可以关闭。

#### 2. 持住力计算

$$F_r = n'_o G + G_j + W_z + P_x - P_t - (T_{ad} + T_{az}) \quad (\text{N}) \quad (9-2)$$

#### 3. 启门力的计算

$$F_q = n_r(T_{ad} + T_{az}) + P_x + n'_o G + G_j + W_z \quad (\text{N}) \quad (9-3)$$

上两式中  $n_r$ ——摩擦阻力安全系数,一般选用1.2;

$n_o$ ——计算闭门力用的闸门自重修正系数,一般选用0.9~1.0;

$n'_o$ ——计算持住力和启门力用的闸门自重修正系数,一般采用1.0~1.1;

$G$ ——闸门自重, N, 当有拉杆时应计入拉杆重量;

$W_z$ ——作用在闸门上的水柱压力, N, 按式(2-10)计算;

$G_j$ ——加重块重量, N;

$P_t$ ——上托力, N, 按式(2-8)计算;

$P_x$ ——下吸力, N, 按式(2-9)计算;

$T_{ad}$ ——支承摩阻力,视支承的情况不同而异;

1) 当采用滚轮时,按使用轴承的不同分为两类;

a) 滑动轴承的滚轮摩阻力;

$$T_{ad} = \frac{P}{R}(f_r + f) \quad (\text{N}) \quad (9-4)$$

b) 滚动轴承的滚轮摩阻力;

$$T_{ad} = \frac{Pf}{R} \left( \frac{R_r}{d} + 1 \right) \quad (\text{N}) \quad (9-5)$$

2) 当采用滑道时,按下式计算;

$$T_{ad} = f_s P \quad (\text{N}) \quad (9-6)$$

$P$ ——作用在闸门上的总水压力,  $N$ ;

$r$ ——滚轮轴半径,  $cm$ , 如图9-1所示;

$R_1$ ——滚动轴承的平均半径,  $cm$ ;

$R$ ——滚轮半径,  $cm$ ;

$d$ ——滚动轴承滚柱直径,  $cm$ ;

$T_{\text{止}}$ ——止水摩阻力:

$$T_{\text{止}} = f_1 P_{\text{止}} \quad (N) \quad (9-7)$$

$f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ ——滑动摩擦系数, 计算持住力应取小值; 计算启门、闭门力应取大值, 其值可按表9-1选用;

$f$ ——滚动摩擦系数,  $cm$ ;

$P_{\text{止}}$ ——止水装置对埋固部分的压力,  $N$ ; 有以下几种情况:

1) 对于 $P$ 型橡皮止水, 如图9-2(a)所示, 则:

$$P_{\text{止}} = \frac{L_y}{2} L_y P + \frac{a L_y c P}{L - l} \quad (9-8)$$

式中  $L_y$ ——止水长度;

$P$ ——止水橡皮承受静水压力的平均强度;

$a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $L$ 、 $l$ ——如图9-2(a)所示;

2) 如果采用 $P_{40}$ A型止水橡皮, 则:

$$P_{\text{止}} = 6.75 P L_y \quad (9-9)$$

3) 如果采用 $P_{45}$ A型止水橡皮, 则:

$$P_{\text{止}} = 5.42 P L_y \quad (9-10)$$

式中  $P$ 、 $L_y$ ——符号意义同前。

4) 对于木制活动止水如图9-2(b)所示, 则:

$$P_{\text{止}} = (L - 0.5 l_1 - c) P L_y$$

式中  $L$ 、 $l_1$ 、 $c$ ——如图9-2(b)所示, 其余符号同前。

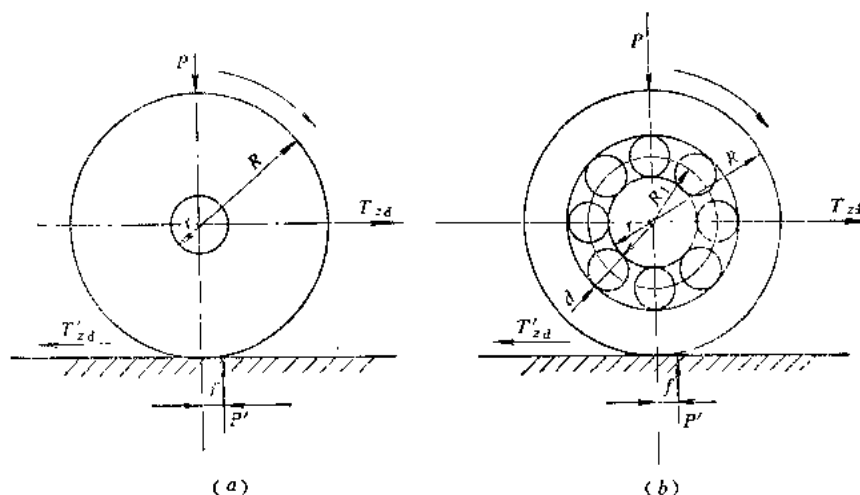


图 9-1 滚轮滚动时的作用力  
(a) 滚轮与轴间装滑动轴承; (b) 滚轮与轴间装滚动轴承

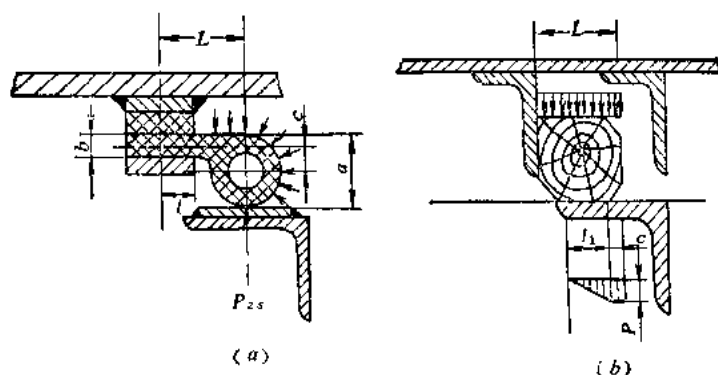


图 9-2 作用在止水上的水压力计算图  
(a)P型止水; (b)方木止水

表 9-1

摩 擦 系 数

种 类	材 料 及 工 作 条 件	最 大 系 数 值	最 小 系 数 值
滑动摩擦系数 $f$	1.钢对钢(干摩擦)	0.5~0.6	0.15
	2.钢对铸铁(干摩擦)	0.35	0.16
	3.木对钢(有水时)	0.65	0.3
	4.胶木滑道*,胶木对不锈钢; 在清水中:		
滑动摩擦系数 $f$	压强 $Q > 25000\text{N/cm}$	0.10~0.11	0.05
	压强 $Q = 25000 \sim 20000\text{N/cm}$	0.11~0.12	
	压强 $Q = 20000 \sim 15000\text{N/cm}$	0.12~0.13	
滑动轴承摩擦 系 数 $f$	1.钢对青铜(干摩擦)	0.3	0.16
	2.钢对青铜(有润滑)	0.25	0.12
	3.钢对压合胶木(有润滑)	0.16~0.2	0.08
	4.不锈钢对压合胶木(有润滑)	0.12~0.16	0.05
止水摩擦系数 $f$	1.橡皮对钢	0.65	0.3
	2.橡皮对不锈钢	0.5	0.2
滚动摩擦系数 $f$	1.钢对钢	0.1cm	
	2.钢对铸铁	0.1cm	

\* 试件表面粗糙度: 轨道工作表面为0.80; 胶木工作表面为1.6。

## 二、静水中开启的闸门

静水中开启的闸门启闭力计算除计入闸门自重外, 尚应考虑一定的水位差引起的摩阻力。露顶式闸门和电站尾水闸门可采用不大于 1 m 的水位差, 潜孔式闸门, 可采用 1~5 m 的水位差。并用下式验算:

$$F_Q \geq \Delta H \gamma A f_s + n_0 G \quad (9-11)$$

式中  $\Delta H$ ——计算水位差, m;

$\gamma$ ——水的容重,  $\text{N/m}^3$ ;

$A$ ——闸门挡水面积,  $m^2$ ;

其余符号同前。

### 第三节 弧形闸门启闭力的计算

影响弧形闸门启闭力的因素有: 门重、止水、转动支铰摩阻力、上托力、下吸力及支臂长度等。其中弧形闸门自重及其力臂的变化, 在启闭力计算中, 起主要作用。

#### 一、闭门力的计算

$$F_{\text{闭}} = \frac{1}{R_1} [n_r(T_{\text{止}}r_0 + T_{\text{止}}r_1) + P_zr_2 - n_gGr_2] \quad (\text{N}) \quad (9-12)$$

计算结果为“正”值时, 需加重; 为负值时, 依靠自重可以关闭。

#### 二、启门力的计算

$$F_{\text{启}} = \frac{1}{R_1} [n_r(T_{\text{止}}r_0 + T_{\text{止}}r_1) + n'_gGr_2 + G_1R_1 + P_zr_2] \quad (\text{N}) \quad (9-13)$$

式中  $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ ——分别为转动铰摩阻力、止水摩阻力、闸门自重、上托力和下吸力对弧形闸门转动中心的力臂,  $m$ ;

$R_1$ 、 $R_2$ ——分别为加重(或下压力)和启门力对弧形闸门转动中心的力臂,  $m$ ;

$T_{\text{止}}$ ——止水摩阻力, 按(9-7)式计算。当侧止水橡皮预留压缩量时, 尚应计入因压缩橡皮而引起的摩阻力;

其他符号同前。

弧形闸门在启闭运动过程中, 力的作用点、方向和力臂随运动而变化, 因此, 必要时可绘制启闭力过程线, 以决定最大值。

### 第四节 拦污栅启吊力的计算

拦污栅一般是在静水或者水压差较小的情况下起吊, 其起吊力计算如下:

#### 一、平面式拦污栅

##### 1. 静水中启吊的启吊力

在静水中启吊拦污栅时启吊力按下式计算:

$$F_{\text{启}} \geq n'_gG + n_m m \quad (\text{N}) \quad (9-14)$$

式中  $n_m$ ——污物的超重系数, 一般用1.2;

$m$ ——污物的重量, 按栅条间部分堵塞考虑, 堵塞面积可根据污物情况而定;

$G$ ——拦污栅自重;

$n'_g$ ——自重修正系数, 采用1.0~1.1。

##### 2. 动水中启吊的启吊力

在动水中启吊拦污栅时, 其启吊力除按(9-14)计算外, 尚应考虑拦污栅部分堵塞后

形成水位差的影响。选用水位差不得大于2m。计算式如下:

$$F_q \geq n'_0 G + n_m m + f_1 P \quad (\text{N}) \quad (9-15)$$

式中  $P$  ——水位差引起的荷载, N;

$f_1$  ——滑动支承摩擦系数;

其余符号同前。

## 二、回转式拦污栅

回转式拦污栅的起栅力  $P_q$  (见图 9-3) 按下式计算:

$$P_q = T_G + T_x + T_D \quad (\text{N}) \quad (9-16)$$

式中  $T_G$  ——垂直荷载  $G$  作用于栅体斜面上平行斜面的分力:

$$T_G = G \sin \alpha \quad (\text{N})$$

$T_x$  ——垂直荷载  $G$  作用于栅体斜面上垂直斜面的分力  $P_d$  加上回转时计算水头 (一般采用 0.5m) 的水压力  $P_l$  之和 (即滚子的正压力) 所产生的阻力

$$P_d = G \cos \alpha \quad (\text{N});$$

$T_D$  ——作用在调节轴承上的荷载  $G_d$  所产生的阻力,

垂直荷载  $G$ :

$$G = \frac{G_r}{2} + \frac{G_l}{2} + G_s \quad (\text{N}) \quad (9-17)$$

式中  $G_r$  ——栅叶自重, N;

$G_l$  ——板式滚子链自重, N;

$G_s$  ——捞起的冰块或污物重, N。

阻力  $T_x$ :

$$T_x = \frac{(f_1 d_s + 2f)(P_d + P_l)}{d} \quad (\text{N}) \quad (9-18)$$

式中  $d$  ——滚子直径, cm;

$d_s$  ——滚轴直径, cm;

$f_1$  ——滚子与滚轴间的滑动摩擦系数;

$f$  ——滚子与竖梁之间的滚动摩擦系数。

荷载  $G_d$ :

$$G_d = T_G + T_x + \frac{G_r}{2} + \frac{G_l}{2} + \Sigma G \quad (\text{N}) \quad (9-19)$$

式中  $\Sigma G$  ——链轮、大齿轮和传动轴的自重之和, t。

阻力  $T_D$ :

$$T_D = \frac{f_1 G_d d_s}{D} \quad (9-20)$$

式中  $d_s$  ——调节轴承处的传动轴直径, cm;

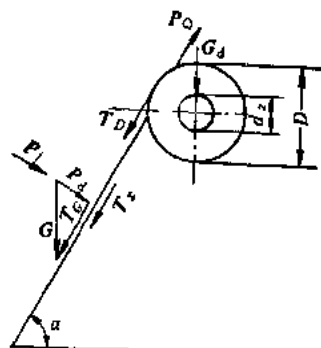


图 9-3 回转式拦污栅的起栅力



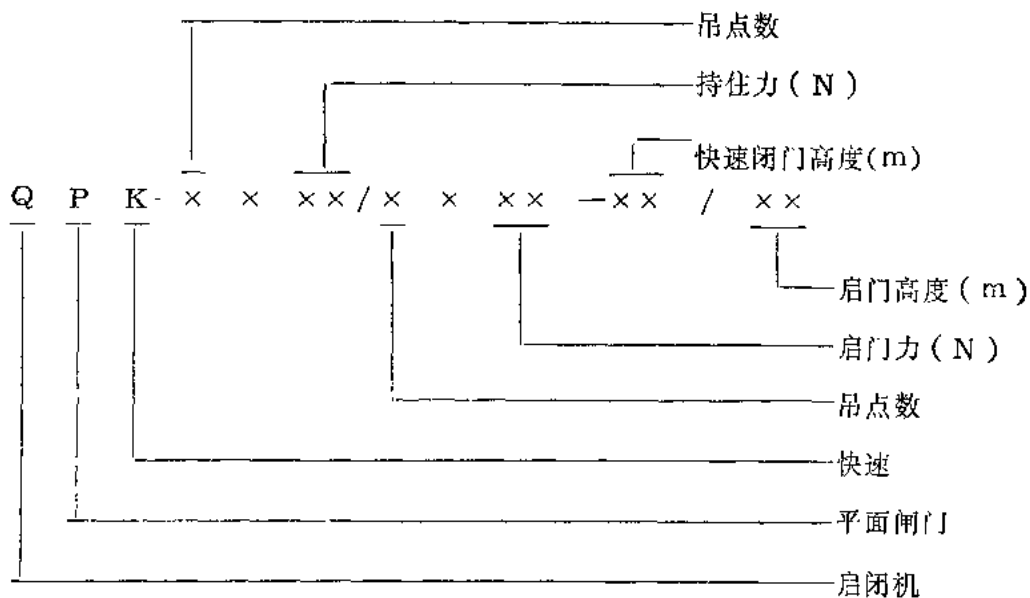
$D$ ——链轮节圆直径, cm;

$f_1$ ——传动轴与调节轴承之间的滑动摩擦系数。

## 第五节 启闭机的选择及几种常用启闭设备

### 一、启闭机的型号

我国生产的启闭机尚未完全实施标准化和系列化。现仅以已经机械工业部批准的QPK系列启闭机为例,说明启闭机型号的表示方法:



标记示例:

双吊点, 持住力 $2 \times 100 \times 10^4 \text{ N}$ , 启门力为 $2 \times 50 \times 10^4 \text{ N}$ , 启门高度11m, 快速闭门高度9m, 启闭机的型号为:

QPK-2×100/2×50-9/11。

### 二、启闭机的选择

选择启闭机时通常由下列几个要素决定:

#### 1. 启闭机的容量

由计算的启门力、持住力和闭门力决定。露顶式平面闸门顶部不溢流时, 启闭机容量只需按启闭力决定; 对于潜孔式平面闸门, 尚应计算持住力, 按它们之中的较大值选用; 弧形闸门的持住力不是控制因素, 因此只需按启闭力选用。选用启闭机的容量应等于或大于计算启闭力, 也允许略小于计算启闭力, 但不得超过5%。小型闸门由于闸门自重小, 施工制造、原材料供应等等往往受条件限制, 不能满足要求, 所以计算启闭力不易准确, 安全系数应取大一些。

#### 2. 启闭机的扬程

首先必须绘制启闭机和闸门的总布置图, 以确定闸门的启门高度。闸门启吊的最高位

置与最低位置之差，即为闸门的启门高度，它可分为正常启门高度与最大启门高度。

(1) 闸门的正常启门高度。可根据运行条件决定，并应满足：

- 1) 溢流闸门，一般提出水面以上1~2m；
- 2) 快速闸门，一般提到孔口以上0.5~1.0m；

(2) 闸门的最大启门高度。由于闸门检修的需要，往往将闸门在正常位置上再继续开启一段高度，使闸门底缘离开闸门门槽（平面闸门），或使闸门停留在便于检修的位置上（弧形闸门），这些位置上的高度即为闸门的最大启门高度。

露顶平面闸门的门槽高度一般等于2倍门高，门槽上面布置有闸门检修桥，其最大启门高度为闸门底缘离开检修桥桥面20cm以上的高度。潜孔平面闸门底缘离开检修室地面20cm以上的高度为闸门的最大启门高度。检修室地面一般高于水库正常高水位1m左右。

螺杆式启闭机由于螺杆长度有限，一般露顶式平面闸门的正常启门高度即为最大启门高度。检修时可以移走启闭机，将闸门吊出门槽检修。在螺杆长度允许的情况下，也可以同时考虑检修高度，但应避免将工作桥布置得过高。用螺杆式启闭机启闭潜孔平面闸门时，在螺杆下端可加拉杆和导轴承，但检修时不方便，须将水位降至低于导轴承的位置后才能拆装导轴承。工程实践中一般多采用闸门加配重，用卷扬式启闭机启闭潜孔平面闸门；对于潜孔弧形闸门，其底缘离开底槛至顶止水导板以上便于拆换底止水的距离，即为潜孔弧形闸门的最大启门高度。

### 3. 启闭机的速度

启闭机的启闭速度与闸门型式、尺寸、工作条件等有关；小尺寸、低水头的闸门启闭速度可以比大尺寸、高水头的闸门大；转动式闸门可以比平面式闸门大；电动操纵可以比人力操纵大；油压操纵可以比机械操纵大；水力操纵的速度随闸门型式而异，变化最大。一般采用的启闭速度是：用人力操纵时取0.02~0.1m/min；用电动操纵时取1~2m/min。快速闸门的关闭时间，应满足对机组和钢管的保护要求，闸门下降至接近底坎时，其速度不宜大于5m/min。

### 4. 闸门的型式

不同型式的闸门，应选择不同型式的启闭机。平面闸门可以通过滑轮组与卷扬式启闭机相联结；而露顶式弧形闸门的吊点通常设在面板前面下部，每个吊点只能通过一根钢丝绳与启闭机联结。因此，当启闭力相同时，弧形闸门启闭机比平面闸门启闭机的外形尺寸大，自重也较重。所以用弧形闸门启闭机启闭平面闸门是不合理的。但当弧形闸门的吊点设置在门顶或门后时，同样可以选用平面闸门的启闭机。卷扬式启闭机只能用于闸门能靠自重或加重关闭的地方，当需用机械加压的方式才能关闭的闸门，需选用螺杆式启闭机或油压启闭机。

此外，选择启闭机时还须考虑孔口的数量，当孔口数量较多（一般多于4孔以上）且不需要在短时间内全部开启闸门时，可选用移动式启闭机。

## 三、几种常用的启闭机

常用的启闭机有螺杆式、固定卷扬式、台车式、门式和油压式等。

### 1. 螺杆式启闭机

螺杆式启闭机多用于操作需要下压力的闸门。大起重量螺杆启闭机多用于操作深孔弧形闸门，但需设置可摇动支承或设置导轨及铰接吊杆与闸门连接。为避免螺杆超载压弯，应设安全保护装置：电动螺杆启闭机应设行程限位开关，手动螺杆启闭机应设安全联轴节。

小型螺杆启闭机的外形如图9-4所示，螺杆支承在承重螺母内，螺母固定在齿轮箱内的伞形齿轮或蜗轮上，当摇动手摇把时，通过齿轮或蜗轮系的传动而转动承重螺母，从而升降螺杆和闸门。

螺杆启闭机的螺杆发生弯曲时，启闭机即失去了启闭能力，因此有必要校核螺杆的稳定性。

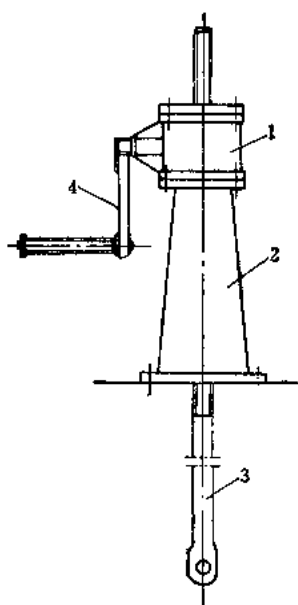


图 9-4 螺杆式启闭机

1—齿轮箱；2—支座；3—螺杆；4—手摇把

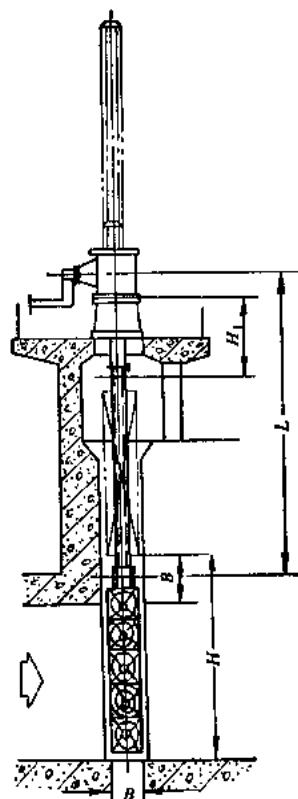


图 9-5 螺杆启闭机布置图

根据选用的螺杆启闭机螺杆内径，由启闭机闸门总布置图求出  $L$ （如图 9-5 中的  $L$ ）和计算闭门力  $T$ ，可校核螺杆的稳定性。

螺杆、螺母一端相当于固定端，与闸门联结的另一端相当于铰接，当螺杆的长细比  $\lambda = \frac{0.7L}{i} \geq 100$ （ $i$ ——为螺杆危险断面的回转半径  $\frac{d_x}{4}$  cm）时，其允许下压力可用下式计算：

$$P = \frac{\pi^2 E_s J}{(0.7L)^2 K} \quad (9-21)$$

式中  $E_s$ ——钢的弹性模量为210, GPa;

$J$ ——螺杆危险断面的惯性矩,

$$J = \frac{\pi d_s^4}{64};$$

$d_s$ ——螺杆内径, cm;

$L$ ——闸门关闭时, 螺母中部至闸门吊耳孔中心的距离, cm;

$K$ ——稳定安全系数,  $K=2.5\sim 4$ 。

将上述有关数据代入上式, 经整理后得出的允许压力公式为:

$$P \leq 8.3 \times 10^5 \times \frac{d_s^4}{L^3} \quad (9-22)$$

当螺杆长度不够时, 可在螺杆下加拉杆并加导轴承, 此时, 上式中的  $L$  为螺母中部至导轴承中部的距离。计算拉杆时,  $L_1$  为导轴承间距或导轴承与闸门吊耳孔的间距。

拉杆相当于两端为铰接的压杆, 且  $\lambda = \frac{L_1}{i_1} \geq 100$  ( $i_1$  为拉杆危险断面的回转半径  $\frac{d_1}{4}$  cm) 时, 其允许压力可用下式计算:

$$P_1 = \frac{\pi^2 E_s J}{L_1^2 K} \quad (9-23)$$

式中  $K$ ——稳定安全系数,  $K=2.5\sim 4$ ;

其余符号意义同前。

将以上有关数据代入公式 (9-23) 中, 则  $P_1$  可用下式计算:

$$P_1 \leq 4.1 \times 10^5 \times \frac{d_1^4}{L_1^3} \quad (9-24)$$

式中  $d_1$ ——拉杆直径, cm。

此外, 选用螺杆启闭机时, 要避免忽视闭门力的选择, 如果允许的闭门力小于闸门所需闭门力, 往往致使螺杆超载而弯曲。

在安装和运行中的疏忽, 往往也会导致螺杆弯曲。螺杆发生弯曲的原因, 大致有以下几点:

- (1) 安装螺杆启闭机时, 螺杆自由垂直偏差大于0.2mm/m;
- (2) 施工时, 门槽和底坎凹凸不平;
- (3) 运行时闸门卡阻, 操作人员强行加压;
- (4) 闸门底止水破坏或底槛有异物, 虽然闸门已关到底, 操作人员继续加压, 致使螺杆超载, 丧失稳定面弯曲。

因此, 在安装和运行中应避免这些现象发生。

各地生产的螺杆式启闭机部分产品系列资料列于表9-2, 可供选用参考。

## 2. 卷扬式启闭机

固定卷扬式启闭机的使用最广泛, 用于操作靠自重或加重关闭和要求在短时间内全部开启的闸门, 一般布置为一机一门, 也可布置为一机多门型式。我国的定型产品计有两

表 9-2

螺杆式启闭机产品目录

型 式	型 号	启闭能力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )		启门高度 (m)	启门速度 (m/min)		手摇(推) 人 数	电 动 机	外形尺寸 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) (mm)	重量 (kg)	生 产 厂
		启	闭		手 动	电 动	上 升	下 降			
手力螺杆式	QP1S0.5	0.5			0.1		1	1	350 $\times$ 350 $\times$ 184	*25	福建省惠安水工机械厂
螺杆式	LQ 0.5	0.5		1	0.32				405 $\times$ 180 $\times$ 133	*12	河北省黄骅县五一机械厂
手摇螺杆式	GQ0.5	0.5		按定户要求			1	1	237 $\times$ 160 $\times$ 81	8.6	广西南宁地区农机厂
螺杆式	LQT-0.5T	0.5							200 $\times$ 300 $\times$ 98	17	甘肃省张掖农业机械厂
螺杆式	PL1 $\times$ 1	1	1	1.3	0.16			1	180 $\times$ 180 $\times$ 150	37	肇庆水利机械厂
螺杆式	LQ1	1		1.5	0.32				422 $\times$ 220 $\times$ 145	*18	河北省黄骅县五一机械厂
手摇螺杆式	GQ1	1		按定户要求			1	1	380 $\times$ 380 $\times$ 118	20	广西南宁地区农机厂
螺杆式	XLQ-1	1		2			1	1	210 $\times$ 210 $\times$ 110	42	湖北省咸宁机械厂
螺杆式	LQT-1T	1					1	1	200 $\times$ 200 $\times$ 115	26	甘肃省张掖农业机械厂
螺杆式	1A 1.5	1.5	1.3	2	0.72		1	1	500 $\times$ 500 $\times$ 180		自贡市水利机械厂
手摇螺杆式	QP1S1.5	1.5			0.35		1	1	500 $\times$ 500 $\times$ 216	*35	福建省惠安水工机械厂
螺杆式	LQT-1.5T	1.5					1	1	250 $\times$ 250 $\times$ 120	37	甘肃省张掖农业机械厂
螺杆式	PL1 $\times$ 2	2	2	1.3	0.12		1	1	180 $\times$ 180 $\times$ 150	62	肇庆水利机械厂
螺杆式	LQ-2	2		2.5	0.37				435 $\times$ 240 $\times$ 155	*23	河北省黄骅县五一机械厂
螺杆式	GQ2	2		按定户要求			1	1	1000 $\times$ 1000 $\times$ 165	60	广西南宁地区农机厂
手摇螺杆式	XLQ-2	2	2.5	3					380 $\times$ 380 $\times$ 180	48	湖北省咸宁机械厂
螺杆式	1A-2.5T	2.5			0.6				300 $\times$ 300 $\times$ 161	*35	浙江省余姚县水利机械厂
螺杆式	LQT-2.5T	2.5							300 $\times$ 300 $\times$ 122	51	甘肃省张掖农业机械厂
手摇螺杆式	1A-3	3	3	2.5	0.72		1	1	600 $\times$ 600 $\times$ 222.5		自贡市水利机械厂
手摇螺杆式	QP1S3	3			0.95		2	1	650 $\times$ 650 $\times$ 263	*75	福建省惠安水工机械厂
螺杆式	PL1 $\times$ 3	3	3	1.8	0.03		1	1	320 $\times$ 252 $\times$ 173	75	肇庆水利机械厂
螺杆式	LQ-3-1	3		3	0.15				880 $\times$ 260 $\times$ 755	*116	河北省黄骅县五一机械厂
手摇螺杆式	GQ3	3		按定户要求			1	1	820 $\times$ 820 $\times$ 252	95	广西南宁地区农机厂
螺杆式	XLQ-3	3	3	3					385 $\times$ 340 $\times$ 227	100	湖北省咸宁机械厂
手电两用螺杆式	LQ-3	3	3	3	0.076	0.313			726 $\times$ 250 $\times$ 850	*150	河北省黄骅县五一机械厂
手电两用螺杆式	QPL3	3			0.015	0.185	2	1	401 $\times$ 423 $\times$ 310	*52	福建省惠安水工机械厂
手推螺杆式	1A-5	5	4	4	0.8		1	1	500 $\times$ 500 $\times$ 665		自贡市水利机械厂 浙江省余姚县水利机械厂

续表

型 式	型 号	启闭能力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )		启门高度 (m)	启门速度 (m/min)		手摇(推)人		电 动 机		外形尺寸 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) (mm)	重量 (kg)	生 产 厂
		启	闭		手 动	电 动	上升	下降	型 号	功率 (kW)			
手动螺杆式	QPLS5	5			0.2		2	1			850 $\times$ 850 $\times$ 308	*245	福建省惠安水工机械厂
螺杆式	PL1 $\times$ 5	5	5	2.3	0.03		1	1			425 $\times$ 360 $\times$ 175	196	肇庆水利机械厂
螺杆式	5LS	5	3									850	江西水力发电设备制造厂
螺杆式	5LQ	5			0.04		2				800 $\times$ 400 $\times$ 1350	350	江西赣南水利机械厂
螺杆式	XLQ-5	5			0.05						610 $\times$ 380 $\times$ 316	200	湖北省咸宁机械厂
手电两用螺杆式	LQ-5	5	1.4~4.2	按用户要求定	0.012	0.190	1	1	JO2-22-4	1.5	520 $\times$ 650 $\times$ 815	*176	白贡市水利机械厂
手电两用螺杆式	QPL5	5			0.015	0.185	2	1	JZ2-11-6	2.2	471 $\times$ 482 $\times$ 360	*85	福建省惠安水工机械厂
手电两用螺杆式	GQ5	5		按用户要求定			1	1	JO2-31-6	1.5	825 $\times$ 825 $\times$ 352	565.5	广西南宁地区农机厂
手电两用螺杆式	QP1 $\times$ 6	6	5	3.5~4.5	0.032	0.16	1	1	JZ2-11-6	2.2	1325 $\times$ 570 $\times$ 5000	485	肇庆水利机械厂
手电两用螺杆式	LQ-7.5	7.5	2.3~7	按用户要求定	0.016	0.235	1	1	JO2-31-4	2.2	620 $\times$ 700 $\times$ 910	*280	白贡市水利机械厂
手电两用螺杆式	GQ7.5	7.5		按用户要求定			2	2	JO2-32-6	2.2	2450 $\times$ 2450 $\times$ 303	613	广西南宁地区农机厂
手电两用螺杆式	LQ-8	8		4.5	0.021	0.164			JO2-31-4	2.2	1200 $\times$ 480 $\times$ 938	*322	河北省黄骅县五一机械厂
手动螺杆式	BLQ-10	10	5	3.5~4.5	0.01		2	1				540	本溪重型汽车制造厂
螺杆式	10LQ	10			0.025		2	2			850 $\times$ 430 $\times$ 1440	490	江西赣南水利机械厂
人力螺杆式	1A-10	10	8		1						600 $\times$ 600 $\times$ 343	*146	浙江省余姚县水利机械厂
螺杆式	10LS	10	7.6									980	江西水力发电设备制造厂
手电两用螺杆式	LQ-10	10	2.3~7	按用户要求定	0.016	0.235	1	1	JO2-32-4	3	620 $\times$ 750 $\times$ 1010	*300	白贡市水利机械厂
双吊点手电两用螺杆式	LQ-5 $\times$ 2	10											河北省黄骅县五一机械厂
手电两用螺杆式	QPL10	10		3.5	0.032	0.384				4		*275	福建省惠安水工机械厂
手电两用螺杆式	PL1 $\times$ 10	10	8		0.015	0.22	4	2	JZ2-12-6	3.5	691 $\times$ 639 $\times$ 411		浙江省余姚县水利机械厂
手电两用螺杆式	10LD	10	7.6	3.5~4.5	0.032	0.2	1	1	JZ2-12-6	3.5	1430 $\times$ 710 $\times$ 6100	575	肇庆水利机械厂
手电两用螺杆式	GQ-10	10		2.5~4.5	0.025	0.128			JTC561A	2			江西水力发电设备制造厂
手电两用螺杆式	BLQ-10	10	5	3.5~4.5	0.01	0.09	2	2	JO2-32-6	2.2	900 $\times$ 925 $\times$ 920	620	广西南宁地区农机厂
手电两用螺杆式	XLQ-10	10		4.5	0.012	0.09	2	2	JO2-32-6	2.2	1540 $\times$ 1008 $\times$ 483	600	本溪重型汽车制造厂
双吊点手电两用螺杆式	PL2 $\times$ 6	12	10	3.5~4.5	0.032	0.16	2	2	JZ2-12-6	3.5	690 $\times$ 490 $\times$ 341	322	湖北省咸宁机械厂
											3896 $\times$ 675 $\times$ 5600	810	肇庆水利机械厂

续表

型 式	型 号	启闭能力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )		启 闭 高 度 (m)	启 门 速 度 (m/min)		手 操 (推) 人 数		电 动 机		外形尺寸 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) (mm)	重 量 (kg)	生 产 厂
		启	闭		手 动	电 动	上 升	下 降	型 号	功 率 (kW)			
手电两用螺杆式 螺杆式	LQ-12	12			0.021	0.164				2.2	1200 $\times$ 490 $\times$ 938	*322	河北省黄骅县五一机械厂
	15LS	15	10~15	4.5								1050	江西水力发电设备制造厂
	LA-15T	15	12		1						800 $\times$ 700 $\times$ 313	*240	浙江省余姚县水利机械厂
	BLQ-15	15	8	3.5~4.5	0.02		2	2				620	本溪重型汽车制造厂
	15LQ	15			0.02		2	2			850 $\times$ 430 $\times$ 1440	535	江西赣南水利机械厂
手电两用螺杆式 螺杆式	LQ-15	15	9	按用户要求定	0.0166	0.26	2	2	JO2-42-4	5.5	842 $\times$ 800 $\times$ 1037	*350	自贡市水利机械厂
	QPL15	15			0.015	0.22	4	2	JZ2-12-6	3.5		*275	河北省黄骅县五一机械厂
	15LD	15	10~15		0.014	0.11			JCH-562	2.6	691 $\times$ 639 $\times$ 411	1200	福建省惠安水利机械厂
	2A-15T	15	12		0.12	1.98			JO2-51-6P	5.5	700 $\times$ 790 $\times$ 315	*300	江西省余姚县水利机械厂
	GQ-15	15					4	4	JO2-42-6	4	1070 $\times$ 770 $\times$ 960	1100	广西南宁地区农机厂
手电两用螺杆式 手电两用螺杆式	BLQ-15	15	8	2.5~5	0.02	0.172	3	2	JO2-32-6	2.2	1710 $\times$ 1300 $\times$ 526	700	本溪重型汽车制造厂
	XLQ-15	15		4.5	0.012	0.136			JO2-41-6	3	820 $\times$ 750 $\times$ 421	350	湖北省咸宁机械厂
	PL1 $\times$ 10	16	12	3.5~5	0.028	0.24	1	1	JZ2-21-6	5	1430 $\times$ 710 $\times$ 6100	609	肇庆水利机械厂
	LQ-8 $\times$ 2	16		4.5	0.01	0.126				4			河北省黄骅县五一机械厂
	LQ-20	20	3.3~13.2	按用户要求定	0.0214	0.305	2	2	JO2-51-4	7.5	1000 $\times$ 1000 $\times$ 120	*450	自贡市水利机械厂
手电两用螺杆式 手电两用螺杆式	QPL20	20			0.015	0.23	4	2	JZ2-21-6	5	764 $\times$ 790 $\times$ 467	*400	河北省黄骅县五一机械厂
	PL2 $\times$ 10	20	16	3.5~4.5	0.032	0.2	2	2	JZ2-21-6	5	5220 $\times$ 710 $\times$ 5100	1150	福建省惠安水利机械厂
	20LD	20	13~20		0.016	0.11			JCH-562	2.6	800 $\times$ 500 $\times$ 300	1350	肇庆水利机械厂
	LQ-10 $\times$ 2	20		4.5	0.01	0.126				4			江西水力发电设备制造厂
	2A-20T	20	15		0.12	2.38			JO2-52-0P	7.5	900 $\times$ 913 $\times$ 330	*550	河北省黄骅县五一机械厂
手电两用螺杆式 手电两用螺杆式	QPL-2 $\times$ 10T	20	14		1	2.7			JO2-41-6P	6	1780 $\times$ 775 $\times$ 307	*400	浙江省余姚县水利机械厂
	BLQ-20	20	10	3.5~4.5	0.014	0.18	4	2	JO2-41-6P	3	2145 $\times$ 1710 $\times$ 685	800	本溪重型汽车制造厂
	20LS	20			0.016	0.2	2	2		7.5	900 $\times$ 500 $\times$ 1950	580	江西赣南水利机械厂
	XLQ-20	20		4.5	0.012	0.136			JO2-41-4	4	820 $\times$ 750 $\times$ 421	639	湖北省咸宁机械厂
	BLQ-20	20	10	3.5~4.5	0.014		1					720	本溪重型汽车制造厂
手电两用螺杆式 螺杆式	20LS	20	13~20									1100	江西水力发电设备制造厂

注 \*表示不包括螺杆及电动机。

类：即供平面闸门使用的一类和供弧形闸门使用的一类。平面闸门卷扬式启闭机分单吊点和双吊点两种，弧形闸门卷扬式启闭机则仅有双吊点一种。两类启闭机在构造布置上基本相同，只是平面闸门的启闭机采用滑轮组装置，以2根以上的钢丝绳与闸门吊点联结，从而使启闭机所需的功率大为减少；机重和价格也相应降低。而卷扬式弧形闸门启闭机是以1根钢丝绳与闸门吊点相联结。但在实际选用时，并不须考虑定名的因素，而可根据实际情况确定机型。当弧形闸门的吊点设置在门顶或门后时，同样可选用平面闸门的启闭机。

(1) 平面闸门卷扬式启闭机的选用。根据设计计算的闸门启门力、持住力和闭门力来选用。当闸门的关闭能依靠其门体自重克服各项摩擦阻力而下降，且其安全系数符合规定要求时，可选用一般卷扬式平面闸门启闭机。对于水利水电工程进水口快速闸门的启闭，则应选用QPK系列卷扬式快速平面闸门启闭机。该系列的启闭机，均有快慢两种速度，慢速是正常工作情况下的启闭速度，是在电动机通电情况下的运行，快速只用在事故情况下运行，电动机不通电，它是靠闸门自重（或水柱压力）等荷载作用下，带动机构运行作快速下降，其下降的速度受调速器控制，不得超过5m/min。不论露顶式或潜孔式闸门，均根据孔高或闸门要求的最大开启高度决定启闭机的扬程。小型闸门的卷扬式启闭机，一般采用手摇，在有电源的情况下，可采用电动，但仍须附加手摇装置。在订货时，需根据闸门需要的启门力、启闭行程、单吊点或双吊点以及运行方式等因素，来选定平面闸门卷扬式启闭机的型号，同时附加说明是否手摇或手摇和电动两用。在选用双吊点时，还需注明吊点距。最后，根据所选定的启闭机型号，按产品说明书所注的动滑轮组装尺寸，设计闸门的吊耳，按机体轮廓尺寸，配置底脚锚栓及启闭平台。如系采用手摇和电动两用，还应考虑启闭平台的手摇操作位置等。

(2) 弧形闸门卷扬式启闭机的选用。根据弧形闸门设计计算的启门力，并核算门体活动部分的自重能够关闭闸门，且满足一定的安全系数，选用合适的启闭机型号。（一般露顶式弧形闸门均可借自重关闭。只有在水头较大的深孔弧形闸门，有时才需外加闭门力，在这种情况下，就需考虑选用螺杆式启闭机或油压式启闭机）。弧形闸门启闭平台在水流方向位置的要求，需照顾到闸门在关闭和最大开启高度的两种情况。务使启门钢丝绳在闸门最大开启高度时，不致与门体面板形成过大的夹角。至于其它在选用启闭机时的要点，均与平面闸门相同，可以参考。

图9-6为一单吊点启闭机。当闸门采用双吊点时，机体可作相应的更动，有3种方案：

(a) 机械同步：将两个分列式的机体用连接轴连起来，以保持两个吊点同步升降。这种方法构造简单，工作安全可靠，是目前用得较多的同步方式。

(b) 电轴同步：按电气原理，保持2台电动机具有相同的转速和相位。这种方法需要增添一些电气设备，目前用得不多，主要用在空间不允许采用连接轴の場合。

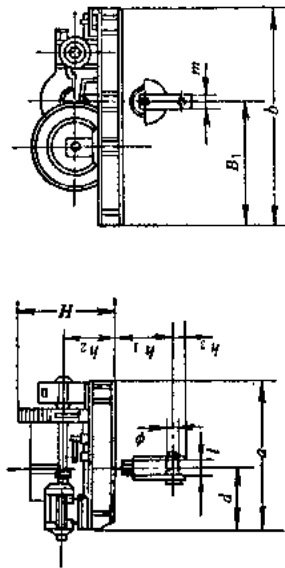
(c) 滑轮同步：将启闭机的卷筒分为两半，钢丝绳从卷筒两端引出，经过定滑轮、导向滑轮和动滑轮的调整达到2个吊点同步的目的。滑轮同步的布置见图9-7，其钢丝绳的绕法见图9-8，这种方法结构简单，造价低廉，在广东地区用得较多。

平面闸门和弧形闸门启闭机的定型系列产品技术特性及其主要尺寸分别列于表9-3至表9-12。



表 9-3

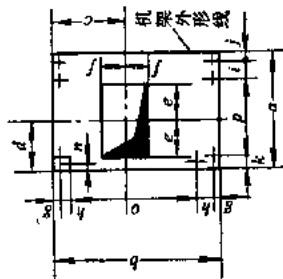
平面闸门单吊点卷扬式启闭机(中央定型系列)技术特性表



吊点	启门力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )	启门高度 (m)	启门速度 (m/min)	滑轮 倍率	钢丝绳规格	电动机		减速机		制动器型号	电磁铁型号	卷筒 直径 (m)	自重 (t)	参考价 格 (万元/台)
						型 号	功率 (kW)	型 号	速 比					
单	5	5	2.38	2×2	6×37+1-φ13-150	JZ-11-6	2.7	PM-350	48.57	JWZ-200/100	MO-1006	0.4	1.1	0.65
	10	5	2.1	2×2	6×37+1-φ1.75-150	JZ-12-6	4.0	PM-350	48.57	JWZ-200/100	MO-1006	0.4	1.55	0.72
	20	5	1.51	2×4	6×37+1-φ17.5-160	JZ-21-6	6.2	PM-400	40.17	JWZ-200	MO-2006	0.4	2.1	1.00
吊	30	5	1.35	2×4	6×37+1-φ21.5-170	JZ-22-6	9	仿PM-500	48.57	JWZ-300/200	MO-2006	0.5	3.112	1.40
	50	10	1.324	2×6	6×37+1-φ21.5-170	JZ-41-8	13.5	仿PM-650	40.17	JWZ-300/200	MO-2006	0.8	6.0	2.15

表 9-4

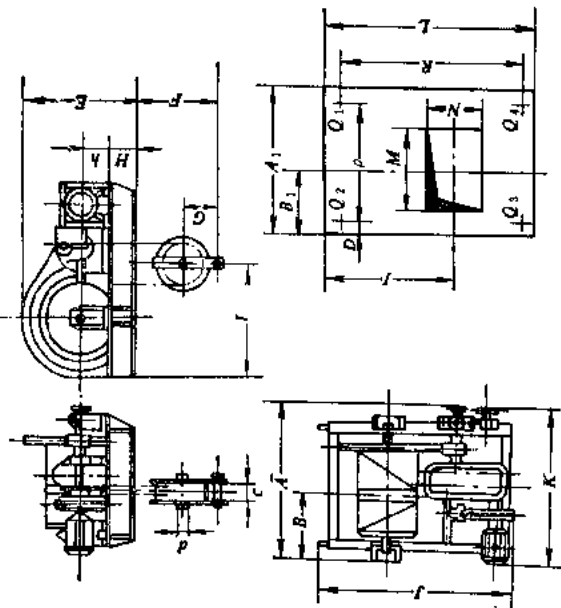
平面闸门单吊点卷扬式启闭机(中央定型系列)外形及基础布置尺寸



吊点	启门力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )	外形尺寸(mm)					悬挂点(mm)					基 础 布 置 (mm)												
		H	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	a	B <sub>1</sub>	L	h <sub>3</sub>	$\phi$	m	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	n	p	o
单吊点	5	754	1000	460	930	890	155	60	40	100	930	1638	890	325	200	250	35	0	0	145	35	0	750	1568
	10	859	685	515	1093	990	155	80	40	130	1083	1740	990	400	280	350	40	0	0	155	40	0	888	1660
	20	948	950	570	1530	1000	195	100	80	160	1530	1840	1000	595	450	300	35	0	0	175	35	0	1320	1770
	30	1236	1030	720	1783	1495	195	120	90	180	1733	2770	1495	720	500	450	40	120	130	135	160	40	1308	2450
	50	1642	1420	1040	2343	1750	195	180	100	290	2343	3410	1750	944	1000	500	30	100	100	130	45	45	1968	3150

表 9-5

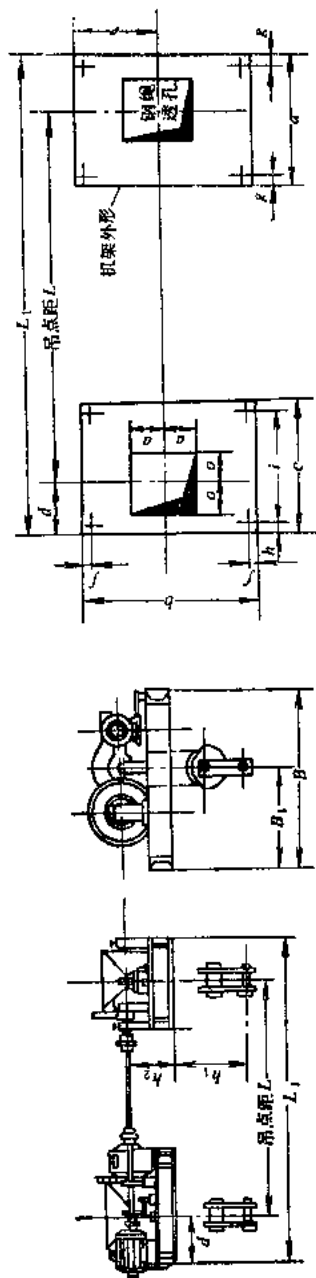
平面闸门单点卷扬式启闭机 (上重QPQ3系列) 技术特性、基础布置及作用荷载表



吊点	型 号	起门力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )	起门高度 (m)	起门速度 (m/min)	吊点中心距 (m)	主 要 尺 寸 (mm)														基 础 荷 载 ( $\times 10^4 \text{N}$ )				
						电 动 机		卷筒直径 (mm)	双联滑轮组		机器重量 (kg)	销轴直径 d (mm)	地脚螺栓规格 (mm)											
						型 号	(kW)		倍	率														
单 吊 点	QPQ3-8	8	8	2.16		JZ212-6	3.5	915	2	950	60	M20×400												
	QPQ3-16	16	8	2.24		JZ222-6	7.5	930	2	1760	80	M24×500												
	QPQ3-25	25	9	1.91		JZ231-8	7.5	700	2	2800	90	M24×500												
	QPQ3-40	40	9	1.36		JZ241-8	11	705	4	4300	100	M30×630												
单 吊 点	QPQ3-8	1262	1130	564.5	534.5	143	125	855	1100	310	285	190	685	1335	1442	1260	750	550	880	1200	2000	2250	2830	2670
	QPQ3-16	1484	1350	678	638	179	150	1080	1200	330	360	240	903	1600	1540	1545	800	600	1050	1485	3720	4150	6060	5430
	QPQ3-25	1700	1520	779.5	719.5	217	140	1215	1300	465	390	265	1175	2081	1700	1970	1000	780	1240	1500	6000	6600	9270	8370
	QPQ3-40	2276	1911	904	904	284	45	1387	1600	510	520	315	1180	2155	2276	1965	1400	1070	1821	1650	9260	10260	15160	13560

平面闸门双吊点卷扬式启闭机（中央定型系列）技术特性及基础布置尺寸表

表 9-6

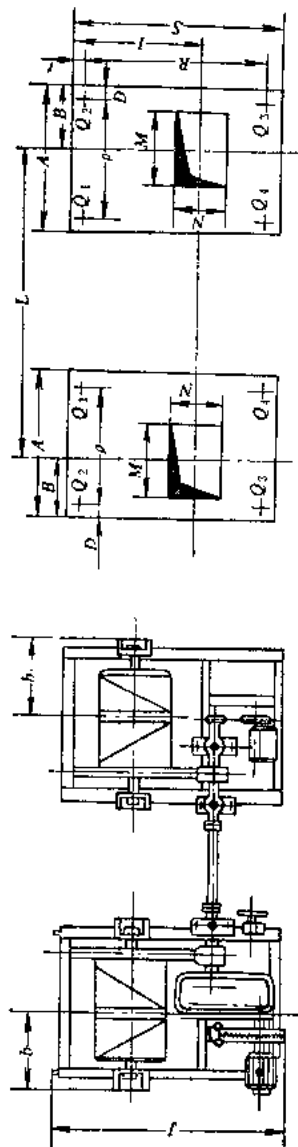
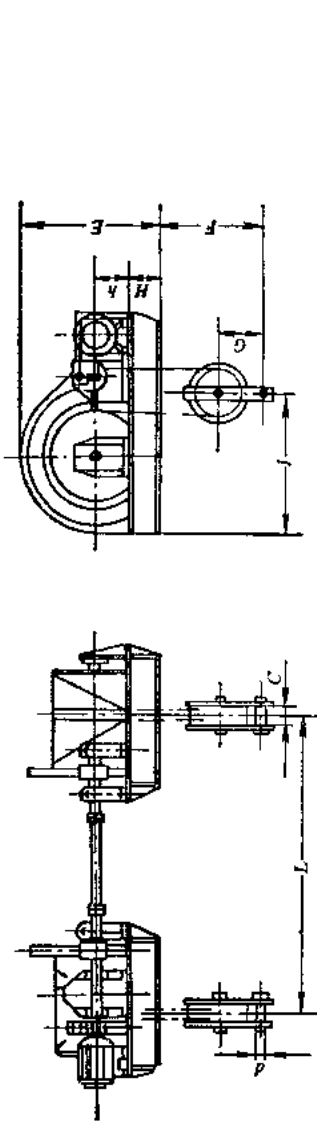


吊点	启门力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )	启门高度 (m)	启门速度 (m/min)	滑轮 倍率	钢丝绳规格	电动机		减速箱		制动器型号	电磁铁型号	卷筒 直径 (m)	自重 (t)	参考价格 (万元/台)
						型号	功率 (kW)	型号	速比					
双吊点	2×5	5	2.1	2×2	6×37+1-φ13-150	JZ-12-6	4	PM 350	48.57	JWZ200/100 <sup>①</sup>	MO-1006	0.4	2.2	0.90
	2×7.5	5	2.17	2×2	6×37+1-φ15.5-160	JZ-21-6	6.2	PM-400	48.57	JWZ200	MO-2006	0.4	2.332	1.00
	2×10	5	2.17	2×2	6×37+1-φ17.5-160	JZ-22-6	9	PM-500	48.57	JWZ200	MO-2006	0.4	2.822	1.18
	2×15	5	1.31	2×4	6×37+1-φ15.5-160	JZ-22-6	9	PM-400	40.17	JWZ200	MO-2005	0.4	2.832	1.33
	2×25	6	1.38	2×4	6×37+1-φ19.5-160	JZ-31-6	13.5	PM-500	48.57	JWZ200	MO-2006	0.5	5.09	1.69

吊点	启门力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )	外形尺寸 (mm)				基础				布置 (mm)							
		L <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	a	b	c	d	e	f	g	h	i	q	O
双吊点	2×5	L+650	1700	960	1000	415	705	1700	946.5	325	960	35	35	35	751.5	250	220
	2×7.5	L+720	2000	1005	665	565	795	2000	1066	360	1005	35	35	35	857	350	350
	2×10	L+807	2120	1095	685	615	890	2120	1180	405	1095	35	35	35	965	350	350
	2×15	L+990	1820	1010	1000	565	1065	1820	1325	495	1030	35	35	35	1125	300	400
	2×25	L+1166	2280	1285	910	645	1233	2280	1529	583	1265	40	40	40	1300	300	450

表 9-7

平面闸门双吊点卷扬式启闭机(上重QPQ3系列)技术特性、基础布置及作用荷载表

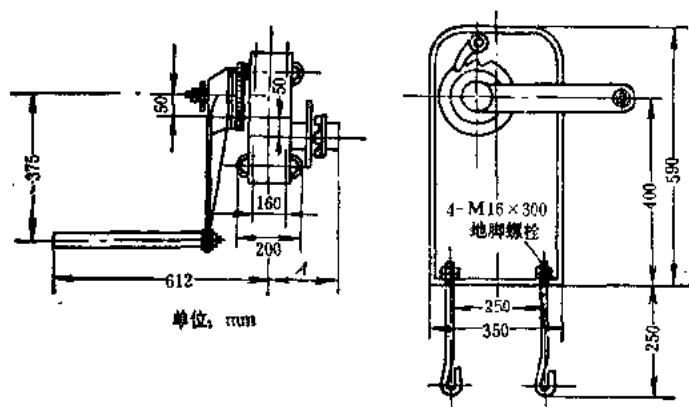


吊点	型 号	起 门 力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )	起门高度 (m)	起门速度 (m/min)	吊点中心距 (m)	电 机		卷筒直径 (mm)	双联滑轮 组倍率	机器重量 (kg)	销轴直径 d (mm)	地脚螺栓规格 (mm)	
						型 号	功率 (kW)					机 寸	
双 吊 点	QPQ3-2×8	2×8	8	1.95	1.9~7	JZ221-6	5	325	2	1970	60	M120×400	
	QPQ3-2×16	2×16	8	2.06	2.3~7.2	JZ231-6	11	945	2	3900	80	M24×500	
	QPQ3-2×25	2×25	9	1.94	2.5~9	JZ242-8	16	710	2	5880	90	M24×500	
	QPQ3-2×40	2×40	9	1.36	3.4~10	JZ241-8	2×11	705	4	8990	100	M30×630	

主 要 参 数		尺 寸 (mm)																基 础 荷 载 (tf)					
		A	B	b	C	D	E	F	G	H	h	I	J	S	M	N	P	R	t	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>
双 吊 点	QPQ3-2×8	1130	534.5	564.5	143	125	855	1100	310	285	190	685	1335	1260	750	550	880	1200	30	2470	2700	2920	2670
	QPQ3-2×16	1350	638	678	178	150	1080	1200	330	360	240	903	1600	1545	800	600	1050	1485	30	3820	4230	6150	5550
	QPQ3-2×25	1520	719.5	779.5	217	140	1215	1300	465	300	265	1175	2081	1970	1000	780	1240	1900	35	6150	6680	9270	8540
	QPQ3-2×40	1911	904	904	284	45	1387	1600	510	520	315	1180	2155	1365	1400	1070	1821	1650	160	9450	10450	15350	13750

表 9-8

上置QPQ系列中平面闸门卷扬式启闭机附设手摇装置表



启闭机型号	所配置的手摇装置				
	图 号	A (mm)	名 称	传动比	手柄上作用力 (N)
QPQ-8	QT9-1-0	295	Y35×80/404逆手摇装置	0.600	131
QPQ-16, QPQ-2×8	QT9-2-0	326	Y40×110/800逆手摇装置	1.162	195
QPQ-25	QT9-3-0	326	Y50×110/1240逆手摇装置	1.860	195
QPQ-40, QPQ-2×16	QT9-4-0	326	Y50×110/1590逆手摇装置	2.340	198
QPQ-2×25	QT9-5-0	356	Z65×140/2480逆手摇装置	3.000	235

手摇装置说明:

Y  
轴孔型式35 ×  
手摇装置上与电动机连接的离合器  
轴孔直径(mm)80  
轴孔长度  
(mm)404  
手摇装置输出轴的扭矩  
(10N·cm)

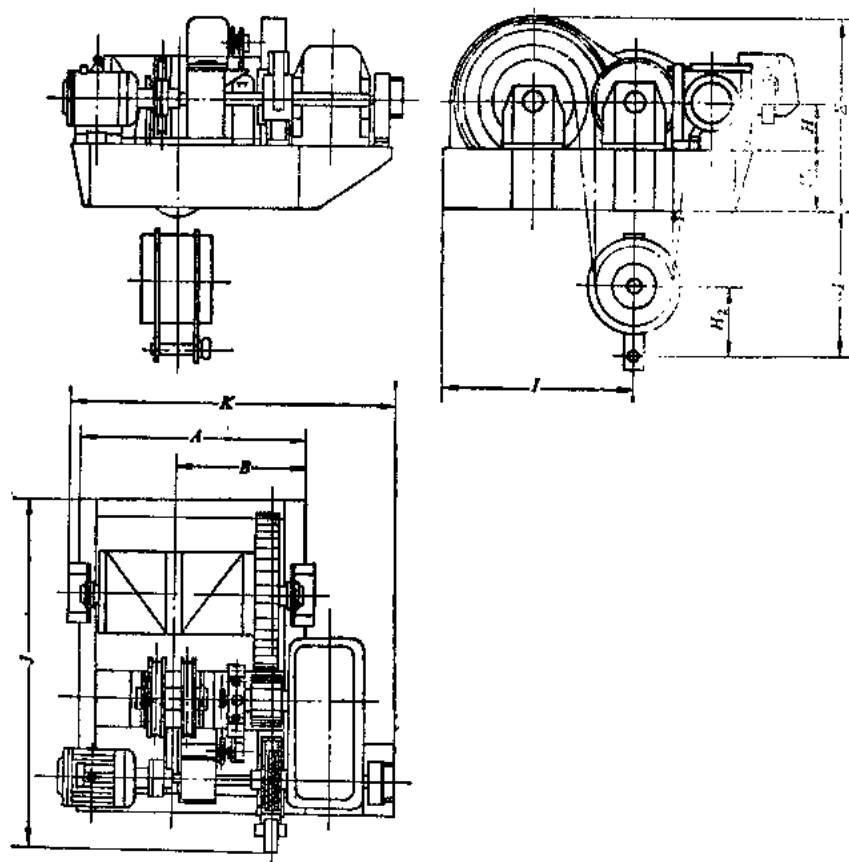
表 9-9

QPK卷扬式快速闸门启闭机型式及基本参数

型 式	型 号	持住力/启门力 (10 <sup>4</sup> N)	快速闭门高度 /启门高度 (m)	快速闭门速度 /启闭速度 (m/min)	吊 距 L (m)	整 机 重 (不大于) (kg)	
单吊点	QPK-6/6-8/8	6/6	8/8	4.0/2.2		750	
	QPK-10/10-8/8	10/10	8/8	4.0/2.2		1080	
	QPK-16/16-8/8	16/16	8/8	4.0/2.2		1810	
	QPK-25/25-8/9	25/25	8/9	4.0/2.1		2610	
	QPK-40/40-8/9	40/40	8/9	4.0/1.8		4110	
	QPK-63/30-8/10	63/30	8/10	4.0/2.1		6180	
	QPK-80/40-9/10	80/40	9/10	4.5/2.1		7850	
	QPK-100/50-9/11	100/50	9/11	4.5/2.4		10100	
	QPK-125/63-9/12	125/63	9/12	5.0/2.6		12430	
	QPK-160/80-10/13	160/80	10/13	5.0/2.4		17800	
	QPK-200/100-10/14	200/100	10/14	5.0/2.4		21950	
双吊点	集中驱动	QPK-2×6/2×6-8/8	2×6/2×6	8/8	4.0/2.2	1.8~6.0	1500
		QPK-2×10/2×10-8/8	2×10/2×10	8/8	4.0/2.2	1.8~7.0	2160
		QPK-2×16/2×16-8/8	2×16/2×16	8/8	4.0/2.2	2.1~8.0	3620
		QPK-2×25/2×25-8/9	2×25/2×25	8/9	4.0/2.1	2.4~9.0	5300
		QPK-2×40/2×20-8/9	2×40/2×20	8/9	4.0/1.8	3.2~10.0	8220
	单独驱动	QPK-2×63/2×30-8/10	2×63/2×30	8/10	4.0/2.1	4.0~11.0	12370
		QPK-2×80/2×40-9/10	2×80/2×40	9/10	4.5/2.1	4.0~12.0	15700
		QPK-2×100/2×50-9/11	2×100/2×50	9/11	4.5/2.4	4.5~12.5	20200
		QPK-2×125/2×63-9/12	2×125/2×63	9/12	5.0/2.6	5.0~13.0	24860
		QPK-2×160/2×80-10/13	2×160/2×80	10/13	5.0/2.4	5.0~14.0	35600
		QPK-2×200/2×100-10/14	2×200/2×100	10/14	5.0/2.4	6.0~14.0	44500

表 9-10

QPK卷扬式单吊点型快速闸门启闭机主要外形尺寸

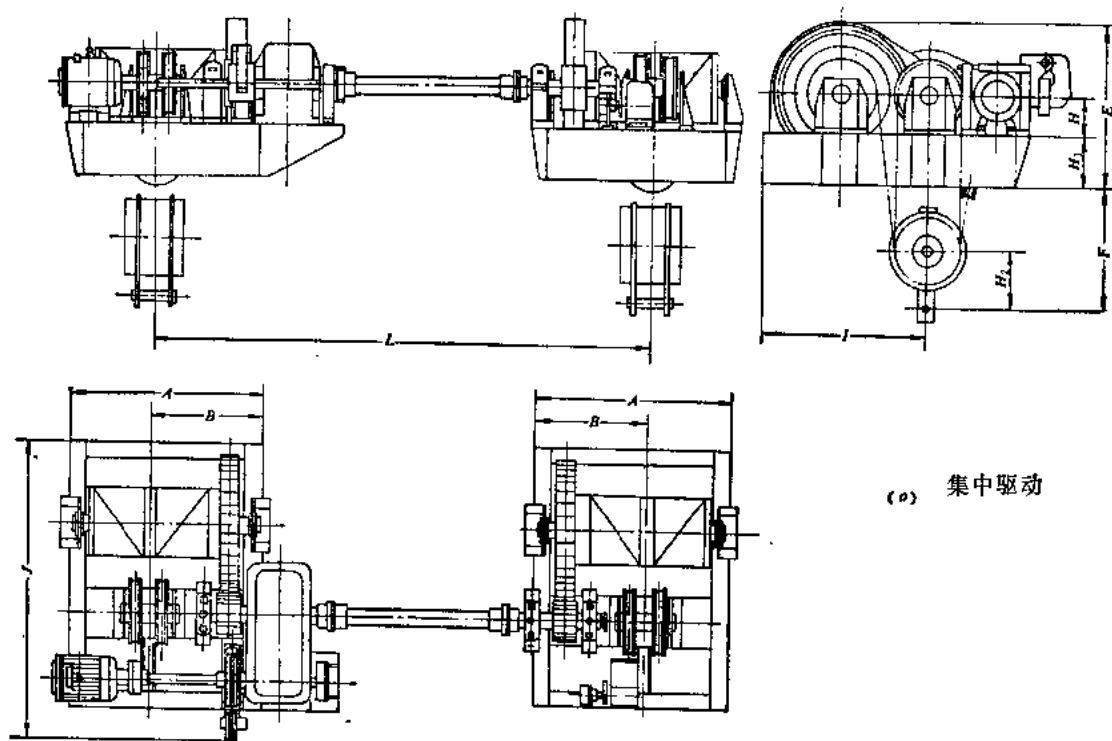


型 号	主 要 外 形 尺 寸									
	A	B	E	F	I	J	K	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H
QPK-6/6-8/8	1080	570	810	950	710	1300	1340	250	290	190
QPK-10/10-8/8	1130	600	860	1100	760	1360	1450	280	310	190
QPK-16/16-8/8	1350	710	1080	1200	920	1680	1650	360	380	240
QPK-25/25-8/9	1520	800	1200	1300	1050	1910	1850	390	460	260
QPK-40/40-8/9	1910	1010	1380	1400	1180	2150	2500	520	500	320
QPK-63/30-8/10	2630	1370	1580	2200	1430	2450	3270	620	550	320
QPK-80/40-9/10	2540	1340	1640	2400	1550	2570	3160	620	600	320
QPK-100/50-9/11	2900	1520	1880	2600	1590	2600	3520	820	660	320
QPK-125/63-9/12	3160	1640	1960	2800	1780	2810	3780	820	750	320
QPK-160/80-10/13	3280	1720	2380	3200	2070	3370	4012	1020	900	420
QPK-200/100-10/4	3840	2020	2660	4000	2240	3540	4570	1220	900	420



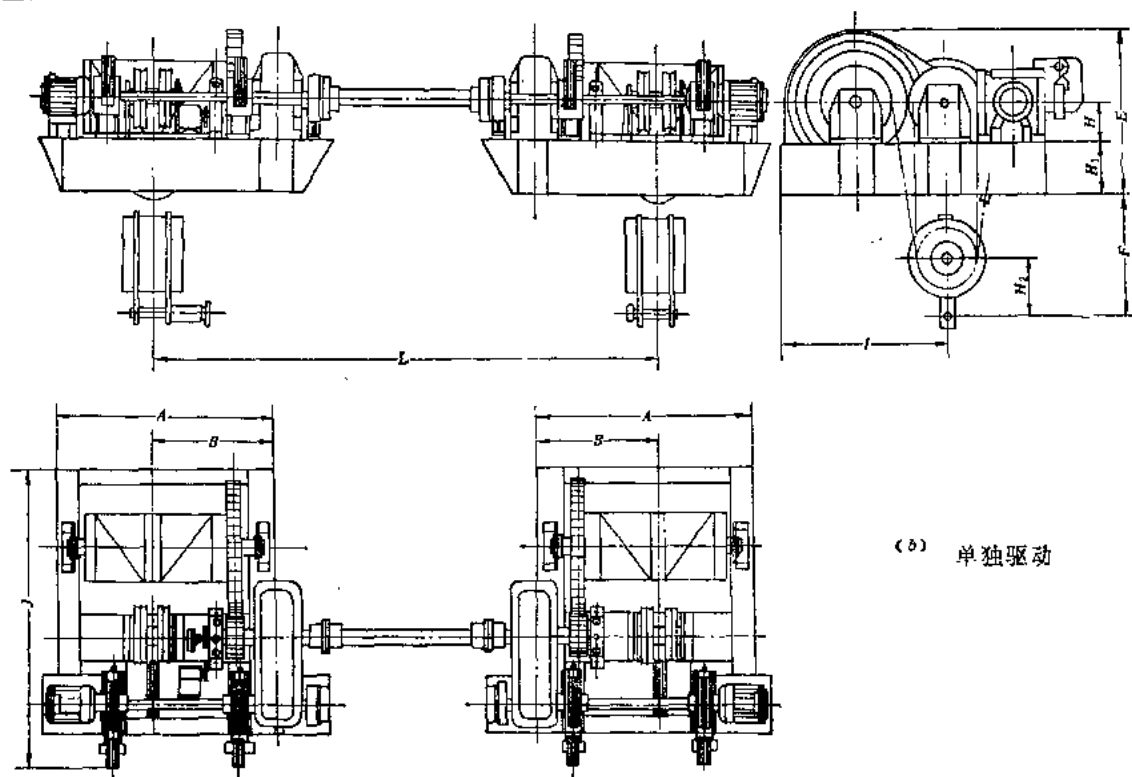
表 9-11

QPK 卷扬式双吊点型快速



型 号	主 要			
	A	B	E	F
QPK-2×6/2×6-8/8	1080	570	810	950
QPK-2×10/2×10-8/8	1130	600	860	1100
QPK-2×16/2×16-8/8	1350	710	1080	1200
QPK-2×25/2×25-8/9	1520	800	1200	1300
QPK-2×40/2×20-8/9	1910	1010	1380	1400
QPK-2×63/2×30-8/10	2630	1370	1580	2200
QPK-2×80/2×40-9/10	2540	1340	1640	2400
QPK-2×100/2×50-9/11	2900	1520	1880	2600
QPK-2×125/2×63-9/12	3160	1640	1960	2800
QPK-2×160/2×80-10/13	3280	1720	2380	3200
QPK-2×200/2×100-10/14	3840	2020	2680	4000

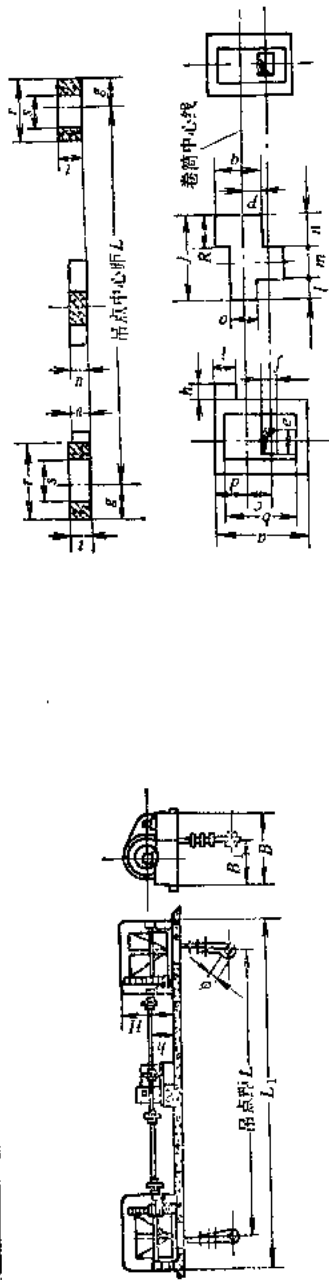
闸门启闭机主要外型尺寸



外形尺寸					
J	J	L	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H
710	1300	1.8~6.0	250	290	190
760	1360	1.8~7.0	280	310	190
920	1680	2.1~8.0	360	380	240
1050	1910	2.4~9.0	390	460	260
1180	2150	3.2~10.0	520	500	320
1430	2450	4.0~11.0	620	550	320
1550	2570	4.0~12.0	620	600	320
1580	2600	4.5~12.5	820	600	320
1780	2810	5.0~13.0	820	750	320
2070	3370	5.0~14.0	1020	900	420
2240	3540	6.0~14.0	1220	900	420

表 9-12

弧形闸门卷扬式启闭机（中央定型系列）技术特性及基础布置尺寸表



启门力 (10 <sup>4</sup> N)	启门高度 (m)	启门速度 (m/min)	钢丝绳		电动机	减速机	手摇机构		制动器	电磁铁	卷筒直径 (m)	自重 (t)	参考价格 (万元/台)
			根数	规格	型号	功率 (kW)	传动比	人数					
2×5	10	1.4	2	6×37+1-φ24-160	JZ-11-6	2.7	208	1	φ200	KMT101	0.5	2.55	1.00
2×7.5	10	1.22	2	6×37+1-φ30-160	JZ-12-6	4	252	1	φ200	KMT101	0.6	3.0	1.20
2×10	10	1.52	2	6×37+1-φ34.5-160	JZ-21-6	6.2	208	1.86	φ200	KMT101	0.8	4.57	1.80
2×15	10	1.8	2	6×37+1-φ39-170	JZ-31-6	13.5	274	3	φ300	KMT102	0.8	7.73	2.30
2×25	12	1.35	2	6×37+1-φ52-160	JZ-41-8	13.5	322	3	φ300	KMT102	1.0	13.1	4.00

基础布置 (mm)													
启门力 (10 <sup>4</sup> N)	外形尺寸 (mm)				基础尺寸 (mm)				卷筒尺寸 (mm)				参考价格 (万元/台)
	L <sub>1</sub>	H	h	B	a	b	c	d	e	f	g	h	
2×5	L+620	880	440	1370	800	1370	1170	250	550	450	400	310	130
2×7.5	L+740	1100	550	1550	950	1550	1400	300	650	550	400	370	220
2×10	L+710	1100	550	1550	950	1550	1390	300	650	550	300	360	335
2×15	L+812	1400	710	2100	1200	2100	1900	400	800	700	400	406	335
2×25	L+970	2000	950	2480	1580	2480	2280	500	1080	500	400	455	480

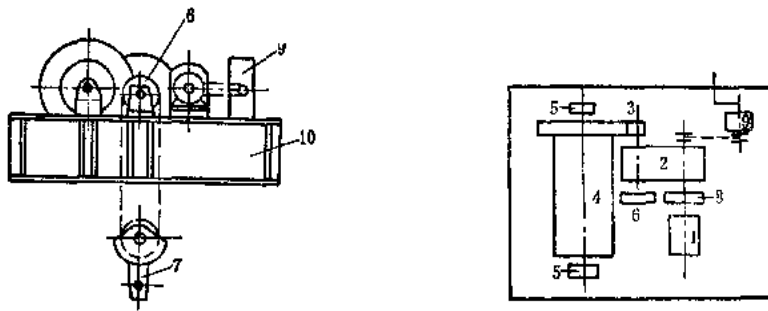


图 9-6 卷扬式启闭机

1—电动机；2—减速箱；3—减速齿轮；4—绳鼓；5—轴承座；6—定滑轮；7—动滑轮；8—制动器；  
9—手摇装置；10—机架

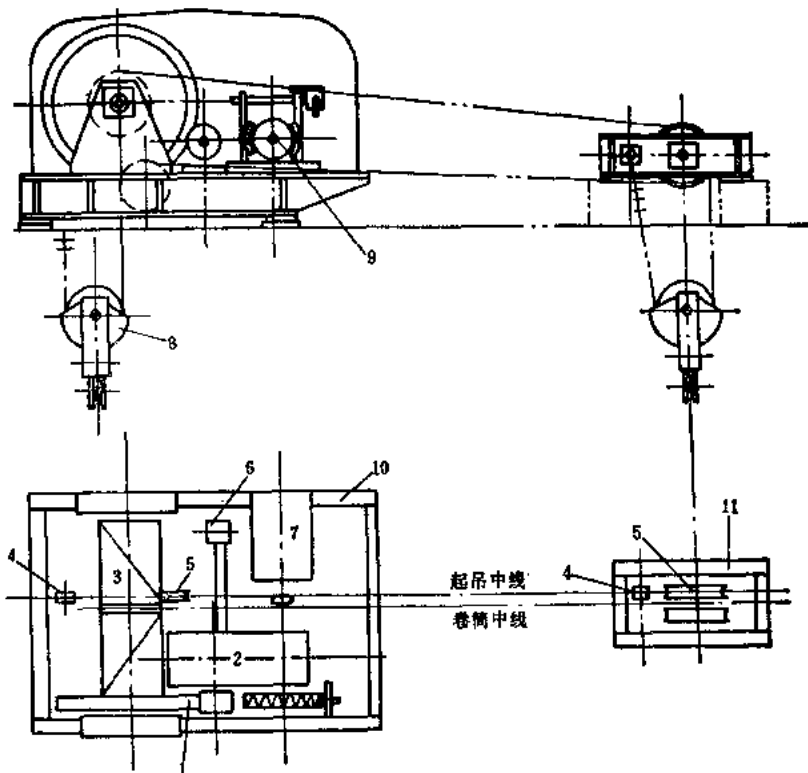


图 9-7 滑轮同步的卷扬式启闭机布置

1—减速齿轮；2—减速箱；3—卷筒；4—钢丝绳端固定装置；5—转向定滑轮；6—限位开关；7—电动机；8—动滑轮；9—电磁刹车装置；10—机架；11—定滑轮架

### 3. 油压式启闭机

无下压力的单向油压启闭机，多用于操作电站进水口的快速闸门双向作用油压启闭机，多用于操作深孔平面闸门和深孔弧形闸门。用于操作弧形闸门时，连接方式可参照螺杆启闭机的连接办法。简易油压启闭机，可用于操作中小型各类闸门。

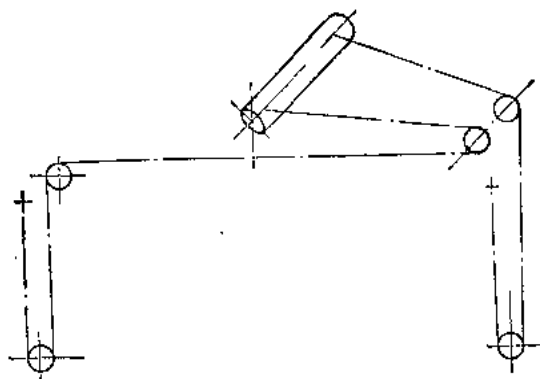


图 9-8 钢丝绳绕法示意图

油压式启闭机由于机械部件简单，所占地位较小，利用较小的动力便能获得较大的起重能力，同时较其它类型的启闭机更能适应遥控和自动化，因此是一种很理想的启闭设备。油压启闭机的构造如图 9-9 所示，主机体是一个活塞筒(或称油缸)，筒内的活塞在油压的作用下，可以沿筒壁作轴向往复运动，从而带动连接在活塞上的连杆以升降闸门。

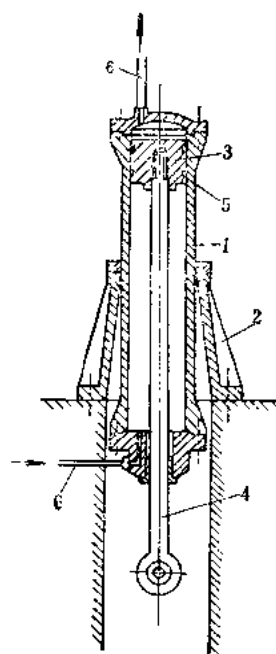


图 9-9 油压式启闭机示意图  
1—活塞筒；2—支座；3—活塞；4—连杆，接闸门；5—油封环；6—油管，通往油泵

油压一般以电动机带动油泵而形成，并沿输油管道送到活塞筒内。

#### 4. 台车式和门式启闭机

台车式和门式启闭机多用于操作孔数多且不需要部分均匀开启的闸门。启闭机台数应根据开启闸门的时间要求决定，并考虑有适当的备用量。采用大容量门式或台车式启闭机操作多种闸门，当各闸门启闭力相差悬殊时，启闭机上宜设启闭各闸门的超载安全装置。布置门式启闭机，应照顾坝面金属结构设备及大坝的检修需要。

此外，手拉葫芦由于其结构简单，造价低廉，在小型水电站工程上也得到广泛应用。

## 第六节 起吊零部件的设计计算

启闭机和闸门之间要借助一些起吊零件连接起来，才能使整个闸门系统有效地工作。这些起吊零件包括吊具、吊耳和锁锭梁等。吊具可分为柔性钢索和刚性吊杆。吊具与闸门上的吊耳相连接。直升式平面闸门的吊耳，应设置在闸门隔板或边梁的顶部，并应尽量布置在闸门重心线上，如图 9-10(a) 示。电站尾水闸门的吊耳，可稍偏向止水侧，以提高止水效果。升卧式平面闸门的吊耳位置，对向下游转动的闸门，吊耳安设在门叶上游面的下部，如图 9-10(b) 示，其高度位置一般在门叶下主梁附近。位置太低，将易于被淤泥埋没，影响启闭机下部动滑轮的正常运转；位置过高，则闸门全开平卧后启闭机钢丝绳的倾斜度加大，不便于机架桥的布置。吊耳轴中心至面板外缘的距离，应能容纳启闭机的动滑轮组，并应留 2~5cm 的裕余度。这样，由于吊点与闸门重心点形成一偏心，启门时产生

一力偶,即便在无水时也能使闸门边上升边转动。对向上游转动的升卧式平面闸门,吊点设在下游面的下部,以使在启门时产生促使闸门向上游转动的力偶。露顶式弧形闸门的吊耳,一般布置在闸门下主梁与支臂交点的面板前面,也可布置在面板后面下主梁两端如图9-11示。潜孔式弧形闸门的吊耳,一般布置在门顶。

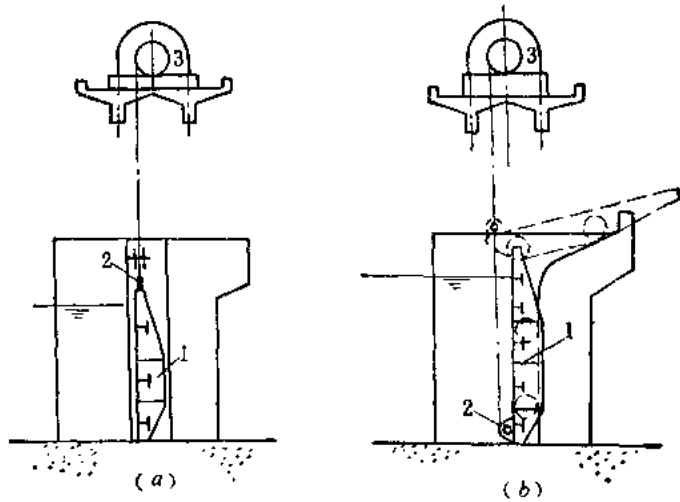


图 9-10 平面闸门的吊耳布置  
1—门叶; 2—吊耳; 3—启闭机

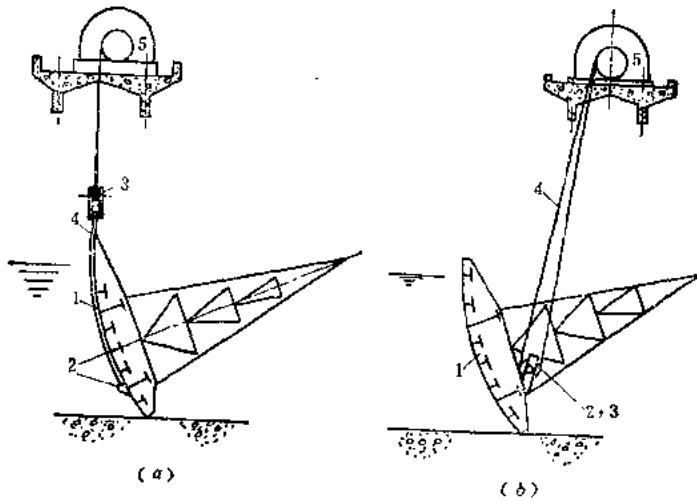


图 9-11 露顶式弧形闸门的吊耳布置  
1—门叶; 2—吊耳; 3—滑轮; 4—吊索; 5—启闭机

闸门采用单吊点或双吊点,应根据孔口大小、宽高比、启闭力、闸门及启闭机布置型式等因素综合考虑确定。一般当宽高比大于1时,宜采用双吊点。

### 一、吊耳计算

#### 1. 吊耳尺寸确定

吊耳的宽度,厚度与吊耳孔直径的关系,可按下面的经验公式确定(参阅图9-12)。

$$B=(2.4\sim 2.6)a$$

$$\delta \geq \frac{1}{20} B$$

$$a = (0.9 \sim 1.05)d$$

$$\Delta = d - d_1 = 0.02d$$

式中  $d$  ——吊耳孔径;

$d_1$  ——吊耳轴径。

### 2. 吊耳孔壁承压应力验算

$$\sigma_{c,j} = \frac{P}{d\delta} \leq [\sigma_{c,j}] \quad (9-25)$$

式中  $P$  ——一个吊耳孔所承受的荷载;

$\delta$  ——吊耳板的厚度;

$[\sigma_{c,j}]$  ——容许局部紧接承压应力, 按表3-39选用。

### 3. 孔壁的拉应力近似验算

$$\sigma_k = \sigma_{c,j} \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} \leq [\sigma_k] \quad (9-26)$$

式中  $r = \frac{d}{2}$  ——吊耳孔半径;

$R$  ——吊耳板孔心到板边的最短距离, 如图9-12示;

$\sigma_k$  ——孔壁抗拉应力, 按表3-39选用。

为了安装和调整吊耳孔位置的需要, 在吊耳板两侧设置轴承板时, 则两块轴承板的总厚度应不小于  $1.2\delta$ 。

当选用移动式启闭机时, 销轴需要经常拆卸, 为便于操作, 又不影响轴孔与轴的紧密接触, 往往将轴孔做成梨形, 如图9-13示, 由于  $R$  与  $r$  相差不大, 故仍可按前述方法验算强度。

吊耳轴径的确定, 可参照轮轴的弯曲应力和剪应力所要求的强度条件式(6-23)和式(6-24)计算。

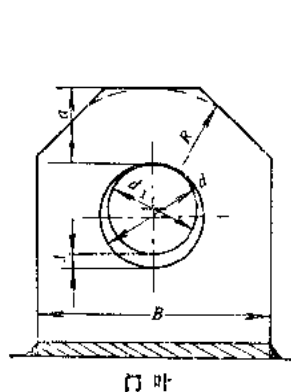


图 9-12 吊耳的构造

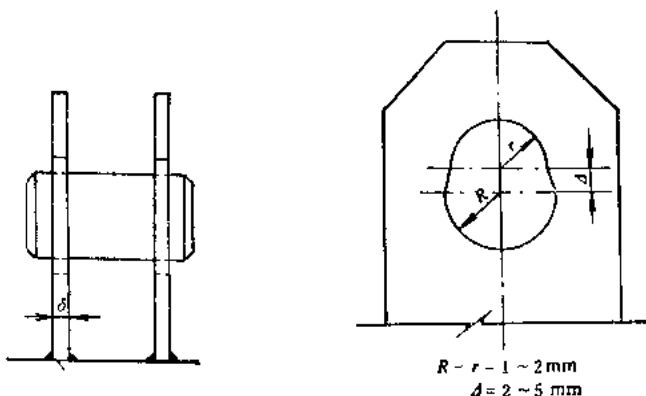


图 9-13 梨形吊耳轴孔

## 二、吊杆的计算

图9-14为吊杆的几种型式，可参照选用。它是由几段铰接构成的。随着闸门逐个间隔的上升，吊杆各段就依次脱开，闸门各提升间隔的高度由启闭机的扬程决定，一般来说它就是吊杆的长度。

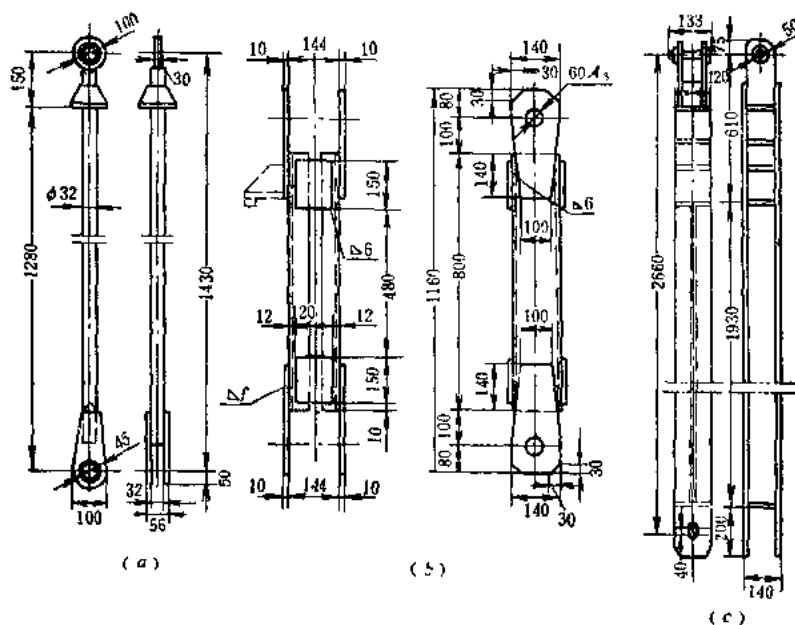


图 9-14 吊杆 (单位: mm)

当吊杆的尺寸选定之后, 要对吊杆最弱断面进行拉应力校核:

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq 0.9[\sigma] \quad (9-27)$$

式中  $P$ ——闸门吊杆所承受的荷载, N;

$A$ ——吊杆最弱断面面积,  $\text{cm}^2$ ;

$[\sigma]$ ——容许拉应力, Pa, 按表3-39采用。

通常,控制吊杆起吊能力的主要因素是销轴与孔壁紧密接触时的局部承压应力 $\sigma_{cl}$ 。因此,为了充分发挥吊杆的强度以节约材料,应该在不给加工制造带来较大麻烦的情况下,采取将孔眼附近的翼缘板局部加厚的措施,以降低其局部承压应力 $\sigma_{cl}$ 。

### 三、压杆计算

对于需用机械下压力才能关闭的闸门要对压杆进行强度和稳定性计算。

压杆所受的实际荷载  $N$  为:

$$N = KQ \quad (9-28)$$

式中  $K$ ——超载系数，一般情况  $K=1.1\sim 1.2$ ；高压深孔门，工作条件复杂， $K=1.2\sim 1.4$ ；

Q——启闭机下压容量（或实际计算压力），N。

受压吊杆按下式计算强度:



$$\sigma = \frac{N}{A} \leq [\sigma] \quad [\text{Pa}] \quad (9-29)$$

式中  $N$ ——按式(9-28)计算;  
 $A$ ——压杆截面面积,  $\text{cm}^2$ ;  
 $[\sigma]$ ——容许应力, 按表3-39选用。  
 受压吊杆按下式计算稳定性:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} \leq [\sigma] \quad (9-30)$$

式中  $N$ 、 $A$ 、 $[\sigma]$ 与前相同;  
 $\varphi$ ——根据构件最大长细比决定的稳定系数, 按表4-19或表4-20采用。

#### 四、钢丝绳的选用及维护

钢丝绳是卷扬式启闭机最常用的不可缺少的部件, 现将钢丝绳的选用及维护介绍于下。

##### 1. 钢丝绳的选用

所选钢丝绳的破断拉力应满足下面条件:

$$\frac{S_{\text{绳}}}{S_{\text{max}}} \geq n_{\text{绳}} \quad (9-31)$$

式中  $S_{\text{绳}}$ ——钢丝绳破断拉力,  $\text{N}$ , 在圆股钢丝绳(GB1102-74)标准中, 只有钢丝破断拉力之和( $\Sigma S_{\text{丝}}$ ), 而无整根钢丝绳的破断拉力( $S_{\text{绳}}$ ), 故选定钢丝绳直径前需将钢丝破断拉力总和换算成钢丝绳的破断拉力:  $S_{\text{绳}} = \alpha \Sigma S_{\text{丝}}$ , 对于启闭机械常用的红维芯钢丝绳  $\alpha$  值根据钢丝绳结构的不同而定: 绳  $6 \times 37$ :  $\alpha = 0.82$ , 绳  $6 \times 19$ :  $\alpha = 0.85$ ; 这两种钢丝绳的主要性能见表9-13和表9-14;

$S_{\text{max}}$ ——钢丝绳工作时承受之最大拉力,  $\text{N}$ ;

$n_{\text{绳}}$ ——根据机构重要性、工作类型及载荷情况而定的钢丝绳安全系数: 对于启闭机械而言, 手动时取  $n_{\text{绳}} = 4$ ; 机动时取  $n_{\text{绳}} = 5 \sim 5.5$ ; 机动时重级及特重级取  $n_{\text{绳}} = 6$ 。

##### 2. 常用的绳端固定方法

(1) 编结法(图9-15a): 钢丝绳一端绕过套环后与自身编结在一起并用细钢丝扎紧。固定处的强度约为钢丝绳自身的75%~90%。

(2) 楔形套筒固定法(图9-15b): 钢丝绳一端绕过楔, 利用楔在套筒内的锁紧作用使钢丝绳固定。固定处的强度约为钢丝绳自身的75%~85%。

(3) 锥形套筒固定法(图9-15c): 钢丝绳末端穿过锥形套筒后松散钢丝, 将头部钢丝弯成小钩并浇入铅或锌液, 凝固后即成。固定处的强度与钢丝绳自身的强度大致相同。

(4) 绳卡固定法(图9-15d): 此法简单、可靠, 目前广泛应用。用绳卡固定时, 绳卡数量应不少于三个, 其间距也应适当; 而且绳卡底板应扣在钢丝绳的工作段上, U形螺栓扣在钢丝绳的尾段上。固定处的强度约为钢丝绳自身强度的80%~90%, 如绳卡装反,

表 9-13

6×19 钢丝绳的主要性能

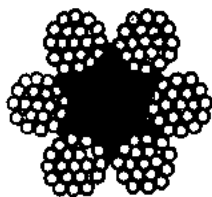
名称: 钢丝绳(GB1102-74)

绳 6×19

股(1+6+12)

 $S_{\text{绳}} = \alpha \Sigma S_{\text{丝}}$ 

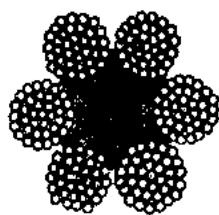
绳纤维芯

 $\alpha = 0.85$ 

直 径		钢丝绳总断面积	参 考 重 量	钢丝绳公称抗拉强度(×10MPa)				
钢 丝 绳	钢 丝			140	155	170	185	200
(mm)		(mm <sup>2</sup> )	(kg/100m)	钢 丝 破 断 拉 力 总 和 (ΣS <sub>丝</sub> )				
				10N(不小于)				
6.2	0.4	14.32	13.53	2000	2210	2430	2640	2860
7.7	0.5	22.37	21.14	3130	3460	3800	4130	4470
9.3	0.6	32.22	30.45	4510	4990	5470	5960	6440
11.0	0.7	43.85	41.44	6130	6790	7450	8110	8770
12.5	0.8	57.27	54.12	8010	8870	9730	10550	11450
14.0	0.9	72.49	68.50	10100	11200	12300	13400	14450
15.5	1.0	89.49	84.57	12500	13850	15200	16550	17850
17.0	1.1	108.28	102.3	15150	16750	18400	20000	21650
18.5	1.2	128.87	121.8	18000	19850	21900	23800	25750
20.0	1.3	151.24	142.9	21150	23400	25700	27950	30200
21.5	1.4	175.40	165.8	24550	27150	29800	32400	35050
23.0	1.5	201.35	190.3	28150	31200	34200	37200	40250
24.5	1.6	228.09	216.5	32050	35500	38900	42350	45800
26.0	1.7	258.63	244.4	36200	40050	43950	47800	51700
28.0	1.8	289.95	274.0	40550	44900	49250	53600	57950
31.0	2.0	357.96	338.3	50100	55450	60850	66200	71550
34.0	2.2	433.13	409.3	60600	67100	73600	80100	
37.0	2.4	515.46	487.1	72150	79850	87600	95350	
40.0	2.6	604.95	571.7	84650	93750	102500	111500	
43.0	2.8	701.60	663.0	98200	108500	119000	129500	
46.0	3.0	805.41	761.1	112500	124500	136500	149000	

表 9-14

6×37 钢丝绳的主要性能

绳径  $\phi \times 37$ 

名称: 钢丝绳 (GB1102-74)

股  $(1+6+12+18)$  $S_{绳} = \alpha S_{股}$ 

绳纤维芯

 $\alpha = 0.82$ 

直 径		钢丝总断面积	参 考 重 量	钢 丝 绳 公 称 抗 拉 强 度 (×10N/MPa)				
钢 丝 绳	钢 丝			140	155	170	185	200
(mm)		(mm <sup>2</sup> )	(kg/100m)	钢 丝 破 断 拉 力 总 和 (N/吨)				
				10N(不小干)				
8.7	0.4	27.88	26.21	3900	4320	4730	5150	5570
11.0	0.5	43.57	40.96	6090	6730	7460	8060	8710
13.0	0.6	62.74	58.98	8780	9720	10630	11600	12500
15.0	0.7	83.39	80.27	11950	13200	14500	15750	17050
17.5	0.8	111.53	104.8	15600	17250	18950	20600	22300
19.5	0.9	141.16	132.7	19750	21850	23950	26100	28200
21.5	1.0	174.97	163.8	24330	27000	29600	32200	34850
24.0	1.1	210.87	198.2	29500	32630	35800	39000	42150
26.0	1.2	250.93	235.0	35100	38850	42650	46400	50150
28.0	1.3	294.52	276.8	41200	45650	50050	54450	58900
30.0	1.4	341.57	321.1	47800	52900	58050	63150	68300
32.5	1.5	392.11	368.6	54850	60750	66650	72500	78400
34.5	1.6	446.13	419.4	62150	69150	75800	82500	89200
36.5	1.7	503.64	473.4	70500	78030	85800	93150	100500
39.0	1.8	564.53	530.8	79000	87500	95950	104000	112500
43.0	2.0	697.08	655.3	97550	109000	118500	128500	139000
47.5	2.2	843.47	792.9	118000	130500	143000	156000	
52.0	2.4	1003.80	934.6	140500	155000	170300	185500	
56.0	2.6	1178.07	1107.4	164500	182500	200000	217500	
60.5	2.8	1366.28	1284.3	191600	211500	232000	252500	
65.0	3.0	1568.43	1474.3	219500	243000	266500	290000	

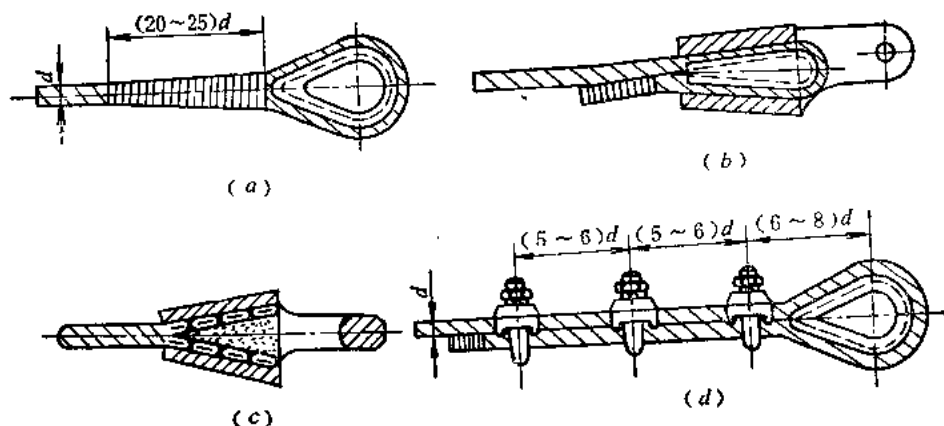


图 9-15 钢丝绳端部的固定方法  
(a)编结法; (b)楔形套简法; (c)锥形套简法; (d)绳卡法

表 9-15 绳卡数与钢丝绳直径的关系

钢丝绳直径 $d$ (mm)	7~16	17~27	28~37	38~45
绳 卡 数	3	4	5	6

则固定处的强度降低到75%，甚至更低。绳卡数与钢丝绳直径之关系见表9-15。

### 3. 钢丝绳的报废标准

钢丝绳在使用前应严格检查磨损、断丝情况，其报废标准如下：

(1) 各种起重机械断丝后的钢丝绳报废标准应根据表9-16决定。

表 9-16 钢丝绳的报废标准

钢丝绳的最初安全系数	钢 丝 绳 结 构			
	6×19		6×37	
	在一节距全长中拉断钢丝根数			
	交 互 捻	同 向 捻	交 互 捻	同 向 捻
6 以下	12	6	22	11
6 ~ 7	14	7	26	13
7 以上	16	8	30	15

(2) 钢丝绳整股破断即应报废。

(3) 钢丝绳外层钢丝磨损或锈蚀后，用游标尺量取，在一个节距内（如图9-16）达钢丝直径的40%时，即应报废。

## 五、锁锭梁

采用移动式启闭机时，要求闸门能脱离启闭机而停留在孔口的中间位置（如调节流量

的要求)，或是全部自水中提出，而架设在临时的支座上，锁锭梁就是满足上述要求的设备，它们与连杆配合（连杆上有一系列的孔口或由钢板组成的阶梯），能将闸门挂在各个提升起来的位置上，提升的最小间隔为 0.5m 或稍多，锁锭梁是一个能抽开的活动结构，操纵锁锭梁应在锁锭平台或检修平台上进行。

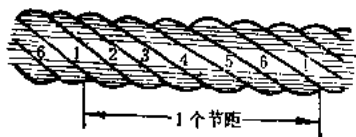


图 9-16 节距

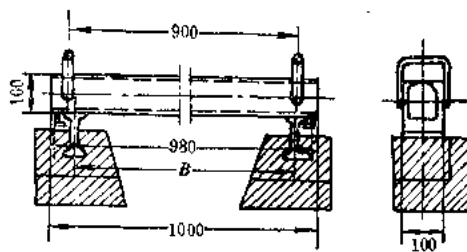


图 9-17 简支式锁锭梁(单位: mm)

锁锭梁的构造应满足操作方便、安全可靠的要求。常用的锁锭梁有简支式的(图9-17)和悬臂式的(图9-18)。一般说来，悬臂式的锁锭梁只适用于中等重量的闸门，连杆穿过锁锭梁，并固定在其中。

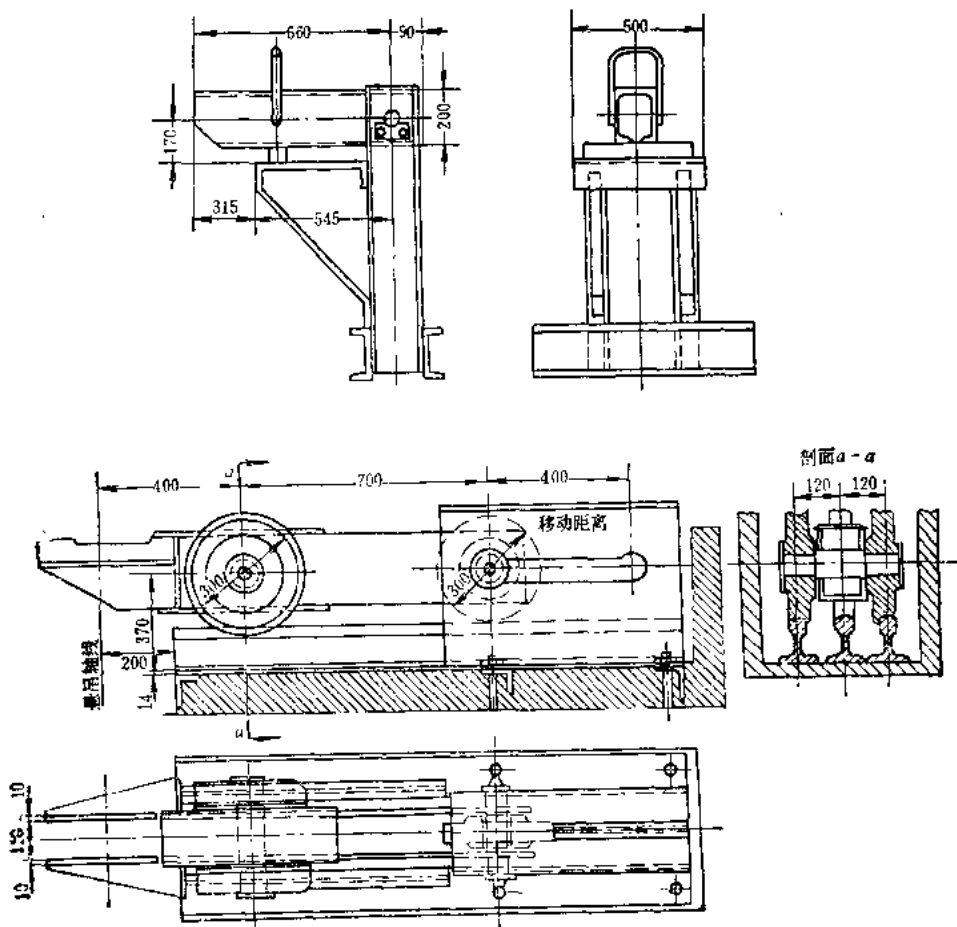


图 9-18 悬臂的锁锭梁(单位: mm)

对于小型平面闸门使用的锁锭梁可以直接用型钢（通常用工字钢或槽钢）切割而成。闸门通过特设的支点支承在型钢上。

作用在锁锭梁上的荷载,应按其不同用途而定。供闸门检修或存放用的锁锭,应考虑闸门自重、加重、风荷载以及操作时可能引起的荷载。对于供闸门部分开启用的锁锭,尚应考虑闸门在动水中可能产生的下吸力或脉动荷载。

锁锭梁的活动和埋设部分应按其受力及构造情况验算其强度、锚固及稳定性。

## 第七节 自动挂钩梁

当采用移动式启闭机操作多孔口闸门或闸门在操作过程中,吊杆装卸频繁时,宜采用自动挂钩梁。

为改善自动挂钩梁的使用条件,提高其抓放闸门的准确性,应注意以下情况:

(1) 闸门应尽量设置上游止水;如闸门设置下游止水时,应注意自动挂钩梁水下工作的可靠性;

(2) 自动挂钩梁入水工作时,应注意水流扰动对其稳定性的影响;

(3) 应注意门槽施工安装精度,以适应自动挂钩梁能在多孔门槽内使用;

(4) 自动挂钩梁应作静平衡试验,以便操作平稳,入槽后不应有倾斜、阻卡等现象;

(5) 自动挂钩梁的转动轴和销轴应设置轴套,并应采取润滑、防锈等措施;

(6) 自动挂钩梁应设导向、定位和安全装置,以保证机构灵活可靠。

自动挂钩梁的型式很多,这里仅介绍两种型式的自动挂钩梁,以供参考。

### 一、挂脱自如式挂钩梁

这种挂钩梁的动作原理如图9-19示,提起闸门时,挂钩梁沿导向装置进入门槽,直至平衡状态的钩子碰及闸门上的挂体顶部,钩子张开,让挂体头部滑过,当钩子处在挂体的第一个台阶时,钩子靠自身重量平衡的作用,与挂体侧面相靠,这时若挂钩梁变下落为向上提起,则挂钩梁钩子便与挂体挂上,继续提升挂钩梁便可将闸门提起。与此相反,下降挂钩梁,又将闸门放回底槛,继续下放挂钩梁,钩子通过挂体第二个台阶,钩子又处于平衡状态,这时提升挂钩梁就脱钩了。

如果发生误操作也不要紧,只要起升挂钩梁,让钩脱掉,再继续重钩就是了。只要司机根据门机深度指示器或钢丝绳记号掌握了何种深度是脱钩,也就操作自如了。但它需要有很好的导向装置,对门槽导向要求较高,否则会发生挂体插不进钩子或在挂脱中产生不灵活等现象。如果门槽埋件误差较大,钩子和挂体在运动中的间隙不能满足要求,则应在挂钩梁和闸门上设计定位装置,解决埋件误差大的问题。

这种挂钩梁由于靠钩子本身的平衡进行挂脱动作,因而很难设计防护装置。为了解决闸门在门槽中卡住发生脱钩的问题,在门机上专门设计了一种深度指示器和一种电子秤,司机可根据深度指示器掌握闸门是否已落至底槛,并根据电子秤所反映的荷载了解闸门是否在中途脱钩,这样能使挂钩梁避免误动作。

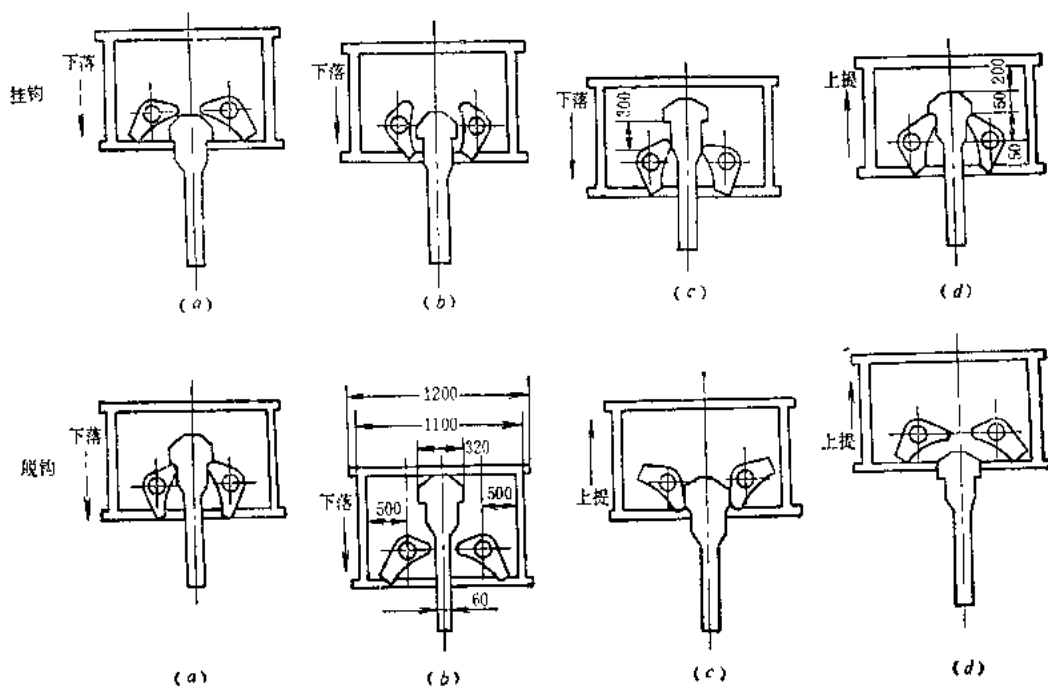


图 9-19 挂脱自如式挂钩梁 (单位: mm)

挂钩: (a) 钩子碰上挂体; (b) 钩子张开; (c) 钩子滑过挂体头部; (d) 钩子卡住挂体;  
脱钩: (a) 钩子在挂体第一台阶; (b) 钩子在挂体第二台阶; (c) 钩子翻转; (d) 钩子与挂体脱开

## 二、螺旋式自动挂钩梁

这种自动挂钩梁具有结构简单、另部件少、动作可靠等优点。它没有用以改变挂钩、脱钩的装置,挂、脱钩时不需人为预先确定位置,这对实现中小型闸门的全部自动化非常有利。螺旋式自动挂钩梁的结构如图9-20示,挂钩梁上有两个圆柱形吊杆,各吊杆下端有一个半月形能自动调整平衡的双侧吊钩,见图9-21。用吊钩和焊在闸门上的“T”型吊槽相结合,实现挂钩梁对闸门的挂钩和脱钩。在挂钩梁体的吊杆部分固定有8块具有螺旋线的三角块,组成上下两组4头螺旋滑道,对应吊杆螺旋滑道位置的挂钩梁体上固定有圆锥销,锥销的一端与螺旋槽配合。挂钩梁与闸门的挂钩、脱钩动作原理如下:

挂钩梁对闸门挂钩,挂钩梁下落,吊杆、吊钩插入闸门吊槽孔内(图9-22a)。当吊杆圆头触及“T”型槽底部时,吊杆停止下落,由于挂钩梁继续下移,梁体上的圆锥销随着下移推动吊杆上的下螺旋滑块,使吊杆相对闸门“T”型吊槽发生旋转,待挂钩梁到达最低位置后,吊杆正好旋转 $45^\circ$ ,即由图9-22的图(a)位置转至图(b)位置。当挂钩梁起吊上升时,圆锥销跟着上升,由吊杆的自重作用,圆锥销和吊杆的上螺旋滑块相对滑动,使吊杆继续旋转 $45^\circ$ ,即由图9-22中的图(b)位置转至图(c)位置。从挂钩梁下落到上升的起吊过程,圆锥销随着由上而下,再由下而往上往复运动一个循环,推动滑道带动吊杆旋转 $90^\circ$ ,使挂钩梁吊钩和闸门“T”型吊槽由开放转到闭锁,完成挂钩梁对闸门的挂钩。反之,挂钩梁对闸门脱钩时,挂钩梁仍然是先落后升,同样能使吊杆旋转 $90^\circ$ ,使挂钩

梁挂钩和闸门“T”型吊槽由闭锁转向开放，完成挂钩梁对闸门的脱钩。

关于闸门、拦污栅和启闭机的防腐蚀措施，可参阅本手册的压力钢管部分。

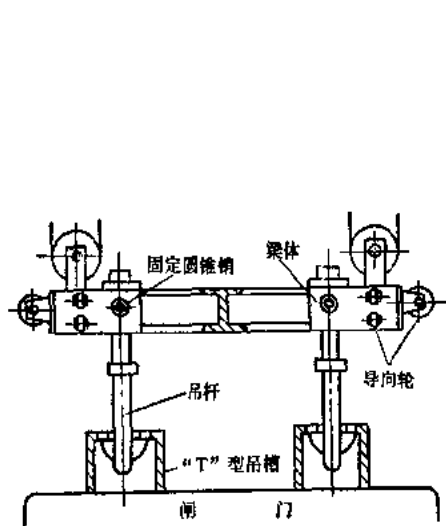


图 9-20 螺旋式自动挂钩梁示意图

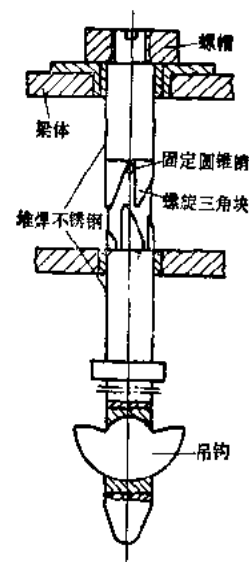


图 9-21 吊杆结构图

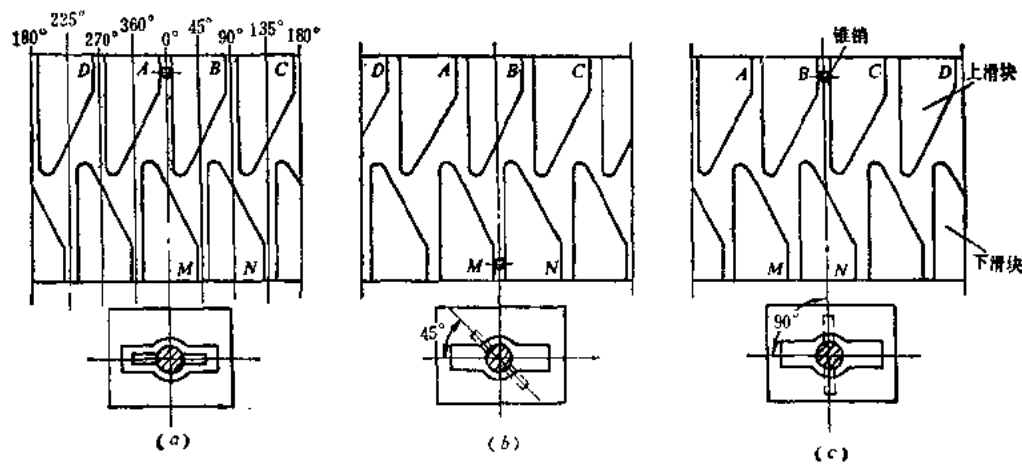


图 9-22 螺旋滑道旋转原理图



## 第十章 钢管的构造和布置

压力钢管是水电站的输水结构物。水流通过取水口、隧洞、调压室或渠道、压力前池等引水建筑物后，经压力钢管输入厂房的水轮机蜗壳中。

在中、高水头的小水电站中，压力钢管有很好的适应性和经济性，在水头、流量都不大的情况下，经过经济论证，压力钢管也常被采用。引水式小水电站的高压管道，往往露天布置在沿地面挖出的沟槽中，成明管形式，这种布置无论施工或运行维护都比较方便。在国内已建众多小水电站，明管形式较普遍，压力钢管一般沿山脊布置。也有些工程，压力钢管设置在坝体廊道内。本部分介绍的钢管设计内容，对于其它供水用的压力钢管道也是适用的。

### 第一节 钢管的构造、材料选择和焊接

#### 一 钢管构造

压力钢管由管体、支承结构和运行、维护所需要的各种附件所组成。管体部分包括直管段、弯管、渐缩锥管、分流供水时的岔管；支承结构部分包括固定和承托钢管所需要的支承构件及镇墩、支墩；运行维护所需要的附件包括伸缩节结构、检修进入孔、防失稳用的管壁加劲结构、排水孔、通气或补气装置，以及因进行水压试验或机组分期组装时封堵钢管用的闷头等。

小型水电站的压力钢管一般由钢板焊接而成，由制作厂家制成一定长度的管节，在工地安装组接。直径小于 600mm 的钢管，可由整卷钢板卷制成螺旋形，以专门的焊接机自动焊接成形，再截成运输条件等因素许可的管节，更小的管径，可直接选用无缝钢管，而一般情况下，则由卷板机卷成弧形板块拼合成形，图 10-1、图 10-2 为这两种管节的示意。

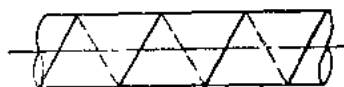


图 10-1 螺旋形焊缝钢管



图 10-2 纵横焊缝钢管

#### 二、材料选择

钢管所用钢材的性能必须符合现行国家标准《普通碳素钢钢号和一般技术条件》(GB 700-79)、《低合金结构钢技术条件》(GB1591-79)、《碳素钢铸件分类及技术条件》(GB979-67)的要求，钢板必须符合《普通碳素钢和低合金钢热轧厚钢板技术条件》(GB 3274-82)。

按钢管及附件结构的不同受力条件,材料选择可参照表10-1。主要受力构件除满足抗拉强度、屈服点、伸长率、硫和磷等杂质含量控制指标外,冷弯加工构件应进行冷弯试验,以取得可靠的试验指标。没有材质指标的钢材,应通过化验和试验,取得设计用的技术指标。小水电建设中可能会遇上钢材品种、规格不理想的情况,应重视可靠的材质指标。屈强比值比较高的钢种应有切实措施保证可焊性,如选择合适的焊条,焊前预热,焊后热处理等。

表 10-1 按不同受力条件选择钢管材料

序号	结 构 名 称	使 用 钢 号	钢 材 标 准	备 注
1	钢管主要受力构件: 管壁、支承环、岔管加 强结构、进人孔主要构 件,伸缩节内、外套管, 闷头	A3, 16Mn, 15MnV, 15MnTi	GB700-79, GB1591-79	15MnTi构件应经过正 火处理
2	加劲环、支承柱、支承 板	A3F, A3, 16Mn	GB700-79, GB1591-79	
3	支承垫板、支座滚轮	A3, A4, A5, 16Mn, ZG35, ZG45	GB700-79, GB1591-79, GB979-67	ZG35, ZG45 指 I、II 级优质钢
4	法 兰	16Mn, ZG35, ZG45	GB1591-79, GB979-67	铸钢指 I、II 级
5	鞍 座 板	A3, A3F, HT15-33, HT20-40	GB700-79, GBE76-67	

表中所有钢材,除沸腾钢外,均指碱性平炉或纯氧顶吹转炉冶炼的产品。除少数受力不大或断面尺寸大于受力计算要求的结构件,可采用沸腾钢外,一般均为镇静钢。镇静钢脱氧完全,成分均匀,一氧化铁含量少,机械加工和焊接性能好,是水电建设中采用最多的一种基本钢种,其中,A3和16Mn采用最普遍。16MnV、16MnTi也是性能良好的低碳合金钢。表中材料的材质指标和工艺性能均指热处理状态下而言,假若按热轧状态交货,试样要热处理,加工件要正火处理,焊接时应预热,以防开裂而损伤材料。

16Mn中含有少量锰(Mn)、钛(Ti)、硅(Si)、铜(Cu)、铌(Nb)等合金元素,且含量超过一般碳素钢,加工及焊接性能、耐腐蚀性、耐磨性均较普通碳素钢好,强度比A3高15%~22%。

普通碳素钢中的4、5号钢属优质高强度钢,强度高于3号钢(A3),但延长率等反映加工及韧度的指标却低于A3。在钢管结构中用作受力较大,或局部承压力大的零、部件,不宜用作管身材料。

碳素铸钢按有害元素多寡分成I、II、III级。其中,I、II级的含硫、磷量小于0.05%,相近于A3钢,用于制作人孔、伸缩节的法兰、封盖等,甚至整个伸缩节(小管径)组成部件。表中未列出III级铸钢,这种铸钢含硫、磷量略大(不超过0.06%),在受力不大或

按构造要求设计的零部件中，也有过应用的实例。选择铸钢时，应注明级别，如材料项中标出“ZG35I”。

表中的“HT15-33”、“HT20-40”为灰口铸铁型号。标号中第一个数值代表材料的抗拉强度，后一个数值为抗弯强度。铸铁的硬度较大，易进行机械加工，抗锈蚀性好，也可与铸铁自身制件焊接。除应用于制作小直径钢管的鞍形支座的座板外，也曾用以代替厚钢板做承压板。

沸腾钢脱氧不完全，有害杂质（硫、磷等）可能集中，还含有有害气体氮，有时效硬化倾向，焊接时易于冷脆，所以钢管结构中主要受力部位避免使用。国内南方地区一些小水电站钢管建设中，有将沸腾钢用作管壁材料的实例，运行情况良好，主要是注意了应力强度控制、有明确的材料的材质指标，注意加工制作、焊接工艺的控制。

钢材弹性模量值，均可按  $E=2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，泊桑比  $\mu=0.3$ ，线膨胀系数  $\alpha=1.2 \times 10^{-5} \text{C}$ 。各种材料的材质指标见本书第三章。

三、焊条型号选择

焊条型号选择应与钢管结构材料配合。表10-2为手工电弧焊条与钢管材料型号匹配关系。

表 10-2 电弧焊条与钢管材料型号关系表

序号	钢 型	钢 号		适 用 的 焊 条 牌 号
		牌 号	代 号	
1	碳 素 钢	3 号镇静钢	A3	T422, T423, T424, T425, T426, T427
2	35kg级普低钢	16锰 16锰钢	16Mn 16MnCu	T502, T503, T506, T507
3	40kg级普低钢	15锰钒 15锰钛	15MnV 15MnTi	T506, T507, T553, T556, T557
4	45kg级普低钢	15锰钒氮	15MnVN	T556, T557, T606, T607

表 10-2中的焊条牌号，第一个字母“T”表示焊条，以“条”字的汉语拼音第一个字母标注，且表示结构钢。对一般非结构钢焊条，则在“T”字后另加字母，例如岔管采用堆焊形式，则堆焊焊条应标出“TD”；第二、三位上数字表示焊条融熔金属的抗拉强度，此值应与钢管结构材料（母材）相适应；第四位上的数字表示焊条药皮类型及焊接电源要求，如表10-3。

表 10-3 药皮类型对焊接电源的要求

序	焊 条 标 号	药 皮 类 型	焊 接 电 源	序	焊 条 标 号	药 皮 类 型	焊 接 电 源
1	T × × 2	钛 钙 型	直流或交流	4	T × × 5	锰 型	直流或交流
2	T × × 3	钛铁矿型	直流或交流	5	T × × 6	低 氢 型	直流或交流
3	T × × 4	氧化铁型	直流或交流	6	T × × 7	低 氢 型	直 流

表10-3中各型药皮有如下特征:

**钛钙型:** 药皮含多量氧化钛及相当量钙或镁的碳酸盐矿石, 焊接工艺性能良好, 熔深一般, 飞溅少, 易脱渣, 焊波美观, 各种位置焊接均适宜。

**钛铁矿型:** 药皮含多量钛铁矿, 焊接工艺性能良好, 熔深一般, 电弧稳定, 飞溅一般, 焊波整齐, 适用于各种位置焊接。

**氧化铁型:** 药皮含有多量氧化铁矿及较多的锰铁脱氧剂。焊接工艺性能较差, 飞溅多, 但电弧稳定, 熔深较大, 熔化速度快, 熔敷金属有较好的抗热裂性, 适用于中、厚钢板、钢管平焊。

**锰型:** 药皮含多量氧化锰矿及较多量锰铁脱氧剂。焊接工艺性能较差, 飞溅稍多, 但电弧稳定, 熔敷金属抗热裂性良好, 含碳量高的中、厚度钢板较适宜采用这种焊条, 但立焊及仰焊性能较差。

**低氢型:** 药皮主要是碳酸钙矿和萤石, 焊接性能一般, 焊波高, 可用于各种位置焊接。药皮干燥时, 可焊接含硫及碳较多的钢材。

以A3、16Mn为材料的压力钢管, 一般情况下较多采用T422及T502型焊条。

#### 四、焊条直径选择

焊条直径根据施焊钢板厚度决定, 按下列范围选用:

钢板厚	
$\delta = (4 \sim 6) \text{ mm}$	焊条直径 $d \leq 2.5 \text{ mm}$
$\delta = (8 \sim 12) \text{ mm}$	$2.5 < d < 6 \text{ mm}$
$\delta = (12 \sim 16) \text{ mm}$	$d = 6 \text{ mm}$

#### 五、焊接坡口型式选择

小型水电站压力钢管的纵、横焊缝多数采用手工焊。焊接部位先要削成坡口。坡口型式选择以减少焊接工作量、有利于保证焊缝焊接质量, 且与焊缝质量检查方法相适应为原则。

“V”型坡口适用于钢板厚度  $\delta = (10 \sim 20) \text{ mm}$ ;

“U”型坡口适用于钢板厚度  $\delta > 20 \text{ mm}$ ;

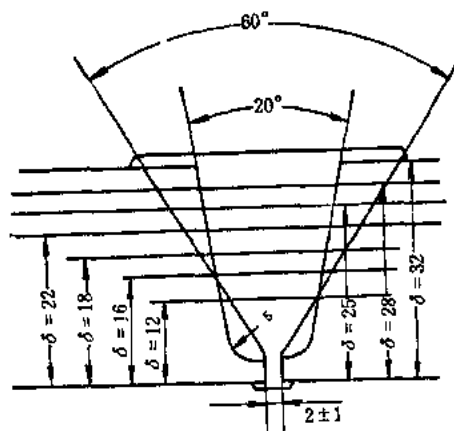


图 10-3 不同厚度钢管接缝熔池断面比较

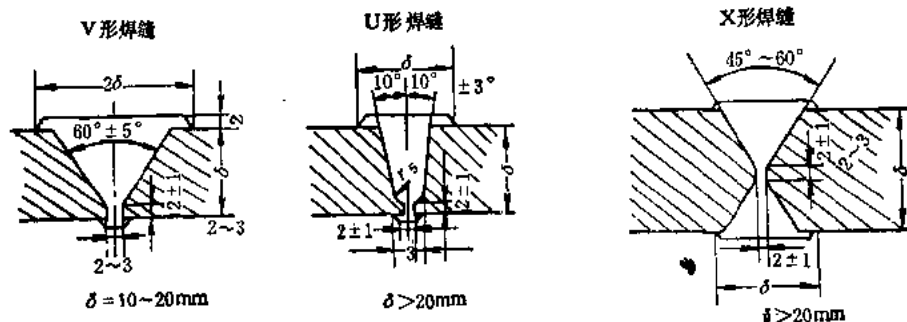


图 10-4 V型、U型、X型焊接坡口形式

“X”型坡口适用于钢板厚度  $\delta > 20\text{mm}$ 。

各种坡口熔敷金属量比较见图10-3, 坡口形式见图10-4。

## 第二节 钢管的设计内容及设计基本资料

### 一、压力钢管的设计内容

压力钢管设计工作一般分成初步设计及技施设计两个阶段进行。

#### (一) 初步设计阶段

初步设计阶段按以下步骤进行:

(1) 管线布置。根据地形、地质、机组台数、水头和流量等条件, 结合钢管进水口及电站厂房建筑的位置、施工安装及运行维护方便的要求, 建立向机组供水方式的可能方案, 并就各方案在地形图及剖面图上布置管轴线走向、高程及镇墩位置。

(2) 管轴几何尺寸计算。根据管轴平、立面图形, 计算钢管各直管段长度及转角。当同一位置上平面及立面都需要转弯时, 宜使两者结合, 按立体转角布置。长度计算到“mm”, 角度计算到“s”。计算长度及转角应结合三角控制网测点, 测定管轴线各控制点(如转弯点、进口中心等)平面座标的位置及高程。

(3) 根据水头、流量等资料估算经济管径及拟定可能分岔形式。

(4) 管道水力计算。水力计算包括水头损失值和配合机组调节保证计算, 以确定水击压力沿管轴分布。

(5) 管支承及附属结构的确定。选择中间支承形式、间距, 设置并调整镇墩位置。确定伸缩节、进入孔等附属结构的位置, 并初拟结构形式及尺寸。

(6) 管壁厚度的估算。根据各管段的计算水压力, 按锅炉公式以规范《SD144-85》中膜应力区基本荷载的允许应力估算各段管壁厚度。

(7) 管壁抗外压稳定校核。

(8) 镇、支墩抗滑稳定体积及几何尺寸的初步拟定。

(9) 初步确定钢管防腐蚀措施。

(10) 工程量、材料管槽开挖土石方量及造价计算。

(11) 各方案的综合技术经济比较, 选择推荐方案。

#### (二) 技施设计阶段

技施设计按批准方案进行以下工作:

(1) 根据钢管各计算段(同壁厚、同直径)承受的计算水压力值, 验算管体强度。

(2) 弯管、锥管及一管多机供水时的分岔管结构设计。

(3) 钢管附属结构的设计。

(4) 镇、支墩地基应力校核, 墩体混凝土施工分期, 管壳锚固措施及埋设件设计。

(5) 弯管、锥管、岔管的结构设计, 刚性环设计。

(6) 钢管基础及附近地面保护、事故排水道、检修通道等圬工措施设计。

(7) 确定钢管防腐蚀措施, 并提出工艺要求。

(8) 钢管管节组装编序, 合拢管节设计。

## 二、钢管设计应有的基本成果

### (一) 初设阶段

初步设计阶段应作出以下几方面成果:

- (1) 压力钢管进口到厂房的枢纽建筑物及交通道等圬工设施的平面布置图。
- (2) 沿管轴纵剖面图(包括基础地质图例)。
- (3) 镇、支墩的平、立面几何尺寸图。
- (4) 钢管及管槽的代表性断面。
- (5) 特殊管节(如伸缩节、分岔管、进入孔等)的基本几何尺寸及结构形式。
- (6) 钢管技术特征值、材料, 工程量及工程概算指标。
- (7) 初步设计说明书(压力钢管部分)。

### (二) 技施设计阶段

技术施工设计阶段应有以下方面的成果:

- (1) 压力钢管进口到厂房的枢纽建筑物、交通、排水等圬工设施的平面布置图。
- (2) 钢管、镇墩、支墩基础开挖图。
- (3) 钢管及管槽纵、横剖面图。
- (4) 钢管的直管段、锥管、弯管等管节的制作展开图、焊缝形式图。制作工艺方面的要求。
- (5) 岔管结构图, 各组成管节和加强结构的展开、制作加工图及焊缝形式。
- (6) 伸缩节、进入孔的结构图(安装总图), 零、部件加工制作图。
- (7) 钢管管节组装结构编序图。
- (8) 镇、支墩结构图、混凝土分期、钢管锚固以及安装架立预埋件布置图。如需要配钢筋则另绘钢筋图及表。
- (9) 钢管支承结构图, 结构的零、部件加工制作图。
- (10) 补气阀结构图(安装总图), 零、部件加工制作图。
- (11) 加劲环结构图。
- (12) 闷头结构及其加工制作图。
- (13) 水压试验装置图(一般由制作加工单位负责, 设计单位可不作此项工作)。
- (14) 钢管防爆装置结构图, 零、部件加工图。
- (15) 技施设计说明书、材料明细、工程量及造价预算。

## 三、设计基本资料

(1) 电站的水文、气象资料, 如水库或压力前池的最高、最低水位; 下游尾水河段的最高、最低尾水位; 钢管设计流量; 厂房中管道轴线高程; 当地气温、水温最高、最低和多年平均值等。

(2) 压力钢管沿管线地质资料, 如沿管线地质平面图、剖面图, 地基的物理特性指标、承载力、摩擦系数等。

(3) 前池—管线—厂房区的1:200~1:500地形图。高水头电站管线比较长, 此带状

图可采用1:1000~1:2000, 但应有与之配合的局部小比例尺地形图。

(4) 厂房、水轮机资料。如选定机组型号, 机组的运行特性(转速, 飞轮力矩, 调速时间, 机组飞逸转速, 设计的转速变化率限制值等)。厂房平、剖面布置图, 蜗壳、尾管单线图、蜗壳前检修闸阀资料。

(5) 钢管材料规格、材质指标, 制作、安装单位的技术条件。

(6) 运输条件及安装现场的施工条件、组装方法等。

(7) 有关设计规程、规范、标准。

#### 四、钢管布置过程中的测量工作

压力钢管布置在进水口和厂房之间, 地形、地势变化大, 落差集中。各个管节及附件都必须事先设计安排好。为了严格控制管轴线平面位置和设置高程, 测量工作必须满足设计、安装所需要的精度。

平面位置控制方面, 对于农村小水电站来说, 如果管线比较短, 水头不大时, 可以以管轴作闭合导线, 以方位角或导线间夹角控制各直线段间的相对关系; 对于管线比较长的小型水电站来说, 应由三角导线网控制, 测算各直线管段的水平投影长度, 以方位角控制线段走向。

钢管进口中心、管轴转弯点或镇墩中心、蜗壳入口中心或机组中心, 应作为网点的控制测点, 测算出坐标位置(国家坐标网或假设的坐标网), 并以此控制施工开挖及管节安装。

压力钢管的立面控制按IV等或相近于IV等的水准要求控制。

弯管转角应能精确至“s”, 管轴长度应精确计算至“mm”。

图10-5为某电站三角网点布置图, 其中导线AB为基准线。

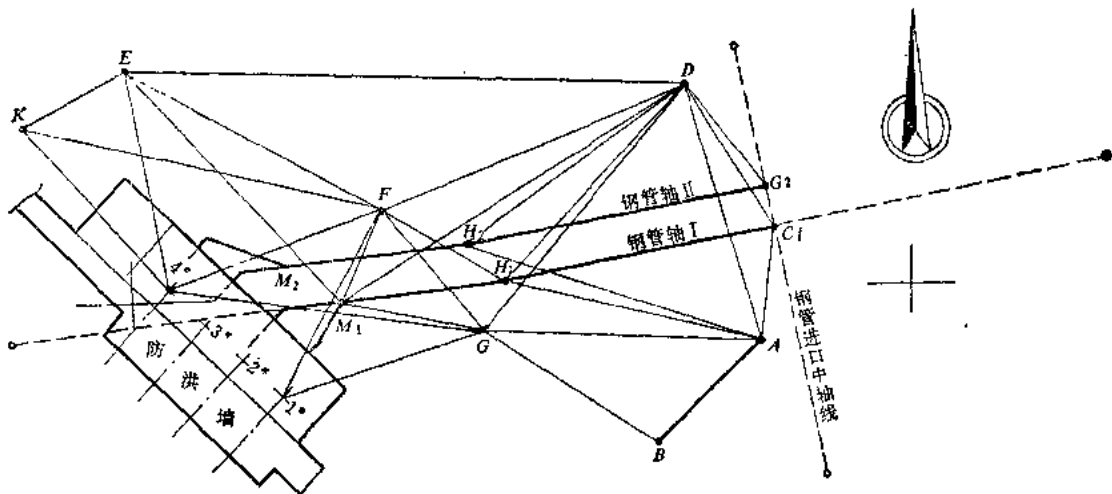


图 10-5 某电站三角控制网点布置图

$C_1$ 、 $C_2$ —钢管进口中心;  $H_1$ 、 $H_2$ —镇墩中心;  $M_1$ 、 $M_2$ —分岔管中心;  $A$ 、 $B$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $K$ —控制点;  $AB$ —基线, 长度由钢钢尺精确测量

### 第三节 钢管布置

#### 一、管线布置

明管管线一般情况下,基本上按地面高程变化而改变管轴俯角。布置时,应考虑下面几个方面:

(1) 钢管宜做成分段式,管轴尽可能布置成直段,以缩短管线长度,特别是有小范围的地面起伏时,适当增加开挖量往往比设置弯管和镇墩来得经济。

(2) 管线应低于钢管进口到蜗壳入口的最低水力坡线,管顶至坡线间不少于2 m  $H_2O$ 高。

(3) 钢管转弯时,转弯半径不宜小于3倍管径,有困难时,亦不宜少于2倍管径。钢管俯角一般不大于 $42^\circ$ 。

(4) 钢管地基开挖高程、断面形式,按满足施工安装要求空间、运行维护方便,交通道及管槽排水的布置要求,管底至地基最少不小于60cm。

(5) 管线经过地段地基稳定,无山洪、滑坡、塌方及滚石威胁。

(6) 镇、支墩宜设置在新鲜的或弱风化基岩上。应尽量避免可能发生不均匀沉陷的地基。特殊情况下,软基不可避免时,应估计可能沉陷量大小、采取地基加固措施,或改进支承结构形式、调整支承间距等技术措施的可能性,在经济比较基础上决定合适的方案。

(7) 管轴经过地带,应有利于钢管施工安装、堆放和运输。

(8) 钢管引进厂房前的弯管、锥管、岔管外混凝土墩体,宜在平缓地面布置,因此要求厂房前缘有一个较开阔、平坦的地面。

(9) 管线经过地带,一般是山脊或利于排水的山坡段。

(10) 管轴平面上、立面上都需要转角时,应考虑立体转角,以减少弯管水力损失及弯管长度。

图10-6为坝后明管布置示意图。

#### 二、钢管供水方式

向机组供水方式有单管单

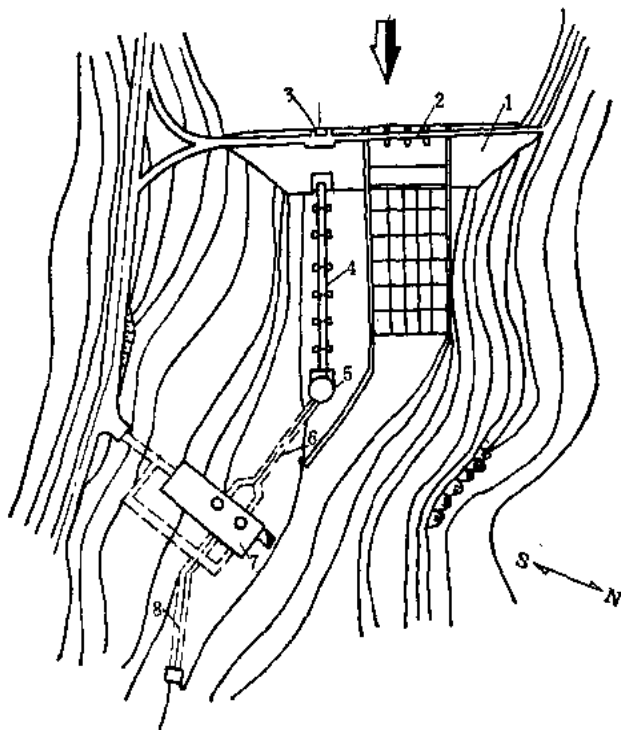


图 10-6 坝后明管布置示意图

1—挡水坝; 2—溢流坝; 3—进水口; 4—压力明管; 5—调压室;  
6、8—压力埋管; 7—厂房



机、单管多机及分组的单机多机三种。供水方式的选择主要根据水头、流量、机组台数条件、管道材料供应、制作技术条件、机组分期供应和安装等因素,以及地形、地质条件,建立方案,通过技术经济论证确定。一般情况下,水头不高、流量较大的短管道宜采用单管供单机组的方式,钢管入口有事故闸门,机组的蜗壳前可省去检修闸阀。中、高水头而流量不大,管道较长,机组数不超过3台时,以单管供多个机组的方式比较合适。中、高水头,流量较大,致使钢管的 $[HD]$ 值偏高,制作安装、管道支承结构,材质要求等均存在一定难度或较高要求,机组数多于4倍,这种情况下,分组供水方式可能比较适宜。

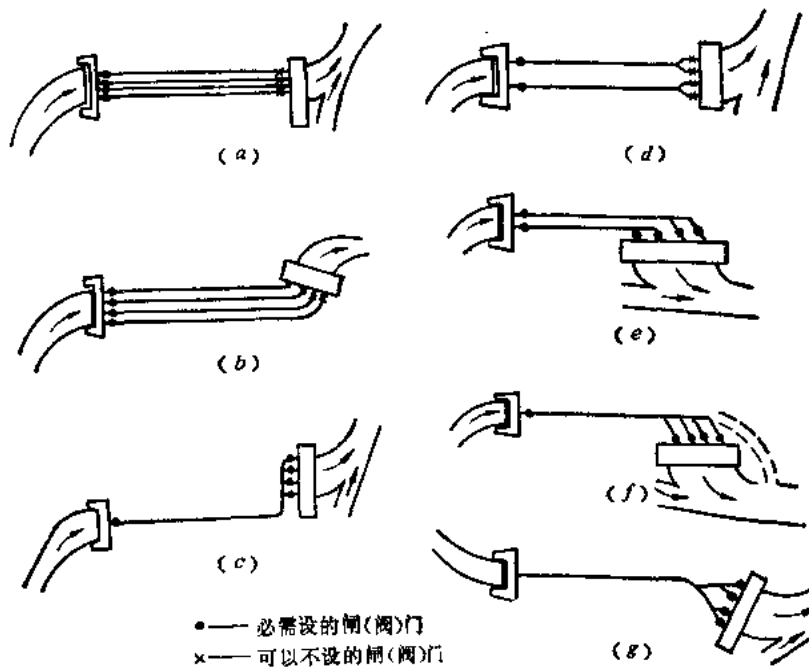


图 10-7 钢管引进厂房的不同供水方式示意

### 三、钢管进厂角度

压力钢管与厂房间相对位置,主要由地形、地质条件及防事故要求而决定的,图10-7为钢管引进厂房不同角度的例图。

在厂房一端引进或使管轴与厂房纵轴平行,此两种方式有利于厂房建筑及有关电气设备避开钢管可能破裂时造成的威胁,但水头损失及钢管转弯处镇墩偏大。可以证明,厂房前的镇墩体积与钢管转入水平段以前的仰角和弯管平面投影偏角关系十分突出。仰角越小,此弯管所在镇墩体积越大;弯管平面上投影偏角越大,镇墩体积越大,如图10-7中的图(b)、图(c)、图(e)、图(f)。实际工程中,当偏角达 $90^\circ$ 时,镇墩体积最大。因此应尽量少采用图(c)和图(e)等管道直角转弯的形式。管道垂直厂房纵轴,成正向引进方式(图10-7中(a)图、(d)图、(g)图),可减少水头损失,缩短管线,减少镇墩工程量,但钢管如果发生爆裂事故,对厂房有严重威胁,所以低水头情况下,这种引进方式比较好。只要地形、地质条件允许,厂房纵轴与钢管轴斜交,钢管从厂房一端

靠近厂房，往往可以得到兼顾的效果。

#### 四、钢管镇墩与支墩布置

镇墩用以固定钢管。设置镇墩的位置应是：水管转弯或分岔处，和当直管段长度超过150m时的直管段中部。若管道纵坡较缓，也可以使直管长超过150m，而将伸缩节设置在直管段中部。

镇墩地基应该稳固，并且有足够的承载力。

支墩用于镇墩间支托钢管之用，且允许钢管顺管轴滑动。按我国规范规定，支墩按等间距设置，在特殊情况下，如局部地段地基无法安排支墩，也可局部调整支墩位置，但最后必须通过管壁及支承结构强度校核论证。估计可能有沉陷而又无法错开的情况下，还可以设计能调整钢管管轴高程的支承结构。

支墩间距选择，涉及制造、运输、堆放和安装方法，钢板原材料出厂规格尺寸等多种因素，通常只要运输安装条件许可，支墩间距应与运输管节长和横焊缝错缝要求结合。支墩间距是否合适，最终要通过管体结构强度核算决定。支墩间距在钢管敷设角、管径、壁厚、设计水压力、钢材材质等因素之间彼此联系、互相影响，因此支墩间距在工程实践中变化幅度比较大，《小型水力发电站设计规范》中第3.5.31条指出支墩间距一般为6~12m。设计水压力较大，坡地平缓，流量较大情况下，宜拟定较短间距，再结合其它因素分析、最终通过管体强度校核确定。反之，当[HD]值较小，坡地较陡时，可拟定偏大的间距。当水压力、管径、敷设角已定的条件下，拟定的间距如不满足强度要求时，还可以通过调整管壁厚度（不少于最小厚度）来解决。

小水电站的钢管支承结构形式对管体强度也很有影响，因此常见的无支承环鞍式支承，支墩间距偏短，较常见的为5~8m；有支承环的滑动或滚动支承，支墩间距较长。据一些国外资料所载，支墩间距在6~10倍管径以内，对钢管运行中可能产生的共震也有改善作用。

支墩上的钢管，其应力比较复杂，因此支墩上钢管局部变形区不应该设置横焊缝，实际上钢管由许多单管节焊成，每个单元是出厂钢板厚度的整倍数，选择钢板宽度时，亦宜结合支墩间距作考虑，必要时，可以安排短于板宽的管节，以调整错缝，但这种短管节不宜过多，以节省钢材。

支墩应使钢管管底离地基面的距离不少于60cm，伸缩节一般设在镇墩和紧接它的第一个支墩之间，两个墩体间净空一般为0.1~0.2倍支墩间距或管径的2~3倍。

地震区的钢管镇、支墩，宜埋入较深的完整、坚固的地基中，适当加大基础面，缩短镇、支墩的间距，防止钢管与地震发生共震并改善地震对钢管应力影响。

#### 五、伸缩节、检修进人孔、放水孔及其布置

##### （一）伸缩节

##### 1. 伸缩节段长度估计

伸缩节用以改善钢管的温度应力，适应镇、支墩间微小不均变形（沉陷）以及管轴安装中不大的长度误差调整。国内广泛使用的套管式伸缩节的结构形式，均由内管、外套管、调压圈以及止水填料盒所组成。

表 10-4

## 伸 缩 节 结 构 设

编号	承受内 压水头 (m)	材 料	组成管节内径			长 度				管 壁 厚 度		
			外套管	内套管	调压圈	外套管	内套管	调压圈	组合长	外套管	内套管	调压圈
1	20	A3	1200	1150	1184	695	585	200	1000	8	8	20
2	20	A3	2062	2000	2032	600	370	125	1000	18	12	16
3	20	A3	1560	1500	1524	1065		220	1170	20	10	18
4	22	A3	2158	2100	2128	650		1000		16	10	16
5	30	A3	1376	1300	1334	250	270	125	650	18	12	16
6	30	A3	2276	2200	2234	545	320	125	700	18	12	16
7	32	A3	1342	1300	1327	735	410	230	630	12	12	20
8	37	A3	1050	1000	1034	735	585	320	1000	10	10	20
9	38	A3	2050	2000	2034	470	965	320	1300	10	10	20
10	39.7	A3	1650	1600	1634	470	410	230	580	14	10	20
11	43.6	A3	2076	2000	2026	760	880	235	1080	20	10	18
12	45	A3	696	600	648	540	100	140	680	20	20	18
13	49.1	A3	1288	1200	1238	400	950	300	1000	16	14	20
14	49.1	A3	1688	1600	1638	425	950	300	1000	16	14	20
15	49.1	A3	1084	1000	1034	350	900	290	950	16	12	20
16	50	A3	1784	1750	1778	300	1100	250	1000	10	10	20
17	55	A3	1440	1400	1425	545	600	250	1300	10	10	20
18	55	A3	1776	1700	1738	700	1088	160	1300	14	14	12
19	55.8	A3	866	800	825	585	600	200	1400	10	8	20
20	56	A3	936	858	890	545	600	260	1300	8	8	20
21	60	A3	1272	1200	1234	250	350	125	770	16	12	14
22	60	A3	2080	2000	2038	720		120	1200	18	12	16
23	62.5	A3	1370	1300	1322	785	1250	200	1450	10	10	20
24	65	ZG35-5019	1265	1200	1226	778	1100	350		18	10	16
25	75	A3	2278	2200	2234	545	320	125	700	18	12	16
26	90	A3	1300	1200	1252	540	100	140	680	20	20	18
27	95	A3	1366	1300	1326	680	970	180		18	12	16
28	98	A3	2080	2000	2040	720	370	125	1000	18	16	16
29	100	A3	870	800	835	500	525	125		8	8	8
30	100	ZG35-5019	1362	1300	1322	778	1100	350		18	8	16
31	107	A3	1274	1200	1241	735	1210	250	1400	12	12	12
32	150	A3	568	500	528	705	635	130	1005	14	14	20
33	150	A3	1334	1250	1302	835	690	190		16	16	14
34	150	A3	1374	1300	1334	760	970	180	1380	18	14	16
35	160	A3	874	800	840	500	525	125		10	10	8
36	165	A3	669	600	626	336	726	110		14	10	14
37	200	A3	878	800	840	500	525	125		12	12	10
38	220	A3	1278	1200	1238	780	970	180	1380	18	16	16
39	230	A3	1650	1600	1634	365	100	120	650	16	16	14
40	273	A3	892	800	838	580	700	200	1050	18	14	18
41	285	A3	1286	1200	1246	760	970	180	1380	18	20	16
42	290	A3	974	928	951	735	965	320	1300	16	16	20

注 (1) 外套管长度包括管径扩大部分, 收缩后的正常管径段及其间的过渡管节段。

(2) 各组成管节长度, 与所设计电站钢管镇墩间距、温度变化幅度有关, 不能随便套用。

(3) 调压法兰的宽度中, 当有两个数据时, 系指外套管上的法兰和调压圈法兰宽度; 当仅有一个数据时, 多

(4) 止水盘根沿管轴向无长度数据, 一般按 $(0.1 \sim 0.2)D$ 确定其长度, 但止水盘根圈数不少于5圈, 高水头情

计 参 考 尺 寸

单位: mm

止 水 盘 根		调 压 法 兰			调 压 螺 栓			备 注
材 料	尺 寸	厚 度	宽 度	螺栓中 心直径	根 数	直 径	长 度	
油 浸 麻	20×3484	20	74—	1120	8	M19	280	石棉绳浸牛油, 石墨粉 法兰有肋20片, 肋厚10
	20×6418	25	75—90	2162	38	M20	130	
石 棉 绳	20×4838	25	—94		28	M22	200	
橡皮、油麻	20×6720	10	140—156	2298	40	M30	260	
油 浸 麻	28×4241	25	75—90	1454	32	M20	130	
	28×7068	25	75—90	2370	38	M20	130	
橡皮、麻绳	25×4170	18	116	1428	24	M16	140	
	25×3481	20	74	1122	8	M19	280	
油 浸 麻	25×7273	20	79	2332	18	M19	280	
	18×5133	18	93	1728	24	M19	200	
油浸石棉绳	30×6434	25	95	2196	28	M23	250	组合法兰, 2片厚20环, 环间肋12片
油 浸 麻	30×2098	40	70	783	12	M20	160	
	32×3952	20×2	160	1340	24	M20	540	
橡皮、油麻	30×5208	20×2	140	1360	24	M24	500	
	30×3311	20×2	140	1250	24	M24	490	
油 浸 麻	20×5579	25	80	1914	32	M16	150	
	25×4492	20	48	1488	12	M27	280	
	25×5504	40	84	1900	12	M30	220	
	25×2639	20	77	1132	8	M19	280	
	28×2859	20	54	986	24	M30	280	
	25×3921	25	76—90	1354	26	M20	130	
	28×6415	25	75—92	2172	38	M20	130	
	25×4225	26	70	1368	24	M19	280	
	30×3980	50	63—85	1357	24	M20	260	
	20×7071	25	75—90	2366	38	M20	130	
橡皮、油麻	28×3990	40	70	1387	12	M20	160	外套管用镍管收缩, 内套管有弧形外缘
	25×4225	40	68—90	1478	24	M20	260	
油浸麻绳	28×6460	25	75—94	2170	38	M22	130	
橡皮、油浸麻	25×2648	20	55—73	920	24	M20	60	
	25×4207	50	63—85	1454	24	M20	260	
油浸麻绳	25×3924	20	80	1562	16	M27	230	
	25×1696	25	70	668	14	M16	125	
橡皮、油浸麻	26×4109	22	52—70	1426	16	M16	350	
	25×4244	40	68—90	1486	24	M22	260	
油浸麻绳	25×2681	16	71—80	965	25	M22	70	
	22×2023	20	50—64	748	24	M16	160	
	25×2674	24	67—87	980	27	M24	90	
	25×3940	30	68—90	1398	24	M22	260	
	20×3914	40	70—84	926	20	M20	160	
	25×2702	50	86	1000	24	M30	278	
橡皮、油浸麻	25×3968	40	68—90	1398	24	M22	260	油浸麻绳
油浸麻绳	25×2994	20	54	1024	12	M22	280	

数为调压圈法兰宽度。

况, 往往用橡皮止水圈设在止水麻绳的两端, 阻止水油乳液渗出。

初步布置中,要拟定伸缩节各组成管节长度及组装后的长度,这些均取决于温度变形幅度、钢管镇墩间距、管径、承受的设计水压力以及构造要求。初定尺寸时,可以参考表10-4中所列国内部分小水电站压力钢管伸缩节尺寸。

## 2. 伸缩节的位置

伸缩节位置影响管壁应力及镇墩工程量。大多数情况下,钢管敷设地段坡度较大,伸缩节位置已如前述,宜设在镇墩以后的第一个支墩之间,两个墩体之间的距离远短于支墩正常间距。当坡地比较平缓,则伸缩节设置在两个相邻镇墩的中间位置,有可能减少镇墩体积。

伸缩节外套管法兰到支墩中心的距离,一般取相邻支墩各段等间距值的0.1~0.2倍。采用较大值有利于钢管强度的充分利用,但以伸缩节内、外套管在钢管轴线向变形不影响伸缩节正常运行限度。

伸缩节作为钢管的主要附件,它的计算方法见第十四章。

### (二) 检修进入孔的布置

进入孔口有圆形及椭圆形两种形式,前者在钢管上割孔呈圆形,后者在钢管上割孔为椭圆形。圆的直径或椭圆的短直径不得小于450mm。水电建设中常用的进入孔结构与化工部门的压力容器进入孔十分相近,手边如有化工设备手册资料,一般情况下可以套用(按常温条件)。表10-5为国内部分小水电站中采用的进入孔结构尺寸资料,可供初拟结构形式及尺寸时参考。

进入孔一般布置在镇墩上游方向的钢管膜应力区范围内,其位置在钢管横断面的水平轴下方,孔中心线与水平轴成 $45^\circ$ ,人孔盖板与颈管法兰间宜设铰链,以方便开关,盖板下应该设置导流塞。当镇墩体积较大,埋入镇墩中的直管段较长时,也可以将进入孔设在镇墩中的直管顶部,这种布置方法可以改善钢管开孔孔周应力。

进入孔间距约150m。管径在1m以下的情况下,适当缩短进入孔的间距,有利于改善钢管内维修工作条件。压力钢管进口处(进水口),宜将进入孔与闸门通气孔结合(闸门用前止水的形式),进入孔面积总能够满足通气孔面积。钢管进入厂房后,人孔结构可与蜗壳进入孔,或设置专门的接合节段结合考虑,避免重复结构。

### (三) 检修放水管的布置

机组、管道检修放水设备在不同的情况下,采用以下几种方法:

(1) 由蜗壳放空阀将管道、蜗壳内的水通过集水井排出;

(2) 由闸阀前专设的检修放水管,将水放入专门的泄水结构,排至下游;

(3) 压力管道进入蜗壳前,如果有低于蜗壳最低点的管段(如有倒虹吸管),则在最低点设置排水管,视水流能量大小,设置专门的消能措施。

低水头压力管道一般比较短,蜗壳前不设事故检修闸阀,自进水口至蜗壳,流道内水体由厂房内检修排水管引至集水井。中高水头的压力管道末,蜗壳前都有闸阀(平板闸、蝴蝶阀或球形阀),闸阀处的旁通管或闸阀自身都可以使压力管中的水放空(图10-8)。因此一般情况下,钢管管末检修排水管并非必要,需要设置时,宜就设高压阀门和临时抽水措施之间进行方案比较。

单位: mm

表 10-5 进 人 孔 结 构 设 计 参 考 尺 寸

设计 编号	水头 (m)	钢材品种	钢管管壳		进入孔 直径 (内缘)	补强贴板		颈 管		颈管法兰		颈 管 盖 板			螺 栓		止 水 垫 圈		备 注
			内径	壁厚		宽度	厚度	高度	壁厚	宽度	厚度	外径	厚度	螺栓中 心直径	直径	根数	材 料	厚 度	
1	10	A3	2000	10	500	300	10	500	15	115	20	760	12	640	M20	16	橡皮板	4	
2	20	A3	1500	10	500	250	10	200	10	120	20	760	20	640	M20	16	橡皮板	4	
3	20	A3	2000	12	500	280	14	173	14	90	25	712	25	622	M24	20	橡皮板	20	
4	25	A3	1200	10	600	200	12	133	10	80	20	760	25	720	M16	12	橡皮板	20	
5	30	A3	2200	12	5000	280	14	176	14	90	25	712	25	622	M24	20	橡皮板	15 φ 8	
6	49	A3	1300	8	5000	200	10	199	16	88	25	712	25	622	M20	20	橡皮板		
7	50	A3	1300	16	5000	150	25	270	16	54	30	720	30	640	M8	30	橡皮板		
8	50.6	A3	1750	12	540		16	100	12	40	30	684	30	644	M18	20	O型橡胶圈		
9	60	A3	2000	14	500	280	14	173	14	90	25	712	32	622	M24	20	橡皮板	盖板上焊加劲肋	
10	68	A3	1200	10	500	290	14	207	14	90	25	712	25	632	M24	20	橡皮板		
11	85	A3	1200	12	500	200	12	252	16	90	25	712	16	622	M20	20	橡皮板		
12	90	A3	2200	16	500	280	16	176	16	90	25	712	32	632	M24	20	橡皮板		
13	98	A3	2000	16	500	280	16	173	16	90	25	712	32	622	M24	20	橡皮板	盖板上焊加劲肋	
14	100	A3	800	8	400	190	10	100	10	70	30	565	26	515	M22	16	橡皮板		
15	200	A3	750	16	450	140	20	160	20	90	20	670	40	570	M24	20	橡皮板		
16	250	A3	800	14	400	190	14	100	14	89	44	610	42	550	M30	16	橡皮板		
17	260	A3	1000	20	400	200	18	200	12	75	46	580	46	525	M38	16	橡皮板	18	
18	290	A3	900	18	500	150	20	243	20	60	20	660	20	600	M20	24	橡皮板	15	
19	290	A3	1300	32	500	250	32	150	12	93	40	750	30	600	M25	20	O型橡皮圈	φ 30	
20	306	A3	1200	20	500	200	20	150	12	113	40	750	30	600	M25	20	O型橡胶圈	φ 31	

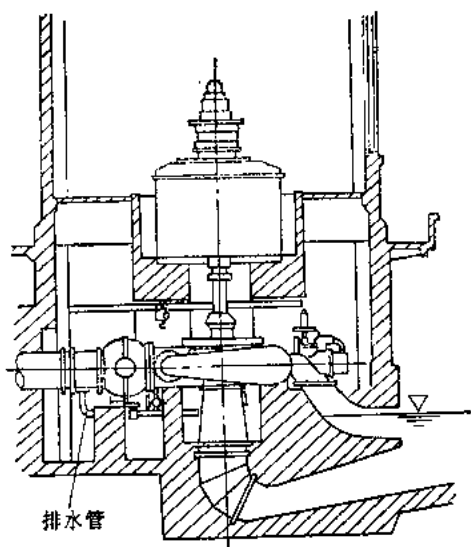


图 10-8 高压阀门上段钢管放水管布置

压力钢管如遇到特殊地形而用虹吸管形式时，或钢管自水平段后管径收缩与蜗壳连接，出现低于蜗壳的容积，这种情况下，在管底要设置排水管，当水压力较大时应配合消能装置。

图10-9为某电站钢管进水闸门室后设置排水管的实例，解决钢管进口闸门漏水时，管内检修方便和安全问题。放水管直径一般在 $d=300\sim600\text{mm}$ ，视放空时间、放空水体的体积而定。

这种放水结构实际也作为管底的检修进入孔，因此结构及管壁加强形式按检修孔设计处理。

#### (四) 放空管的消能结构

压力钢管的放空装置末端消能工结构形式示例于图10-10。

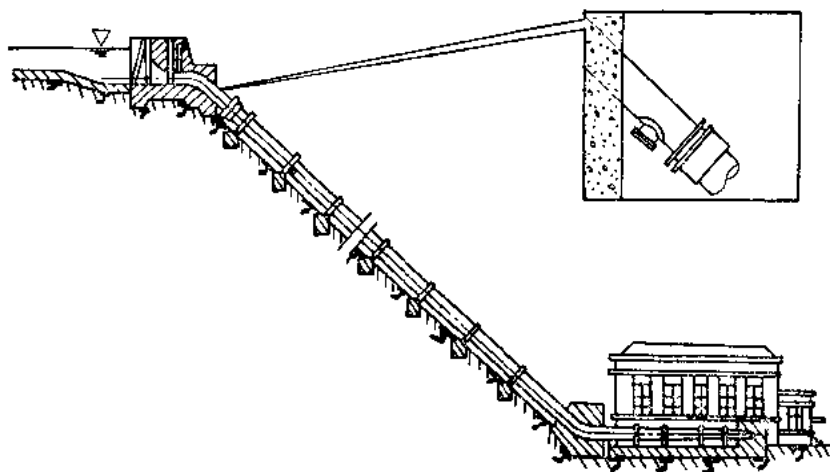


图 10-9 压力前墙后排水管的布置形式示意图

放空管上装置两道 $\phi 600$ 检修阀门，互为备用，出口端设高压针形阀。打开针阀后，高速水流通过消力塘消能，再由矩形薄壁堰溢出，通过泄水道将水流引至下游河槽。消力塘的水深及消能段长度根据水力计算决定。

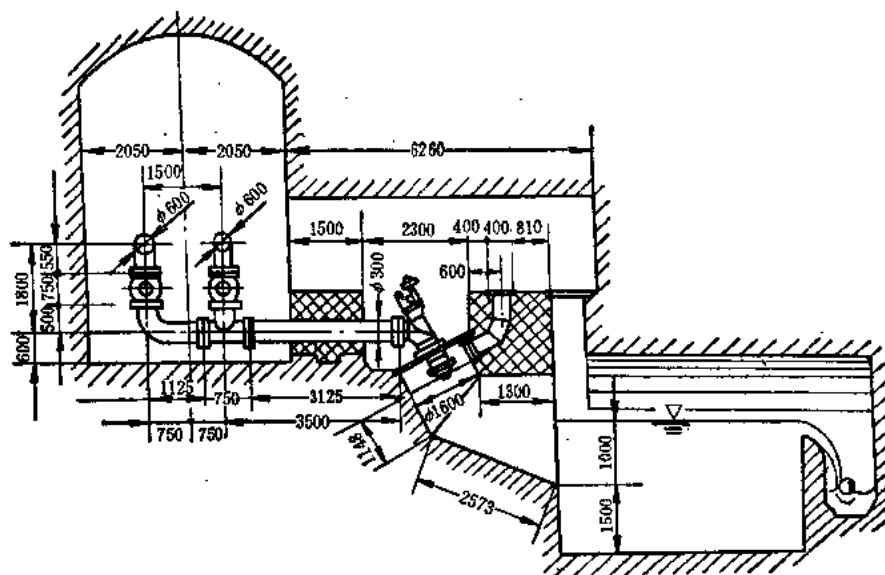


图 10-10 钢管放水管阀及消能装置示图 (单位: mm)



## 第十一章 钢管的直径和管壁厚度

### 第一节 钢管直径选择

《水电站压力钢管设计规范》(SD144-85)以下简称《规范》第2·1·3条规定：“管径应根据技术经济比较确定。可根据布置和内压力变化情况分段定出几种管径，但变径次数不宜过多”。《小型水力发电站设计规范》第3·5·26条规定：“压力水管的内径和根数，应在经济计算的基础上，结合地形、地质和施工等因素，综合比较选定”。

按上述规定，管径选择应在满足机组调节保证条件的前提下，结合供水方式选择、定出几种管径方案比较进行选择。一般做法是先按选定机组机型需要的最大供水流量，拟定供水方案，由经验公式的经济管径（或经济流速值），在多个方案中选定最优方案。比较中，各方案均采用相同的经验经济管径估算公式。选定方案后，对管径增、减作进一步的技术经济比较，确定管径分段。

一般情况下，对于水头不高、管道较短，钢管造价占工程总造价比重较小的工程，可直接在满足机组调节保证要求前提下，按经验的经济流速值（或经验公式）选定管径，整条钢管直径不分段或少分段。多数中水头以上的管道，管径应该分段，并且对选定管径进行技术经济论证。论证中，除满足机组调节保证要求外，根据可引用流量的变化特性，机组最大引用流量的保证率大小，引水渠道经济过流能力，水轮机高效率区范围内工作水头允许变化范围，对方案比较阶段选定的管径作调整，以求得降低工程造价、减少钢材用量的最佳管径。管径调整应该对丰、中、枯三个典型年的可引用径流量逐月进行电量计算，计算中应该计入引水渠道、水头损失、水轮机的效率变化。

#### 一、按经验的经济流速值选择管径

国内经济流速值多数为3.0~5m/s。根据《规范》(SD144-85)，钢管按不同水压力段，采用不同直径。低水压力段用小流速值，高水压力段用大流速值。钢管较短时，宜采用全长直径等值。根据已拟定的流速 $V_0$ ，由下式计算直径：

$$D_0 = 1.128 \sqrt{\frac{Q_{\max}}{V_0}} \quad (\text{m}) \quad (11-1)$$

式中  $Q_{\max}$ ——钢管的设计引用流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

《小型水力发电站设计规范》第3·5·26条给出压力钢管经济流速范围为4.0~5.0m/s。实际选用时，可根据电站水头、钢材来源及价格情况选用偏大值或偏小值。

#### 二、几个估算经济管径 $D_0$ 的经验公式和实例

##### 1. “彭德舒”经验式

$$D_0 = \sqrt[7]{\frac{5.2Q^3}{H_{\max}}} \quad (H > 100\text{m}) \quad (\text{m}) \quad (11-2)$$

$$D_0 = \sqrt[7]{0.052 Q_{\max}^3} \quad (H < 100\text{m}) \quad (\text{m}) \quad (11-3)$$

2. “法尔布施”经验式

$$D_0 = 0.52 \sqrt[7]{\frac{N^3}{H^4}} \quad (\text{m}) \quad (11-4)$$

式中  $N$ ——机组的额定出力, kW。

3. 国内经验式

$$D_0 = 0.639 Q_{\max}^{0.45} \quad (\text{m}) \quad (11-5)$$

式中  $Q_{\max}$ ——钢管设计过水流量值,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

公式(11-2)中的 $H$ 为设计管段的计算水头(静水压力及水击值之和);公式(11-4)中的 $H$ 为机组的计算水头(额定出力时最小水头)。

现将国内已建的部分小水电站压力钢管的直径和有关技术数据列于表11-1,表中按设计流量顺序排列。若用经验式(11-2)、式(11-3)、式(11-4)、式(11-5)计算结果与表11-1中的实际管径值相比较,可发现多数电站的直径比较接近经验公式估算值。

### 三、按技术经济比较选择管径

不同管径方案间作比较时,除对不同管径方案进行技术可行、施工方便程度以及运行条件进行分析论证外,要计算不同管径方案下的功能指标和经济指标,钢材供应较困难的工程,则还可以单独把钢材耗量指标提出作比较依据。对各方案的工程造价和动能效果进行分析比较,结合分析钢管制作、安装、运输及运行条件,甚至材料材质要求和供应条件,就能选择出比较理想的钢管直径。

对小水电站而言,经济比较一般按年费用最小及投资回收年限较短的原则进行。小水电建设资金通过国家补助加地方集资(银行贷款为主)来解决,钢管造价和动能效果有必要考虑时间的价值因素。这种计算和比较相对复杂(动态计算),某些计算数据较难得到准确值,因而一定程度上影响精度,仅从方案比较要求来考虑,相对精度也可以满足要求。规模较小的电站,尤其是小(2)型电站宜于用较简单的静态计算方法,这种方法不考虑利息等反映时间价值的因素,计算比较简单,其中一些数据的精确值亦不易确定,但作方案比较用的相近估算值仍是可以满足的。

(一)按静态计算各方案的年费用

一般用列表形式来比较小I型,电站钢管管径方案,表格形式见表11-2。

表11-2说明:

(1)表中第1项管道总长指主管总长。

(2)第5项出力损失计算  $\Delta N = 9.81 Q_{\max} \Delta H \eta$ 。其中,  $Q_{\max}$ 为钢管设计流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\eta$ 为机组效率平均值,取值0.85~0.9,各方案采用同值,但当水头损失因管径偏小或供水方式特点而明显影响机组效率时,应加修正;  $\Delta H$ 为水头损失值。

(3)第6项年电量损失  $\Delta E = \Delta N t$ 。其中,  $t$ 为装机容量年利用小时数,由水能规划计算确定,缺乏资料时,可采用  $t = 3500 \sim 4500\text{h}$ ,各方案用同值。

(4)第10项钢管投资按原材料出厂价格、运输、加工制作及制作中的损耗率、安装、

表 11-1 国内已建的部分小水电站压力钢管技术数据表

序 号	钢管布置 形 式	设计引 流量 (m <sup>3</sup> /s)	计 算 水 头 (m)	钢 管 长 度 (m)	钢管直径 D, (mm)	序 号	钢管布置 形 式	设计引 流量 (m <sup>3</sup> /s)	计 算 水 头 (m)	钢 管 长 度 (m)	钢管直径 D, (m)	序 号	钢管布置 形 式	设计引 流量 (m <sup>3</sup> /s)	计 算 水 头 (m)	钢 管 长 度 (m)	钢管直径 D, (m)
1	明 管	25.0	30.5	70.00	2.80	24	明 管	5.1	47.0	101.50	1.50	47	明 管	2.50	105.0	257.0	1.00
2	明 管	20.0	12.4	18.00	2.40	25	明 管	4.7	65.62	137.50	1.20	48	明 管	2.50	105.0	257.20	1.00
3	明 管	18.0	13.0	15.60	2.30	26	明 管	4.4	42.0	112.00	1.20	49	明 管	2.50	63.15	108.10	1.10
4	明 管	17.5	46.16	63.00	2.30	27	明 管	4.3	54.6	84.00	1.00	50	明 管	2.50	46.00	54.90	1.00
5	明 管	14.0	62.3	105.00	2.10	28	明 管	4.12	52.6	86.87	1.20	51	明 管	2.50	107.65	200.00	0.98
6	明 管	10.36	36.0	116.00	2.00	29	明 管	4.14	51.85	267.00	1.20	52	明 管	2.25	73.65	247.00	0.90
7	明 管	10.3	34.8	81.30	2.00	30	明 管	4.10	43.0	92.00	1.20	53	明 管	2.10	256.2	647.50	1.00
8	明 管	10.0	16.0	40.00	1.70	31	明 管	4.0	135.0	233.90	1.00	54	明 管	2.10	250.1	550.00	1.00
9	明 管	10.0	30.0	58.00	2.00	32	明 管	4.0	52.0	88.86	1.20	55	明 管	2.10	41.78	436.00	1.20
10	明 管	9.63	24.5	50.00	1.80	33	明 管	3.84	50.0	86.60	1.30	56	明 管	1.92	345.00	605.00	0.80
11	明 管	9.25	20.8	38.50	2.00	34	明 管	3.82	45.0	112.00	1.20	57	明 管	1.89	37.80	76.18	1.32
12	明 管	9.2	21.0	53.00	1.75	35	明 管	3.61	46.0	210.70	1.30	58	明 管	1.75	214.00	670.00	0.80
13	明 管	9.0	98.6	70.00	1.75	36	明 管	3.5	106.0	247.00	1.10	59	明 管	1.70	218.00	530.00	0.80
14	明 管	9.0	65.62	138.80	1.70	37	明 管	3.4	43.0	52.00	1.30	60	明 管	1.70	231.30	340.00	0.80
15	明 管	7.7	43.5	89.00	1.50	38	明 管	3.2	119.0	198.80	1.00	61	明 管	1.60	212.00		0.80
16	明 管	7.7	21.0	32.10	1.80	39	明 管	3.2	57.0	115.00	1.20	62	明 管	1.54	218.00	550.00	0.70
17	明 管	6.48	392.7	700.00	1.48	40	明 管	3.0	114.5	191.00	1.00	63	明 管	1.50	217.00	400.0	0.80
18	明 管	6.45	51.5	116.80	1.50	41	明 管	2.96	132.0	257.70	1.00	64	明 管	1.50	118.00	355.60	0.80
19	明 管	6.2	51.4	83.80	1.50	42	明 管	2.72	92.6	165.00	1.00	65	明 管	1.50	134.50	330.00	0.80
20	明 管	6.1	205.4	412.00	1.60	43	明 管	2.6	108.0	178.60	1.00	66	明 管	1.2	167.10	300.00	0.80
21	明 管	6.0	105.0	266.20	1.40	44	明 管	2.52	68.0	140.00	1.00	67	明 管	1.14	70.00	178.00	0.80
22	明 管	5.95	120.0	261.00	1.70	45	明 管	2.5	179.0	292.00	1.00	68	明 管	0.56	184.00	325.00	0.60
23	明 管	5.25	36.70	156.00	1.40	46	明 管	2.5	100.0	226.30	1.00	69	明 管	0.56	135.00	425.00	0.60

表 11-2

小水电站钢管管径方案选择列表计算

序 号	计 算 项 目	单 位	一管多机方案			一管两机方案			单管单机方案		
			主管直径(mm)			主管直径(mm)			管 径 (mm)		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	管道总长	m									
2	设计流量	m <sup>3</sup> /s									
3	设计流速	m/s									
4	水头损失	m									
5	出力损失	kW									
6	年电量损失	万kW·h									
7	电能损失费用及替代 电能年计算费用	万元									
8	管道平均壁厚	mm									
9	管道钢材总重	t									
10	钢管投资	万元									
11	圬工结构投资	万元									
12	管道的年运行费	万元									
13	总年计算费用	万元									

油漆保护等费用后的扩大单价计算。

(5) 第7项电能损失费按国家或地方电力系统规定的电价乘电能损失值。替代电能一般为火电提供, 它的年计算支出按下式计算:

$$C_k = (a + p_k K_k) \Delta E \quad (\text{元}) \quad (11-2)$$

其中,  $a$  为替代电能每度电燃料费 (元/度);  $K_k$  为替代电能每度电造价 (元/度);  $p_k$  为火电投资效益系数, 为  $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{12}$ 。

(6) 第11项圬工结构投资中包括土、石方开挖费用及镇墩、支墩工程投资, 计入  $K_{\text{管}}$  中。

(7) 第12项管道年运行费按下式计算:

$$C_{\text{管}} = (p + \beta) K_{\text{管}} \quad (\text{元}) \quad (11-3)$$

其中,  $p$  为投资效益系数, 取值同  $p_k$ ;  $\beta$  为钢管的年运行费率, 近似按 7% 取值。

(8) 第13项总年计算费用  $C$  按下式计算:

$$C = (p + \beta) K_{\text{管}} + (a + p_k K_k) \Delta E \quad (\text{元}) \quad (11-4)$$

总年计算费用最小的方案, 动能经济指标比较优越。

(二) 按静态计算各方案的投资回收年限

按列表法计算投资回收年限法的各栏项目, 表的格式见表 11-3。

表 11-3 说明:

(1) 表中第 5 项机组净水头由毛水头减去水头损失值求得。

(2) 第12项钢管年运行费中, 包括管道本身及镇墩、支墩等圬工结构费用的年运行费用, 钢管预期使用年限约为 25 年, 年运行费率约为 (5~8)%, 无资料时可按 7% 取值\*。

● 《水利经济计算规程》, 水利电力部水利水电规划设计院。

表 11-3

列表计算各方案的投资回收年限

序号	计 算 项 目	单 位	一管四机方案			两管四机方案			单管单机方案		
			主管直径(mm)			主管直径(mm)			管 径 (mm)		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	管道总长	m									
2	设计流量	m <sup>3</sup> /s									
3	设计流速	m/s									
4	水头损失	m									
5	机组冷水头	m									
6	年发电量	万kW·h									
7	钢管平均壁厚	mm									
8	钢管材料总重	t									
9	钢管投资	万元									
10	圬工结构投资	万元									
11	总 投 资	万元									
12	钢管年运行费	万元									
13	电能成本	元									
14	投资回收年限	a									

(3) 第13项电能成本由年运行费除年电量值求得。

(4) 第14项投资回收年限为钢管总投资(钢管及圬工建筑)与年发电量净收益、年基本折旧两者之和的比值。其中,年发电量净收益应由年电量出售收入中扣除电能成本后的净值。净收益实际属整个电站,其中管道部分可按管道投资占电站总投资比重折算。钢管的年基本折旧为投资的3.8%。

(5) 其余各项意义同表11-2的说明。

投资回收年限不超过规定年限的方案,是经济的,而回收年限最短的方案最优。

(三) 按动态计算的方案比较

动态计算要考虑施工年数和使用年数,各台机组的投产年限以及电力工业投资利润率(回收率),以年总费用最小的方案,或内部回收率高的方案为最好方案。具体算法可见电力工业部1982年2月颁发的《电力工程经济分析暂行条例》。

## 第二节 钢 管 管 壁 厚 度

压力钢管壁厚由工作厚度及锈蚀裕量两部分组成,可用下式表示:

$$\delta = \delta_{\text{工}} + c \quad (11-5)$$

式中  $\delta_{\text{工}}$ ——工作厚度,取决于强度校核和稳定校核(mm)。

$c$ ——锈蚀裕量,取决于水质对钢材有无腐蚀性及含泥砂量,泥砂颗粒组成和硬度,取1~2(mm)。

低水头、大流量情况下,由强度要求的壁厚较小,为了在施工中使钢管有一定刚度,避免产生很大的椭圆度,管壁应采用最小允许厚度。

## 一、管壁最小厚度

根据《规范》(SD144-85)规定,管壁最小厚度不宜小于下式数值:

$$\delta \geq \frac{D}{800} + 4 \quad (\text{mm}) \quad (11-6)$$

式中  $D$ ——钢管直径, mm.

当计算出的壁厚小于6mm时,应取6mm.

## 二、由荷载要求的管壁厚度

压力钢管承受荷载后,按应力状态,管体可划分成直管段膜应力区、直管段局部应力区和异形管节应力区。膜应力区受力比较简单。局部应力区指设置加劲环和有支承结构的附近部位,由于有局部弯矩,钢管变形复杂,但管壁厚度一般与膜应力区同值,必要时可在局部变形段适当加厚。异形管节指锥管、弯管、进人孔管节及分岔管。这些管节应力复杂,且有应力集中现象,管壁厚度宜比膜应力区增大10%~15%。

管壁厚度先行估算,最后通过详细的应力验算确定。当计算的厚度小于最小管壁厚度,则按最小壁厚选定。当拟定的厚度不能满足应力要求值时,可以增大管壁厚度,也可以通过下列方法调整:

- (1) 调整钢管支座间距;
- (2) 改变支承结构形式及断面尺寸;
- (3) 局部加厚管壁。

膜应力区管壁厚度估算公式:

$$\delta = \frac{pD}{2[\sigma]\phi} + c \quad (\text{m}) \quad (11-7)$$

弯管、锥管壁厚估算公式:

$$\delta = \frac{K_x p D}{2[\sigma]\phi \cos \varphi} + c \quad (\text{m}) \quad (11-8)$$

岔管管壁厚度估算公式:

$$\delta = \frac{K_x p D}{2[\sigma]\phi \cos \varphi} + c \quad (\text{m}) \quad (11-9)$$

以上三式中:

$p$ ——计算水压力;

$$p = 9.8(H_{\text{静}} + \Delta H) (10^5 \text{Pa})$$

$H_{\text{静}}$ ——计算断面静水头, m;

$\Delta H$ ——计算断面处水击增量, m;

$D$ ——钢管平均直径,可近似取内径, m;

$\phi$ ——钢管焊缝的焊接系数,小水电估算壁厚时可取 $\phi = 0.85 \sim 0.9$ ;

$[\sigma]$ ——钢材允许应力,按《规范》(SD144-85)取值;

$\varphi$ ——锥管半锥顶角,度;

$K_x$ ——锥管及其它管节连接时,连接处应力集中系数,由管壁衔接处的不连续偏角决定(见十二章),初估时可近似取 $K_x = 1.1 \sim 1.25$ ;

$c$ ——锈蚀裕量,一般取 $c=2\text{mm}$ ,当管壁厚按构造要求时, $c=0$ 。

计入锈蚀裕量后的管壁厚度,一般厚度应取成以 $\text{mm}$ 为单位的整偶数,如6、8、10、12……等。

锥管的半锥顶角以 $\varphi \leq 6^\circ$ 为佳。在 $\varphi$ 不超过 $6^\circ$ 情况下, $\cos\varphi$ 对厚度影响很小,也可以忽略 $\cos\varphi$ ,最后在应力校核时调整。

选择管径方案过程中,拟定管壁厚度的某些数据可以采用估算值,以简化计算过程。如计算水头可按静水头加大某一百分数(对冲击式水轮机可按10%;对反击式水轮机可按15%~30%,视水头高低而定),各方案简化方法的相对精度一致,一般不影响方案选择的准确性。

### 三、不同壁厚管节的衔接处理

一个电站的钢管从始端至末端, $[pD]$ 值连续变化,要求管壁厚度亦不同。为实用方便,钢管管壁每段设成等厚度,段间厚度差宜为 $2\text{mm}$ 。如钢管比较长,厚度差可增大,以减少钢材规格,不同厚度衔接处,当级差超过 $2\text{mm}$ 在较厚的一方要按《规格》(SD144-85)要求,削1:3坡口,以减少接缝处的附加局部应力。

《规范》第7.1.2条指出:“钢管壁厚变化处,明管宜使外径不变”,按此设计,管外的支承结构比较容易安排,结构的形式和尺寸可以尽量规格化,减少形式、尺寸多变带来的制作安装难度,也附合经济管径的处理原则。

根据公式(11-7)以及 $D_0=1000\text{mm}$ 计算出各种壁厚可以承受的最大计算水头值列于表11-4。此表可供确定不同厚度的钢管适用水头范围时作参考。当实际钢管直径(内径)不同于 $1000\text{mm}$ 时,表中的最大水头值( $\text{m}$ )应除以实际钢管直径值(以 $\text{m}$ 计)。

表 11-4 各种材料壁厚承受最大计算水头表

材 料	A3															
实际管壁厚度( $\text{mm}$ )	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
承受最大水头( $\text{m}$ )	89.7	134	179	224	269	314	359	403	448	473	516	559	602	645	688	731
材 料	16Mn															
实际管壁厚度( $\text{mm}$ )	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
承受最大水头( $\text{m}$ )	131	196	261	327	392	458	523	555	617	678	740	753	811	869	927	985

【例 11-1】某电站的压力钢管用A3钢制作,管内径 $D_0=1200\text{mm}$ ,已有厚度为 $\delta=6$ 、8、 $10\text{mm}$ 三种钢板,锈蚀裕量 $c=2\text{mm}$ ,要求确定三种钢板制作的管子适用的最大计算水头,以便确定它们的设置位置。

管径 $D_0=1200\text{mm}=1.2\text{m}$ 。已有管壁厚度中扣除锈蚀裕量后,实际工作厚度为 $\delta=4$ 、6、 $8\text{mm}$ 。按表11-4及管径差别,不同的厚度可承受的最大计算压力为:

$$\delta = 6 \text{ mm} \quad H = \frac{89.7}{1.2} = 74.75 \quad (\text{m})$$

$$\delta = 8 \text{ mm} \quad H = \frac{134}{1.2} = 111.67 \quad (\text{m})$$

$$\delta = 10 \text{ mm} \quad H = \frac{179}{1.2} = 149.17 \quad (\text{m})$$

由计算结果，以钢管进口最高静水位减去扣除水击压力水柱高后的 $H$ 值，即可依次确定壁厚 $\delta = 6$ 、 $8$ 、 $10 \text{ mm}$ 的管段末断面中心高程并确定分段位置。

两种不同厚度的管段连接，在级差超过 $2 \text{ mm}$ 时焊接必须有坡口和过渡性坡口的形式，见图11-1。

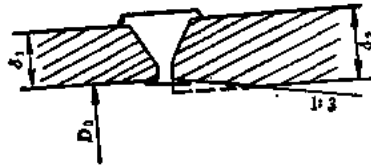


图 11-1 不等厚管壁焊接形式



## 第十二章 钢管管体结构设计

### 第一节 钢管材料的容许应力

#### 一、管体的容许应力

钢板在弹性工作状态下的应力不能超过表12-1中规定值。

表 12-1 钢板容许应力值表 ( $10^6\text{Pa}$ )

材 料	钢 板 规 格 (mm)	膜 应 力 区		局 部 应 力 区			
		基 本	特 殊	基 本		特 殊	
		轴 力		轴 力	轴力及弯矩	轴 力	轴力及弯矩
A2	$\delta = 4 \sim 20$	118.58	150.92	144.45	183.26	172.48	215.60
	$\delta = 21 \sim 40$	107.80	137.20	131.32	166.60	156.80	196.00
	$\delta > 40$	102.40	330.34	124.75	158.27	148.96	186.20
A3	$\delta = 4 \sim 20$	129.33	164.64	157.58	199.92	188.16	235.20
	$\delta = 21 \sim 40$	124.00	157.78	151.02	191.59	180.32	225.40
	$\delta = 41 \sim 60$	118.58	150.92	144.45	183.26	172.48	215.60
16Mn	$\delta \leq 16$	188.65	240.10	229.31	291.55	274.40	343.00
	$\delta = 17 \sim 25$	177.87	226.38	216.88	274.89	258.72	323.40
	$\delta = 26 \sim 36$	167.09	212.66	203.55	258.23	243.04	303.80
	$\delta = 38 \sim 50$	156.31	198.94	190.41	241.57	227.36	284.20
15MnTi	$\delta \leq 25$	215.60	274.40	262.64	333.20	313.60	392.00
	$\delta = 26 \sim 40$	204.82	260.68	249.51	316.54	297.92	372.40
15MnV	$\delta = 5 \sim 16$	215.60	274.40	262.64	333.20	313.60	392.00
	$\delta = 17 \sim 25$	204.82	260.68	249.51	316.54	297.92	372.40
	$\delta = 26 \sim 36$	194.04	246.96	236.37	299.88	282.24	352.80
	$\delta = 38 \sim 50$	183.26	233.24	223.24	283.22	266.56	333.20

注 (1) 本表根据《普通碳素钢号 and 一般技术》(GB700-65)、《普通低合金钢号 and 一般技术条件》(YB13-69) 及《水电站压力钢管设计规范》(SD144-85 试行) 的表 5.1.1 得出。15MnTi 及 15MnV 的膜应力区容许应力对抗拉强度  $\sigma_b$  的安全系数不应低于 2.71, 按此要求, 采用这两种钢材时, 容许应力可适当降低。

(2) 铸钢件和厂房内的明钢管容许应力应按表中值乘以系数 0.9。

(3) 岔管容许应力不能用此表中值。

钢管的膜应力区包括支承环、加劲环及其附近等效翼缘以外的管段。此范围内管体应力主要是膜应力, 由管壁挠曲形成的弯曲应力比重较小。

局部应力区包括支承 (有支承环及无环的支墩处) 和加劲环、防震环处管壁, 环中心两侧各  $(0.78\sqrt{R\delta})$  范围等效长度。

#### 二、钢管支承和附件中机械零件的容许应力

国内钢管规范未对管身以外的机械零件容许应力作出专门规定, 根据机械零件工作条

件，基本荷载下的容许应力按《水利水电工程钢闸门设计规范》（SDJ13-78）规定，即表3-39所示。

机械零件采用灰铁铸件时，容许应力按表3-40取值。

三、焊缝系数

（一）焊缝分类

压力钢管结构中，焊缝分三类，各类焊缝规定应用范围为：

一类焊缝：钢管所有管节（包括岔管）的纵缝和最后合拢时的环缝，岔管处加强梁（或肋）与管体、水压试验封头环缝处对接焊缝，角焊缝，厂内明管环缝，岔管环缝，加强结构的组合焊缝；

二类焊缝：包括较次要的受力接缝，例如管壁环缝；

三类焊缝：不属于一、二类焊缝且检修时不引起停电的其它焊接缝。

（二）焊缝系数

1.按《水工建筑物金属结构制造、安装及验收规范》（SLJ201-80、DLJ201-80）规定：压力钢管如不进行水压试验，明管无损探伤检查长度对一类焊缝为100%；二类焊缝为50%；水头低于25m的钢管，除设计图纸规定外，施工单位可酌情减少探伤长或不作探伤；其它探伤方法在超声波发现可疑波形后进行。对于小水电站，在应用上可结合工程具体情况适当放宽。

2.按国内拟定的《水电站压力钢管设计规范》，对不同类的焊缝探伤检查及焊接系数见表12-2。

表 12-2 焊缝的探伤检查及焊缝系数

焊 缝 类 别		一 类	二 类
超声波探伤抽查率（%）		100	50
射线照相抽查率（%）		25	10
焊缝系数 $\phi$	双面对接焊	0.95	
	单面对接焊、有垫板	0.90	

第二节 钢管荷载及荷载组合

一、钢管荷载

钢管荷载包括：

（1）内水压力：

上游正常水位时静水压力，用记号（1.0）表示；

正常运行时最高压力，用记号（1.1）表示；

特殊运行情况下的最高压力, 用记号 (1.2) 表示;

水压试验时内水压力, 用记号 (1.3) 表示。

(2) 管体自重。

(3) 管内水重:

无压满水重, 用记号 (3.0) 表示;

半充水时部分水重, 用记号 (3.1) 表示。

(4) 温度变化引起的力;

对分段式钢管, 此力指伸缩节内填料摩擦力和支墩对钢管摩擦力。

(5) 管道变直径处、转弯处、堵头、闸阀伸缩节处的管轴向水压力。

(6) 镇墩、支墩不均匀沉陷引起的力。

(7) 风荷载。

(8) 雪荷载。

(9) 地震荷载。

(10) 管道放水时, 通气设备失灵造成负压。

## 二、荷载组合

经常作用或在压力钢管正常运行中出现的荷载, 均属基本荷载; 不常出现或建设过程中短时存在的荷载, 属于特殊荷载。

(一) 基本荷载组合

(1) 正常运行情况之一:  $(1.1) + (2) + (3.0) + (4) + (5) + (6)$ 。

(2) 正常运行情况之二:  $(1.0) + (2) + (3.0) + (4) + (5) + (6) + (7) + (8)$ 。

(3) 放空情况: (10)。

(二) 特殊荷载组合

(1) 特殊运行情况:  $(1.2) + (2) + (3.0) + (4) + (5) + (6)$ 。

(2) 水压试验情况:  $(1.3) + (2) + (3.0) + (5)$ 。

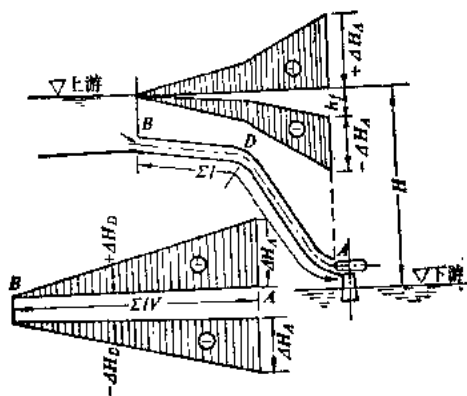
(3) 充水情况:  $(2) + (3.1)$ 。

(4) 地震情况:  $(1.0) + (2) + (3.0) + (4) + (5) + (6) + (9)$ 。

## 三、荷载计算

(一) 内水压力

钢管各截面的计算内水压力由沿管轴分布的压力线 (水力示坡线) 求得。压力线至管轴的距离表示计算水压对应的水柱高 (图12-1)。管轴各点水压力由静水压和水锤压力两部分组成, 最高压力线为静水压力与管道最大正水锤压力之和 (丢弃负荷); 最低压力线为静水压力与最大负水锤之和 (增负荷或丢弃负荷后的反水锤)。



### 1. 最高、最低压力线的计算条件

(1) 正常工作条件。正常工作条件下, 最高压力线按下列情况考虑:

- 1) 钢管进口处为正常蓄水位, 机组丢弃全负荷(一管多机或仅有一台机组的电站);
- 2) 钢管进口处发生涌波或设计洪水, 这时机组丢弃全负荷(电站有两条以上钢管, 一条管因丢负荷引起进口涌波, 接着另一条管机组丢弃负荷);

最低压力线按下列情况考虑:

- 1) 钢管进口处为最低运行水位, 一管多机时, 最后一台机组由空转至满负荷; 一管一机时, 机组由2/3负荷至满负荷;
- 2) 钢管进口处发生最低涌波水位, 一管多机时突增一台机负荷; 一管一机时, 机组负荷由2/3增发满负荷;
- 3) 钢管进口处为最低运行水位时, 钢管供水机组丢弃全负荷, 由正水锤引起的反水锤值。

### (2) 特殊工作条件

当钢管直接从水库取水, 水库遇校核洪水时, 机组丢弃全负荷。

### (3) 水压试验

### 2. 用近似计算方法计算阀门处水锤压力值

在实际工程中, 阀门处不同类型的水击值可分别采用表12-3中所列公式进行近似计算。

表 12-3 间接水锤的近似计算公式

水 锤 性 质		近 似 计 算 公 式	
间接水锤	第一相水锤	丢弃负荷	$\xi_1 = \frac{2\sigma}{1 + \rho\tau_s - \sigma}$
		增加负荷	$\eta_1 = \frac{2\sigma}{1 + \rho\tau_s + \sigma}$
	末相水锤	丢弃负荷	$\xi_m = \frac{2\sigma}{2 - \sigma}$
		增加负荷	$\eta_m = \frac{2\sigma}{2 + \sigma}$

注 (1) 表中  $\rho = \frac{aV_m}{2gH_s}$ 、 $\sigma = \rho \frac{2L}{aT_s}$ ; 式中  $L$  为钢管全长、 $a$  为水锤波在钢管中的传播速度、 $V_m$  为阀门全部开启时管中流速、 $T_s$  为有效启闭时间;

(2) 表中公式是在假定导叶开度依直线规律变化  $\left( \tau_s = \tau_s \mp \frac{2L}{aT_s} \right)$ , 且  $\xi < 0.5$  的基础上导出的;

(3) 在一般情况下, 对相对起始开度  $\tau_s$ , 关闭阀门时应取全开为设计条件, 即  $\tau_s = 1$ ; 开启时部分开启的设计条件, 即  $\tau_s = 0.5 \sim 0.75$ ;

(4) 求得  $\xi_1$ 、 $\xi_m$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_m$  后, 乘以静水头  $H_s$  值, 即得水锤压力值。

因水锤计算是调节保证计算的一部分, 故应结合机型及调速特性与机组转速变化计算配合进行。其具体计算请参见《小型水电站设计手册水力机械》第三章第一节调节保证计算部分。

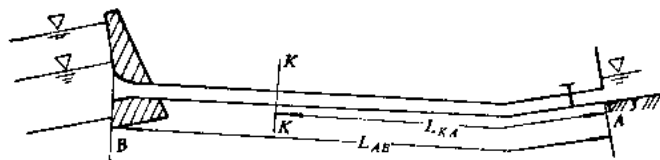


图 12-2 K断面位置示意

### 3. 水锤压力沿管路的分布计算

已计算出阀门（或导叶）端的水锤压力后，按下法计算水锤压力沿管路的分布。

#### （1）第一相水锤

在第一相水锤情况下，管道任意截面K中的水锤压力，为管

末端水锤压力与相当于“水池移到该K截面时”的管末端水锤压力之差。按图12-2即K截面的水锤压力可表示成

$$\xi_1^K = \xi_{BA}^A - \xi_{KA}^A \quad (12-1)$$

式中  $\xi_{BA}^A$ ——未移动“水池”前，按前述诸方法求得的管末端水锤压力相对值。计算时，管路特征值  $\rho$  为常数，时间常数  $\sigma$  按总长  $L_{BA}$  计算；

$\xi_{KA}^A$ ——移动“水池”到K点时，按从K点到管末端作为水管长求得的水锤相对值，时间常数  $\sigma$  按  $(L_{BA} - L_{BK})$  计算。

K点水击压力可写成：

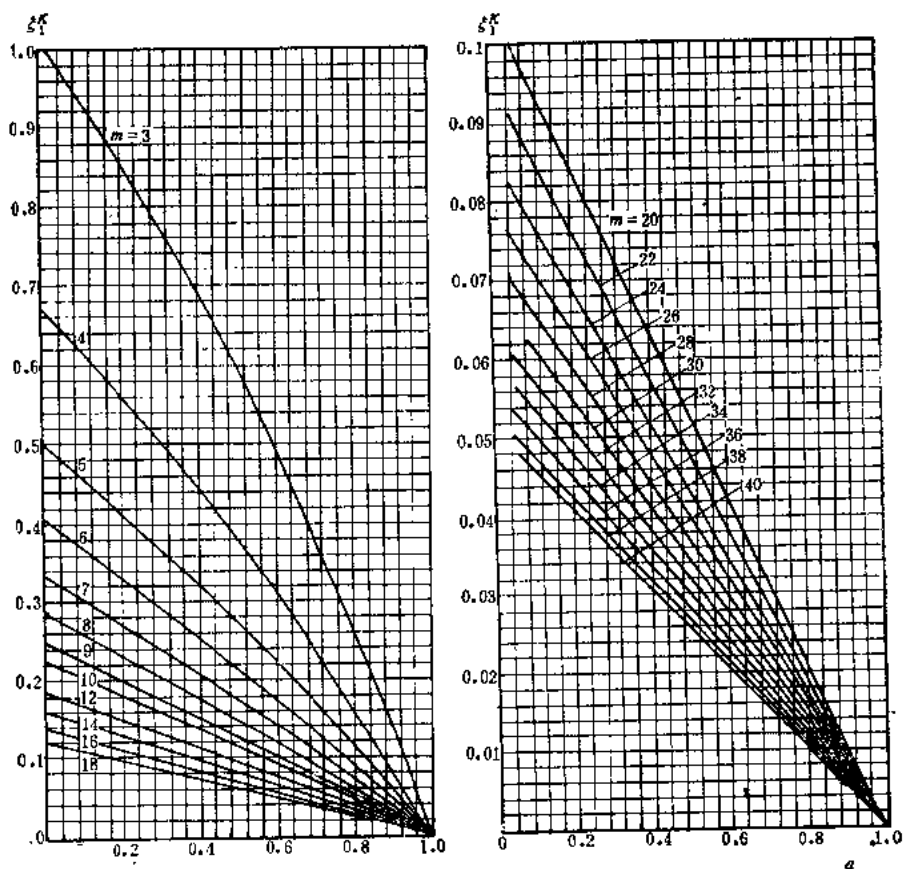


图 12-3 弃负荷时  $\xi_1^K \sim \alpha$  关系曲线

$$\xi_1^K = 2 \left( \frac{1}{m-1} - \frac{\alpha}{m-\alpha} \right) \quad (12-2)$$

式中  $m$ ——特征值,

$$m = \frac{1 + \rho \tau_0}{\sigma} = \frac{(1 + \rho \tau_0) g H_0 T_0}{\sum_B l V};$$

$\alpha$ ——计算断面到管末端的长度与全管长的比数,  $\alpha = \frac{L_{KA}}{L_{BA}};$

$L_{KA}$ ——K点到管末端的管长。

图12-3为由式(12-2)给出丢弃全负荷时的图形, 由图直接查出任意断面的 $\xi_1^K$ 。

增加负荷时的负水锤值, 按下式计算:

$$\eta_1^K = \frac{2m(1-\alpha)}{(m+1)(m+\alpha)} \quad (12-3)$$

图12-4为由式(12-3)给出的图形, 可直接查各断面负水锤值。

## (2) 末相水锤

在未相水锤情况下, 任意断面K的水锤压力按此断面至钢管进口的管轴长与钢管全长之比来确定, 即:

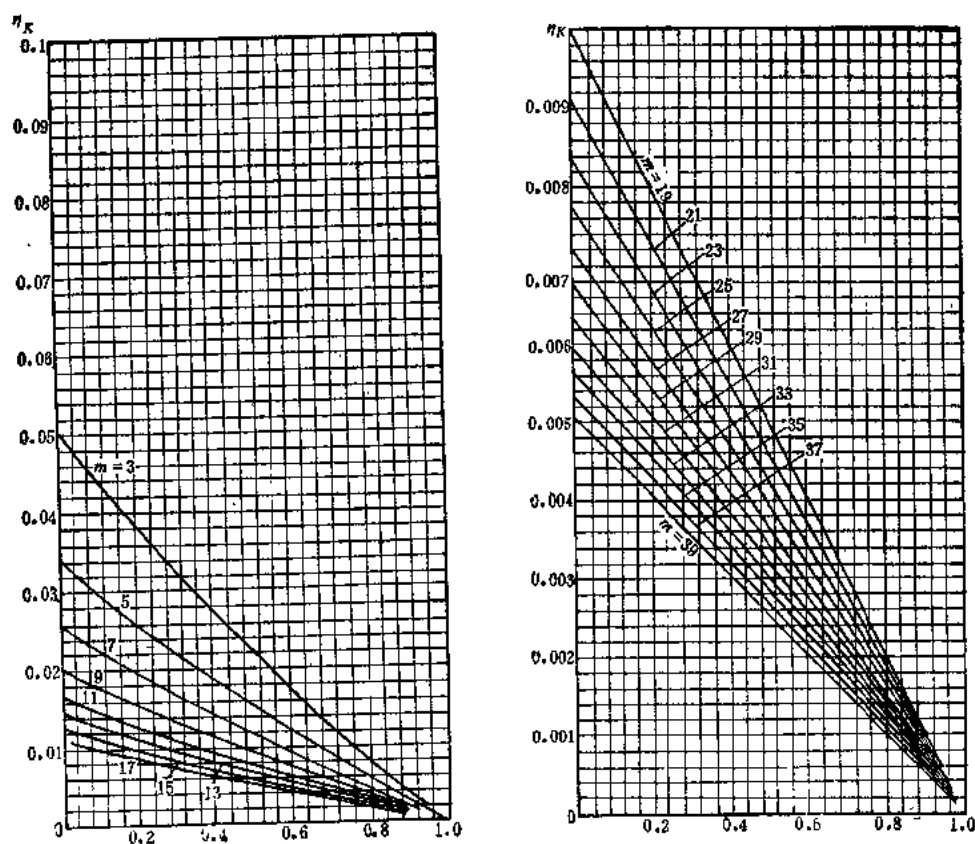


图 12-4 增负荷时  $\eta_1^K \sim \alpha$  关系曲线

$$\text{丢弃全负荷时,} \quad \xi^K = (1-\alpha)\xi_m \quad (12-4)$$

$$\text{突增负荷时,} \quad \eta^K = (1-\alpha)\eta_m \quad (12-5)$$

式中  $\alpha$ ——系数, 同式(12-2)所注;

$\xi_m$ 、 $\eta_m$ ——分别为钢管末端的最大正水锤及负水锤。在关闭阀门结束后阀门处产生的第一个反水锤如较 $\eta_m$ 值大, 则K断面的水锤值, 按反水锤值取值, 即取最大正水锤的负值。

根据各断面的轴线高程和进口静水位, 再计入上述计算所得水锤压力水柱高, 即求得压力钢管在设计条件下的计算水压力。

#### 4. 水压试验

按照《水电站压力钢管设计规范》(SD144-85)规定: 水压试验压力值应不小于1.25倍正常工作情况最高内水压力, 也不小于特殊工作情况最高内水压力。若整段试验时, 管段末端达到试验压力值而顶端超过规定试验值过多, 因此水头高的电站宜于分段试验。在最大试验压力下, 至少应稳压30min(岔管)或10min(其它管)。

#### (二) 支墩不均沉降引起的荷载

压力管线通过软基, 或因隧洞、压力前池水在管线坡面处逸出地面, 产生土壤结构破坏, 或岩基中有较宽软弱层, 支墩有可能产生沉降变形(图12-5)时, 设计管体强度应将本项荷载列入基本荷载。

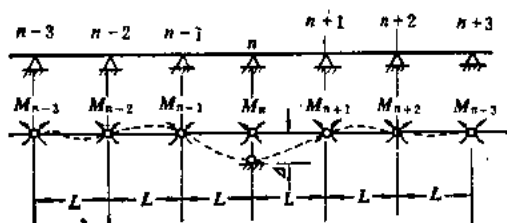


图 12-5 支墩 $n$ 沉降时钢管轴弹性变形示意

不均匀沉降的支墩数及沉降量, 较难准确估算。设计中, 此项荷载大致可以有两种处理方法。

(1) 按钢管支座地基情况, 对支墩基础估计最大可能沉降量, 计算所引起的附加于钢管上的力(弯矩)。从结构强度方面, 使钢管安全得到保证。

(2) 按钢材的许可应力, 计算出可能有沉降的支墩允许沉降量。通过运行观测, 发现沉降量超过许可值时, 立即消除引起沉降的原因, 并在支承附件结构设计时, 采取允许以后调整管架设高程的结构措施。

软弱地基的沉降与许多因素有关, 应参阅土工基础方面的资料, 加以估算。

作为设计荷载, 在小型水电站的压力钢管中, 基础有软弱夹层时, 仅考虑一个支墩沉降, 若有较多支墩沉降, 应考虑重新选线。多个支墩间, 当一个支墩沉降时, 钢管原来等间距布置的支承条件被改变, 其中一跨的跨距增加一倍, 沉降使钢管内弯矩加大, 理论上看, 一跨支座将引起整段钢管(镇墩至伸缩节)内力重新调整, 实际上, 在沉降支座两端相邻支座的弯矩变化, 据П·В·克林格尔分析仅增大15%左右, 离沉降支座越远, 附加弯矩越小。

#### (三) 风荷载

压力钢管架设高度, 离地面一般很低, 多数小电站的钢管设在沟槽中, 且风压造成垂直于管轴的横向荷载, 一般不大, 所以风压荷载可不加以考虑。

设在常年风压较大, 或季节性风压较大地区的小型电站, 风压产生横向荷载, 近似按下式计算:

$$W^b = K K_s W, \quad (\text{Pa}) \quad (12-6)$$

式中  $W$ ——基本风压值, 按当地离地10m高30年一遇的10分钟平均最大风速值。缺乏资料时, 可查全国基本风压分布图, 再按邻近地区资料适当修改确定;

$K$ ——建筑物风载体型系数,  $K \approx 0.6$ ;

$K_s$ ——风压高度变化系数, 近似取  $K_s = 0.8 \sim 1.0$ 。

П·Б·克林格尔提出按下式计算风压值:

$$W^b = \frac{1}{16} V_m^2 c \beta \quad (12-7)$$

式中  $V_m$ ——地表以上10m高度最大风速平均值m/s;

$c$ ——空气动力系数,  $c = 0.42 \sim 0.60$ ,  $c$ 与雷诺数  $Re (Re = V_m D_0 / 1.45 \times 10^{-4})$ , 其中  $D_0$  为管内径) 有关, 查图12-6;

$\beta$ ——风压高度修正系数, 设在地面的钢管  $\beta = 1$ 。

#### (四) 雪荷载

雪荷载形成沿管轴均布荷载, 加大轴向力和法向力。一般积雪时间短、降雪量不大的地区, 可不计入此荷载。降雪量大、积雪历时长的高寒地区, 每米管长的雪荷载, 按下式计算:

$$S^b = D a S_0 \quad (\text{N}) \quad (12-8)$$

式中  $S_0$ ——基本雪压值, Pa, 按30年一遇最大积雪重量,  $\text{N/m}^2$ ,

缺乏当地资料时可查全国基

本雪压分布图, 再参考邻近有资料地区修改确定;

$a$ ——荷载系数,  $a = 0.4$  (见《小电站钢管道》, П·Б·克林格尔著)。

法向分力

$$S_j^b = D a S_0 \cos \alpha \quad (12-9)$$

式中  $\alpha$ ——钢管敷设角。

#### (五) 地震荷载

根据《水工建筑物抗震设计规范》(SDJ10-78), 小型水电站建筑物设计标准一般不超过IV级, 专门论证提高级别后, 不大于III级, 防震主要是通过结构措施。

处在地震地区, 需要进行结构抗震计算时, 按《水电站压力钢管设计规范》规定, 管体强度计算中考虑地震引起的水体的水平力。仅在垂直管轴的水平向予以考虑。

水平地震荷载按下式计算:

$$P_i = k_H c_s \cdot a_i \cdot w_i \quad (12-10)$$

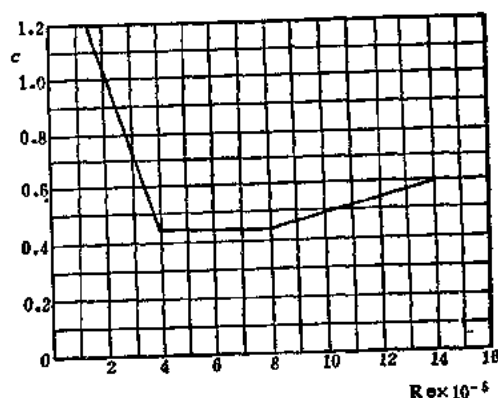


图 12-6 空气动力系数  $c$  与雷诺数  $Re$  的关系



表 12-4 钢管和镇、支墩所受正常荷载

序 号	作用力 方向	作 用 力 名 称	计 算 公 式	作用力符号						结 构 受 力 部 位				备 注
				上 段		下 段		管 壁	分 段 的	镇 墩	管 壁	支 墩	镇 墩	
				升	降	升	降							
1	管 轴 方 向	钢管自重分力	$A_1 = \sum(q_i L) \sin \alpha$	+	+	+	+	+	*	*	*	*	(1)管轴向作 用力符号; + : 钢管下行 方向; - : 钢管上行 方向	
2		关闭的阀门及网头上的力	$A_2 = \frac{\pi D_0^2}{4} P$	+	+	+	+	+	*	*	*	*	(2)上段指镇 墩以上, 下段指 镇墩以下	
3		弯管上的内水压力	$A_3 = \frac{\pi D_0^2}{4} P$	+	+	-	-	-	*	*	*	*		
4		渐缩管的内水压力	$A_4 = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) P$	+	+	+	+	+	*	*	*	*		
5		伸缩节端部的内水压力	$A_5 = \frac{D}{4} (D_1^2 - D_2^2) P$	+	+	-	-	-	*	*	*	*		
6		温度变化时伸缩节止水填 料的摩擦力	$A_6 = \pi D_0 b_1 \mu_1 P$	+	-	-	+	+	*	*	*	*		
7		温度变化时支墩对钢管的 摩擦力	$A_7 = \sum(q_i L) f \cos \alpha$	+	-	-	+	+	*	*	*	*		
8		弯管中水的离心力的分力	$A_8 = \frac{\pi D_0^2}{4} \frac{V^2}{g} \gamma_w$	+	+	-	-	-	*	*	*	*		
9	垂 直 轴 方 向	钢管自重分力	$Q_1 = q_i L \cos \alpha$						*	*	*	*		
10		钢管中水重分力	$Q_w = q_w L \cos \alpha$						*	*	*	*		
11	径 向	内部水压力	$P = \gamma_w H$						*	*	*	*		
12	铅 直 方 向	镇墩中心起算前后半跨钢 管自重	$Q'_1 = \frac{1}{2} q_i L$							*		*		
13		同12项钢管中水重	$Q'_w = \frac{1}{2} q_w L$							*		*		
14		支墩重量	$W'_d = V'_d \gamma_h$							*		*		
15		镇墩重量	$W_d = V_d \gamma_h$							*		*		

式中  $k_H$ ——水平地震系数, 对于七、八、九级地震,  $k_H$  分别等于 0.1、0.2、0.4;  
 $c_s$ ——综合影响系数,  $c_s=0.25$ ;  
 $a_i$ ——地震加速度分布系数, 支承环处  $a_i=1$ ; 跨中  $a_i=2.5$ , 其余断面按直线比内插;  
 $w_i$ ——单位长钢管重和水重。

按上式计算结果, 水平向地震荷载沿管轴分布, 同地震加速度系数沿管轴分布 (图 12-7) 有相似的形式。

应注意: 水平地震力造成管体附加弯矩的作用方向, 与水管的自重及水重法向分量所形成弯矩作用方向并不重合。计算状态下可按相差  $90^\circ$  考虑。

现将钢管和镇、支墩荷载计算公式列于表 12-4 中。

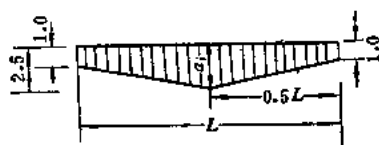


图 12-7 地震加速度分布系数  $a_i$

表 12-5 摩擦系数  $\mu_1$

摩擦材料名称	摩擦系数 $\mu_1$
橡皮与铸铁(有润滑剂)	0.15~0.30
石棉与钢板(无润滑剂)	0.35~0.46
麻类填料与钢板(有润滑剂)	0.30
橡皮与钢(有或无润滑剂)	0.30~0.65

表中伸缩节止水填料对管壁摩擦力取决于止水填料对管壁的压强和填料接触面积, 以及填料性质。钢管与填料摩擦系数  $\mu_1$  查表 12-5, 一般取  $\mu_1=0.3$ 。

水重和管重的法向分量对钢管形成连续荷载。管重计算中, 按直管段实际管壁厚度计算。钢管有加劲环及支承环时, 应加 13%~15% 的附件结构重量, 或者按附件重直接计算。

对于  $A_0$ , 一些资料<sup>①</sup>指出: 填料摩擦力可按内压力而定, 或按圆周向单位周长摩擦力为 (7.3~14.6) kN/m 来计算。

$A_1$  计算中, 支墩对钢管的摩擦系数见表 15-9, 随支墩形式而定。

### 第三节 直管段强度校核

#### 一、计算管段选择

钢管强度校核计算的代表性管段和断面应选择同直径、同厚度管段中最大计算水压力的一跨, 在这一跨的膜应力区以跨中断面①和位于支承环旁膜应力区边缘的断面②为代表, 由于断面②应力一般不起控制作用, 故可不考虑; 局部应力区以设加劲环断面③和支承环断面④为代表, 加劲环断面③虽一般不起控制作用, 但当其位于紧靠镇墩部位时, 有可能起控制作用, 没有环的鞍式支承, 以鞍式支承处断面⑤为代表 (图 12-8)。

① 《水工金属结构》第三分册, 刘国钧, 夏念凌。

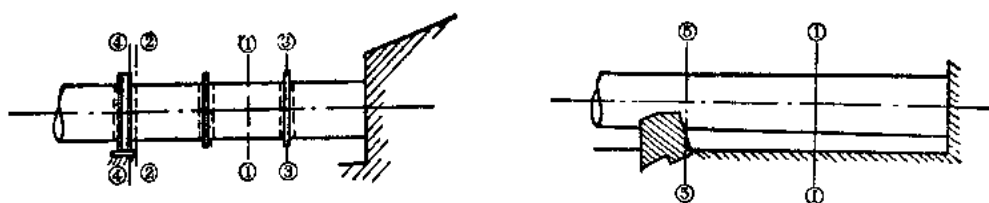


图 12-8 强度校核计算断面

## 二、膜应力区应力计算

断面①上的内力和应力计算式如表12-6所示，可根据实际设计结构及工况择项进行计算及组合，再根据式（12-22）计算折算应力。

表 12-6 断面①-①的内力与应力计算公式

编号	产生内力原因	内力名称	断面	计算公式		备注
				内力	应力	
1	轴向压力	轴力	横断面	见表12-4	$\sigma_{x1} = -\frac{\Sigma A}{F_{d1}} = -\frac{\Sigma A}{2\pi r\delta}$	全断面为负、正、随伸缩节位置而定
2	管重、水重的法向分量	弯矩		$M = \frac{L^2}{10} (q_s + q_w) \cos\alpha$	$\sigma_x = \pm \frac{M}{\pi r^3 \delta} \cos\theta$	$0 \leq \theta \leq 90^\circ$ $\sigma_{x1}$ 为负 $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ $\sigma_{x1}$ 为正
3	风荷载	弯矩		$M_f = \frac{W^2 DL^2}{10}$ ( $W^2$ 见式12-6)	$\sigma_{xf} = \pm \frac{M_f}{\pi r^3 \delta} \sin\theta$	背风向 $\sigma_{xf}$ 为正 迎风向 $\sigma_{xf}$ 为负
4	雪荷载	弯矩		$M_s = \frac{L^2}{10} DS^2$ ( $S^2$ 见式12-8)	$\sigma_{xs} = \pm \frac{M_s}{\pi r^3 \delta} \cos\theta$	同 2 项
5	地震荷载	弯矩		$M_e = 0.022k_H (q_s + q_w) L$	$\sigma_{xe} = \pm \frac{M_e}{\pi r^3 \delta} \sin\theta$	$0 \leq \theta \leq 180^\circ$ $\sigma_{xe}$ 为正 $180^\circ < \theta \leq 360^\circ$ $\sigma_{xe}$ 为负
6	内水压力	环向力	纵断面	$T = 0.5D\gamma_w(H - 0.5D\cos\alpha\cos\theta)$	$\sigma_{x1} = \frac{T}{\delta}$	$\theta = 180^\circ$ 时最大
7	半充水	环向力			$\sigma_\theta = 0.5\gamma_w D\eta$ ( $\eta$ 查图12-14)	

## 三、加劲环旁断面应力计算

加劲环旁断面即图12-8中的断面③，断面内力和应力随各个环位置而变。对于靠近跨中断面及靠近支墩处的加劲环旁断面，都应进行校核。与跨中断面①相比较，断面③应力项目有下列变化：

(1) 加劲环对钢管在内水压作用下的径向（ $r$  向）变形产生约束，环旁钢管有局部变形（图12-9），产生管轴向应力 $\sigma_{x1}$ （管内壁受拉为正，管外壁受压为负）和剪应力

$\tau_{sr}$ 。小型电站加劲环断面一般不大（相对于支承环），环与管壁径相对变位较小，多数情况下，折算强度计算中可以忽略 $\tau_{sr}$ 。

$$\sigma_{s1} = \pm 1.82\beta \frac{H\gamma_s D}{2\delta} = \pm 1.82\beta \frac{Pr}{\delta} \quad (12-11)$$

（2）加劲环旁断面③的环向力 $\sigma_{\theta 1}$ 受环的变形控制，应按加劲环的环向力计算，因此以 $\sigma_{\theta 2}$ 代替表12-6中第6项环向力 $\sigma_{\theta 1}$ 。

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{Pr}{\delta}(1-\beta) \quad (12-12)$$

断面③除增加 $\sigma_{s1}$ 项，改 $\sigma_{\theta 1}$ 为 $\sigma_{\theta 2}$ 外，其余不变。 $\beta$ 见表12-11注（6）。

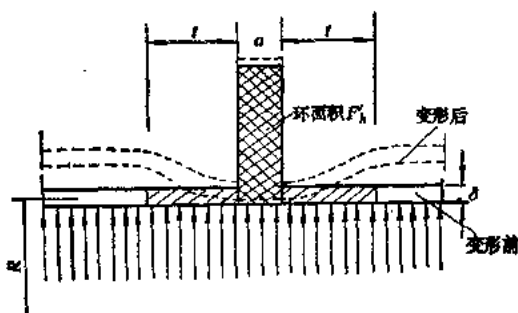


图 12-9 管壁在环处的局部变形

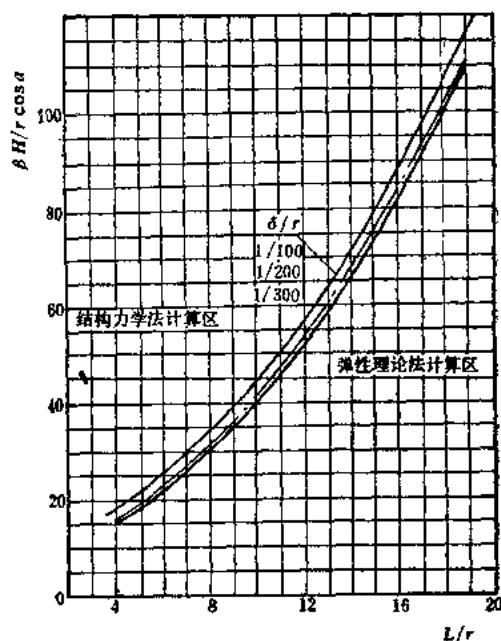


图 12-10 支承环及其边缘应力计算方法判别图

#### 四、支承环断面应力计算

##### （一）计算方法选择

当管内水自重和管自重在支承环附近所产生的局部应力，超过均匀内水压力引起环应力的10%，则应计入这部分局部应力，采用弹性力学的方法计算；当低于10%时，则忽略不均匀水压影响，采用结构力学法计算。

判别依据可根据图12-10进行。先计算出跨距与管半径比值“ $L/r$ ”、系数“ $\beta H/r \cos \alpha$ ”，根据管壁厚度计算 $\delta$ 与半径比值“ $\delta/r$ ”，找图上 $L/r$ 、 $\beta H/r \cos \alpha$ 的点迹位置，确定宜于采用的计算方法。

##### （二）结构力学法计算支承环旁断面应力

###### 1. 计算公式

支承环旁断面系指紧靠环腹板的管截面，此断面上的应力点受管体内力和环断面内力控制。断面上的内力和应力计算式如表12-7所示，按实际计算工况择项计算并组合，以求得折算应力值。在计算断面上不同部位（以从顶起算的圆心角 $\theta$ 为特征）应力各有差别，最大折算应力，宜分别对 $\theta = 0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ 进行计算后组合而定。由于结构力学法采用的计算简图把 $\theta = 90^\circ$ 处结构处理成集中节点，因而使此处应力偏大，且发生

表 12-7

支承环旁断面的内力与应力计算公式

编号	产生内力原因	内力名称	断面	计 算 公 式		备 注
				内 力	应 力	
1	轴向压力	轴 力	横 断 面	见表12-4	$\sigma_{x1} = \pm \frac{\Sigma A}{F_{\delta\delta}} = \pm \frac{\Sigma A}{2\pi r\delta}$	全断面受压或拉
2	管重、水重 法向分量	弯 矩		$M = \frac{L^2}{10}(q_s + q_w)\cos\alpha$	$\sigma_{x1} = \pm \frac{M}{\pi r^2 \delta} \cos\theta$	$0 \leq \theta \leq 90^\circ$ 为正 $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ 为负
3	环约束管径 向变形	弯 矩			$\sigma_{x1} = \pm 1.82\beta pr/\delta$	管内壁为“+” 管外壁为“-”
4	支墩沉陷	弯 矩		$M_s = -0.548 \frac{E\pi D^3 \delta}{L^2} \Delta$ $M_{s+1} = 0.346 \frac{E\pi D^3 \delta}{L^2} \Delta$ $M_{s+2} = -0.0865 \frac{E\pi D^3 \delta}{L^2} \Delta$	$\sigma_{x1} = \pm \frac{M_s}{\pi r^2 \delta} \cos\theta$	视沉陷支墩位置确定有无此项, 及其正负号
5	风 荷 载	弯 矩		$M_f = \frac{W^2 DL}{10}$ ( $W^2$ 见式12-6)	$\sigma_{x1} = \pm \frac{M_f}{\pi r^2 \delta} \sin\theta$	背风向为正 迎风向为负
6	雪 荷 载	弯 矩		$M_s = \frac{L^2}{10} DS^2$ ( $S^2$ 见式12-8)	$\sigma_{x1} = \pm \frac{M_s}{\pi r^2 \delta} \cos\theta$	同2项
7	地震荷载	弯 矩		$M_s = -0.04k_R(q_s + q_w)L$	$\sigma_{x1} = \pm \frac{M_s}{\pi r^2 \delta} \sin\theta$	$0 \leq \theta \leq 180^\circ$ 为正 $180^\circ < \theta \leq 360^\circ$ 为负
8	管重、水重 法向分力	剪 力		$V = 0.5(q_s + q_w)L\cos\alpha$	$\tau_{x\theta} = \frac{V}{\pi r \delta} \sin\theta$	$\theta = 0^\circ$ $\theta = 180^\circ$ $\tau_{x\theta}$ 最小 $\theta = 90^\circ$ $\tau_{x\theta}$ 最大
9	内 水 压	环向力	纵 断 面		$\sigma_{\theta s} = \frac{Pr}{\delta}(1 - \beta)$	
10	半 充 水	环向力		$N_s = \frac{R}{3}[2\bar{Q}_r - \bar{Q}_r]\cos 2\theta$	$\sigma_{\theta s} = \frac{N_s}{F}$	
11	半 充 水	弯 矩		$M_b = \frac{R^3}{3} \left[ \frac{\bar{Q}_r}{2} - \bar{Q}_r \right] \cos 2\theta$ $\bar{Q}_r = 0.188 \left( \frac{r}{R} \right)^2 L$ $\bar{Q}_r = \frac{rL}{R} \left( 0.01528 - 0.377 \frac{\Delta r}{R} \right)$	$\sigma_{\theta s} = \pm \frac{M_b}{W_R}$	$\theta$ 自底点起算 外壁受拉为正 内壁受压为负 应力 $\theta = 45^\circ$ 最大
12	水管自重 及水重法 向 分 力	弯 矩		$M_R = QR\cos\alpha \left( K_1 + \frac{b}{R} K_2 \right)$	$\sigma_{\theta s} = \frac{M_R Z_R}{J_R}$	(图12-12), $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 随圆心角 $\theta$ 而变, 查表12-8, $\theta$ 自顶点量起; 地震时的 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 见表12-9

续表

编号	产生内力原因	内力名称	断面	计 算 公 式		备 注
				内 力	应 力	
13	支座反力	环向力	纵断面	$N_R = Q \cos \alpha (K_1 + \beta_1 K_2)$ $\beta_1 = \frac{r}{R} \left( 1 - \frac{2K}{\beta r} \right) - \frac{b}{R}$ $K = \frac{\mu L^2}{12r^2} + \frac{(2+\mu)L}{4kr} + (1-\mu^2) \times \left[ 1 - \frac{q_s}{2(q_s + q_x)} \right]$	$\sigma_{\theta} = \frac{N_R}{F}$	

表 12-8  $K$  值与圆心角  $\theta$  的关系值 (略去剪力项)

$\theta^\circ$ (从顶点量起)	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
0	-0.238732	+0.318310	+0.011268	-0.068310
15°	-0.241384	+0.307464	+0.008618	-0.057484
30°	-0.248415	+0.275664	+0.001585	-0.025684
45°	-0.257198	+0.225079	-0.007198	+0.024921
60°	-0.263704	+0.159155	-0.013704	+0.090845
75°	-0.263023	+0.082385	-0.013023	+0.167615
90°上部	-0.250000	0	0	+0.250000
90°下部	+0.250000	0	0	-0.250000
105°	+0.263023	-0.082385	+0.013023	-0.167615
120°	+0.263704	-0.159155	+0.013704	-0.090845
135°	+0.257198	-0.225079	+0.007198	-0.024921
150°	+0.248415	-0.275664	-0.001585	+0.025684
165°	+0.241382	-0.307464	-0.008618	+0.057464
180°	+0.238732	-0.318310	-0.011268	+0.068310

突然变号。多数实例计算证明：断面最大应力点往往不在  $\theta = 90^\circ$  点上。计算中如  $\theta = 90^\circ$  处应力超过允许应力值时，并非真正危险，一般不超过 5% 时，是允许的。

## 2. 表 12-4 和表 12-7 中计算式几点说明

(1) 计算中，径向力 ( $r$  向) 相对小，在折算应力中占比重甚小，因此， $\sigma_r$ 、 $\tau_{xr}$ 、 $\tau_{\theta r}$  都可忽略不计，以简化计算；

(2) 由水压力、管重的轴向分力、钢管温度变形受到的摩擦力以及水流动时产生的轴向力 (即各个 “A”) 计算式见表 12-4；

(3) 钢管自重和水重的法向分力，在支墩之间管体上形成均布荷载，钢管形似支在墩座上的环形断面梁。梁断面内力为弯矩  $M$  及剪力  $V$ ，它们的分布趋势是：从伸缩节处的悬臂端到镇墩处的固端 (图 12-11)，每跨跨中及支承点的弯矩  $M$ 、剪力  $V$  值逐渐增大，但超过 3 跨时， $M$  及  $V$  的变化幅度很小，可以按支承点为刚结计算。实际上，同一跨内钢管一般设计成同直径  $D$  和同厚度  $\delta$ ，强度校核断面在最后一跨， $M$ 、 $V$  值接近或等于两端固接的梁内力，锥管一般布置在镇墩中，因此手册中仍按以往采用的弯矩、剪力计算式。

表 12-9

地震时  $K$  值与圆心角  $\theta$  的关系值

$\theta^\circ$ (从顶点量起)	$M_R = n_s QR \left( K_{11} + \frac{R+d}{R+b} K_{12} \right)$		$N_R = n_s Q (K_{11} - B_s K_{12})$		备 注
	$K_{11}$	$K_{12}$	$K_{11}$	$K_{12}$	
0	0	0	0	0	(1) 本表用于地震时支承环附加内力 $M_R$ 、 $N_R$ ，表达式同表12-7中12、13项，但 $B_s$ 值改用： $\beta_s = -\frac{\tau}{R} \left( 1 - \frac{2K}{kL} \right) \pm \frac{\pi(R+d)}{4(R+b)}$ $M_R$ 及 $N_R$ 中都应乘地震系数 $n_s$ ； (2) 剪力及附加值的有关系数忽略不计
15°	-0.019651	-0.064705	-0.019651	+0.082385	
30°	-0.022380	-0.125000	-0.032380	+0.159155	
45°	-0.032119	-0.176777	-0.032119	+0.225079	
60°	-0.014417	-0.216506	-0.014417	+0.275664	
75°	-0.022945	-0.241481	+0.022945	+0.307464	
90°	+0.079577	-0.250000	+0.079577	+0.318310	
90°+	+0.079577	+0.250000	+0.079577	+0.318310	
105°	+0.022945	+0.241481	+0.022945	+0.307464	
120°	+0.014417	+0.216506	-0.014417	+0.275664	
135°	-0.032119	+0.176777	-0.032119	+0.225079	
150°	-0.032380	+0.125000	-0.032380	+0.159155	
165°	-0.019651	+0.064705	-0.019651	+0.082385	
180°	0	0	0	0	
195°	+0.019651	-0.064705	+0.019651	-0.082385	
210°	+0.032380	-0.125000	+0.032380	-0.159155	
225°	+0.032119	-0.176777	+0.032119	-0.225079	
240°	+0.014417	-0.216506	+0.014417	-0.275664	
255°	-0.022945	-0.241481	-0.022945	-0.307464	
270°	-0.079577	-0.250000	-0.079577	-0.318310	
270°+	-0.079577	+0.250000	-0.079577	-0.318310	
285°	-0.022945	+0.241481	-0.022945	-0.307464	
300°	+0.014417	+0.216506	+0.014417	-0.275664	
315°	+0.032119	+0.176777	+0.032119	-0.225079	
330°	+0.032380	+0.125000	+0.032380	-0.159155	
345°	+0.019651	+0.064705	+0.019651	-0.082385	
360°	0	0	0	0	

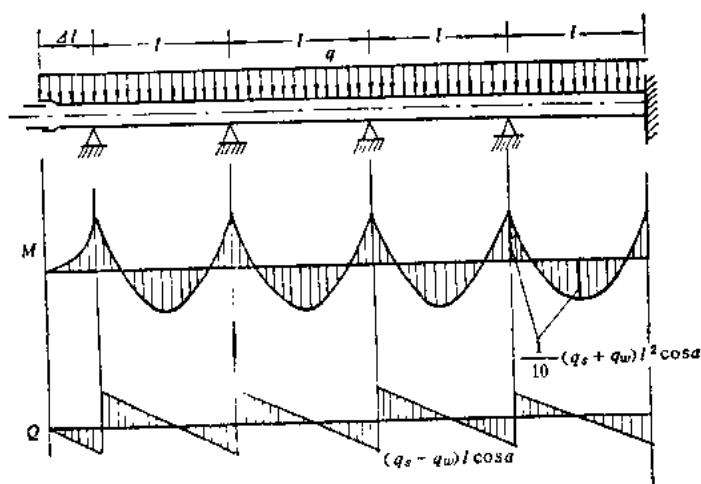


图 12-11 由管法向分力引起的管壁内力

对于跨数大于3的, 采用表12-6和表12-7的计算式偏于安全。

(4) 支座沉陷计算中, 按一个支座发生沉陷, 钢管弹性线如图12-5所示。

用三弯矩方程计算钢管内力与沉陷量关系, 可表达成:

$$M_{n-2}L_{n-1} + 2M_{n-1}(L_{n-1} + L_n) + M_nL_n = +\frac{6EJ\Delta}{L_n} \quad (12-13)$$

$$M_{n-1}L_n + 2M_n(L_n + L_{n+1}) + M_{n+1}L_{n+1} = -6EJ\Delta\left(\frac{1}{L_n} + \frac{1}{L_{n+1}}\right) \quad (12-14)$$

$$M_nL_{n+1} + 2M_{n+1}(L_{n+1} + L_{n+2}) + M_{n+2}L_{n+2} = +\frac{6EJ\Delta}{L_{n+1}} \quad (12-15)$$

离沉陷支座越远, 弹性线变形越小, 因此可以忽略较远的支座受沉陷的影响, 仅考虑相邻1~2个支座及沉陷支座附加内力。镇墩处变形比相邻支座沉陷后的弹性变形较大, 附加弯矩值大于图12-11中的弯矩值。为简化计算, 假定镇墩处为固结端, 镇墩边缘弯矩附加值与沉陷支座处弯矩等值, 但方向相反。

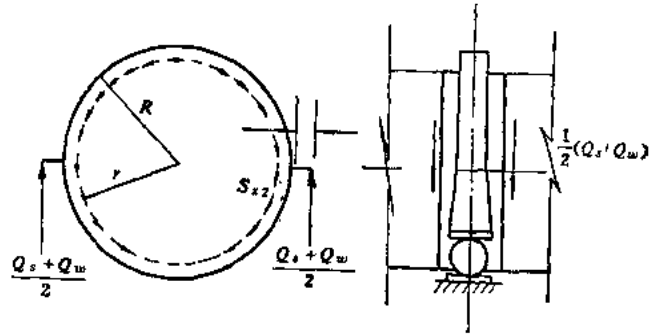


图 12-12 支承环计算简图

由于钢管支座等间距布置, 即  $L_{n-2} = L_{n-1} = L_n = L_{n+1} = L_{n+2}$ , 如果相邻几距钢管直径、厚度无变化, 则可认为弹性线变形以沉陷支座为对称轴, 因而  $M_{n-2} = M_{n+2}$ ,  $M_{n-1} = M_{n+1}$ , 忽略  $M_{n-2} = M_{n+2}$ , 使之为“0”。

由式(12-13)~式(12-15)在上述假定下, 可解得:

$$M_n = +\frac{30}{7} \frac{ET}{L^2} \Delta \quad (12-16)$$

$$M_{n+1} = M_{n-1} = -\frac{18}{7} \frac{EJ}{L} \Delta \quad (12-17)$$

沉陷后支座减少承受的荷载转给相邻支座, 转移的荷载为:

$$(\Delta q_s + \Delta q_w)L \cos \alpha = \frac{M_n - 2M_{n+1}}{L} \quad (12-18)$$

此转移的荷载假定仅由支座  $n+1$ 、 $n-1$  承受, 按表12-7第8项计算附加剪应力  $\Delta \tau_{ss}$ 。

当  $M_{n-2} = M_{n+2} \neq 0$ , 仅假定  $M_{n-1} = M_{n+1} = 0$ , 则可得

$$M_n = +\frac{57}{13} \frac{EJ}{L^2} \Delta \quad (12-19)$$

$$M_{n+1} = -\frac{36}{13} \frac{EJ}{L^2} \Delta \quad (12-20)$$

$$M_{n+2} = \frac{9}{13} \frac{EJ}{L^2} \Delta \quad (12-21)$$

式中  $E$ ——钢弹性模量,  $E = 2058 \times 10^8$ , kPa;



$J$ ——钢管断面的惯矩,  $J=\pi r^3 \delta$ ,  $\text{m}^4$ ;

$L$ ——支座跨距,  $\text{m}$ ;

$\Delta$ ——沉陷量,  $\text{m}$ 。

根据上述诸式由允许的附加弯矩求沉陷量危险值, 或由估算沉陷量求弯矩、剪力及附加应力。跨内任意断面的内力, 因支座处内力已知, 即可按静定梁求出 (图12-13)。

(5) 钢管半充水时, 管体允许应力可提高 5%。表12-6中第7项为跨中断面半充水时的环向应力, 式中应力系数  $\eta$  由图12-19查得。

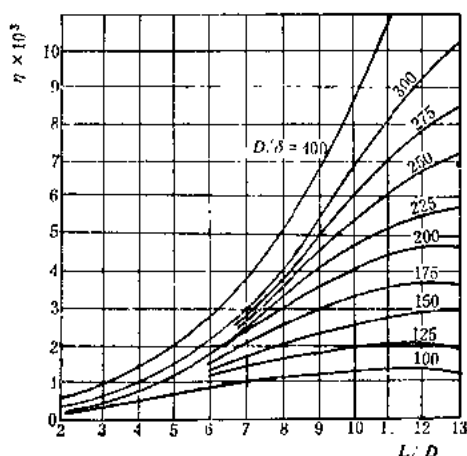


图 12-14  $\frac{L}{D} \sim \eta$  关系表

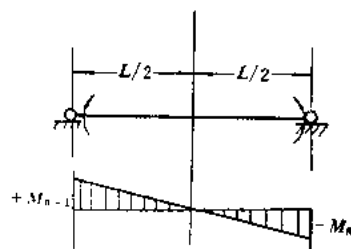


图 12-13 一跨弯矩图

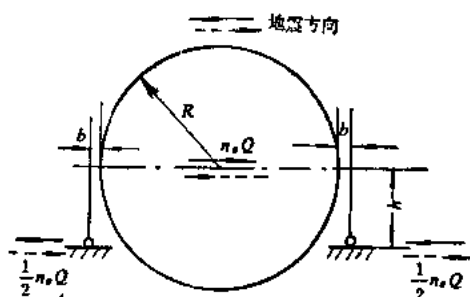


图 12-15 水平向地震时的惯性力和支座反力

(6) 地震时, 钢管及管内水体产生横向 (垂直于管轴) 水平惯性力, 按单位管长质量集中在管轴线位置 (图12-15)。

地震使镇、支墩亦产生惯性力, 其中包括墩体自身惯性力及由钢管传来的惯性力。垂直管轴线的水平惯性力和平行管轴线的纵向地震力由加大镇、支墩的抗滑安全系数, 以及改进结构解决。地震加速为重力加速的  $(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5})$ , 结合小水电等级条件, 抗滑安全系数在地震区宜超过 “1.3”, 但一般不多于 “1.5”。

(7) 支承环断面抗弯刚度  $W_R$ , 根据拟定的支承环断面形式和尺寸, 用一般材料力学方法进行计算。表12-10为几种典型的断面特性计算公式。

表12-10中第2种断面形式, 采用等肢或不等肢角钢。角钢的断面特性  $h_0$ 、 $y_0$ 、 $I_0$  可查一般材料手册。也可以采用其它型钢组合的支承环断面形式; 表中的断面系数仅用来计算支承环远离管壁的外缘应力, 而计算管壁上的应力值时, 应将表12-10中的断面系数  $W$  计算式分母  $y_2$  (或对应值) 改为  $y_1$ 。

(二) 弹性理论法计算支承环旁断面应力

1. 计算式

当由  $L/r$  和  $\beta H/rcos\alpha$  决定的判别点, 在图12-10上位置表明管重和水重影响不能忽略

表 12-10

几种典型断面特性计算公式

序	断面简图	面积 $A_R$	重心位置	断面系数 $W$ (环外缘计算)
1		$A_R = bh + B\delta$ $B = b + 1.56\sqrt{R\delta}$	$y_1 = \frac{bh^2 + 2bh + B\delta^2}{2(bh + B\delta)}$ $y_2 = h + \delta - y_1$	$W = \frac{1}{(h + \delta - y_1)} \left( \frac{b^2}{3} - + m\omega_1^2 - \omega_2^2 \right)$ $+ \frac{B\delta^3}{3} + B\delta y_1 - B\delta^2 y_1$
2		$A_R = 2A_s + B\delta$ $A_s$ — 角钢截面积 $B = 2b + c + 1.56\sqrt{R\delta}$	$y_1 = \frac{4A_s(y_s + \delta) + B\delta^2}{4A_s + 2B\delta}$ $y_s$ — 角钢形心高 $y_2 = (h + \delta) - y_1$	$W = \frac{1}{(B + \delta - y_1)} \left[ 2I_s + 2A_s(y_s + \delta - y_1)^2 + \frac{B\delta^3}{3} - + B\delta y_1 - B\delta^2 y_1 \right]$ $I_s$ — 角钢断面惯性矩
3		$A_R = Bd + ch + bk$ $B = c + 1.56\sqrt{R\delta}$	$y_2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{CH^2 + (b - c)K'}{Bd + ch + bk} + \frac{(B - C)(2H - d)d}{Bd + ch + bk} \right]$ $y_1 = H - y_2$	$W = \frac{1}{3y_2} [by_1^2 + By_2^2 - (b - c)(y_1 - y_2) - K'] - (B - C)(y_1 - d)^2$
4		$A_R = 2(CH + bd) + Bd$ $B = K + 2c + 1.56\sqrt{R\delta}$	$y_2 = \frac{B\delta(2H + \delta) + 2(CH^2 + bd^2)}{2B\delta + 4(CH + bd)}$ $y_1 = H + \delta - y_2$	$W = \frac{1}{6y_2} (bd^2 + 2B\delta^2 + 2CH^2) + \frac{2bd}{y_2} \left( y_1 - \frac{d}{2} \right)^2 + \frac{B\delta}{y_2} \left( H - y_2 + \frac{\delta}{2} \right)^2 + \frac{2CH}{y_2} \left( y_1 - \frac{H}{2} \right)^2$

表 12-11

用弹性理论法计算支承环的内力与应力的公式表

序号	内力产生原因	内 力 名 称	作用 平 面	计 算 式		备 注
				内 力	应 力	
1	表12-4中各 项荷载	轴向力	横 断 面	$\Sigma A$	$\sigma_{x1} = \frac{\Sigma A}{2\pi r \delta} + \frac{T_1}{\delta}$	
2	内水压力、 管重、水重、 地震力	轴向力		$T_1 = \frac{QL}{12\pi r^2} (\cos\alpha \cos\theta - n_s \sin\theta_1)$		
3	内水压力、 管重、水重、 地震力	弯 矩		$M_1 = \left( K + \frac{2+\mu}{4kr^2} L \right) \frac{Q}{2\pi k^2 r L} \times (n_s \sin\theta_1 - \cos\alpha \cos\theta) + \frac{\beta p}{2k^2}$	$\sigma_{x1} = \pm \frac{bM_1}{\delta^2}$	管壁内缘为“+” 管壁外缘为“-”
4	内水压力、 管重、水重、 地震力	剪 力		$S_{x\theta} = \left( 1 - \frac{2K}{kL} \right) \frac{Q}{2\pi r} (n_s \cos\theta_1 + \cos\alpha \sin\theta)$	$\tau_{x\theta} = \frac{S_{x\theta}}{\delta}$	管壁内外缘为“0” 值
5	内水压力、 管重、水重、 地震力	剪 力		$S_{xy} = \frac{kQ}{\pi r L} (n_s \sin\theta_1 - \cos\alpha \cos\theta) + \frac{\beta p}{k}$	$\tau_{xy} = \frac{1.6S_{x\theta}}{\delta}$	
6		轴向力	纵 断 面	$T_2 = (1-\beta)p + \mu T_1$	$\sigma_{\theta 1} = \frac{T_2}{\delta}$	
7		弯 矩		$M_2 = \mu M_1$	$\sigma_{\theta 2} = \pm \frac{bM_2}{\delta^2}$	管内壁为正 管外壁为负
8		剪 力		$S_{\theta x} = S_{x\theta}$	$\tau_{\theta x} = \tau_{x\theta}$	管壁内外缘为“0” 值

注 (1) 风荷载、雪荷载及半充水, 在环内的应力, 同结构力学法, 见表12-7;

(2) 横向地震形成的内力和应力计算点, 其对应圆心角 $\theta_1$ 与其它力形成应力计算点 $\theta$ 相差 $90^\circ$ , 即前者从管腰起算, 后者自管顶起算。为求最大应力点, 应分别以自顶点起算的各 $\theta$ 角( $\theta_1 = \theta - 90^\circ$ )校算;

(3) 当不考虑地震时,  $n_s = 0$ ; 计入地震, 则 $n_s$ 可取 $(0.25 \sim 0.5)k_H$ ;

(4) 各个 $\theta$ 角对应计算点处, 应分别对管内壁及外壁计算应力值;

(5) 表中 $K = \frac{\mu L^4}{12r^2} + \frac{(2+\mu)L}{4kr^2} + (1-\mu) \left[ 1 - \frac{q_s}{2(q_s + q_w)} \right]$ ;

(6) 表中符号含义:

$\beta$ ——管壁外环断面与环计算断面比值,  $\beta = \frac{F' - n\delta}{F}$ ;

$\mu$ ——钢泊桑系数,  $\mu = \frac{1}{3}$ ;

$k$ —— $k = \frac{1}{0.78\sqrt{r\delta}}$ ,  $\frac{1}{k}$ 即管壁等效翼缘宽度;

$p$ ——水压强,  $p = \gamma_w H$ ;

$Q$ ——跨钢管水重及管重,  $Q = \pi r L (\gamma \gamma_w + 2\delta \gamma_s)$ ;

$\gamma_s$ 、 $\gamma_w$ ——钢和水的容重;

$\delta$ ——管壁厚。

时, 按弹性理论法计算环旁断面应力。

表12-11列出按此法对支承环在内水压力、管重、水重及支座反力形成应力。表中同样忽略了数值较小的管内壁径向压应力 $\sigma_r$ 及剪应力 $\tau_{rz}$ , 有关附号定义除本章开始说明外, 如图12-16所示。

支承环内应力(纵断面)同时在环旁断面④得到反映。环内应力与表12-10中应力叠加后进行折算应力校核, 也即应力点选在环与管壳相接断面。

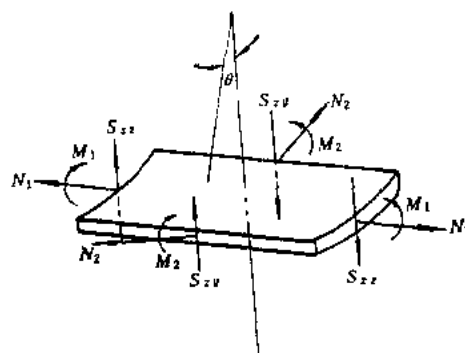


图 12-16 管壁微元体上的内力示意

支承环在管重、水重及支柱反力作用下的内力及应力计算见表12-12。

表 12-12 支承环的内力与应力计算

序号	内力产生原因	内力名称	作用平面	计 算 式		备 注
				内 力	应 力	
1	管重、水重、支座反力	环向力		$N_R = Q R \cos \alpha (K_1 + B, K_2)$	$\sigma_{\theta} = \frac{N_R}{F}$	$K_1, K_2, K_3, K_4$ 见表12-8
2		弯 矩		$M_R = Q R \cos \alpha \left( K_1 + \frac{b}{R} K_2 \right)$	$\sigma_{\theta} = \frac{M_R Z_R}{J_R}$	
3	地震时, 管重、水重的横向惯性力	环向力		$N_s = n_s Q (K_{1s} - B, K_{2s})$	$\sigma_{\theta s} = \frac{N_s}{F}$	$K_{1s}, K_{2s}, K_{3s}$ 见表12-13
4		弯 矩		$M_s = n_s Q R \left( K_{1s} + \frac{h}{R+b} K_{2s} \right)$	$\sigma_{\theta s} = \frac{M_s Z_R}{J_R}$	

注  $B_s = \frac{r}{R} \left( 1 - \frac{2K}{kL} \right) \pm \frac{\pi h}{4(R+b)} \begin{pmatrix} \theta = 0 \sim \frac{\pi}{2} \\ \theta = -\frac{\pi}{2} \sim \pi \end{pmatrix}$

$k, Q, K$ ——见表12-11注;

$R, h, b$ ——见图12-15;

$$B_1 = \frac{r}{R} \left( 1 - \frac{2K}{kL} \right) - \frac{b}{R}.$$

表 12-13  $K_i$  值与圆心角  $\theta$  关系值

$\theta^\circ$	$K_1$	$K_{1s}$	$K_{1s}$	$\theta^\circ$	$K_2$	$K_{1s}$	$K_{1s}$
0	0	0	0	90°	0.318310	0.079577	0.250000
15°	0.082385	-0.019651	-0.064705	105°	0.307464	0.022945	0.241481
30°	0.159155	-0.032380	-0.125000	120°	0.275664	-0.014417	0.216506
45°	0.225079	-0.032119	-0.176777	135°	0.225079	-0.032119	0.176777
60°	0.275664	-0.014417	-0.216506	150°	0.159155	-0.032380	0.125000
75°	0.307464	0.022945	-0.241481	165°	0.082385	-0.019651	0.064705
90°	0.318310	0.079577	-0.250000	180°	0	0	0

## 五、鞍式支座上钢管应力计算

### (一) 无支承环的鞍式支座

图12-17为鞍座上管壳受力后的内力符号及主要内力——弯矩分布示意(鞍座内部分未表示出)。

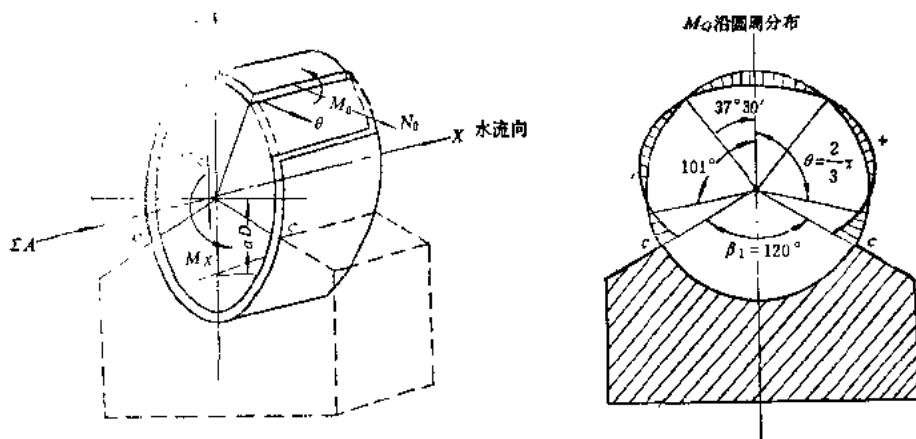


图 12-17 鞍式支座上钢管内力示意

钢管在一跨管轴向力、自重和水重,以及支座反力作用下,内力和应力按表12-14计算,最危险应力点在鞍座两肩与墩体前后边缘处(图中c点),当鞍座包角 $\beta_1 = 120^\circ$ 时,c点对应圆心角 $\theta = 120^\circ$ (自顶部起算)。

对于正常运行情况以外的其余情况,当计入临时荷载时,同有支承环的支座处理方法一样。特殊荷载——地震对鞍式支座的钢管结构,一般情况下可不考虑,仅在高水头及电站容量在系统中所占比重较大时才予以考虑。

如控制应力超过允许应力,可用下列措施调整结构,以改善应力:

- (1) 顺管轴向适当加大弧形垫板的宽度;
- (2) 加厚支座范围管壳计算段的壁厚;
- (3) 调整支座间距。

### (二) 有支承环的鞍式支座

强度校核断面在环与管交接处(同前述断面④),最危险应力点仍在c点(图12-17)。与无环情况相比较,横断面内力和应力计算项目无变化,如同表12-14中1、2、3项;纵断面内力计算仍如表中所列,4、5项应力计算按表12-7中12、13项的应力计算式进行,内水压力形成的环张力(表12-14中第6项)按表12-7第9项的内力及应力计算。

## 六、强度校核

### (一) 管壁应力强度校核符号及方向

管壁应力计算中,座标系统以顺管轴为X轴,管横截面上环的切线方向为 $\theta$ 轴,管截面的半径方向为r轴。

应力方向以此三轴为准,分别表示为 $\sigma_x$ 、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ ;剪切应力分别以 $\tau_{x\theta}$ 、 $\tau_{\theta r}$ 、 $\tau_{rx}$ 表示,脚标中第一个文字符号表示剪切应力平面法线向座标,第二个文字符号表示与剪切应力平

表 12-14

一跨钢管的内力与应力计算公式

序	产生内力、 应力荷载	内力名称	作用 平面	计 算 公 式		应力计算部位
				内 力	应 力	
1	轴 向 力	压 力	横 断 面	$\Sigma A$	$\sigma_{x1} = -\frac{\Sigma A}{2\pi r\delta}$	0 $\theta = \frac{2}{3}\pi$
2	均布法向 荷载	弯 矩		$M_x = \frac{L^2 \cos \alpha}{10} (q_s + q_w)$	$\sigma_{x1} = \pm \frac{M_x}{W} \left( \begin{matrix} \theta = 0 \\ \theta = \frac{2}{3}\pi \end{matrix} \right)$	0 $\theta = \frac{2}{3}\pi$
3	均布法向 荷载	剪 力		$V_x = \frac{L \cos \alpha}{2} (q_s + q_w)$	$\tau_{x\theta} = \frac{V_x}{\pi R\delta} \sin \theta$	0 $\theta = \frac{2}{3}\pi$
4	支座反力 及两端各半 跨管、水重 分量	弯 矩	纵 断 面	$M_\theta = \pm 2K_s V_x r$	$\sigma_{\theta1} = \pm \frac{3M_\theta}{2r\delta^2} \left( \begin{matrix} \text{内壁} \\ \text{外壁} \end{matrix} \right)$	0 $\theta = \frac{2}{3}\pi$
5		拉、压力		$N_\theta = \pm 2K_{1s} V_x$	$\sigma_{\theta1} = \pm \frac{N_\theta}{4r\delta}$	0 $\theta = \frac{2}{3}\pi$
6		环张力		$T_\theta = pD_s$	$\sigma_{\theta1} = \frac{T_\theta}{4r\delta}$	0 $\theta = \frac{2}{3}\pi$

注 W——钢管横断面抗弯刚度

$$W = \frac{1}{\cos \theta} \pi r^2 \delta;$$

 $V_x$ ——半跨管长自重和水重; $p$ ——水压强,  $p = \gamma_w H$ ; $K_s$ 、 $K_{1s}$ ——内力系数, 见表12-15; $q_s$ 、 $q_w$ ——单位管长自重及水重。

表 12-15

系数 $K_s$ 、 $K_{1s}$ 

系 数	部 位	鞍 座 包 角 $\beta'$			
		90°	120°	150°	180°
$K_s$	$\theta = 0$	0.03	0.02	0.012	0.006
	$\theta = \frac{2}{3}\pi$	0.082	0.0528	0.0316	0.017
$K_{1s}$	$\theta = 0$	0.132	0.100	0.078	0.057
	$\theta = \frac{2}{3}\pi$	0.102	0.056	0.021	0.0004

行的座标, 图12-18表示上述符号代表的应力在微元体上的作用方向。

应力以拉为“+”、压力为“-”。

荷载作用下, 钢管的内力以拉力为正“+”、压力为“-”, 弯矩以使钢管底部受拉

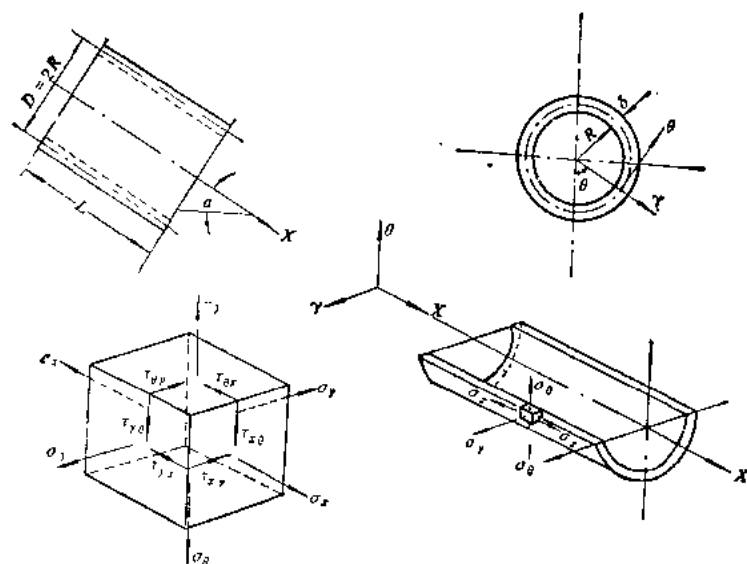


图 12-18 管壁应力符号

为“+”、受压为“-”，剪力规定同剪应力。

## (二) 强度校核准则

根据《规范》(SD144-85) 压力钢管按第四强度理论进行强度校核。

第四强度理论(冯·米赛斯理论)认为材料受力后,所产生的变形,使材料内应力和变形所形成的变形能,在材料强度趋于屈服极限过程中,变形能不断积聚,最后使材料自身结构产生畸变,进入屈服状态。研究表明:对于塑性材料,变形能破坏理论,计入了材料所产生的各种应力,更能反映实际的复杂的受力状态,对材料强度的使用更充分。

第四强度理论的折算应力在二向应力状态(因径向应力小,忽略)下,各计算点应力应满足下列条件:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \sigma_\theta + 3\tau_{x\theta}^2} \leq [\sigma] \quad (12-22)$$

## 第四节 管壳外压稳定校核

### 一、气压差选择

按《规范》(SD144-85)规定:明管内外允许气压差,其值不得大于 98kPa,若通气孔能保证不被污物或冰块堵塞,管内、外气压差值可采用计算值,但不得少于 49kPa。

### 二、抗外压稳定安全系数

压力钢管抗外压稳定安全系数,据《规范》规定取为 2.0。

### 三、刚性环布置及环断面拟定

按  $4p=49\text{kPa}$ , 圆管处是否设置刚性环的判别标准是能否满足下式:

$$\delta \geq \frac{D}{167} \quad (12-23)$$

按  $4p = 0.2 \times 10^3 \text{ Pa}$ , 则上式为

$$\delta \geq \frac{D}{330} \quad (12-24)$$

上式不能满足, 则应设刚性环。刚性环在支座之间等间距布置。

常用的刚性环断面形式如图12-19所示。

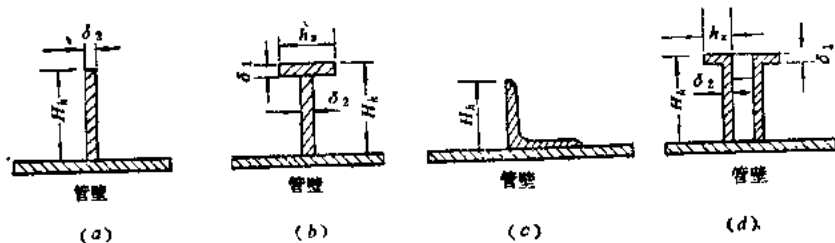


图 12-19 几种刚性环的断面形式

正常运行条件下, 环断面处于小偏心受拉 (或近似处理成轴心受拉状态), 环断面高度与板厚之比受细长比限制。计及制作、运输及安装过程, 断面高度  $H_k$ , 不宜超过环腹板厚的10~12倍。翼板宽不超过  $0.2 \sim 0.6 H_k$ 。加劲肋成对配置, 厚度不小于腹板厚的  $3/4$ , 于环周布置8~12片。环用等于或稍薄于管壁的扁钢板制作, 也可用型钢。

承受外压时, 刚性环断面可近似处理成轴心受压, 环腹板高  $H_k$  与厚度比宜满足:

$$\frac{H_k}{\delta} \leq 50 \sqrt{\frac{2400}{\sigma_s}} \quad (12-25)$$

式中  $\sigma_s$ ——钢材屈服极限。

#### 四、刚性环的临界外压力和抗外压安全度

##### (一) 刚性环的临界外压

据《规范》取

$$P_1 = \frac{3EJ_R}{R^3 l_k}, \quad P_2 = \frac{\sigma_s F_k}{r l_k} \quad (12-26)$$

之小值, 作  $P_c$  值。

式中  $E$ ——钢弹性模量系数,  $E = 2.058 \times 10^8$ , kPa;

$J_R$ ——环计算断面 (包括环两侧各  $0.78 \sqrt{r\delta}$  长的等效变形管壳面积) 的断面惯矩;

$R$ ——环计算断面重心圆半径, m;

$l_k$ ——环间距, m;

$F_k$ ——环计算断面积,  $\text{m}^2$ 。

##### (二) 抗外压安全度

据《规范》的规定

$$K = \frac{P_c}{\Delta P} \geq 2.0 \quad (12-27)$$

式中  $\Delta P$ ——管内外计算压力差。



如不能满足安全度  $K \geq 2$  的要求, 宜加大环断面刚度或调整环间距, 通常以前者较经济。

### 五、环间管壁的外压稳定计算

环间管体在外压作用下, 有可能产生图12-21所示失稳变形。

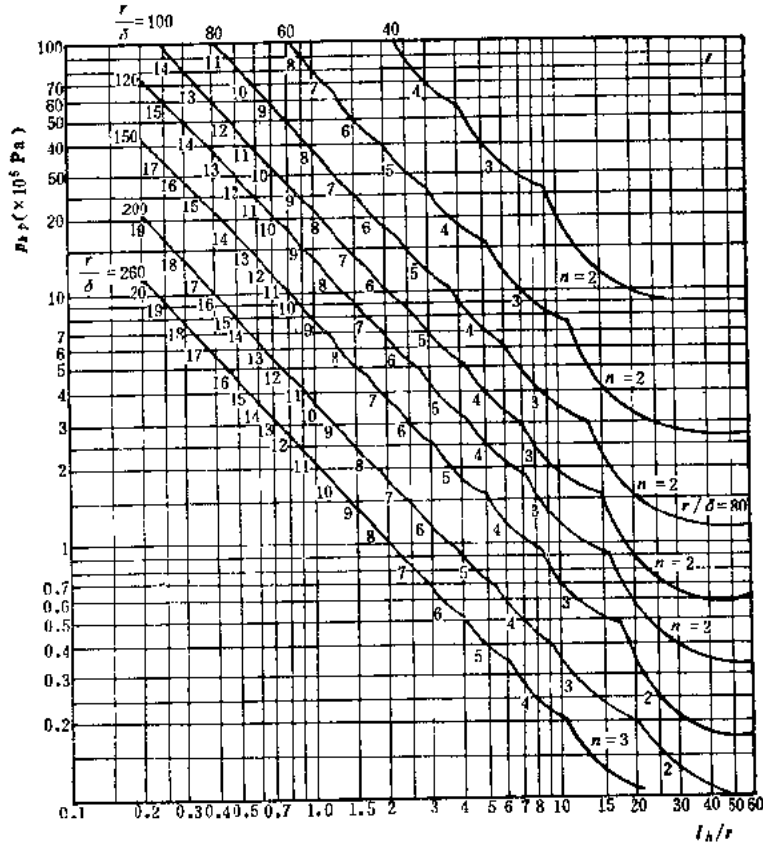


图 12-20 环间管壁失稳波纹形式

使环间管体失稳的临界外压力  $P_{cr}$  用米赛斯公式计算:

$$P_{cr} = \frac{E}{(n^2 - 1) \left( 1 + \frac{n^2 l_h^2}{\pi^2 r^2} \right)^{3/2}} \frac{\delta}{r} + \frac{E}{12(1 - \mu^2)} \left( n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - \mu}{1 + \frac{n^2 l_h^2}{\pi^2 r^2}} \right) \frac{\delta^3}{r^3} \quad (12-28)$$

其中  $n$  为相应于最小  $P_{cr}$  时压屈波数, 用下式估算:

$$n = \sqrt[4]{56.48 \delta \left( \frac{r}{l_h} \right)^3} \quad (12-29)$$

按  $E = 2.058 \times 10^8$  (kPa),  $\mu = 0.3$ ,  $\frac{r}{\delta} = 40 \sim 350$ , 式 (12-28) 表达成图12-20,  $P_{cr}$  可直接按 “ $l_h/r$ ” 及 “ $r/\delta$ ” 查出。要求

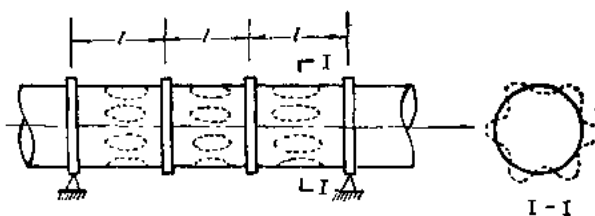
$$K = \frac{P}{\Delta P} \geq 2$$

## 六、刚性环的断面强度校核

刚性环在外压作用下，环计算断面应力 $\sigma_\theta$ ，由环承受的外压力及环-壳在制造、安装中可能产生的不圆度 $\Delta R$ 所决定， $\sigma_\theta$ 可用下式计算：

$$\sigma_\theta = \frac{qrl_h}{\varphi F_h} + \frac{M_{\max}}{W_h} \leq [\sigma] \quad (12-30)$$

图 12-21 明管临界外压力曲线



此式为偏心受压时的应力近似计算式，即“雅辛斯基公式”，有一定缺陷，但有足够的精确度，误差小于5%。

式中  $q$  ——管内外压力差， $q = \Delta P$ ，kPa；

$r$  ——钢管平均半径，m；

$l_h$  ——刚性环间距，m；

$F_h$  ——刚性环计算断面积， $m^2$ ；

$W_h$  ——环计算断面抗弯刚度， $m^3$ ；

$\varphi$  ——弯矩作用平面内轴心受压稳定系数，与环的长细比 $\lambda = 1.82 \frac{R}{\rho}$ 、环截面形状、

作用力的偏心率 $\varepsilon$ 等有关，见《钢结构设计规范》（TJ17-74）的附录五；

$\rho$  ——环计算截面惯性半径；

$$\rho = \sqrt{\frac{J_h}{F_h}} \quad (m) \quad (12-31)$$

$M_{\max}$  ——环的初始不圆度 $\Delta R$ ，在 $q$ 作用下形成的最大弯矩；

$$M_{\max} = \frac{q \Delta R r l_h}{1 - k} \quad (J) \quad (12-32)$$

$\Delta R$  ——不圆度，为理论环半径与实际环半径之差。以向圆心凹进为“正”，凸出圆之外为“负”，按《规范》（SD144-85）规定，安装完毕后 $\Delta R \geq 5D/1000$ ；

$k$  ——系数， $k = \frac{q l_h}{P_{cr}}$ ，分母为环的抗外压临界值，见式（12-26）。

规范（TJ17-74）中，对这种偏心受压构件规定用下式计算：

（1）当偏心率 $\varepsilon \leq 30$ 时

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_r F_h} \leq [\sigma] \quad (12-33)$$

（2）当偏心率 $\varepsilon > 30$ 时

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_h} \leq [\sigma] \quad (12-34)$$

式中  $N$  —— $N = q R l_h$ ；

$\varphi_p$ ——弯矩作用平面内的稳定系数，根据截面形式、长细比 $\lambda$ 、偏心方向和偏心率

$$\varepsilon = \frac{M_{\max}}{N} \frac{F_h}{W_h} \text{—查规范 (TJ17-74) 附表18~附表20。}$$

进行此项强度核算工作，一般按下述程序：

(1) 根据已拟定的刚性环断面，计算其断面特性值 $F_h$ 、 $J_h$ 、 $R_h$ 及抗弯刚度 $W_h$ ；

(2) 由所确定的 $l_h$ 及式(12-26)，计算抗外压临界值 $P_{cr}$ ；

(3) 估计初始不圆度 $\Delta R$ ，以式(12-32)求出刚性环计算断面上的弯矩最大值 $M_{\max}$ ，此值出现在对应圆心角 $\theta = 90^\circ$ 的纵断面上；

(4) 由已求得的 $J_h$ 、 $F_h$ ，计算断面惯性半径 $\rho$ 、弯曲度 $\lambda$ ，以及偏心率 $\varepsilon = \frac{M_{\max}}{q R l_h} \frac{F_h}{W_h}$ ，查规范(TJ17-74)附表，得 $\varphi_p$ ；

(5) 由式(12-33)或式(12-34)计算环内(环向)应力。当 $\sigma_\theta > [\sigma]$ 时，应加大刚性环截面尺寸，再重新验算，直至满足为止，这时，防止失稳的能力更形提高。

## 第五节 锥管、弯管的强度校核

在内水压力及其它力作用下，锥管和弯管的管壁应力计算不同于直管，设计时宜将锥管、弯管管壁适当加厚(通常加厚15%)，以适应实际应力状态。当管径较大、水头不高、且管壁厚度取决于结构要求和外压稳定条件时，锥管、弯管壁与相邻直管段的管壁等厚。

锥管在露天设置的管段中，一般敞露于大气中，弯管则埋于镇墩混凝土中。计算弯管应力时，不宜计入混凝土对管壳变形的约束力。对锥管、弯管亦需进行管壁应力强度校核。图12-22为锥管受力示意。

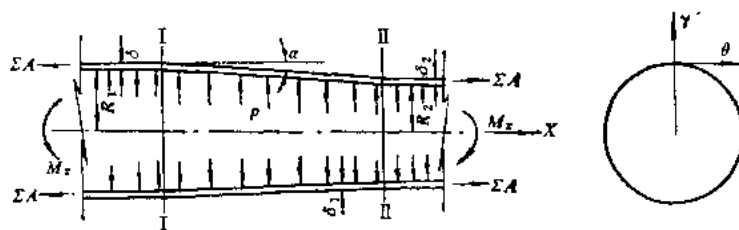


图 12-22 锥管荷载示意

锥管承受内水压力 $P = \gamma_w H$ 、轴向力 $\Sigma A$ 及法向力引起的弯矩 $M_x$ 。计算时，因锥管较短，管两端弯矩 $M$ 可取等值，法向力引起的剪力影响不大，可近似忽略。

锥管段中，不同部位的管壁应力不同，受力最大的截面为图12-22中I-I，II-II，此两断面上的应力，按表12-16进行计算。

表12-16说明：(1) 锥管长度 $\Delta L$ 应满足下式。

$$\Delta L > 2 \sqrt{\frac{R_1 \delta_1}{\cos \alpha}}$$

表 12-16

锥管段受力最大截面 I-I、II-II 应力计算

单位:  $\times 10^5 \text{Pa}$ 

应力名称	应力部位	截 面		
		对 直 管 段	对 锥 管 段	
I - I				
轴向应力	$\sigma_x$	管外壁	$\sigma_x = -1.816n^2 c_1 + \frac{PR_1}{2\delta}$	$\sigma_x = -1.816c_1 + \frac{PR_1}{2\delta n \cos \alpha}$
		管内壁	$\sigma_x = +1.816n^2 c_1 + \frac{PR_1}{2\delta}$	$\sigma_x = +1.816c_1 + \frac{PR_1}{2\delta n \cos \alpha}$
环向应力	$\sigma_\theta$	管外壁	$\sigma_\theta = -c_1 + \frac{PR_1}{\delta} - 0.546n^2 c_1$	$\sigma_\theta = -c_1 + \frac{PR_1}{\delta n \cos \alpha} - 0.546c_1$
		管内壁	$\sigma_\theta = -c_1 + \frac{PR_1}{\delta} + 0.546n^2 c_1$	$\sigma_\theta = -c_1 + \frac{PR_1}{\delta n \cos \alpha} + 0.546c_1$
II - II				
轴向应力	$\sigma_x$	管外壁	$\sigma_x = 1.816n^2 c_1 + \frac{PR_2}{2\delta_1}$	$\sigma_x = +1.816c_1 + \frac{PR_2}{2\delta_1 n \cos \alpha}$
		管内壁	$\sigma_x = -1.816n^2 c_1 + \frac{PR_2}{2\delta_1}$	$\sigma_x = -1.816c_1 + \frac{PR_2}{2\delta_1 n \cos \alpha}$
环向应力	$\sigma_\theta$	管外壁	$\sigma_\theta = c_1 + \frac{PR_2}{\delta_1} + 0.546n^2 c_1$	$\sigma_\theta = c_1 + \frac{PR_2}{\delta_1 n \cos \alpha} + 0.546c_1$
		管内壁	$\sigma_\theta = c_1 - \frac{PR_2}{\delta_1} + 0.546n^2 c_1$	$\sigma_\theta = c_1 + \frac{PR_2}{\delta_1 n \cos \alpha} - 0.546c_1$

(2) 表中符号定义, 除图12-22所示外, 各常数按下列各式计算:

$$c_1 = \frac{1}{c_2} \left[ c_2 (\sqrt{n \cos \alpha} + n^{\frac{1}{2}}) - c_3 \left( 2 \sqrt{n \cos \alpha} + 1 + \frac{1}{n^{\frac{1}{2}}} \right) \right]$$

$$c_2 = \frac{1}{c_4} \left[ c_4 (\sqrt{n \cos \alpha} + n^{\frac{1}{2}}) + c_5 \left( n^2 + 1 + \frac{2}{\sqrt{n \cos \alpha}} \right) \right]$$

$$c_3 = \frac{1}{n^2 c_4} [c_4 (\sqrt{n \cos \alpha} + 1) + c_5 (n^2 - 1)]$$

$$c_4 = n^2 + \frac{1}{n} + 2 \left( \sqrt{n \cos \alpha} + 1 + \frac{1}{\sqrt{n \cos \alpha}} \right)$$

对于 I-I 截面,  $n = \frac{\delta_1}{\delta}$ ;

$$c_5 = 2.57 \frac{\sqrt{R_1}}{\delta^{1.5}} \left( \frac{PR_1}{2} + \frac{\sum A}{2\pi R_1} + \frac{M_x}{\pi R_1^2} \right) \lg \theta$$

$$c_6 = 0.85 \frac{PR_1}{\delta} \left( 1 - \frac{1}{n \cos \alpha} \right)$$

对于截面 II-II,  $n = \frac{\delta_1}{\delta_2}$ ;

$$c_1 = 2.57 \frac{\sqrt{R_2}}{\delta_2^{1.5}} \left( \frac{PR_2}{2} + \frac{\sum A}{2\pi R_2} + \frac{M_x}{\pi R_2^2} \right) \lg \alpha$$

$$c_2 = -0.85 \frac{PR_2}{\delta_2} \left( 1 - \frac{1}{n \cos \alpha} \right)$$

计算 $c_s$ 、 $c_r$ 时,当轴向力 $\Sigma A$ 及弯矩 $M_s$ 与图12-22所示相反时,应代以“负值”,管壁厚度应满足:

$$\sigma_x + \sigma_\theta \leq [\sigma] \quad (12-35)$$

否则应改壁厚,也可改弯管顶角半径 $\alpha$ 。

【例 12-1】某引水式水电站,压力钢管内径0.9m,上、下镇墩间管自由段长(伸缩节至镇墩)108m,支墩间距8m,管轴线与水平线夹角 $\alpha = 30^\circ$ ,最后一跨钢管跨中处计算水头值 $H = 155\text{m}$ 伸缩处计算水头值 $H = 87.4\text{m}$ ,鞍式支座,支座部位无支承环结构。管道由16Mn钢板制作,伸缩节止水填料用2cm直径的油浸麻绳,填料段长 $b_1 = 12\text{cm}$ ,填料与钢管的摩擦系数 $\mu_1 = 0.4$ ,钢的单位体积重 $\gamma_s = 76.44\text{kN/m}^3$ 。根据以上资料,要求决定本段管壁厚度,并对运行工况下温升时管壁强度进行校核。

#### (一) 初拟管壁厚度

初拟管壁厚度按膜应力区管体承受内水压力(基本荷载)时要求的厚度。由表12-1,16Mn钢板在中等厚度时,对应基本荷载时的允许应力 $[\sigma] = 188.65 \times 10^6 \text{Pa}$ 。厚度估算以表12-8中第6项计算公式进行,式中焊接系数 $\phi$ 由表12-4,取为 $\phi = 0.9$ ,则要求的厚度为

$$\delta = \frac{H_R \gamma_w r}{\phi [\sigma]} + c = \frac{155 \times 9.8 \times 10^3 \times 0.45}{0.9 \times 129.36 \times 10^6} + 0.002 = 0.00787 \approx 0.008(\text{m})$$

#### (二) 荷载计算及组合

##### 1. 钢管轴向力

##### (1) 钢管自重分力:

$$A_1 = q_s L \sin \alpha = 2\pi r \delta \gamma_s L \sin \alpha = 2\pi \times 0.454 \times 0.008 \times 76.93 \times (108 - 8/2) \times \sin 30^\circ = 90.486 (\text{kN})$$

##### (2) 伸缩节端部水压力:

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_0^2) p$$

伸缩节外套管内径 $D_1 = 0.952\text{m}$ ,内套管内径 $D_0 = 0.9\text{m}$ ,设计水压力 $p = 856.52\text{kPa}$ ,

$$A_2 = \frac{\pi}{4} [(0.952)^2 - (0.9)^2] \times 856.52 = 64.78 (\text{kN})$$

##### (3) 温度变化时伸缩节止水填料对管体摩擦力:

$$A_3 = \pi D_1 b_1 \mu_1 p = \pi \times 0.952 \times 0.12 \times 0.4 \times 856.52 = 123 (\text{kN})$$

##### (4) 温度变化时鞍式支座对管体摩擦力:

$$\begin{aligned} A_4 &= \Sigma q L f \cos \alpha = (2\pi r \delta \gamma_s + \pi r^2 \gamma_w) L f \cos \alpha \\ &= (2\pi \times 0.454 \times 0.008 \times 76.93 + \pi \times 0.45^2 \times 9.8) \\ &\quad \times 104 \times 0.5 \times \cos 30^\circ = 359.82 (\text{kN}) \end{aligned}$$

##### 2. 垂直管轴方向的力

##### (1) 钢管自重分力(一跨):

$$\begin{aligned} Q_1 &= q_s l \cos \alpha = 2\pi \times 0.454 \times 0.008 \times 76.93 \times 8 \times \cos 30^\circ \\ &= 12.163 (\text{kN}) \end{aligned}$$

(2) 钢管中水重分力(一跨):

$$Q_w = q_w l \cos \alpha = \pi \times 0.45^2 \times 9.8 \times 8 \times \cos 30^\circ = 43.163 \quad (\text{kN})$$

3. 径向

$$\text{管壁受内水压力: } p = \gamma_w H_{\text{中}} = 9.8 \times 155 = 1519 \quad (\text{kPa})$$

上述计算结果列下表。

序	作用力名称	方 向	力 数 值 (kN)	
			温 升	温 降
1	钢管自重分力 $A_1$	轴 向	+90.486	+90.486
2	伸缩节端面水压力 $A_2$	轴 向	+64.78	+64.78
3	伸缩节填料摩擦力 $A_3$	轴 向	+123	-123
4	支座对管体摩擦力 $A_4$	轴 向	+359.82	-359.82
5	钢管自重法向力 $Q_1 \cos \alpha$	垂直管轴向	+12.163	+12.163
6	钢管水重法向力 $Q_w \cos \alpha$	垂直管轴向	+43.163	+43.163
7	内水压力 $P$ (跨中断面)	径 向	1519(kPa)	1519(kPa)
	内水压力 $P$ (支座断面)	径 向	856.52(kPa)	856.52(kPa)

4. 力的组合

按题要求, 计算温升时最后一跨钢管跨中和支座断面的应力并校核强度。温升时, 除法向力及径向力外, 轴向力组合应是  $A_1 + A_2 + A_3 + A_4$ 。

$$\text{对跨中断面 } \Sigma A = 90.486 + 64.78 + 123 + 359.82 = 638.086 \quad (\text{kN})$$

$$\begin{aligned} \text{对支座断面 } \Sigma A &= 90.486 \times \frac{(108-5)}{108} + 64.78 + 123 + 359.82 \\ &= 633.9 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

(三) 在运行工况温升条件下钢管强度校核

1. 最后一跨的跨中断面①—①

(1) 轴向力 $\Sigma A$ 的应力 $\sigma_{x1}$ :

$$\sigma_{x1} = -\frac{\Sigma A}{2\pi r \delta} = \frac{-638.086}{2\pi \times 0.454 \times 0.006} = -37281.4 \quad (\text{kPa})$$

(2) 法向力 $(q_1 + q_w)$ 的应力 $\sigma_{x2}$ :

$$\text{断面弯矩 } M_x = \pm \frac{(q_1 + q_w) l^2}{10} \cos \alpha = \pm \frac{7.97 \times 8^2}{10} \cos 30^\circ = \pm 44.174 \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$\text{在管顶部 } \theta = 0^\circ \text{ 处 } M_x = -44.174 \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$\text{在管底部 } \theta = 180^\circ \text{ 处 } M_x = 44.174 \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$\begin{aligned} \text{断面特性系数 } W &= \pi r^3 \delta \frac{1}{\cos \theta} = \pi \times 0.45^2 \times 0.006 \times \frac{1}{\cos 0^\circ} \\ &= 3.817 \times 10^{-3} \quad (\text{m}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= \pi r^3 \delta \frac{1}{\cos \theta} = \pi \times 0.45^2 \times 0.006 \times \frac{1}{\cos 180^\circ} \\ &= -3.817 \times 10^{-3} \quad (\text{m}^3) \end{aligned}$$

$$\theta = \frac{0^\circ}{180^\circ} = \sigma_{x2} = \frac{M_x}{W} = \frac{\pm 44.174}{3.817 \times 10^{-3}} = \mp 11512.96 \quad (\text{kPa})$$

(3) 径向力(内水压力)的应力 $\sigma_\theta$ :

$$\sigma_\theta = \frac{pD}{2\phi\delta} = \frac{1519 \times 0.9}{2 \times 0.9 \times 0.006} = 126583 \quad (\text{kPa})$$

(4) 主应力校核:

$$x \text{ 向应力 } \sigma_x = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} = -37281.4 \mp 11572.96$$

$$= \begin{aligned} & -48854.36 (\theta = 0^\circ) \\ & -25708.44 (\theta = 180^\circ) \end{aligned} \quad (\text{kPa})$$

$$\text{周向应力 } \sigma_\theta = 126583 \quad (\text{kPa})$$

$$\text{剪应力 } \tau_{x\theta} = 0 \quad (\text{kPa})$$

$$\begin{aligned} \text{管顶 } (\theta = 0^\circ) \quad \sigma &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \sigma_\theta + 3\tau_{x\theta}^2} \\ &= \sqrt{(-48854.36)^2 + (126583)^2 - (-48854.36)(126583)} \\ &= 156825 \quad (\text{kPa}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{管底 } (\theta = 180^\circ) \quad \sigma &= \sqrt{(-25708.44)^2 + (126583)^2 - (-25708.44)(126583)} \\ &= 141203.51 \quad (\text{kPa}) \end{aligned}$$

$$\text{两者均小于允许值 } [\sigma] = 188650 \quad (\text{kPa})$$

2. 最后一跨支座处断面⑤—⑤

(1) 轴向力 $\Sigma A$ 的应力 $\sigma_{x1}$ :

$$\sigma_{x1} = -\frac{633.9}{2\pi \times 0.454 \times 0.006} = -37036.82 \quad (\text{kPa})$$

(2) 法向力 $(q_1 + q_2)$ 的应力 $\sigma_{x2}$ :

此项应力同跨中应力值, 但应力方向相反, 即

$$\text{在管顶部 } \theta = 0^\circ \text{ 处 } \sigma_{x2} = 11572.96 \quad (\text{kPa})$$

$$\begin{aligned} \text{在支座肩部 } \theta = 120^\circ \text{ 处 } \quad \sigma_{x2} &= \frac{M_x}{W} = \frac{M_x \cos \theta}{\pi r^2 \delta} = \frac{144.174 \times \cos 120^\circ}{\pi \times (0.454)^2 \times 0.006} \\ &= -18554.28 \quad (\text{kPa}) \end{aligned}$$

(3) 剪力 $V_x$ 的剪应力 $\tau_{x\theta}$ :

$$V_x = \frac{l \cos \alpha q}{2} = \frac{8 \times \cos 30^\circ \times (1.74 + 6.23)}{2} = 27.61 \quad (\text{kN})$$

$$\theta = 0^\circ \quad \tau_{x\theta} = \frac{V_x}{\pi r \delta} \sin \theta = \frac{27.61 \times \sin 0^\circ}{\pi \times 0.454 \times 0.006} = 0 \quad (\text{kPa})$$

$$\theta = 120^\circ \quad \tau_{x\theta} = \frac{27.61 \times \sin 120^\circ}{\pi \times 0.454 \times 0.006} = 5786.86 \quad (\text{kPa})$$

(4) 圆周向弯矩 $M_\theta$ 的应力 $\sigma_{\theta1}$ :

$$\theta = 0^\circ \quad M_\theta = \pm 2K_1 V_x r = \pm 2 \times 0.02 \times 27.61 \times 0.454 = 0.5014 \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$\theta = 120^\circ \quad M_\theta = \pm 2K_2 V_x r = \pm 2 \times 0.0528 \times 27.61 \times 0.454 = \pm 1.312 \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

对应的应力为:

$$\theta=0^{\circ} \quad \sigma_{\theta 1} = \pm \frac{3M_{\theta}}{2r\delta^2} = \pm \frac{3 \times 0.5014}{2 \times 0.454 \times 0.006^2} \\ = \pm 46016.89 \text{ (kPa)} \quad \left\{ \begin{array}{l} + \text{内壁} \\ - \text{外壁} \end{array} \right\}$$

$$\theta=120^{\circ} \quad \sigma_{\theta 1} = \pm \frac{3 \times 1.312}{2 \times 0.454 \times 0.006^2} = \pm 121484 \text{ (kPa)} \quad \left\{ \begin{array}{l} + \text{内壁} \\ - \text{外壁} \end{array} \right\}$$

(5) 圆周向轴力 $N_{\theta}$ 的应力 $\sigma_{\theta 2}$ :

$$\theta=0^{\circ} \quad N_{\theta} = 2K_1 V_s = 2 \times 0.1 \times 27.61 = 5.522 \text{ (kN)}$$

$$\theta=120^{\circ} \quad N_{\theta} = -2K_1 V_s = -2 \times 0.056 \times 27.61 = -3.032 \text{ (kN)}$$

对应的应力为:

$$\theta=0^{\circ} \quad \sigma_{\theta 2} = \frac{N_{\theta}}{4r\delta} = \frac{5.522}{4 \times 0.454 \times 0.006} = 506.796 \text{ (kPa)}$$

$$\theta=120^{\circ} \quad \sigma_{\theta 2} = -\frac{3.092}{4 \times 0.454 \times 0.006} = -283.774 \text{ (kPa)}$$

(6) 内水压力 $p$ 的圆周向应力 $\sigma_{\theta 3}$ :

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{pr}{\varphi\delta} = \frac{856.52 \times 0.454}{0.9 \times 0.006} = 72011.13 \text{ (kPa)}$$

升温时应力计算结果列下表:

(kPa)					
序	应 力 名 称	$\theta=0^{\circ}$		$\theta=120^{\circ}$	
		内 壁	外 壁	内 壁	外 壁
1	钢管轴向应力 $\sigma_x$	-37036.82	-37036.82	-37036.82	-37036.82
2	法向力 $(q_1+q_2)$ 弯曲应力 $\sigma_{x1}$	+11572.96	+11572.96	-18554.28	-18554.28
3	法向力 $(q_1+q_2)$ 剪切应力 $\tau_{x\theta}$	0	0	+5786.86	+5786.86
4	圆周向弯曲应力 $\sigma_{\theta 1}$	+46016.89	-46016.89	+121484	-121484
5	圆周向支反力的应力 $\sigma_{\theta 2}$	+506.79	+506.79	-283.77	-283.77
6	内水压下管圆周应力 $\sigma_{\theta 3}$	+72011.13	+72011.13	+72011.13	+72011.13

(7) 应力校核:

1)  $\theta=0^{\circ}$ 、 $180^{\circ}$ 处的应力组合列于下表:

(kPa)					
序	应 力 名 称	$\theta=0^{\circ}$		$\theta=120^{\circ}$	
		内 壁	外 壁	内 壁	外 壁
1	$\sigma_x$	-25463.86	-25463.86	-55591.1	-55591.1
2	$\sigma_{\theta}$	+118534.81	+26501.03	+193211.36	-49756.64
3	$\tau_{x\theta}$	0	0	+5786.86	+5786.86



2) 应力校核: 按  $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \sigma_\theta + 3\tau_{x\theta}^2}$  计算结果列成下表:

序	应 力	$\theta=0^\circ$		$\theta=120^\circ$	
		内 壁	外 壁	内 壁	外 壁
	$\sigma$ (kPa)	133106.2	45005.9	226189.8	52916.8

支座肩部为局部应力区, 按表 12-1,  $[\sigma]=291550\text{kPa}$ 。大于设计应力值, 说明所选用的管壁厚度及支座间距可以满足运行工况下温升条件的强度要求。

## 第十三章 压力岔管设计

### 第一节 岔管的类型及选择

#### 一、岔管类型

《水电站压力钢管设计规范》(SD144-85)中列出的岔管主要型式有5种:

- (1) 三梁岔管;
- (2) 内加强月牙肋岔管;
- (3) 贴边岔管;
- (4) 无梁岔管;
- (5) 球形岔管。

小水电站压力岔管的 $[HD]$ 值比较小,较常用的岔管型式中,以三梁岔管、内加强月牙肋岔管、贴边岔管为主,另两种岔管型式因成形技术要求较高而比较少用。本章介绍前三种岔管的设计方法。某些电站如果有条件采用后两种岔管,可按规范及有关专集介绍方法进行设计。

图13-1为Y形和T形三梁岔管的结构图式;图13-2为内加强月牙肋岔管,其中图13-2(a)为T形岔管的单线图;图13-2(b)为半片岔管的结构透视;图13-2(c)为月牙肋在管中安装位置照片实例,都是T形形式。Y形的结构也类似,这种岔管由若干个锥形基本管节和过渡管节组合成形。

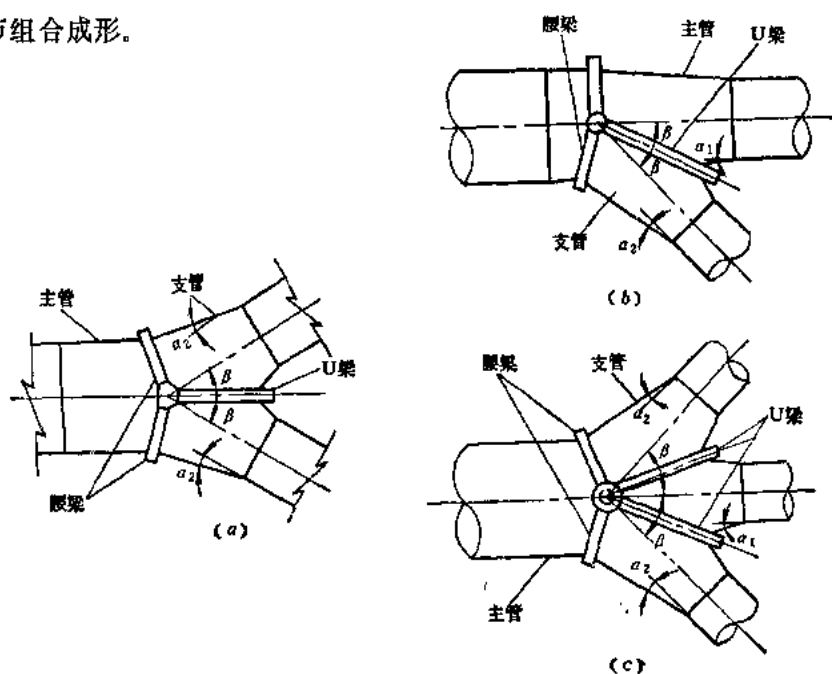


图 13-1 三梁岔管的基本形式

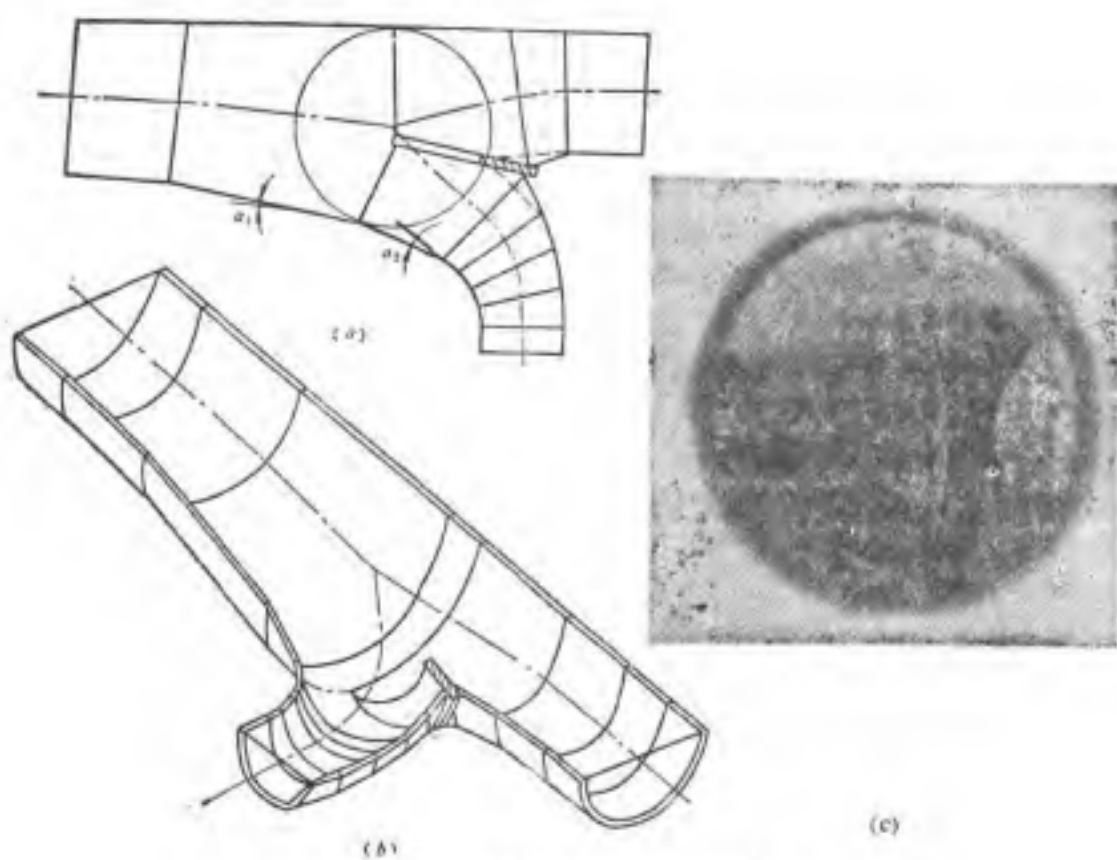


图 13-2 内加强月牙肋管管节结构

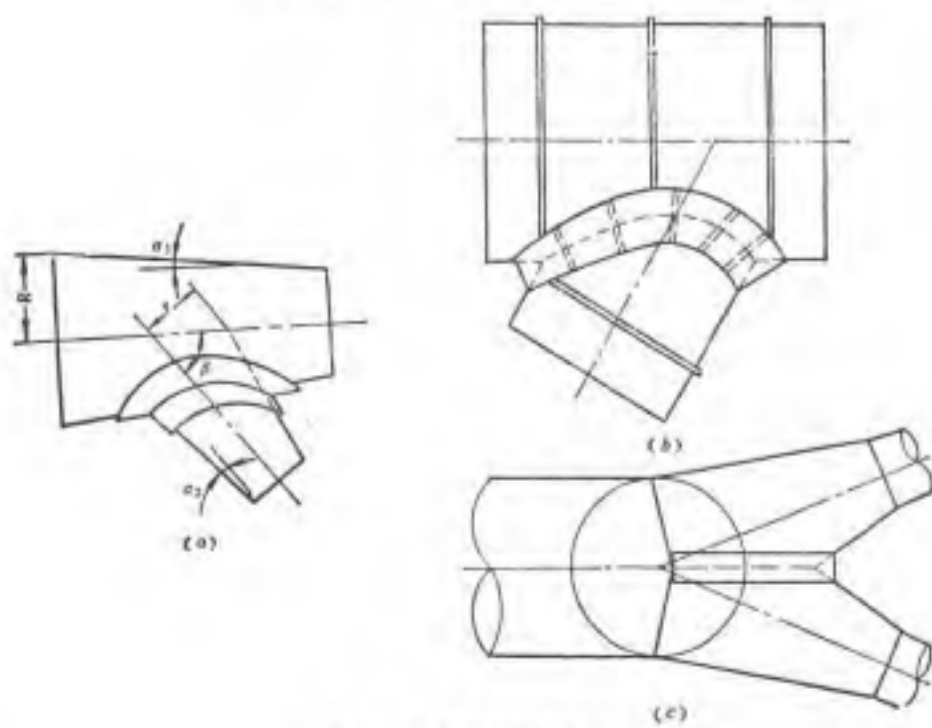


图 13-3 贴边岔管形式

图13-3为贴边岔管几种形式, 其中图13-3(a)为《规范》(SD144-85)规定的基本形式; 图13-3(b)、(c)为广东省水利水电勘测设计院和四川省水利水电勘测设计院曾采用过的两种贴边岔管形式。

图13-4为外加强曲面环梁岔管形式, 国内外采用较多。从结构上看仍属于三梁式岔管的简化形式。当设置腰梁后, 组成类似三梁空间加强体系, 取消腰梁则成为由两支具有与相贯线吻合的曲面U形梁加强结构体系, 国内较多应用在地下压力管结构中。小型水电站的压力岔管周围通常浇筑一定厚度的混凝土, 这种岔管亦有它的应用价值。

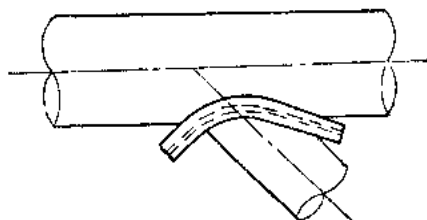


图 13-4 外加强梁式岔管

## 二、岔管选择

《小型水力发电站设计规范》指出: 分岔段的布置, 应根据主管轴线与厂房的相对位置、机组台数及其间距, 并结合地形、地质情况, 综合考虑确定, 力求构造简单、联结平顺、便于施工、经济合理。并指出一般以两分岔为宜。

三梁岔管的水力流态好(中间无拉杆者), 加强梁系的承载力有一定的强度储备能力。实测资料说明: 除腰部应力峰值外, 梁的中间截面实测应力小于计算值。岔管安装制作比较方便, 这种岔管的弱点是耗钢量较大, U梁与管壳的连结施焊量大, 在缺乏热处理设备的情况下, 焊缝应力集中现象不易消除。

内加强月牙肋岔管结构占空间小, 耗钢量较三梁岔管和曲面环梁岔管少, 制作、安装方便, 计算方法相对成熟。它的弱点是肋板对水流干扰大(特别是在非对称的卜形岔管中), 需要通过扩大设肋板部位的管径来改善流态、减少水头损失。岔管由一个倒锥管和两个正锥管组成基本管节, 前后连接若干个过渡锥管或弯管节与经济管径衔接, 引入厂房机组。

贴边岔管最适宜用于主、支管呈不对称布置的情况下, 一般主、支管的直径比小于0.5, 当比值大于0.5时, 应与别的岔管作经济比较。岔管按压力管开孔后孔周补强的工作原理, 分别在主、支管相贯的附近设补强板或类似结构, 降低开孔处应力峰值。这种岔管因补强结构不干扰水流, 水头损失得到改善。耗钢量比较少, 制作、安装比较方便。

曲面环梁岔管优、缺点类似三梁岔管。从受力状态看, 相当于将贴边岔管的补强圈转成与孔口钢管管壁垂直或成某个角度, 因此增大了加强结构的刚度和改变断面的余地。由于梁的作用力与梁形心距离的增大, 带来附加弯矩应力, 使梁断面增大。实测应力与计算应力除U梁腰部应力比较接近外, 其余梁断面应力亦小于实测值<sup>①</sup>。岔管的水流流态不受加强结构干扰, 但岔管的耗钢量相对大。

小水电的压力岔管设计选型, 建议较多采用内加强月牙肋岔管、贴边岔管。三梁或曲面环梁岔管在[HD]值较小的岔管中亦可选用。国内外有关文献建议: 当主、支管直径比

① 《压力钢管的岔管计算暂行规范》, 苏联水电建设总局, 1960年。

$\frac{D_{\text{主}}}{D_{\text{支}}} \geq 2$  时, 用贴边岔管; 当  $2 > \frac{D_{\text{主}}}{D_{\text{支}}} \geq \frac{3}{4}$  时, 用曲面环梁岔管或其它形式岔管; 当  $\frac{D_{\text{主}}}{D_{\text{支}}} < \frac{3}{4}$  时, 最好用三梁岔管或内加强月牙肋岔管。国内规范指出贴边岔管大小直径比应  $\geq 1.4$ 。

## 第二节 岔管体形拟定

### 一、岔管体形参数的拟定范围

岔管体形参数选择涉及水力流态、结构应力状态和材料耗用量, 以及制作工艺的难易。《规范》(SD144-85) 在总结工程经验基础上, 规定了岔管参数选择范围 (图13-1至图13-4)。

对三梁岔管和贴边岔管:

主岔管的半锥顶角  $\alpha_1 = 0^\circ \sim 7^\circ$

支岔管的半锥顶角  $\alpha_2 = 5^\circ \sim 10^\circ$

分岔角  $\beta = 45^\circ \sim 60^\circ$

对内加强月牙肋岔管:

主岔管的半锥顶角  $\alpha_1 = 10^\circ \sim 15^\circ$

支岔管的半锥顶角  $\alpha_2 = 20^\circ$  左右

分岔角  $\beta = 55^\circ \sim 90^\circ$

曲面环梁岔管的参数与贴边岔管相似。

### 二、加强结构的形式拟定

加强结构形式应尽可能简单、制作方便。除贴边岔管和曲面环梁岔管以外, 其它的岔管的相贯线均应设计成二元二次曲线, 使焊接在相贯线位置的加强结构也具有二元二次曲线的轮廓。图13-5表示分岔相贯线能满足此要求的制图方法。

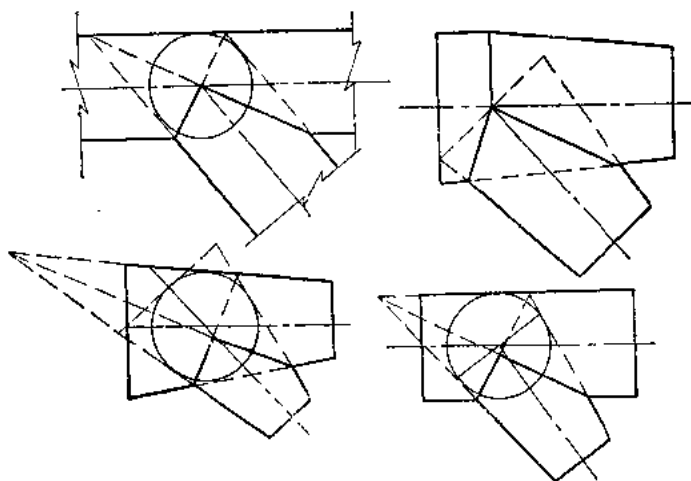


图 13-5 相贯线为二元二次曲线的几种岔管拟定方式

岔管管轴分岔点为圆心作一圆（岔管结构中实际代表一个球），对于无倒锥管节的岔管，公切球半径按管轴分岔点处与主岔管或主管的管壳中面（壁厚半值）相切圆的半径确定；对内加强月牙肋岔管来说，公切球半径一般取成岔管前段钢管中面半径的（1.1~1.2）倍。公切球半径同时要与分岔角 $\beta$ 、主岔管、支岔管的半锥顶角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 配合，使倒锥与正锥管衔接处钝角区，腰线转折角 $\alpha_0$ 控制在（ $10^\circ \sim 15^\circ$ ）范围内，以减少因腰线转折引起的集中应力。一般规律是：公切球半径大， $\alpha_1$ 大 $\alpha_2$ 小，并且 $\beta$ 角小时，转折角 $\alpha_0$ 就小，应力集中现象也得到改善，但同时，月牙肋尺寸及厚度却增大了，制作难度也增大，用钢量也增多。因此要结合钢管与厂房相对位置、机组间距条件逐步调整岔管体形和参数。

加强结构的断面形式：对三梁岔管和曲面环梁岔管，以矩形（宽度为钢板厚）或工形较好。T形截面因形心比较高，作用力对加强梁的弯矩增大，导致应力加大，但这种截面对制作岔管比较方便，加强梁中的U梁可以内插入岔管以减低形心高度，梁的尺寸拟定可参考表13-2中部分已建电站岔管结构尺寸。

对于内加强月牙肋岔管，宜用矩形截面，宽度即为肋板厚度。

对于贴边岔管用矩形截面钢板，焊在岔管外壁或内壁较常见。

### 第三节 岔管的荷载及材料容许应力

#### 一、计算荷载和工况

##### （一）内水压力

- （1）钢管进口处正常蓄水位时的静水压力；
- （2）钢管进口处正常蓄水位时，机组丢弃全部负荷管内发生的水击压力；
- （3）钢管进口处因部分机组丢弃负荷形成进口水位壅高后，供水机组再次弃负荷形成新的水击压力；
- （4）水压试验压力（1.25倍设计水压力值）。

##### （二）地震荷载

地震荷载参见水利电力部《水工建筑物抗震设计规范》（SDJ10-78）试行中规定。

##### （三）未凝固混凝土荷载

当压力钢管供水机组台数 $\geq 2$ ，或者压力前池供给多根钢管用水时，荷载（一）（3）要结合运行中机组丢弃负荷的具体可能状况进行分析，研究有无可能发生在钢管进口处已发生最高壅水后，接着发生水击现象；研究可能存在的仅是部分丢弃负荷的情况。

国内一些小水电站运行经验表明：当电站钢管供水机组用多条发电机母线联系着，这种情况下应该考虑荷载（一）（3）。

地震荷载对非地震区或设防的烈度较低（ $\leq 7^\circ$ ）的小电站压力岔管来说意义不大。地震规范指出这种电站主要采取抗震措施。压力岔管在小水电站中常常设计成岔管埋置于混凝土中的形式，地震引起惯性力直接由混凝土传给地基。地震区或设防要求较高的电站，除非采用明岔管，一般亦不必考虑地震荷载。

岔管在安装就位后，如采用埋置于混凝土中的形式，则岔管承受未凝固的混凝土压

力。一旦凝固后,这种外压力将消失,混凝土压力宜作为一种临时荷载考虑,采用临时的内支撑加固措施来解决。

岔管外有混凝土墩体包裹,但强度设计仍按明岔管进行。静水压力和正常蓄水位时的水击压力是基本荷载。地震荷载及水压试验荷载属于特殊荷载。按《规范》(SDJ144-85)规定,计入地震荷载时,除静水压力外,不再计入水击压力值。

## 二、材料的容许应力

材料容许应力按规范要求,由下表中给定方法计算。

表 13-1 钢管材料容许应力规定值

应力区域	部 位	荷 载	
		基 本	特 殊
膜应力 $\times[\sigma]_1$	膜应力区的管壁及小偏心受拉的加强构件	$0.5\sigma_s$	$0.7\sigma_s$
局部应力区 $[\sigma]_1$	距加强梁 $3.5\sqrt{R\delta}$ 以内及转角点处管壁 承受弯矩的外加强梁	$0.8\sigma_s$	$1.0\sigma_s$
		$0.67\sigma_s$	$0.8\sigma_s$

注 对于用有限元计算的峰值应力,容许应力可较本表酌情提高;表中 $\sigma_s$ 为所用钢材的屈服极限值。

## 第四节 三梁岔管的简化设计

### 一、管壁厚度

管壁厚度应取下列两式中的较大值:

(一)膜应力区的管壁厚度( $\delta$ )

$$\delta = \frac{K_1 p R}{[\sigma]_1 \varphi \cos \alpha} + c \quad (13-1)$$

(二)局部应力区的管壁厚度( $\delta$ )

$$\delta = \frac{K_2 p R}{[\sigma]_2 \varphi \cos \alpha} + c \quad (13-2)$$

式中  $p$ ——设计内水压力;

$R$ ——该节钢管的最大内半径;

$\alpha$ ——该节钢管的半锥顶角;

$\varphi$ ——焊缝系数,见表12-2;

$[\sigma]_1$ 、 $[\sigma]_2$ ——材料用于岔管时的容许应力,见表13-1;

$K_1$ ——系数, $K_1=1.0\sim 1.1$ ;

$K_2$ ——边缘应力集中系数,近似取 $1.5\sim 2.0$ ,视管节与邻接管节管壳偏转角选定,偏角大取大值;

$c$ ——锈蚀裕量。

由式(13-1)、式(13-2)中选出的管壁厚度,一般可不再进行应力校核。锈蚀裕量按 $1\sim 2\text{mm}$ 另加。

表13-2列出国内部分电站三梁岔管壁厚及加强梁技术数据,可供拟定尺寸时参考。

表 13-2 岔管管技术数据参考

电站编号	建造年代	类别	岔管型式	PD值 ( $10^4\text{Pa}$ )	岔管主要结构尺寸 (mm)					钢材	加面结构型式及尺寸 (mm)
					主管		支管		分岔角		
					内径	壁厚	内径	壁厚			
1	1960	埋	三梁	605	1500	26	1000	18	45°	A3	U梁T (580~980)×180, 铆钉组合板梁 330×120
2	1967	明	三梁	176	2200	8	1400	8	2×30°		U梁T (800~450)×35, 腰梁450×30 300×25
3	施工	明	三梁	462	4200	14	2800	14	2×30°	16Mn	U梁(600~800)×40, 腰梁600×40
4	1969	明	三梁	189	900	16	400	16	60°	A3	U梁T 200×20 腰梁T 100×20 U梁T 450×25, 腰梁T 200×22
5	1965	明	三梁	204	900	16	900	16	2×74° 37°	A3	U梁T 200×16 (160~400)×30, 腰梁T 150×24 150×16, 176×20
6	1971	明	三梁	367	1200	20	600	20	2×30° 182-1	16Mn	U梁T (400~800)×40, 腰梁T 400×40 200×20
7		明	三梁	38	1800	12	1800	12	2×30°	A3	U梁I 400×12-2 腰梁I 300×12-2 U梁I (400~700)×12×3, 腰梁I 388×12
8	1973	埋	三梁	820	4000	26	4000	26	45°	15Mn	U梁(800~1350)×55, 腰梁800×52, (一号岔管)
9	1972	埋	三梁	836	2200	22	1800	22	45°	16Mn	U梁(700~1400)×66, 腰梁700×66(一号岔管)
10	1972	埋	三梁	1360	3400	28	1700	28	60°	16Mn	U梁(450~1200)×230, 腰梁(450~800)×230(一号岔管)
11		明	三梁	121	1420	16	1150	16	45°	A3	U梁T 300×20 腰梁T 200×22 U梁T (200~450)×22, 腰梁T 200×22
12		埋	三梁	110	1000	12	1000	12	90°	A3	U梁T 200×22, (200~450)×22, 腰梁T 200×22, 200×22
13		明	三梁	870	2000	10	1200	10	45°	A3	U梁T 150×30, 500×30, 双腰梁T 150×30, 450×30
14		明	柱合型	75	500	12	350	10	45°	A3	U梁T 150×12 腰梁150×10, 岔管补强板 50×12 U梁T (138~313)×10, 岔管补强板 50×12
15		明	三梁		1300	10	800	10	2×30°	A3	U梁T 200×25 腰梁330×25 U梁T 305×25



续表

电站编号	建造年代	类别	岔管型式	PD值 (10 <sup>4</sup> Pa)	岔管主要结构尺寸(mm)					钢材型号	加固结构型式及尺寸(mm)
					主管		支管		分岔角		
					内径	壁厚	内径	壁厚			
16			三梁	261	900	16	500	16	45°	A3	U梁 <sup>300×30</sup> T(200~400)×30, 腰梁200×30
17			三梁	74	2000	10	1000	10	50°	A3	U梁 <sup>200×15</sup> T(200~500)×15, 腰梁200×15
18			三梁	85	1700	14	1200	14	60°	A3	岔管用锥形管节, 锥底角80°. U梁 <sup>300×30</sup> T(200~500)×30梁 <sup>腰200×30</sup>
19			三梁	81.25	1300	10	800	10	80°	A3	U梁(450~600)×36, 腰梁500×36
20			三梁	205	1100	14	1750	14	60°	A3	岔管用锥形管节锥底角77°. U梁 <sup>300×32</sup> T(600~800)×32梁 <sup>腰600×32</sup>
21		明	混合型		3400	10	1000	10	45°	A3	三支梁U梁 <sup>200×26</sup> T <sup>200×26</sup> 280×20, 腰梁I <sup>200×26</sup> 230×10, 支管补强板 <sup>150×10</sup>
22		明	三梁	30	1200	10	1200	10	80°	A3	U梁 <sup>200×20</sup> T <sup>200×20</sup> 300×30
23	1965	明	三梁	260	1000	20	850	20	45°	A3	U梁 <sup>200×40</sup> T <sup>200×40</sup> 340×40
24	1972	明	三梁	240	828	14	418	10	60°	A3	U梁150×50, 腰梁150×50
25											
26			三梁	195	750	16		14	50°	A3	U梁T <sup>518×18</sup> 腰梁168×18
27			三梁	63.5	1600	8	1200	8	52°40′	A3	U梁 <sup>250×21</sup> T(192~434)×25腰梁192×25
28			三梁	72.54	1300	8	800	8	74°54′	A3	U梁 <sup>150×15</sup> T(200~400)×15, 腰梁200×15

## 二、加强梁设计

### (一) 加强梁结构

加强梁设在岔管的三个管壳相贯处, 承受管体割去一部分后形成的不平衡水压力。梁系由三根似椭圆梁组成(图13-6), 其中两个支管间的梁长轴半径最大, 这根梁习惯上称为U梁; 另两根在主、支管相贯处, 长轴半径和短轴半径通常比较接近, 称为腰梁。等径、对称分岔的两支腰梁半径相同; 不等径或不对称分岔的两支腰梁内半径不同。腰梁除承受所在位置处的不平衡水压力外, 还承受U梁给予的集中荷载, U梁除承受不平衡水压力外, 还承受腰梁给予的集中力。

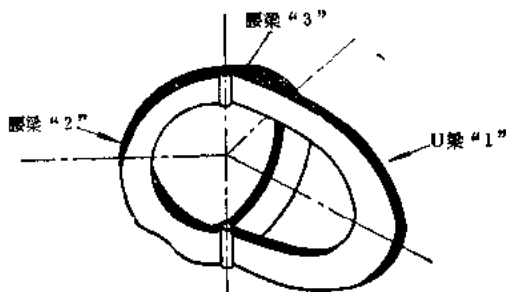


图 13-6 三梁结构透视

加强梁断面应先行拟定, 通过应力校核确定。通常有一个先试拟定通过计算应力后再逐步调整的过程。拟定梁断面形式及尺寸时, 可参考表13-2中所列实例资料, 应注意使加强梁的断面形心尽量靠近管壳。

U梁和腰梁断面高度及面积一般不相同, 但同一根梁有等断面和变断面两种形式。腰梁宜用等高度等断面。U梁在 $[HD]$ 值较大时, 一般采用变断面高度, 接点处断面高度与腰梁相等, 腰部断面在梁的高度方向加大; 当 $[HD]$ 值比较小时通常采用等断面、等高度。

### (二) 加强梁计算方法的简化假设条件

岔管的 $[HD]$ 值较大时, 应按《水电站压力钢管设计规范》(SD144-85)中较详细的近似计算方法进行荷载及内力计算。小电站的 $[HD]$ 值比较小, 《规范》附录(四)给出简化计算的途径。本手册根据常见的小水电工程情况, 对简化计算作如下假设条件:

(1) 岔管埋置于混凝土镇墩中, 岔管前、后端因断面不同引起的不平衡水压力, 由管壁外的止推环或锚固结构传递给镇墩;

(2) 岔管前后无伸缩节;

(3) 荷载中不考虑温度影响力和水平向不平衡水压力;

(4) 三梁的接点视作铰接;

(5) 水压力对于腰梁两侧等效长范围内管壁的荷载可不计;

(6) 腰梁以近似的半圆环梁代替, U梁变位计算以直梁代替, 梁内缘用带有曲梁校正系数的直梁公式计算内、外应力。

### (三) 梁的荷载

图13-7为几种常见岔管垂直向不平衡水压力荷载图式。图中, 阴影面积乘设计水压力值, 即为梁承受的垂直荷载。

#### 1. 计算荷载的若干几何尺寸

图13-8给出几种常用梁式岔管的几何量图式

(1) 等径卜形圆管分岔(图13-8a);

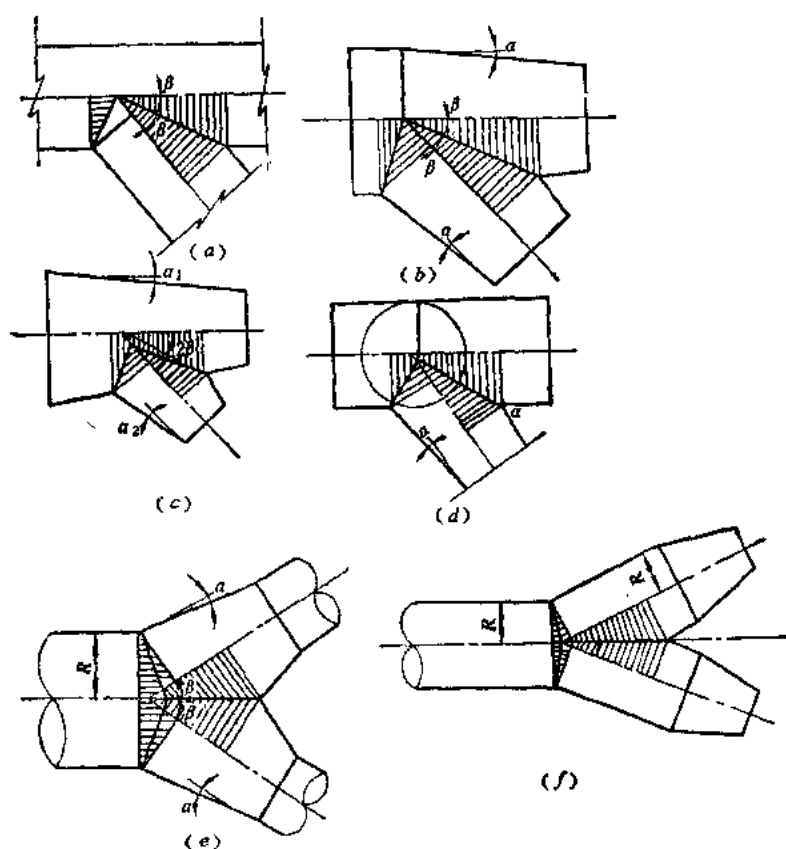


图 13-7 岔管荷载分析

$$\left. \begin{array}{l} \text{U梁OB: 内缘长轴半径} \quad \overline{OB} = R / \sin \frac{\beta}{2} \\ \text{内缘短轴半径} \quad \overline{OO_1} = R \end{array} \right\} \quad (13-3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{腰梁OA: 内缘长轴半径} \quad \overline{OA} = R / \cos \theta \\ \text{内缘短轴半径} \quad \overline{OO_1} = R \end{array} \right\} \quad (13-4)$$

腰梁OC: 内缘长、短轴半径均为  $R$

(2) 圆管上卜形锥管分岔 (图13-8b): 岔管的U梁BG、腰梁AG、CG由下列方法求内缘的长、短轴半径。

K点坐标由直线EK及KB的方程解出; A点坐标由直线AB、AE解出; E点坐标由直线CE、AE解出。在坐标场 $x, y$ 中, 各直线方程分别为:

$$\text{EK:} \quad y = R \quad (13-5)$$

$$\text{AB:} \quad y = -R \quad (13-6)$$

$$\text{KB:} \quad y = \frac{R}{\cos(\alpha + \beta)} - \operatorname{tg}(\alpha + \beta) x \quad (13-7)$$

$$\text{AE:} \quad y = \frac{-R}{\cos(\beta - \alpha)} - \operatorname{tg}(\beta - \alpha) x \quad (13-8)$$

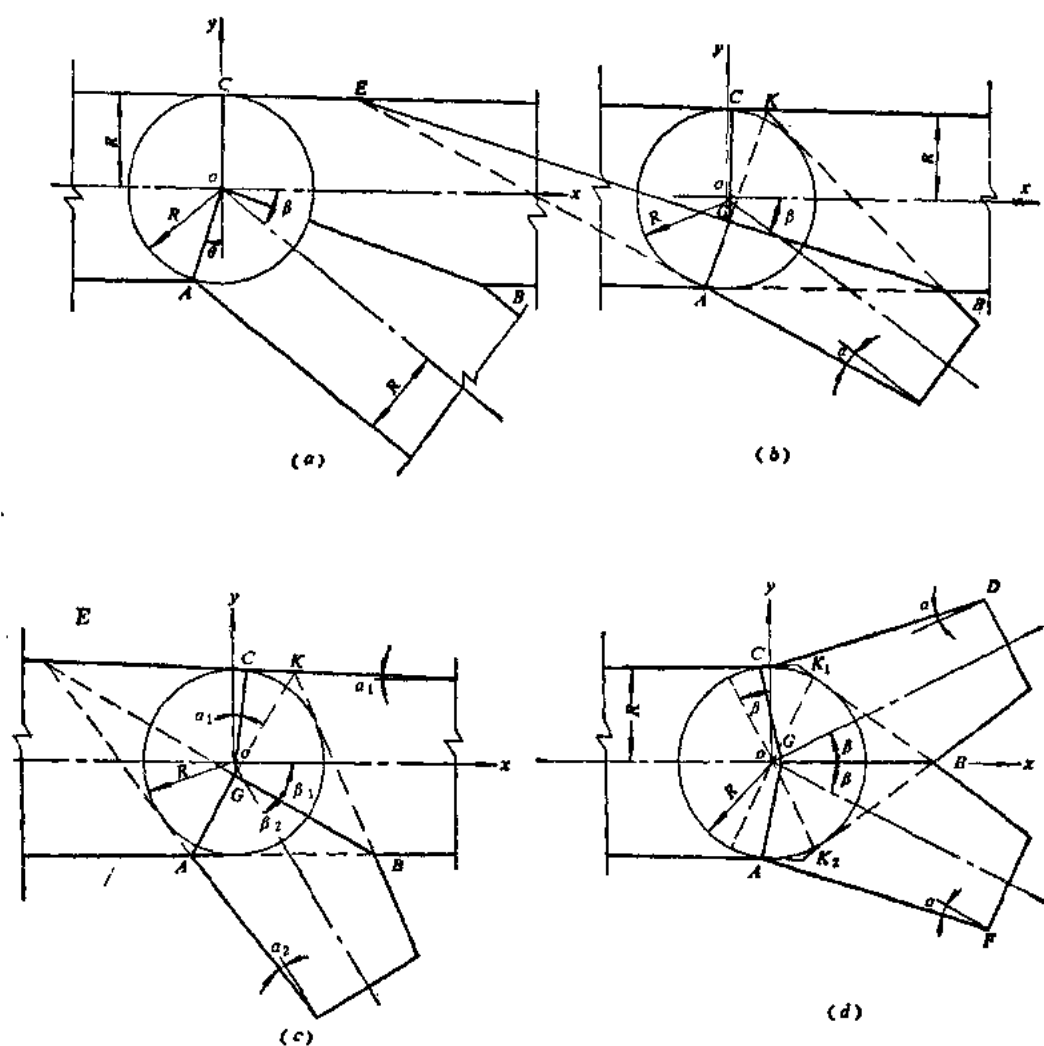


图 13-8 几种岔管几何图形及符号

G点为相贯线交点。在建立A、B、K、E坐标后，直线AK、BE联解，可得G点坐标。  
AK方程为：

$$y = \frac{(y_K - y_A)(x - x_A)}{(x_K - x_A)} + y_A \quad (13-9)$$

BE方程为：

$$y = \frac{(y_E - y_B)(x - x_B)}{(x_E - x_B)} + y_B \quad (13-10)$$

联解得G(x<sub>G</sub>, y<sub>G</sub>)。

U梁的长轴半径a<sub>1</sub>，腰梁AG的长轴半径a<sub>2</sub>均可由解析几何关系求出，即

$$a_1 = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2} \quad (13-11)$$

式中，对U梁BG：Δy = y<sub>G</sub> - y<sub>B</sub>，Δx = x<sub>G</sub> - x<sub>B</sub>

对腰梁AG：Δy = y<sub>G</sub> - y<sub>A</sub>，Δx = x<sub>G</sub> - x<sub>A</sub>

腰梁CG的长轴半径a<sub>2</sub>为

$$a_z = y_z + |y_o| \quad (13-12)$$

三根梁在G类的x轴向(垂直于图13-8b图面)高度z, 就是U梁BG、腰梁AG、CG的内缘短轴半径b,

$$b = z = \sqrt{R^2 - y_o^2} \quad (13-13)$$

腰梁CG是内径为R的圆环梁。G点已越过圆的中心, 与公切球心的距离为 $y_o$ 。

(3) 锥形主、支管卜形分岔(图13-8c): 如同求图13-8(b)的几何数据一样, 先求出K、B、A、E的坐标值, 再求相贯线交点G的坐标及梁的内缘长、短半径a、b, 其中腰梁CG端部亦越过公切球心O。计算时, 直线EK、AB、KB、AE的方程为:

$$EK_1: \quad y = \frac{R}{\cos \alpha_1} - x \operatorname{tg} \alpha_1 \quad (13-14)$$

$$AB_1: \quad y = \frac{-R}{\cos \alpha_1} + x \operatorname{tg} \alpha_1 \quad (13-15)$$

$$KB_1: \quad y = \frac{R}{\cos(\beta_1 + \beta_2 + \alpha_2)} - x \operatorname{tg}(\beta_1 + \beta_2 + \alpha_2) \quad (13-16)$$

$$AE_1: \quad y = \frac{-R}{\cos(\beta_1 + \beta_2 - \alpha_2)} - x \operatorname{tg}(\beta_1 + \beta_2 - \alpha_2) \quad (13-17)$$

式中 R——公切球半径(内切钢管);

$\alpha_1, \alpha_2$ ——主锥和支锥管的半锥顶角;

$\beta_1, \beta_2$ ——相贯线GB与主锥轴、支锥轴间夹角。

由EK、KB直线方程确定K点坐标; AB、KB直线方程确定B点坐标; AB、AE直线方程确定A点坐标; AE、EK直线方程确定E点坐标。C点坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_o &= R \sin \alpha_1 \\ y_o &= R \cos \alpha_1 \end{aligned} \right\} \quad (13-18)$$

G点坐标( $x_o, y_o$ ), 由已知A、B、K、E坐标建立的EB、KA直线方程联解求得。G点所在主锥截面圆半径即为U梁BG、腰梁AG、CG的梁端短半径, 按下式计算:

$$b = z = \sqrt{\left(\frac{R}{\cos \alpha_1} + x_o \operatorname{tg} \alpha_1\right)^2 - y_o^2} \quad (13-19)$$

【例 13-1】某卜形锥主、支管岔管, 公切球径 $R=125.4\text{cm}$ , 主锥管半锥顶角 $\alpha_1=4^\circ 22'$ , 支锥管半锥顶角 $\alpha_2=7^\circ$ , 分岔角 $(\beta_1 + \beta_2)=45^\circ$ , 试计算三根梁的内缘半径。

由图13-8(c), 4条直线方程为:

$$EK_1: \quad y = \frac{R}{\cos \alpha_1} - x \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{125.4}{\cos 4^\circ 22'} - x \operatorname{tg} 4^\circ 22' \quad (13-20)$$

$$AB_1: \quad y = \frac{-R}{\cos \alpha_1} + x \operatorname{tg} \alpha_1 = -\frac{125.4}{\cos 4^\circ 22'} + x \operatorname{tg} 4^\circ 22' \quad (13-21)$$

$$KB_1: \quad y = \frac{R}{\cos(\beta_1 + \beta_2 + \alpha_2)} - x \operatorname{tg}(\beta_1 + \beta_2 + \alpha_2) = \frac{125.4}{\cos 52^\circ} - x \operatorname{tg} 52^\circ \quad (13-22)$$

$$AE: \quad y = \frac{-R}{\cos(\beta_1 + \beta_2 - \alpha_1)} - x \operatorname{tg}(\beta_1 + \beta_2 - \alpha_1) = \frac{-125.4}{\cos 38^\circ} - x \operatorname{tg} 38^\circ \quad (13-23)$$

联解式(13-20)、式(13-22),得K点坐标:K(64.71, 120.85); 联解式(13-21)和式(13-22),得B点坐标: B(243, -107.34); 联解式(13-21)和式(13-23),得A点坐标: A(-38.94, -128.71); 联解式(13-20)和式(13-23),得E点坐标: E(-403.81, 156.35),

直线AK的方程式为:

$$y = \frac{(y_K - y_A)(x - x_A)}{(x_K - x_A)} + y_A = \frac{(120.85 + 128.71)(x + 38.94)}{64.71 + 38.94} - 128.71 \\ = 2.408x - 34.954 \quad (13-24)$$

直线BE的方程式为:

$$y = \frac{(y_E - y_B)(x - x_B)}{(x_E - x_B)} + y_B = \frac{(156.35 + 107.34)(x - 243)}{-403.81 - 243} - 107.34 \\ = -0.40767x - 8.274 \quad (13-25)$$

联解式(13-24)和式(13-25)得到相贯线交点G的坐标位置:  $x_G = 9.48\text{cm}$ ,  $y_G = -12.14\text{cm}$ .

$$\text{U梁的长轴半径: } \overline{BG} = a_1 = \sqrt{(y_G - y_B)^2 + (x_G - x_B)^2} \\ = \sqrt{(-12.14 + 107.34)^2 + (9.48 - 243)^2} = 252.2\text{cm}$$

$$\text{短轴半径: } b_1 = \sqrt{\left(\frac{R}{\cos \alpha_1} + x_G \operatorname{tg} \alpha_1\right)^2 - y_G^2} \\ = \sqrt{\left(\frac{125.4}{\cos 4^\circ 22'} + 9.48 \operatorname{tg} 4^\circ 22'\right)^2 - (-12.14)^2} \\ = 125.9\text{cm}$$

$$\text{AG梁的长轴半径: } \overline{AG} = a_2 = \sqrt{(y_G - y_A)^2 + (x_G - x_A)^2} \\ = \sqrt{(-12.14 + 128.71)^2 + (9.48 + 38.94)^2} \\ = 126.2\text{cm}$$

$$\text{短轴半径: } b_2 = 125.9\text{cm}$$

$$\text{CG梁的长轴半径: } \overline{CG} = a_3 = \sqrt{(y_G - y_C)^2 + (x_G - x_C)^2}$$

其中  $y_C = R \cos \alpha_1 = 125.4 \times \cos 4^\circ 22' = 125.04\text{cm}$ ;

$$x_C = R \sin \alpha_1 = 125.4 \times \sin 4^\circ 22' = 9.548\text{cm}.$$

按已求得G点坐标值及 $x_C$ 、 $y_C$ , 可得

$$a_3 = \sqrt{(125.04 + 12.14)^2 + (9.548 - 9.48)^2} = 137.2\text{cm}$$

$$\text{CG梁的短轴半径: } b_3 = 125.9\text{cm}.$$

(4) 圆管上Y形锥管分岔(图13-8d)。Y形岔管的三根加强梁分别为U梁BG、腰梁AG、CG。梁内缘的长轴半径 $a$ 、短轴半径 $b$ , 仍由几根轮廓线方程联解后, 按前述方法计算。已有这方面的计算公式<sup>①</sup>。

① 《压力钢管》, 潘家铮主编, 水利电力出版社。

$$\text{U梁BO: 长轴半径: } a_1 = R \frac{\cos\alpha \sin\beta}{\cos^2\alpha - \cos^2\beta} \quad (13-26)$$

$$\text{短轴半径: } b_1 = R \frac{\sin\beta}{\sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\beta}} \quad (13-27)$$

$$\text{腰梁CO、AO: } a_2 = \frac{R}{\sin\lambda} \quad (13-28)$$

$$b_2 = R \quad (13-29)$$

式中  $R$ ——主管及公切球半径;

$\beta$ ——半分岔角;

$\alpha$ ——半锥顶角;

$\lambda$ ——CG梁与 $x$ 轴交角:  $\lambda = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\cos\alpha + \cos\beta}{\sin\beta}\right)$ .

腰梁与U梁的接点已伸出支管的直径点, 因此三根梁按实际交点G的长半径应是:

$$\text{U梁} \quad a_1 = \frac{R \cos\alpha}{\sin\alpha + \sin\beta} \quad (13-30)$$

$$\text{腰梁} \quad a_2 = \frac{R}{\sin\lambda} \left(1 - \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\gamma}\right) \quad (13-31)$$

$$\lambda = \text{tg}^{-1}\left(\frac{1 + \cos\alpha \cos\beta}{\cos\alpha \cdot \cos\beta}\right) \quad (13-32)$$

G点位置(见图13-8d)随 $R$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 而变。

很多情况下, 为了结构制作方便, 如果两片腰梁平面相对偏角不大时, 可布置在一个平面之内(即偏离管壳相贯线), 同时把U梁端延伸, 使与腰梁相接, 这样布置的腰梁内缘半径应重新计算确定。

## 2. 作用于梁上荷载的近似计算

按前述: 忽略作用于梁上的水平荷载, 且将U梁内缘轮廓看成椭圆, 腰梁看成圆环梁。梁的荷载为图13-7中各岔管的阴影面积与设计水压强 $P$ 的乘积。

图13-9列出两种最常见的三梁岔管加强梁的荷载分布图式。

图13-9(a)中的 $F_1$ 、 $F_2$ 分别按下式计算:

$$F_1 = a_1 \sin\beta \quad (13-33)$$

$$F_2 = R \text{tg}\beta \quad (13-34)$$

图13-9(b)中的 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 分别按下列式计算:

$$F_1 = a_1 \sin\beta_1 \quad (13-35)$$

$$F_2 = a_1 \sin\beta_2 \quad (13-36)$$

$$F_3 = \frac{R x_A}{y_A} \quad (13-37)$$

$$F_4 = \sqrt{x_A^2 + y_A^2} [\cos[180^\circ - (\Delta + \beta_1 + \beta_2)]] \quad (13-38)$$

式中  $a_1$ ——U梁长轴半径;

$\beta$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ——分岔角;

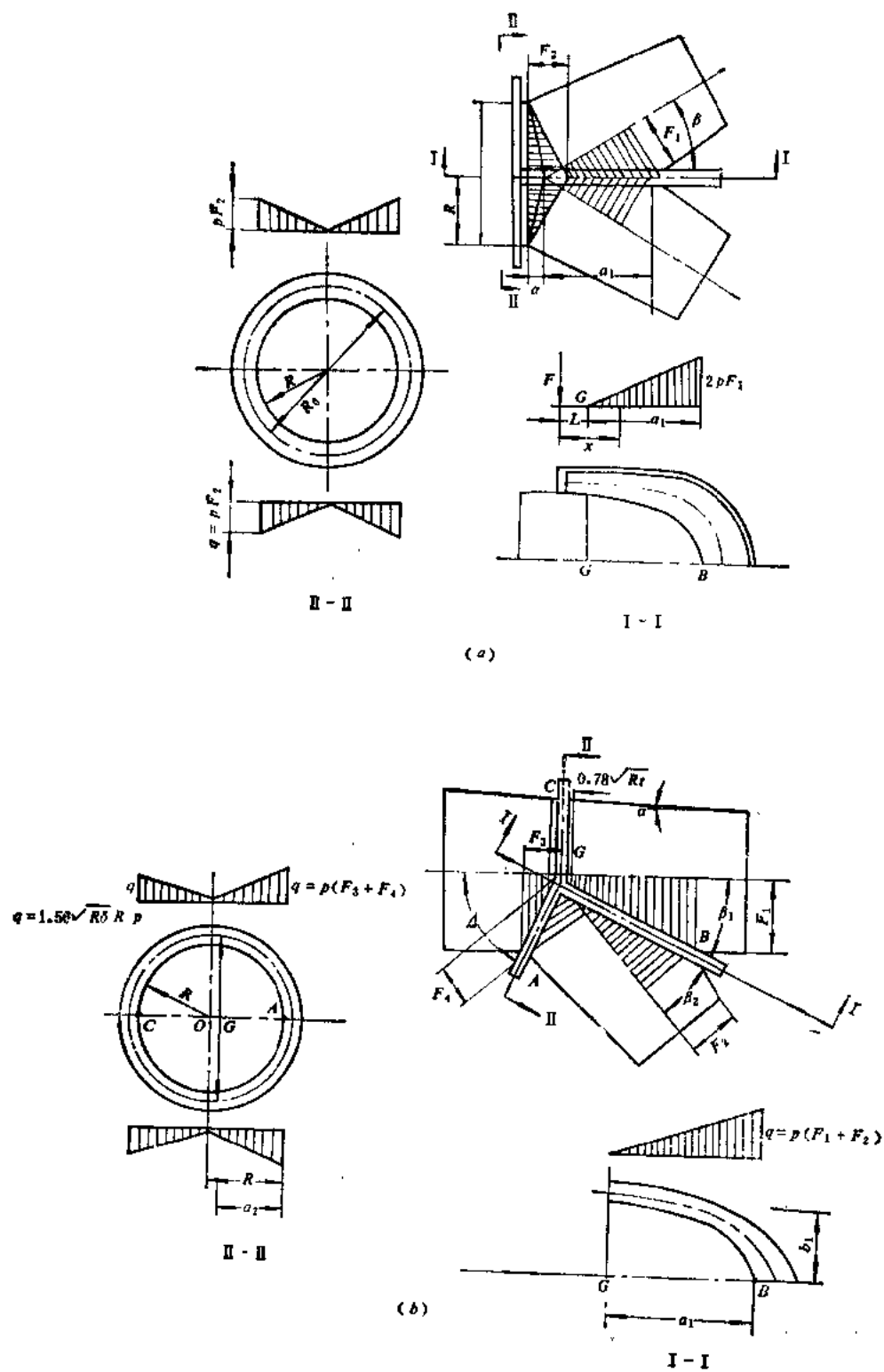


图 13-9 三梁岔管的加强梁荷载



$R$ ——管轴分岔点处管半径, 即公切球半径;

$x_A, y_A$ ——岔管钝角区管壳交点  $A$  的坐标;

$\Delta$ ——腰梁  $AG$  所在处的相贯线与主锥管轴夹角;

$$\Delta = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{y_A}{x_A} \right)$$

当所设计岔管  $[HD]$  值较大时, 水平荷载不宜忽略。当岔管裸露成明岔管形式、或岔管前后有伸缩节时, 分析方法比较繁冗, 应按《水电站压力钢管设计规范》(SD144-85) 中的附录四列出较详细算法进行, 或参见有关专著文献资料<sup>①</sup>进行。

荷载在梁上按三角形分布。

#### (四) 梁系内力计算

按本节计算假设条件, 内力计算不考虑三梁接点处的角变位和扭转所引起的内力, 以及水平荷载引起的 U 梁端部轴向力。

##### 1. 与梁荷载相当的等效荷载

荷载分布在梁的端部(接点)到梁内缘范围内, 计算简图则自接点算至梁腰断面的形心处。应以梁腰断面内力相等为原则, 计算作用荷载的等效荷载。梁断面先行拟定, 可算出梁腰断面形心到内缘的距离  $\Delta a$ 。已知  $\Delta a$  后, 等效荷载由下列式计算:

$$\text{对均布荷载} \quad q' = qa \frac{(a+2\Delta a)}{(a+\Delta a)^2} \quad (13-39)$$

$$\text{对三角形荷载} \quad q' = qa \frac{(a+3\Delta a)}{(a+\Delta a)^2} \quad (13-40)$$

对梯形荷载(计入梁两侧管壳  $0.78\sqrt{R\delta}$  范围内水压力), 可将梯形荷载划分成均布荷载和三角形荷载, 按式(13-39) 式(13-40) 换算后叠加。式中  $q$  为最大单位长荷载值(如 U 梁:  $q=2pF_1$ 、 $q=p(F_1+F_2)$  等等),  $a$  为梁的长轴半径, 对 U 梁:  $a=a_1$ ; 对腰梁:  $a=a_2$ 。

##### 2. 梁端内力

三梁端部( $G$ 点)的内力有 6 个, 即 U 梁的弯矩  $M_1$ 、切力  $Q_1$ ; 两支腰梁的弯矩和切力  $M_2$ 、 $Q_2$ 、 $M_3$ 、 $Q_3$ ; 转角  $\varphi_1=\varphi_2=\varphi_3=0$ ; 垂直变位  $\Delta$ , 未知数一共 7 个。按力法解算超静定未知力, 建立 6 个方程式, 及加 1 个边界条件方程式。内力正负号作如下规定:

弯矩  $M$ : 均以使梁的曲率增大为正;

切力  $Q$ : 均以使梁绕另一端反时针转为正。

$$\text{对 U 梁“1”}: \quad \delta_{1P} - Q_1 \delta_{1Q} - M_1 \delta_{1M} = \Delta_1 \quad (13-41)$$

$$\varphi_{1P} - Q_1 \varphi_{1Q} - M_1 \varphi_{1M} = 0 \quad (13-42)$$

$$\text{对腰梁“2”}: \quad \delta_{2P} - Q_2 \delta_{2Q} - M_2 \delta_{2M} = \Delta_2 \quad (13-43)$$

$$\varphi_{2P} - Q_2 \varphi_{2Q} - M_2 \varphi_{2M} = 0 \quad (13-44)$$

$$\text{对腰梁“3”}: \quad \delta_{3P} - Q_3 \delta_{3Q} - M_3 \delta_{3M} = \Delta_3 \quad (13-45)$$

① 《水工结构分析文集》, 潘家铮, 电力工业出版社, 1981·4。

$$\varphi_{1P} - Q_3 \varphi_{3q} - M_3 \varphi_{3m} = 0 \quad (13-46)$$

$$\text{切力应平衡, 即} \quad Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (13-47)$$

$$\text{接点处变位相容} \quad \Delta_{11} = \Delta_{12} = \Delta_{13} \quad (13-48)$$

式中  $\delta_{1q}, \delta_{2q}, \delta_{3q}$ ——三根梁的形常数, 利用表13-3中序1、4、7公式计算。计算时, 使表中式中的  $Q = 1$ ;

$\varphi_{1q}, \varphi_{2q}, \varphi_{3q}$ ——三根梁的形常数, 利用表13-3中序1、4、7公式计算。计算时, 使表中式中的  $Q = 1$ ;

$\delta_{1m}, \delta_{2m}, \delta_{3m}$ ——三根梁在梁端弯矩  $M = 1$  作用时, 梁端垂直变位, 即形常数, 用表13-3中序1、4、7式计算。计算时, 式中  $M = 1$ ;

$\varphi_{1m}, \varphi_{2m}, \varphi_{3m}$ ——三根梁在梁端弯矩  $M = 1$  作用时, 接点的角变位形常数, 用表13-3中序1、4、7式计算。计算时, 取  $M = 1$ ;

$\delta_{1P}, \delta_{2P}, \delta_{3P}$ ——分别为U梁和两根腰梁在分布荷载作用下的梁端(接点)垂直变位, 用表13-3中与荷载分布形式相对应的公式计算。对三角形分布荷载, 用表13-3中序号3、6、9的公式计算; 对均布荷载, 用表13-3中序号2、5、8的公式计算; 当荷载为梯形时, 则划分荷载成均布和三角形分布, 分别计算后叠加;

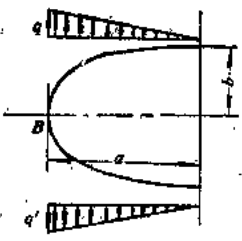
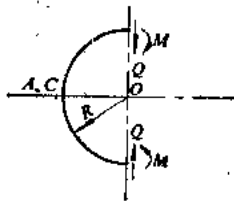
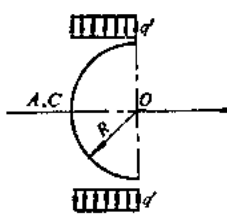
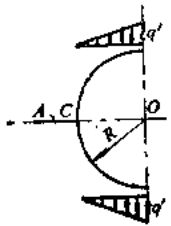
$\varphi_{1P}, \varphi_{2P}, \varphi_{3P}$ ——分别为U梁和两根腰梁在分布荷载作用下的端部转角。同样, 按表13-3中与计算荷载分布形式相同的公式计算, 梯形分布荷载仍按均布和三角形分布的公式计算结果叠加。

联解方程组可得到三根梁端部的弯矩和切力。这时, 每根梁荷载均为已知(分布荷

表 13-3 三梁端部在内力作用下的变位和转角计算公式

序	计算简图	计算公式
1		<p>半椭圆梁</p> <p>梁端在弯矩 <math>M</math> 作用下的变位和转角:</p> $\delta_{1m} = \frac{2M}{E} \left[ \frac{a^2}{J} \left( 1 - \frac{1}{3} e^2 \right) - \frac{1}{F} \right], \quad \varphi_{1m} = \frac{\pi M a}{EJ} \left( 1 - \frac{1}{4} e^2 \right)$ <p>梁端在切力 <math>Q</math> 作用下的位移和转角:</p> $\delta_{1q} = \frac{\pi Q a}{2E} \left[ \frac{a^2}{J} \left( 1 - \frac{3}{8} e^2 \right) + \frac{1}{F} \left( 2.9 - \frac{3.1}{8} e^2 \right) \right],$ $\varphi_{1q} = \frac{2Q}{E} \left[ \frac{a^2}{J} \left( 1 - \frac{e^2}{3} \right) - \frac{1}{F} \right]$
2		<p>半椭圆梁</p> <p>在均布荷载 <math>q'</math> 作用下梁端的变位和转角:</p> $\delta_{1P} = -\frac{2a^2 q'}{3E} \left[ \frac{a^2}{J} \left( 1 - \frac{2}{5} e^2 \right) + \frac{1}{F} \left( 2.9 - \frac{5.1}{5} e^2 \right) \right]$ $\varphi_{1P} = -\frac{\pi a q'}{4E} \left[ \frac{a^2}{J} \left( 1 - \frac{3}{8} e^2 \right) - \frac{2}{F} \left( 1 + \frac{1}{8} e^2 \right) \right]$

续表

序	计算简图	计 算 公 式
3		<p>半 圆 环 梁</p> <p>在三角形分布荷载作用下梁端的变位和转角:</p> $\delta_{\delta} = \frac{\pi q R^3}{16 E} \left[ \frac{a^3}{J} \left( 1 - \frac{5}{12} e^2 \right) + \frac{1}{F} \left( 2.9 - \frac{7.1}{4} e^2 \right) \right]$ $\phi_{\phi} = \frac{2 a q'}{9 E} \left[ \frac{a^3}{J} \left( 1 - \frac{2}{5} e^2 \right) - \frac{3}{F} \left( 1 + \frac{1}{5} e^2 \right) \right]$
4		<p>半 圆 环 梁</p> <p>梁端在弯矩M作用下的变位和转角:</p> $\delta_{\delta} = \frac{2 M}{E} \left( \frac{R^3}{J} - \frac{1}{F} \right), \quad \phi_{\phi} = \frac{\pi M R}{E J}$ <p>梁端在切力Q作用下的变位和转角:</p> $\delta_{\delta} = \frac{\pi p R}{2 E} \left( \frac{R^3}{J} + \frac{2.9}{E} \right), \quad \phi_{\phi} = \frac{2 Q}{E} \left( \frac{R^3}{J} - \frac{1}{F} \right)$
5		<p>半 圆 环 梁</p> <p>梁端在均布荷载q'作用下的变位和转角:</p> $\delta_{\delta} = \frac{2 q' R^3}{3 E} \left( \frac{R^3}{J} + \frac{2.9}{E} \right), \quad \phi_{\phi} = \frac{\pi q' R}{4 E} \left( \frac{R^3}{J} - \frac{2}{F} \right)$
6		<p>半 圆 环 梁</p> <p>梁端在三角形分布荷载作用下的变位和转角:</p> $\delta_{\delta} = \frac{\pi q' R^3}{16 E} \left( \frac{R^3}{J} + \frac{2.9}{F} \right)$ $\phi_{\phi} = \frac{2 q' R^3}{9 E} \left( \frac{R^3}{J} - \frac{3}{F} \right)$

序	计算简图	计算公式
7		<p>半圆环梁</p> <p>在梁端弯矩M作用下梁端的变位和转角:</p> $\delta_{11} = \frac{2M}{E} \left\{ \frac{R^3}{J} [(\pi - \beta) \cos \beta + \sin \beta] - \frac{1}{F} \sin \beta \right\}$ $\phi_{11} = \frac{2MR}{EJ} (\pi - \beta)$ <p>在梁端剪力Q作用下梁端的变位和转角:</p> $\delta_{12} = \frac{QR}{E} \left\{ \frac{R^3}{J} [(\pi - \beta)(2 \cos^2 \beta + 1) + 3 \cos \beta \sin \beta] \right. \\ \left. + \frac{1}{F} [2.9(\pi - \beta) + 0.9 \sin \beta \cos \beta] \right\}$ $\phi_{12} = \frac{2Q}{E} \left\{ \frac{R^3}{J} [(\pi - \beta) \cos \beta + \sin \beta] - \frac{1}{F} \sin \beta \right\}$
8		<p>半圆环梁</p> <p>在均布荷载作用下, 梁端变位和转角:</p> $\delta_{11} = \frac{q'R^3}{2EJ} \left[ (\pi - \beta)(3 + 2 \cos^2 \beta) \cos \beta + \frac{1}{3} (4 + 11 \cos^2 \beta) \sin^2 \beta \right] \\ + \frac{q'R^3}{EF} \left[ 1.9(\pi - \beta) \cos \beta + \frac{1}{3} (5.8 - 0.1 \cos^2 \beta) \sin \beta \right]$ $\phi_{11} = \frac{q'R^3}{2EJ} [(\pi - \beta)(2 \cos^2 \beta + 1) + 3 \sin \beta \cos \beta] \\ - \frac{q'R}{EF} [(\pi - \beta) + \cos \beta \sin \beta]$
9		<p>半圆环梁</p> <p>在三角形分布荷载作用下, 梁端变位和转角</p> $\delta_{11} = \frac{q'R^3}{6EJ(1 + \cos \beta)} \left[ (\pi - \beta) \left( 10 \cos^4 \beta + 12 \cos^3 \beta + 12 \cos^2 \beta + 18 \cos \beta \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{3}{4} \right) + \sin \beta \left( 4 - \frac{7}{12} \cos \beta + 11 \cos^2 \beta \right) + \frac{41}{6} \cos^3 \beta \right] + \frac{q'R^3}{6EJ(1 + \cos \beta)} \\ \times \left[ (\pi - \beta) \left( 8.7 \cos^4 \beta + 11.4 \cos^3 \beta - \frac{8.7}{4} \right) + \sin \beta \left( 11.6 \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{24.7}{4} \cos \beta - 0.2 \cos^2 \beta - \frac{15.3}{2} \cos \beta \right) \right]$ $\phi_{11} = \frac{q'R^3}{6EJ(1 + \cos \beta)} \left[ (\pi - \beta)(4 \cos^3 \beta + 6 \cos \beta + 3) \right. \\ \left. + \sin \beta \left( -\frac{4}{3} + 9 \cos \beta \right) + \frac{16}{3} \cos^2 \beta \right] - \frac{q'R}{EF(1 + \cos \beta)} \\ \times \left[ (\pi - \beta) + \sin \beta \left( -\frac{2}{3} + \cos \beta + \frac{2}{3} \cos^2 \beta \right) \right]$

注 (1) 表内公式中半椭圆梁部分(序1、2、3)系对矩形断面而言, 圆环梁部分可适用于任何断面形式;  
 (2) E为钢材弹性模量,  $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ; J为梁截面惯性矩, 计算时, 梁腰应计入梁两侧等效长度  $2 \times 0.75 \sqrt{Rt}$ , U梁一般可不计入管壁等效部分面积对J的影响; F为截面积, 同样应计入梁腰两侧等效面积;  
 e为椭圆的偏心率,  $e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ , 其中a、b为椭圆长短轴半径; 其余符号见表中图示。

载和端部超静定力), 把梁腰当成固端, 计算梁各断面内力。如本节开始所述, 小型的三梁岔管一般计算梁腰内力较可靠, 其余断面内力与实际内力出入较大。

上述计算内力方法，对等断面梁及变断面梁都适用。

#### (五) 梁断面应力校核

按一端固接（梁腰），对已知荷载的静定结构可求出梁腰断面内力，即弯矩 $M$ 和轴力 $N$ ，内缘应力 $\sigma_1$ 、外缘应力 $\sigma_2$ 由下式计算：

$$\sigma_1 = \frac{N}{F} + K_n - \frac{Mc_1}{J} \quad (13-49)$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{F} - K_n - \frac{Mc_2}{J} \quad (13-50)$$

式中  $N$ 、 $M$ ——梁腰断面的轴力和弯矩；

$F$ ——梁腰断面积；

$c_1$ 、 $c_2$ ——梁断面内、外缘至断面形心距；

$K_n$ 、 $K_n$ ——梁腰截面的内、外缘曲梁校正系数。

$$K_n \approx 1 + 0.5 \frac{J}{b_1 c_1^2} \left[ \frac{1}{R - c_1} + \frac{1}{R} \right]$$

$b_1$ ——截面内缘宽度；

$R$ ——截面形心至此截面弯曲中心的距离。

$K_n$ 适用于矩形、倒T形、对称和不对称工字型截面。曲梁校正系数修正因梁按直梁计算带来的误差。精确计算表明：具有矩形截面的梁（如无翼板的单腹板U梁、且不计与梁连接的管壳等效长影响），内缘应力误差 $\eta\%$ 与所计算截面的 $(R:h)$ 比值有关（即截面形心曲率半径 $R$ 与截面计算高度之比），当 $\frac{R}{h} \geq 1.2$ 时， $\eta \leq 5\%$ ，已有足够精度（详见SD144-85编写说明的表6、3、1、4），初拟梁的截面高度时，应注意这一点，并且使 $R$ 数值有足够的有效位数。

矩形梁截面的曲梁校正系数 $K_n$ 、 $K_n$ 可按下列式计算，

$$\text{内缘} \quad K_n = \frac{c}{3e} \frac{\left(1 - \frac{e}{c}\right)}{\left(\frac{R}{c} - 1\right)} \quad (13-51)$$

$$\text{外缘} \quad K_n = \frac{c}{3e} \frac{\left(1 + \frac{e}{c}\right)}{\left(\frac{R}{c} + 1\right)} \quad (13-52)$$

式中  $c = c_1 = c_2 \approx \frac{h}{2}$ ；

$e$ ——截面曲率半径 $R$ 与中性轴曲率半径 $r$ 的差值，即 $e = R - r$ ，

$$r = \frac{b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3}{b_1 \ln \frac{R_2}{R_1} + b_2 \ln \frac{R_3}{R_2} + b_3 \ln \frac{R_4}{R_3}} \quad (\text{对工字、T字形梁截面})$$

$$r = \frac{h}{\ln \frac{R + 0.5 h}{R - 0.5 h}} \quad (\text{对矩形梁截面})$$

图13-10为梁截面符号示意, 对矩形截面  $b = b_1 = b_2 = b_3$ 。

由式(13-49)、式(13-50)算出的内、外缘应力应不超过表13-1中 $[\sigma]_s$ 的第二行规定的容许应力。如不能满足, 应修改梁的尺寸、甚至修改梁的断面形式。

岔管不具备退火消除焊接应力的情况下, 或岔管不进行单独水压试验的情况下, 可酌情适当降低容许应力值。

#### (六) 构造要求

三梁岔管结构计算中所采用几何尺寸, 均以管壳厚的中间层为依据。实际设计绘制管节展开图时, 应根据梁与管壳接合情况对相贯线位置作修正(见第十六章)。

U梁嵌入岔管时, 梁端嵌入深度为零, 腰部嵌入最大。腰梁内缘与管壳内壁重合。正对称Y形岔管, 一般可不作导流板, 卜形非对称岔管内宜做导流板。导流板一侧焊在梁内

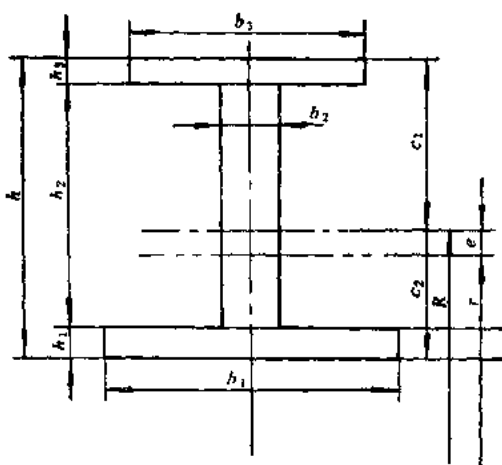


图 13-10 工字梁弯曲的几何特征

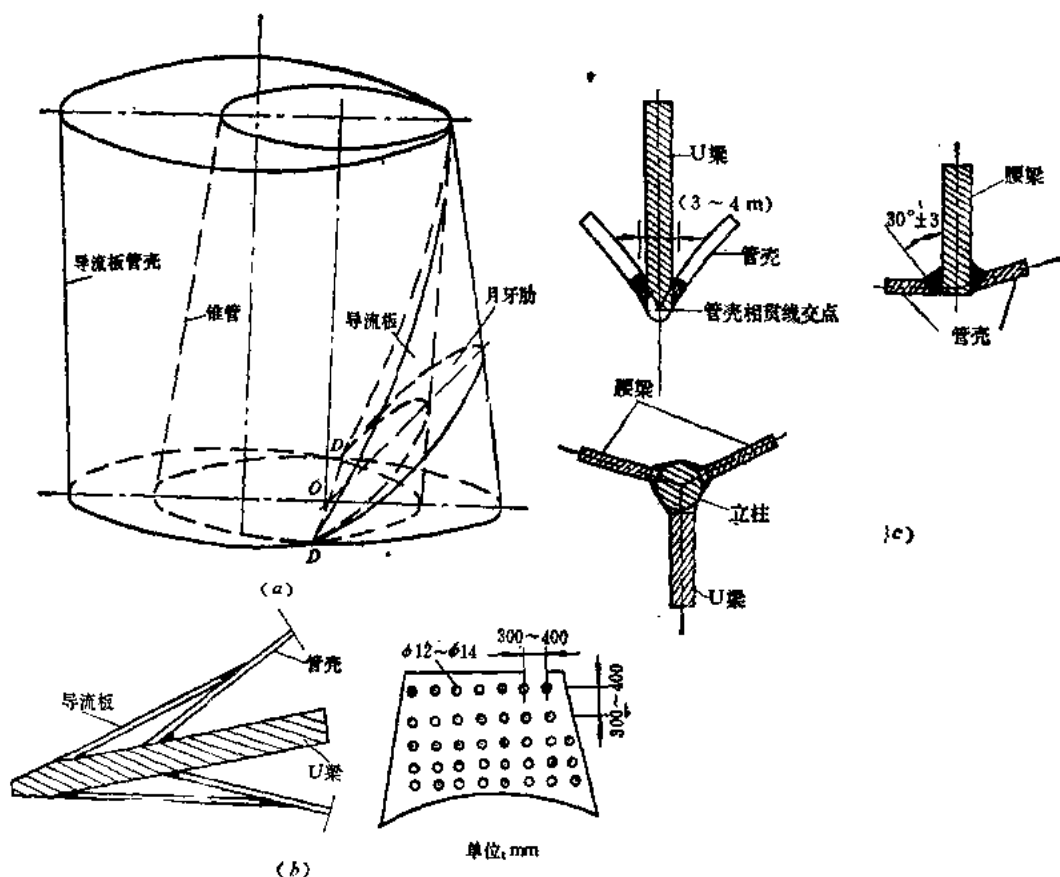


图 13-11 导流板几何特征透视图及构造形式

缘, 另一端焊在管壳内壁上, 一般用 4 mm 钢板制作。板上钻孔, 使板两壁水压平衡, 板的形状按圆柱体与锥体相交确定 (图 13-11), 或用马粪纸在管内比拟定尺寸后作样板确定导流板的展开尺寸。

U 梁内缘打磨成圆形或锥形, 打磨部分应在计算断面之外。腰梁内缘应与管壳内缘齐平, 打磨光滑。

三根梁的接合位置, 一般采用加设接合短柱 (图 13-11c), 短柱直径约为梁板厚的 (1.5~2) 倍。工程实践中也有采用三根腰梁与 U 梁腰互相直接焊接 (角焊) 形式, 顶部加焊三角形或梯形盖板 (图 13-1a)。

梁与短柱的焊缝长度和焊缝高度应满足梁端承受的切力的要求。

有关岔管设计中的其它工艺要求, 可见《水工建筑物金属结构制造安装及验收规范》(SLJ201-80, DLJ201-80), 以及专门文献<sup>①</sup>。

## 第五节 内加强月牙肋岔管设计

### 一、岔管结构和管节划分

内加强月牙肋岔管由基本管节、肋板及前后过渡管节所组成。基本管节为与肋板连接的主管和支管, 过渡管节将前后钢管与基本管节逐节连接, 是锥管或弯管节。通过过渡管节调整钢管与岔管间的直径和水流方向。图 13-2 (a) 中岔管除 3 个基本管节外, 主管前设 1 个过渡管节, 主岔管有 2 个过渡管节, 支岔管后有 5 个过渡管节。图 13-12 中, 卜形岔管除基本管节外设有 6 个过渡管节; Y 形岔管则由 6 个过渡管节组成。

各个管节的划分应满足的要求是:

- (1) 各管节展开后的最短母线长不少于 300 mm;
- (2) 相邻管节管壳的折角 (偏角)  $\Delta$ , 宜不超过  $7^\circ$ 。折角大小, 影响水力损失和管壁应力集中现象, 一般宜小不宜大;
- (3) 相邻管节壁厚有变化时, 相差值不宜超过 2 mm;
- (4) 相邻管节的相贯线应按二元二次曲线设计 (以公切球控制)。

月牙肋岔管除满足上述要求外, 还应注意水流平顺的要求和制作、安装方便。Y 形岔管经过倒锥和中间的过渡管节调整后, 水流经过分岔处的水力损失比较小。卜形岔管除采用倒锥扩大管径和过渡管节调整外, 还将主管和主岔管一侧的管壳边线安排成一条直线, 并且设导流板。

### 二、管壁厚度的拟定

岔管壁厚按式 (13-1) 及式 (13-2) 中的大值拟定, 即

$$\delta = \frac{K_1 p R}{[\sigma]_1 \phi \cos \alpha} + c$$

$$\delta = \frac{K_2 p R}{[\sigma]_2 \phi \cos \alpha} + c$$

①《压力钢管的制作和安装》, 水利电力部第七工程局等, 水利电力出版社, 1975 年。

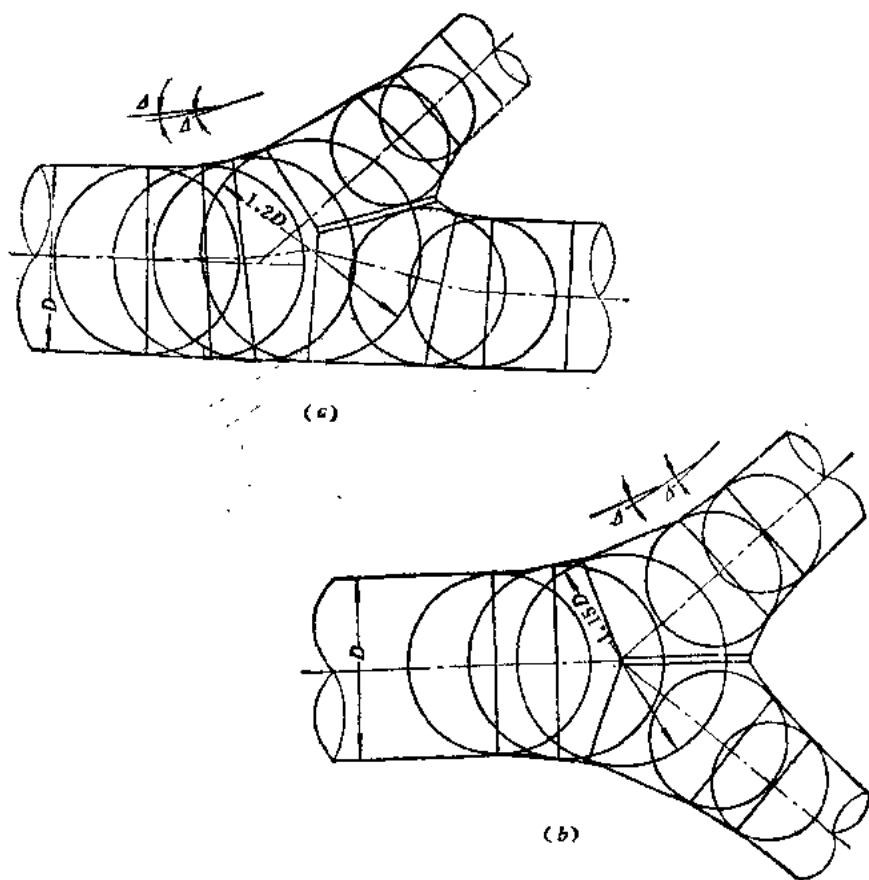


图 13-12 内加强月牙肋岔管各管节公切于球体的连接形式

其中的 $K_1$ ，根据该管节最大的半径 $R$ 和式(13-1)计得的 $\delta$ 之比( $R/\delta$ )及相邻管节管壳折角 $\Delta$ 值，查图13-13。

### 三、岔管体形的几何尺寸及关系

图13-14为《规范》(SD144-85)中列出的内加强月牙肋岔管的计算几何量。

(一) 腰线转折角与半锥顶角

转折角 $\theta_{12}$ 、 $\theta_{13}$ 由拟定体形时确定。转折角 $\theta_{12}$ 为：

$$\theta_{12} = \omega_{12} - (2\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) - \theta_{13} \quad (13-53)$$

式中 $\omega_{12}$ ——主管II与支岔管III的轴线夹角，由拟定体形时确定；

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ ——为主管I、主岔管、支岔管的半锥顶角，拟定体形时确定，见本章第二节规定。

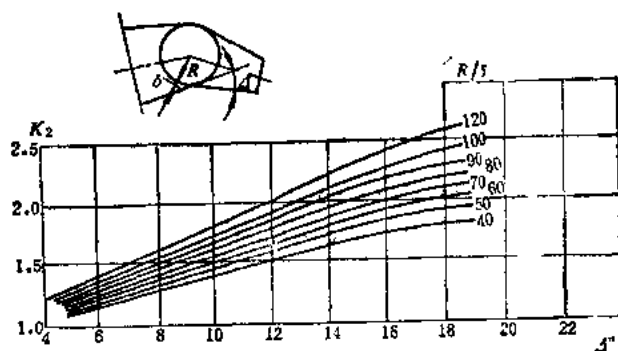


图 13-13 确定应力集中系数 $K$ 的参考曲线



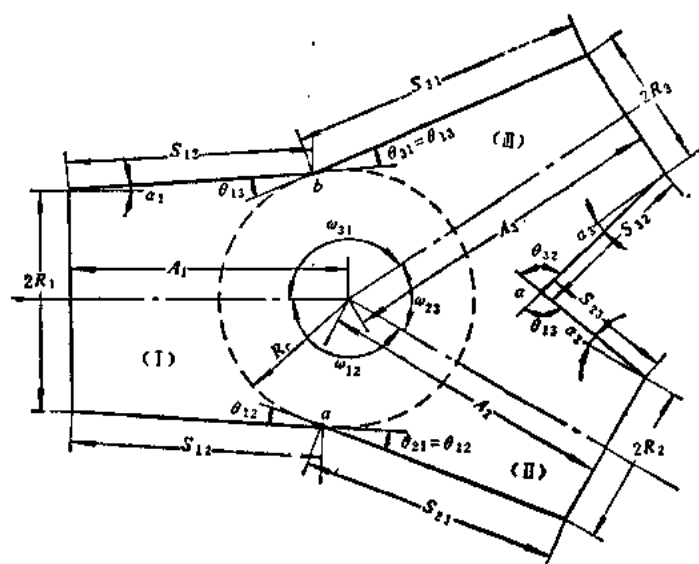


图 13-14 内加强月牙肋岔管的几何特征

对于Y形对称岔管:

$$\theta_{12} = \theta_{13} = \frac{1}{2} [\omega_{13} - (2\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)] \quad (13-54)$$

式中  $\omega_3$ ——分岔角。

对于T形岔管:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 0; \\ \theta_{12} &= \omega_{12} - (2\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \end{aligned} \quad (13-55)$$

(二) 公切球半径  $R_r$

$$R_r = R_i \cos \alpha_i + A_i \sin \alpha_i \quad (13-56)$$

(对主管I及主岔管II,  $i=1, 2$ ; 对支岔管III,  $i=3$ )

公切球半径系根据主管进口半径的(1.1~1.2)倍拟定。 $R_i$ 对主管I指进口断面半径, 对主岔管II、III指出口断面半径, 脚标分别为1、2、3。 $R_i$ 在拟定体形和划分管段时确定, 由拟定的 $R_r$ 、 $R_i$ 用式(13-56)计算各基本管节(I、II、III)的轴线长 $A_i$ 。

(三) 基本管节I、II、III沿腰线的节距 $S_{ij}$

基本管节腰线节距 $S_{12}$ 、 $S_{13}$ 、 $S_{21}$ 、 $S_{23}$ 、 $S_{31}$ 、 $S_{32}$  (见图13-14)由下列式计算:

$$S_{12} = \frac{A_1}{\cos \alpha_1} - R_r \left( \tan \frac{\theta_{12}}{2} + \tan \alpha_1 \right) \quad (13-57)$$

$$S_{21} = \frac{A_2}{\cos \alpha_2} - R_r \left( \tan \frac{\theta_{21}}{2} + \tan \alpha_2 \right) \quad (13-58)$$

$$S_{13} = \frac{A_1}{\cos \alpha_1} - R_r \left( \tan \frac{\theta_{13}}{2} + \tan \alpha_1 \right) \quad (13-59)$$

$$S_{31} = \frac{A_3}{\cos \alpha_3} - R_r \left( \tan \frac{\theta_{31}}{2} + \tan \alpha_3 \right) \quad (13-60)$$

$$S_{12} = \frac{A_2}{\cos \alpha_1} - R_r \left( \operatorname{tg} \frac{\theta_{21}}{2} + \operatorname{tg} \alpha_2 \right) \quad (13-61)$$

$$S_{21} = \frac{A_1}{\cos \alpha_2} - R_r \left( \operatorname{tg} \frac{\theta_{12}}{2} + \operatorname{tg} \alpha_1 \right) \quad (13-62)$$

(四) 基本管节 I、II、III 管轴间夹角

夹角由下式计算:

$$\omega_{12} = \omega_{21} = 180^\circ - (\theta_{12} + \alpha_1 + \alpha_2) \quad (13-63)$$

$$\omega_{13} = \omega_{31} = 180^\circ - (\theta_{13} + \alpha_1 + \alpha_3) \quad (13-64)$$

$$\omega_{23} = \omega_{32} = 180^\circ - (\theta_{23} + \alpha_2 + \alpha_3) \quad (13-65)$$

其中  $\omega_{23} = \omega_{31} = \beta$ , 即主岔管和支岔管的分岔角。

#### 四、月牙肋设计

(一) 计算工况和计算方法

内加强月牙肋岔管计算一般考虑两种工况, 即

(1) 试验工况, 管端焊有封盖;

(2) 运行工况, 管端与过渡管节相连, 变形受约束。

小水电站岔管 [HD] 值较小时, 鉴于这种岔管的实测应力与计算应力吻合较好, 除局部位置有应力集中现象外, 一般部位计算成果有足够精度, 因此主要通过拟定好体形及尺寸和做好制作焊接、退火及无损检测措施等工艺, 以保证岔管的可靠性, 视情况决定是否进行水压试验。

在运行工况下, 内水压力 (静水压及水击压力之和) 是基本荷载, 施工时管外混凝土荷载属临时性质, 通过临时措施解决。岔管的外压失稳问题一般通过管外锚固措施解决, 可不作基本荷载列入计算内容。

计算用结构力学法。肋板受基本管节相贯处的管壳作用力, 以肋板作脱离体单独分析; 假定内水压力均匀分布; 在计算肋中央截面宽度时, 对于重要工程对岔管作整体弹性应力计算, 计入管壳局部弯矩、扭矩等的影响。

(二) 计算步骤

(1) 根据拟定的岔管体形几何特征值, 计算月牙肋顶点 (3 根相贯线交点) 的坐标位置;

(2) 计算肋板中面与管壳中面、肋板表面与管壳外表面的相贯线坐标位置;

(3) 计算管壳对肋板中央面的作用力;

(4) 由计算或查图表定出肋腰中央面的宽度和需要的厚度, 并且按钢板出厂标准厚度进行调整;

(5) 肋腰部宽度确定后, 近似按抛物线规迹确定其余各截面的宽度, 也即确定肋内缘线各点坐标。肋的外缘线则以管壳相贯线为基础向管壳外适当加宽, 以满足管壳与肋板焊接缝的位置要求;

(6) 对截面应力 (主要在肋腰部) 进行校核, 如不能满足允许应力限值的要求, 可适当加厚肋板厚度。

### (三) 肋板计算

#### 1. 三个基本管节(锥管)的相贯线与管轴夹角计算

图13-15为夹角示意。夹角计算按下式计算:

$$\operatorname{tg} \rho_{12} = \frac{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1 \cos \omega_{12}}{\cos \alpha_1 \sin \omega_{12}} \quad (13-66)$$

$$\operatorname{tg} \rho_{13} = \frac{\cos \alpha_3 - \cos \alpha_1 \cos \omega_{13}}{\cos \alpha_1 \sin \omega_{13}} \quad (13-67)$$

$$\operatorname{tg} \rho_{23} = \frac{\cos \alpha_3 - \cos \alpha_2 \cos \omega_{23}}{\cos \alpha_2 \sin \omega_{23}} \quad (13-68)$$

$$\rho_{12} = \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 \cos \omega_{21}}{\cos \alpha_2 \sin \omega_{21}} \quad (13-69)$$

$$\rho_{13} = \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_3 \cos \omega_{31}}{\cos \alpha_3 \sin \omega_{31}} \quad (13-70)$$

$$\rho_{23} = \frac{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_3 \cos \omega_{32}}{\cos \alpha_3 \sin \omega_{32}} \quad (13-71)$$

式中  $\omega_{12} = \omega_{21}$  ——为主管I轴与主岔管II轴夹角(见图13-14);

$\omega_{13} = \omega_{31}$  ——为主管I轴与支岔管III轴夹角;

$\omega_{23} = \omega_{32}$  ——为主岔管II与支岔管III轴夹角。

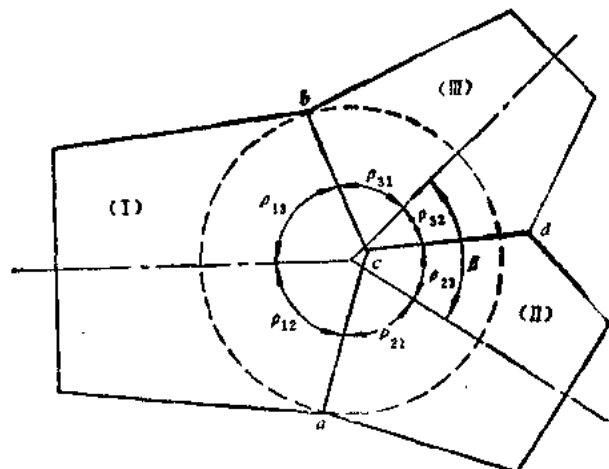


图 13-15 内加强月牙肋岔管几何特征

#### 2. 肋板顶点位置

肋板顶点  $c$  在三个基本管节相贯线汇交点上, 交点在每个管节坐标场中的位置不同。

按《规范》(SD144-85)给定的坐标场表示方法(图13-16), 肋板顶点在支坐锥管III的坐标场  $X_3, Y_3, Z_3$  中的位置用下列式计算:

$$x_{3c} = -x'_{3c} = R_3 \left[ \frac{\cos \omega_{23} \sin(\alpha_2 - \alpha_1) - \cos \omega_{13} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) - \sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\cos \alpha_1 \sin \omega_{23} + \cos \alpha_2 \sin \omega_{13} + \cos \alpha_3 \sin \omega_{12}} \right] \quad (13-72)$$

$$z_{3c} = R_3 \left[ \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) \sin \omega_{13} + \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \sin \omega_{23}}{\cos \alpha_1 \sin \omega_{23} + \cos \alpha_2 \sin \omega_{13} + \cos \alpha_3 \sin \omega_{12}} \right] \quad (13-73)$$

c 点在III锥管截面圆中对应的圆心角 $\theta_{1c}$ 为

$$\theta_{1c} = \cos^{-1} \frac{x_{1c}}{[R_1 + (A_1 - z_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_1]} \quad (13-74)$$

$$\theta'_{1c} = 180^\circ - \theta_{1c} \quad (13-75)$$

式中  $R_1$ 、 $A_1$  见图13-14.

c 点在主锥管I坐标场 $X_1$ 、 $Y_1$ 、 $Z_1$ 中的位置可直接由 $c(x_{1c}, z_{1c})$ 通过下列式转换:

$$x_{1c} = -x_{3c} \sin(\omega_{31} - 90^\circ) - z_{3c} \cos(\omega_{31} - 90^\circ) \quad (13-76)$$

$$z_{1c} = x_{3c} \cos(\omega_{31} - 90^\circ) - z_{3c} \sin(\omega_{31} - 90^\circ) \quad (13-77)$$

同样, c 点在主锥管II坐标场 $X_2$ 、 $Y_2$ 、 $Z_2$ 中的位置, 由下列式换算而得:

$$x_{2c} = x_{1c} \sin(90^\circ - \omega_{12}) + z_{1c} \cos(90^\circ - \omega_{12}) \quad (13-78)$$

$$z_{2c} = -x_{1c} \cos(90^\circ - \omega_{12}) + z_{1c} \sin(90^\circ - \omega_{12}) \quad (13-79)$$

c 点在I、II管截面圆中对应圆心角为:

$$\theta_{1c} = \cos^{-1} \frac{x_{1c}}{R_1 + (A_1 - z_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_1} \quad (13-80)$$

$$\theta_{2c} = \cos^{-1} \frac{x_{2c}}{R_2 + (A_2 - z_{2c}) \operatorname{tg} \alpha_2} \quad (13-81)$$

3. 管壳中面与肋板中面相交线的水平投影长  $a$ , 肋顶端、底端距离  $2b$  计算

$$a = \frac{[R_1 + (A_1 - z_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_1] (1 - \cos \theta'_{1c})}{(1 + \operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{ctg} \rho_{12}) \sin \rho_{12}} \quad (13-82)$$

$$b = [R_1 + (A_1 - z_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_1] \sin \theta'_{1c} \quad (13-83)$$

式中  $a$ 、 $b$  位置见图13-16.

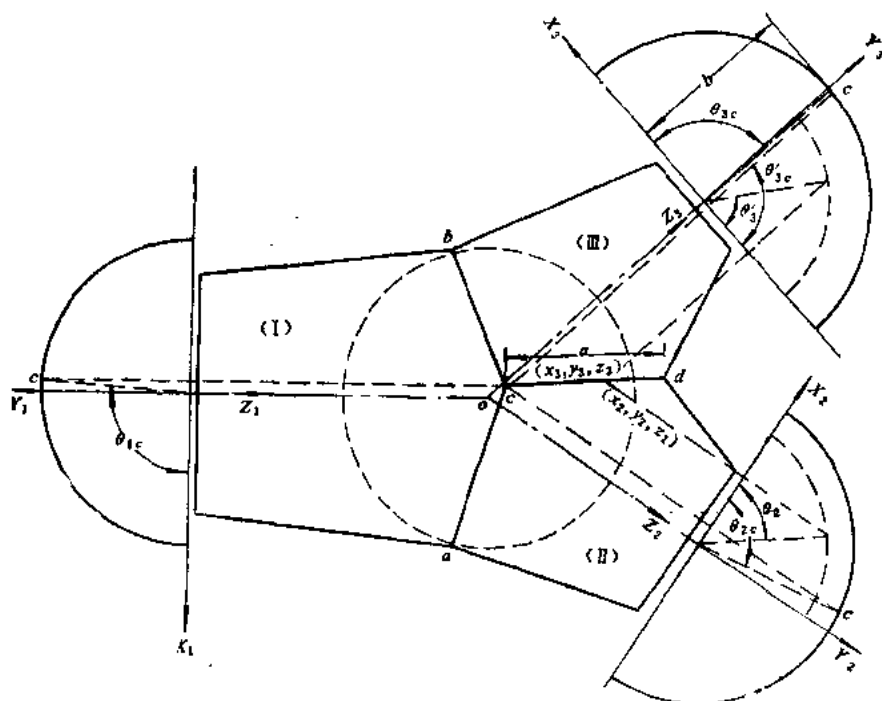


图 13-16 内加强月牙肋岔管的坐标系统

#### 4. 主岔管II及支岔管III管壳中面与肋中面相交线上各点坐标位置计算

相交线为一条曲线，曲线上各点坐标位置随所在管节截面圆的圆心角变化而变化。对主岔管II，各点坐标位置以 $\theta_2$ 为变量( $\theta_2 = 0 \sim \theta_{2e}$ )，通过下列式计算：

$$z_2 = \frac{[R_2 + (A_2 - z_{2e})\operatorname{tg}\alpha_2](\cos\theta_2 - \cos\theta_{2e})}{\operatorname{tg}\rho_{21}\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha_2 \cos\theta_2}{\operatorname{tg}\rho_{21}}\right)} + z_{2e} \quad (13-84)$$

$$x_2 = [R_2 + (A_2 - z_2)\operatorname{tg}\alpha_2]\cos\theta_2 \quad (13-85)$$

$$y_2 = [R_2 + (A_2 - z_2)\operatorname{tg}\alpha_2]\sin\theta_2 \quad (13-86)$$

对支岔管III，各点坐标位置以 $\theta'_2$ 为变量， $\theta'_2 = 0 \sim \theta'_{2e}$ ，通过下列式计算：

$$z_3 = \frac{[R_3 + (A_3 - z_{3e})\operatorname{tg}\alpha_3](\cos\theta'_2 - \cos\theta'_{2e})}{\operatorname{tg}\rho_{32}\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha_3 \cos\theta'_2}{\operatorname{tg}\rho_{32}}\right)} + z_{3e} \quad (13-87)$$

$$x_3 = [R_3 + (A_3 - z_3)\operatorname{tg}\alpha_3]\cos\theta'_2 \quad (13-88)$$

$$y_3 = [R_3 + (A_3 - z_3)\operatorname{tg}\alpha_3]\sin\theta'_2 \quad (13-89)$$

对肋板中面，相交线上各点应以肋板坐标场 $X_1$ 、 $Y_1$ 、 $Z_1$ 为准求出(图13-17)，计算出下列式进行：

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{[R_2 + (A_2 - z_{2e})\operatorname{tg}\alpha_2](\cos\theta'_2 - \cos\theta'_{2e})}{\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha_2 \cos\theta'_2}{\operatorname{tg}\rho_{21}}\right)} \sin\rho_{21} \\ &= \frac{[R_2 + (A_2 - z_{2e})\operatorname{tg}\alpha_2](\cos\theta_2 - \cos\theta_{2e})}{\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha_2 \cos\theta_2}{\operatorname{tg}\rho_{21}}\right)} \sin\rho_{21} \end{aligned} \quad (13-90)$$

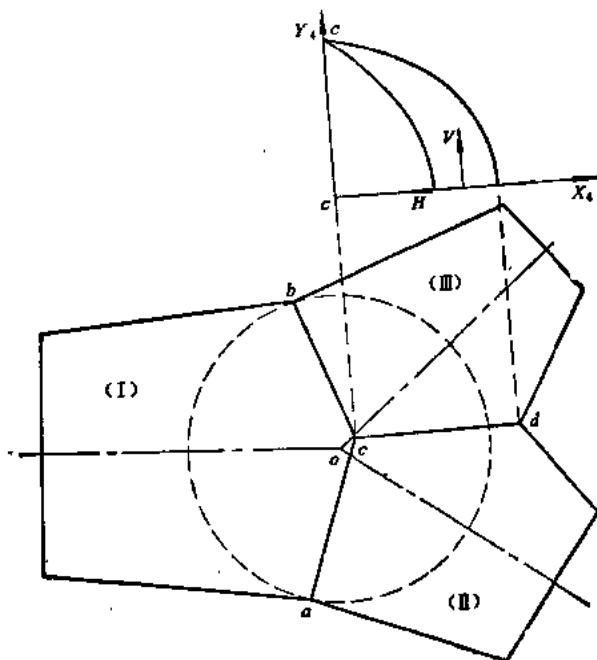


图 13-17 月牙肋板平面图形

$$y_1 = \frac{[R_1 + (A_1 - z'_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_1] (1 + \operatorname{ctg} \rho_{11} \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \theta'_{1c}) \sin \theta'_1}{1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_1 \cos \theta'_1}{\operatorname{tg} \rho_{11}}}$$

$$= \frac{[R_1 + (A_1 - z_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_1] (1 + \operatorname{ctg} \rho_{11} \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \theta_{1c}) \sin \theta_1}{1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_1 \cos \theta_{1c}}{\operatorname{tg} \rho_{11}}} \quad (13-91)$$

上两式中，都有两个表达式。当确定主岔锥II与肋中面交线坐标时，用脚标为“2”的式子；当确定支岔锥III与肋中面交线坐标，则用脚标为“3”的式子。作为变量的 $\theta_{1c}$ ，从0变到 $\theta_{1c}$ ； $\theta'_1$ 则从0变到 $\theta'_{1c}$ 。

5. 主岔锥管II、支岔锥管III作用于肋板中面的力

(1) 主岔锥管II对肋中面的垂直分力：

$$V_2 = p(R'_2)^2 \left[ \frac{\left( -c_2 + \frac{1}{2}c_{1c}^2 + c_{1c} - \frac{1}{2}c_{1c}^2 \right)}{(1 + \operatorname{tg} \rho_{21} \cos^2 \alpha_2)} + \frac{(c_2 - c_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_2}{2G_2} \right] \quad (13-92)$$

(2) 主岔锥管II对肋中面的水平分力：

$$H_2 = H_{21} + H_{22} + H_{23} \quad (13-93)$$

$$H_{21} = \frac{p(R'_2)^2 \cos \rho_{21}}{2 \cos^2 \alpha_2} [-D_{1c} + T_1 (E_2 - E_{1c})] \quad (13-94)$$

$$H_{22} = \mu p(R'_2)^2 \operatorname{tg} \alpha_2 \sin \rho_{21} [F_{1c} - T_2 G_2 (E_2 - E_{1c})] \quad (13-95)$$

$$H_{23} = -\mu p(R'_2)^2 \cos \rho_{21} [-G_2 F_{1c} + T_2 (E_2 - E_{1c})] \quad (13-96)$$

上列式中  $p$  —— 设计内水压力；

$\mu$  —— 钢的泊桑比， $\mu = \frac{1}{3}$ ；

$$R'_2 = R_2 + (A_2 - z_{2c}) \operatorname{tg} \alpha_2;$$

$$G_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 \operatorname{ctg} \rho_{21};$$

$$R''_2 = R'_2 (1 + G_2 \cos \theta_{2c});$$

$$c_2 = \frac{1}{1 + G_2};$$

$$c_{1c} = \frac{1}{1 + G_2 \cos \theta_{1c}};$$

$$D_{1c} = \frac{\sin \theta_{2c} (G_2 + \cos \theta_{1c})}{(1 - G_2^2) (1 + G_2 \cos \theta_{2c})^2};$$

$$T_2 = \frac{2}{(1 - G_2^2)^{1.5}};$$

$$E_2 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1 + G_2}{\sqrt{1 - G_2^2}};$$

$$E_{1c} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\operatorname{tg} \left[ \frac{1}{2} (90^\circ - \theta_{2c}) \right] + G_2}{\sqrt{1 - G_2^2}};$$

$$F_{2,c} = \frac{\sin \theta_{2,c}}{(1-G_1^2)(1+G_2 \cos \theta_{2,c})}.$$

(3) 支岔锥管III对肋中面的垂直分力:

$$V_3 = p(R_3'')^2 \left[ \frac{\left(-C_3 + \frac{1}{2}C_3^2 + C_{3,c} - \frac{1}{2}C_{3,c}^2\right)}{G_3^2 \cos^2 \alpha_3 \operatorname{tg} \rho_{32}} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_3}{2G_3} (c_3 - c_{3,c}) \right] \quad (13-97)$$

(4) 支岔锥管III对肋中面的水平分力:

$$H_3 = H_{31} + H_{32} + H_{33} \quad (13-98)$$

$$H_{31} = \frac{p(R_3'')^2 \cos \rho_{32}}{2 \cos^2 \alpha_3} [-D_{3,c} + T_3 (E_3 - E_{3,c})] \quad (13-99)$$

$$H_{32} = \mu p(R_3'')^2 \operatorname{tg} \alpha_3 \sin \rho_{32} [F_{3,c} - T_3 G_3 (E_3 - E_{3,c})] \quad (13-100)$$

$$H_{33} = -\mu p(R_3'')^2 \cos \rho_{32} [-G_3 F_{3,c} + T_3 (E_3 - E_{3,c})] \quad (13-101)$$

式(13-97)~式(13-101)中:

$$G_3 = \operatorname{tg} \alpha_3 \operatorname{ctg} \rho_{32};$$

$$R_3' = R_3 + (A_3 - z_{3,c}) \operatorname{tg} \alpha_{31};$$

$$R_3'' = R_3' (1 + G_3 \cos \theta_{3,c}');$$

$$c_3 = \frac{1}{1+G_3};$$

$$c_{3,c} = \frac{1}{1+G_3 \cos \theta_{3,c}'};$$

$$D_{3,c} = \frac{\sin \theta_{3,c}' (G_3 + \cos \theta_{3,c}')}{(1-G_1^2)(1+G_3 \cos \theta_{3,c}')};$$

$$T_3 = \frac{2}{(1-G_1^2)^{1.5}};$$

$$E_3 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1+G_3}{\sqrt{1-G_1^2}};$$

$$E_{3,c} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\operatorname{tg} \left[ \frac{1}{2} (90^\circ - \theta_{3,c}') \right] + G_3}{\sqrt{1-G_1^2}};$$

$$F_{3,c} = \frac{\sin \theta_{3,c}'}{(1-G_1^2)(1+G_3 \cos \theta_{3,c}')};$$

作用于肋板中面的力为:

$$\text{水平力} \quad V = V_2 + V_3 \quad (13-102)$$

$$\text{垂直力} \quad H = H_2 + H_3 \quad (13-103)$$

V、H的作用点在图13-17中月牙肋的腰部中面上。

6. 肋板腰部宽度 $B_r$ 和厚度 $t_w$ 的估算

肋板各个截面宽度 $B_w$ 仅取决于体形的几何角度和尺寸,这是因为月牙肋形状系根据管壳对它作用力的合力线轨迹与肋截面形心重合原理导出,当岔管基本管节I、II、III的几何特征确定后,合力作用点轨迹线亦确定下来,II、III管节的相贯线至合力轨迹线间距的

两倍值也就是月牙肋的内缘线。《水电站压力钢管设计规范》(SD144-85)按月牙肋设计实践经验,提出用主岔管II、支岔管III的相贯线作月牙肋外缘线的基本轮廓,另加制作裕度来确定肋板外轮廓;内缘按抛物线轮廓确定,以简化肋的设计计算。图13-18给出肋板腰部宽度 $B_r$ 的曲线。

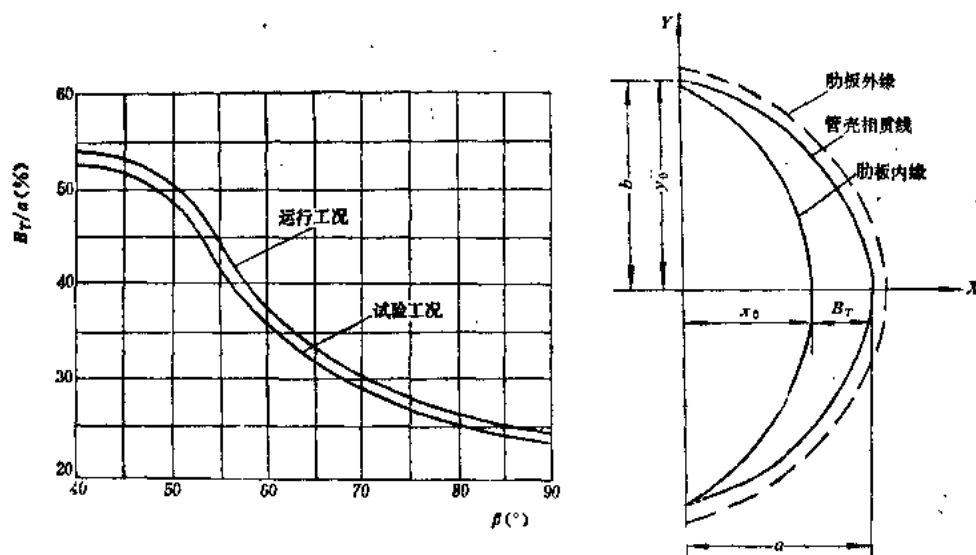


图 13-18 由 $B_r$ 确定肋板各截面宽度 $B$ 的曲线

由已知的分岔角 $\beta$ 及设计工况(运行),用曲线II查出 $(B_r/a)$ 值,肋宽为

$$B_r = \left( \frac{B_r}{a} \right) \times a \quad (13-104)$$

式中 $a$ 为式(13-82)算出的管壳中面与肋中面交线的水平投影长。

肋板厚度 $t_w$ 由下式计算:

$$t_w = \frac{V}{B_r [\sigma]_1} + C \quad (13-105)$$

式中  $V$ ——肋腰截面受的垂直力,由式(13-102)求得;

$C$ ——锈蚀裕量。

肋的其余截面宽 $B_w$ ,按内缘抛物线轮廓确定,抛物线为:

$$y^2 = \frac{y_0^2}{x_0} (x_0 - x) \quad (13-106)$$

式中  $y_0 = b$ ,  $b$ 由式(13-83)计算;

$x_0 = a - B_r$ ,  $a$ 由式(13-82)计算,  $B_r$ 即肋腰宽。

#### 7. 肋板强度校核

肋板强度校核对小水电而言,仅校核肋腰部位。肋腰的主应力按下式计算:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} (\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}) \quad (13-107)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} (\sigma - \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}) \quad (13-108)$$



式中  $\sigma$  ——肋腰截面正应力,

$$\sigma = V / (B_r T_w);$$

$\tau$  ——肋腰截面剪应力,

$$\tau = 3H / (2B_r T_w);$$

$V, H$  ——肋腰截面受的垂直力和水平力, 见式 (13-102)、式 (13-103)。

$\sigma_1$  及  $\sigma_2$  应小于表 13-1 中的  $[\sigma]$ , 基本荷载项, 否则调整肋板厚。

#### 8. 肋板侧表面与主岔管 II、支岔管 III 管壳中面交线坐标计算

肋板厚度确定后, 板两侧表面与管壳中面交线上各点的坐标值, 是拟定肋板外缘轮廓及制作岔管的重要依据。

支岔管 III 管壳中面与肋表面交线各点坐标由下列式计算:

$$x_{13} = \frac{[R_1 + (A_1 - z_{1c} - \Delta z_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_1](\cos \theta'_{1m} - \cos \theta'_{1n})}{(1 + \operatorname{ctg} \rho_{32} \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \theta'_{1n}) \sin \rho_{32}} \quad (13-109)$$

$$y_{13} = \frac{[R_1 + (A_1 - z_{1c} - \Delta z_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_1](1 + \operatorname{ctg} \rho_{32} \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \theta'_{1m}) \sin \theta'_{1n}}{1 + \operatorname{ctg} \rho_{32} \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \theta'_{1n}} \quad (13-110)$$

$$\text{式中 } \Delta z_{1c} = \frac{t_w \cos \rho_{31}}{2 \sin(\rho_{32} + \rho_{31})}$$

$$\theta'_{1m} = 180^\circ - \left[ \cos^{-1} \frac{x_{1c} + \Delta x_{1c}}{R_1 + (A_1 - z_{1c} - \Delta z_{1c}) \operatorname{tg} \alpha_1} \right]$$

$$\Delta x_{1c} = \frac{t_w \sin \rho_{31}}{2 \sin(\rho_{32} + \rho_{31})}$$

各符号含义见图 13-14、图 13-15 和图 13-16。

$x_{1c}, z_{1c}$  为相贯线交点  $c$  在 III 管中面坐标值, 见式 (13-72) 和式 (13-73)。

用上列式计算时, 以  $\theta'_1$  为变量;  $\theta'_1 = 0 \sim \theta'_{1n}$ , 一般以  $5^\circ$  或  $10^\circ$  为节距, 逐点计算。

主岔管 II 管壳中面与肋表面交线各点坐标由下列式计算:

$$x_{12} = \frac{[R_2 + (A_2 - z_{2c} - \Delta z_{2c}) \operatorname{tg} \alpha_2](\cos \theta_{1n} - \cos \theta_{1m})}{(1 + \operatorname{ctg} \rho_{23} \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \theta_{1n}) \sin \rho_{23}} \quad (13-111)$$

$$y_{12} = \frac{[R_2 + (A_2 - z_{2c} - \Delta z_{2c}) \operatorname{tg} \alpha_2](1 + \operatorname{ctg} \rho_{23} \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \theta_{1n}) \sin \theta_{1m}}{1 + \operatorname{ctg} \rho_{23} \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \theta_{1n}} \quad (13-112)$$

$$\text{式中 } \Delta z_{2c} = \frac{t_w \cos \rho_{21}}{2 \sin(\rho_{21} + \rho_{23})};$$

$$\cos \theta_{1n} = \frac{x_{2c} - \Delta x_{2c}}{R_2 + (A_2 - z_{2c} - \Delta z_{2c}) \operatorname{tg} \alpha_2};$$

$$\Delta x_{2c} = \frac{t_w \sin \rho_{21}}{2 \sin(\rho_{21} + \rho_{23})};$$

其余符号见式 (13-109)、式 (13-110) 的说明。

#### (四) 构造要求

(1) 岔管的基本管节和过渡管节因各节最大直径不同, 在均匀内水压力下, 管壳应按需要采用不同厚度, 但相邻管壁厚不宜大于 4mm。

(2) Y 形对称岔管可考虑不设导流板, 卜形非对称岔管应设导流板。导流板一侧焊

于月牙肋板上,另一侧焊在管壳上(参见图13-11a),用计算或马粪纸在管内比拟定形。

(3) 岔管的月牙肋尖部,内缘与管壳内壁齐平,外缘应高出管壳外壁。由于尖部宽度比较小,某些文献在试验研究基础上提出加宽尖部的方案<sup>●</sup>,该方案用一圆弧曲线修正外缘,使尖部突出管壳外 $\Delta B$ 值(图13-19)。也可以用一光滑曲线使尖部与其后断面平顺相切。

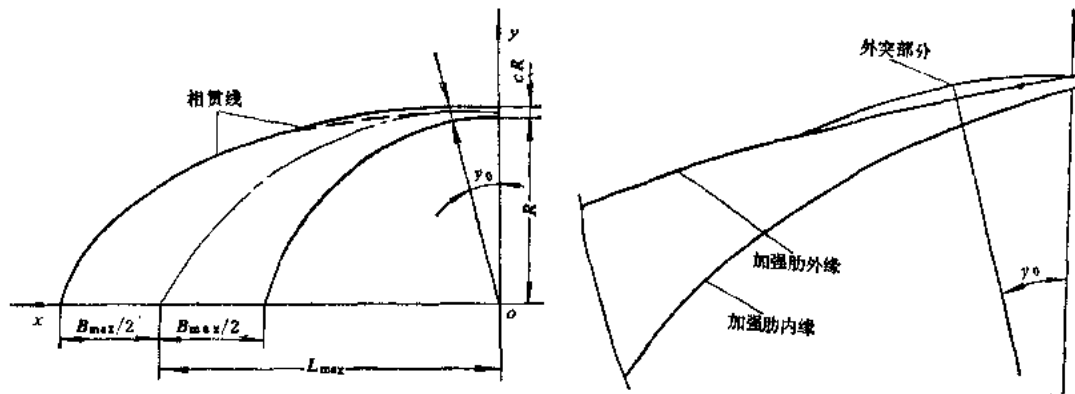


图 3-19 月牙肋尖部的修改形式

由此引起肋尖部小偏心受拉,但附加应力不大,特别是肋加宽后,刚度加大,对结构有利。肋尖加宽段中心角 $\gamma_0$ 和突出高度 $\Delta B$ ,可参考表13-4。

表 13-4 肋尖加宽段中心角 $\gamma_0$ 和突出高度 $\Delta B$ 值

分岔角 $\beta^\circ$	45	50	60	70	90
$\gamma_0$ 角	6°37'10"	7°38'7"	9°58'4"	12°00'33"	19°28'16"
$\Delta B = cR$	0.065R	0.061R	0.073R	0.083R	0.094R

(4) 管壳与肋板焊接形式有肋端部焊接和肋侧面焊接两种方式。前一种形式肋板外缘轮廓按管壳相贯线确定,不再因焊接而加宽,比较经济,但焊接工艺要求技术条件较高,焊缝检测和整体退火成为十分关键环节;后一种形式在国内、外应用比较普遍(图13-20)。仍要求强化检测工作,并进行退火等热处理工序。

(5) 管壳与肋连接焊缝高度(有效),不应少于管壳壁厚,且应是双面焊,主焊缝一般布置在管外侧,内壁焊缝应打磨光滑。

(6) 肋的迎水面应打磨成半圆形或弹头形截面,但不能削弱基本断面积。

(7) 岔管前、后过渡管节外壁宜焊止推环,使岔管的整体水平推力传递给管外的镇墩混凝土。

● 《月牙形内加强肋钢岔管的设计》,水利电力部第九工程局设计院。

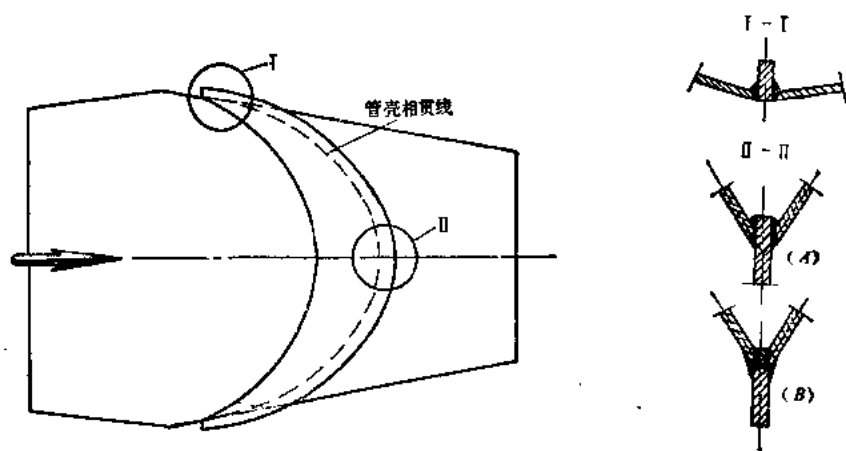


图 13-20 肋板与管壳的连接形式

## 第六节 卜形贴边岔管设计

### 一、贴边岔管体形

卜形贴边岔管在国内主要用于埋管结构中，小型电站的这类岔管也用在周围有较厚镇墩混凝土的结构中，常见的贴边岔管形式有：

(1) 圆柱形主、支管的分岔；

(2) 圆锥主管与圆柱支管的分岔。

岔管的分岔角控制在 $\beta=45^\circ \sim 60^\circ$ ，主、支管直径（分岔点处）比不小于2（图13-3）。

由于主岔管和支岔管轮廓不受公切球外切要求的控制，它们的相贯线为三元二次曲线。

在管轴平面上的投影（单线图）

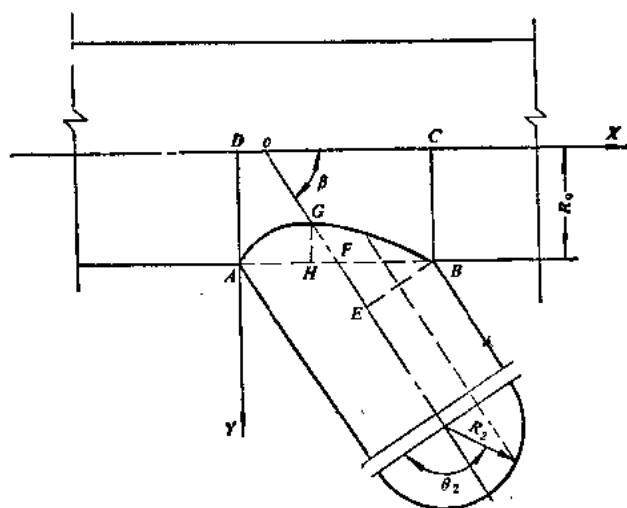


图 13-21 圆柱形分岔管的几何图形

曲线，按不同主、支管形式用下列式计算：

对圆柱主、支管（图13-21）：

$$x = \frac{R_1}{\sin \beta} (A \cos \theta_2 + \cos \beta \sqrt{1 - A^2 \sin^2 \theta_2}) \quad (13-113)$$

$$y = R_1 \sqrt{1 - A^2 \sin^2 \theta_2} \quad (13-114)$$

式中  $R_1$ ——主管管壳中面半径（内半径与壁厚半值之和）；

$A$ ——支、主管半径比值， $A = \frac{R_2}{R_1}$ ；

$R_2$ ——支管管壳中面半径;

$\theta_2$ ——支管截面圆心角。

$\theta_2$ 从 $0^\circ$ 至 $180^\circ$ 取值, 可用上两式计算得与 $\theta_2$ 对应的曲线上各点坐标值。

对锥形主管、圆柱形支管(图13-22)

$$y = \frac{1}{2}(-Ax + \sqrt{x^2(A^2 + 4B) - 4Cx + 4D}) \quad (13-115)$$

式中  $A = \frac{2}{\operatorname{tg} \beta}$ ;

$$B = 1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_1}{\sin^2 \beta};$$

$$C = \frac{2R_0}{\operatorname{ctg} \alpha_1 \sin^2 \beta};$$

$$D = \frac{R_0^2 - R_2^2}{\sin^2 \beta};$$

$\alpha_1$ ——锥管半锥顶角;

$R_0$ 、 $R_2$ ——锥管在管轴分岔点处的半径(管壳中面)和支管中面半径。

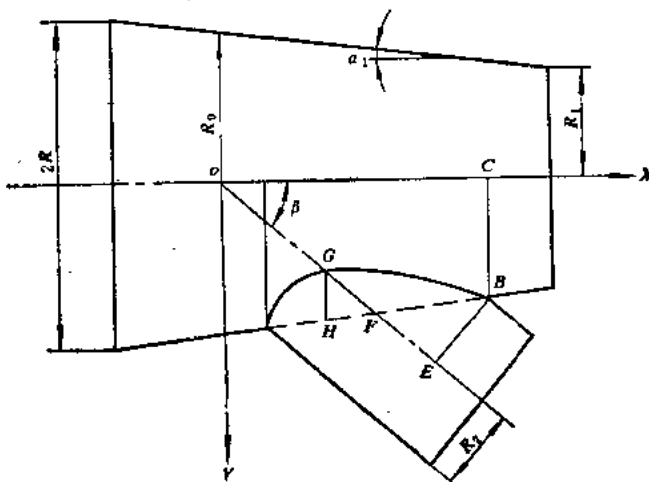


图 13-22 圆锥接圆柱管分岔的几何图形

计算时, 在岔管的钝角区(A点附近)和锐角区(B点附近), 作为变量的 $x$ 值宜多取几点, 即值与值的节距取小些, 以满足相贯线曲率小、要求计算点加密的要求。

## 二、管壁厚度

同济大学对贴边岔管进行研究后, 提出壁厚应取与之邻接的钢管壁厚1.3~1.5倍,

$\frac{R_2}{R_0}$ 大则取偏大值, 以降低钝角区应力峰值和缩短应力峰值衰减范围。如式(13-1)所示, 壁厚为

$$\delta = \frac{(1.3 \sim 1.5)pR_0}{[\sigma]_1 \phi \cos \alpha_1}$$

## 三、补强板尺寸

### 1. 补强板厚度和补强板层数

初步确定的补强板厚度可按无补强板时管壳开孔后的应力集中峰值扣去管壳可承担部分后的余下部分, 全部安排给补强板承担的方法进行, 再通过经验的应力验算公式校核(对小型岔管而言)。

管壳开孔后的应力集中系数, 在不同的支、主管半径比及分岔角情况下, 由表13-5查得。

补强板厚 $\delta'$ , 在已查得应力集中系数 $k$ 后, 由下式估算,

$$\delta' = \frac{\sigma_0}{[\sigma]_1} (k-1) + C \quad (13-116)$$

式中  $\sigma_0$ ——管壳膜应力

$$\sigma = \frac{pR}{\delta \cos \alpha}$$

$[\sigma]$ ——基本荷载下管壳材料容许应力（表13-1）；

$C$ ——锈蚀裕量，取 $C=2\sim 3\text{mm}$ ；

$\delta$ ——岔管膜应力区壁厚（本节中用的式（13-1）计算结果）。

表 13-5 应 力 集 中 系 数  $k$  值

支、主管半径比	0.4				0.45				0.5	
分岔角 $\beta$	45°	50°	55°	60°	45°	50°	55°	60°	45°	50°
应力集中系数 $k$	3.06	2.9	2.75	2.65	3.4	3.2	2.96	2.76	3.65	3.45

支、主管半径比	0.5		0.55				0.6			
分岔角 $\beta$	55°	60°	45°	50°	55°	60°	45°	50°	55°	60°
应力集中系数 $k$	3.1	2.9	4.0	3.65	3.35	3.15	4.25	3.8	3.5	3.26

注（1）此表系根据《规范》（SD144-85）中附图7.1.2转换而来；

（2）当分岔角 $\beta$ 及支、主管半径比介于表中数值之间时，可以内插。

所得补强板厚度应该与钢板标准厚一致。如计算厚不同于出厂钢板厚度，应采用相近的偏大值。

补强板对小型电站而言，宜布置在管外壳。当岔管直径较大时，可考虑内、外壁都设补强板的加强形式。研究资料表明，当补强板厚度不超过管壳厚度时，在补强板边缘由不同厚度造成的局部挠曲应力影响很小，膜应力区基本未改变；过厚的补强板将改变这种状况。因此当计算出的 $\delta'$ 与管壳厚 $\delta$ 的差超过2mm时，可考虑在补强宽度外按1:3铲坡口的形式（类似钢管不同壁厚连接的构造要求），或者采用内、外补强的形式。

## 2. 补强板的宽度

补强板宽度根据岔管接口处应力集中峰值衰减至膜应力值的距离而定。补强板厚度已使锐角部位应力峰值得到削减，在板周界的部位，应力可接近膜应力，因此，主管的补强板宽度可按支管半径的（0.8~1.1）倍拟定；支管的补强板宽度可按支管半径的（0.5~0.6）倍拟定。

## 3. 岔管补强板边缘应力近似验算

岔管应力峰值在锐角处（图13-21、图13-22）B点附近最大，控制锐角部位的应力不超过允许值后，其余部位的补强板厚度及宽度与锐角部位补强板尺寸相同，强度可得到保证。

小水电站贴边岔管[HD]不大时，锐角部位最大主应力按下列经验公式计算：

$$\sigma_{\max} = \frac{pR_0}{\delta} \left\{ (1 - 0.585 \sin^2 \beta) \left[ 1 + 5.05 \left( \frac{R_2}{R_0} \right)^{1/3} \right] - 398.9 \alpha_2 \right\}$$

$$\times \left( \frac{R_2}{R_0} \right)^{1/2} \cos \left( \frac{9\alpha_1}{\beta^2} \right) \} (1 - 1.5 \operatorname{tg} \alpha_1) \quad (13-177)$$

式中  $R_0$ ——岔管的管轴分岔点处主管半径；

$R_2$ ——岔管的管轴分岔点处支管半径；

$\delta$ ——计入补强板厚后的计算厚度（实际总厚度扣除锈蚀裕量）；

$\beta$ ——分岔角；

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ——主、支管的半锥顶角（图13-21、图13-22中 $\alpha_2=0^\circ$ ）。

式（13-117）适用  $\beta=45^\circ \sim 60^\circ$ ， $R_2/R_0=0.4 \sim 0.7$ ， $\alpha_1=0^\circ \sim 8^\circ$ ， $\alpha_2=0^\circ \sim 7^\circ$ 。

主管中部贴边的边缘处主应力按下式计算：

$$\sigma_{\max} = \frac{pR_0}{\delta} \left[ 1.172 + 0.353\alpha_2 - 0.00558\alpha_2\beta + 0.0245\beta + 0.517(\beta - 52.5)^{1/2} \right. \\ \left. \times \left( \frac{R_2}{R_0} - 0.7 \right) \right] (1 - 1.5 \operatorname{tg} \alpha_1) \quad (13-118)$$

式中符号意义同式（13-117）注。

计算上列两式时，式中的 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta$ 均用“度”计。公式的适用范围相同。

【例 13-2】一根卜形贴边岔管，由A3钢制作。运行工况下设计内水压力 $p=607.6\text{kPa}$ ，分岔角 $\beta=60^\circ$ ，主管为锥形，半锥顶角 $\alpha_1=5^\circ$ ，支管为圆管 $\alpha_2=0^\circ$ ，分岔处半径 $R_0=60\text{cm}$ ， $R_2=35\text{cm}$ 。岔管埋入混凝土墩体中。试设计岔管及补强板及验算最大应力。

1. 拟定岔管壁厚

按式（13-1）：

$$\delta = \frac{(1.3 \sim 1.5)pR_0}{[\sigma]_t \phi \sin \alpha_1}$$

$p=607.2\text{kPa}$ ， $R_0=60\text{cm}$ ， $R_2=35\text{cm}$ ， $[\sigma]_t=0.5\sigma_s=0.5 \times 2400 \times 98 = 117.6\text{MPa}$ ， $\phi=0.95$ ， $\alpha_1=5^\circ$ ，加厚系数按《规范》（SD144-85）表6.3.1用插值法得1.383。所以

$$\text{主管壁厚} \quad \delta_1 = \frac{1.383 \times 607.2 \times 60}{117600 \times 0.95 \times \cos 5^\circ} = 0.45\text{cm}$$

$$\text{支管壁厚} \quad \delta_2 = \frac{1.383 \times 607.2 \times 35}{117600 \times 0.95 \times \cos 0^\circ} = 0.263\text{cm}$$

计算壁厚均小于规范规定最小壁厚6mm，采用主、支管等厚 $\delta=\delta_1=\delta_2=0.6\text{cm}$ 。

2. 相贯线各点坐标计算（略，可见第十六章有关算例）

3. 补强板尺寸

由表13-5，因 $\frac{R_2}{R_0} = \frac{35}{60} = 0.583$ ，对 $\beta=60^\circ$ 而言，应力集中系数 $k$ 内插于3.15与3.26之间，可得 $k=3.2$ ，补强板厚 $\delta'$ 按式（13-116）计算：

$$\delta' = \frac{pR}{\delta \cos \alpha} \frac{(k-1)}{[\sigma]_t} + C = \frac{607.2}{0.6 \cos 5^\circ} \times \frac{(3.2-1)}{117600} + 0.2 \approx 0.22\text{cm}$$

补强板用单层外补强形式，厚度用4mm。

补强板宽度：考虑到补强板厚度小于管壳厚度，对膜应力场影响较小，宽度采用规范推荐数值范围的偏小值，即，

主管补强板  $B_{\pm} = 0.8 \times R_2 = 0.8 \times 35 = 20\text{cm}$

支管补强板  $B_{\text{支}} = 0.5 \times R_2 = 0.5 \times 35 \approx 18\text{cm}$

#### 4. 应力验算

(1) 锐角部位补强板边缘应力。按式(13-117)计算, 边缘最大应力为:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{pR_0}{\delta} \left\{ (1 - 0.585 \sin^2 \beta) \left[ 1 + 5.05 \left( \frac{R_2}{R_0} \right)^{1/3} \right] - 398.9 \alpha_2 \left( \frac{R_2}{R_0} \right)^{1/4} \right. \\ &\quad \left. \times \cos \left( \frac{9\alpha_1}{\beta^2} \right) \right\} (1 - 1.5 \tan \alpha_1) \\ &= \frac{607.2 \times 60}{0.8} \left\{ (1 - 0.585 \sin^2 60^\circ) \left[ 1 + 5.05 \left( \frac{35}{60} \right)^{1/3} \right] - 0 \right\} \\ &\quad \times (1 - 1.5 \tan 5^\circ) = 76860.5\text{Pa}\end{aligned}$$

A3钢的容许应力在基本荷载作用  $[\sigma]_1 = 0.5\sigma_s = 117600\text{kPa} > \sigma_{\max}$ ,

(2) 主管中部贴边的最大应力。按式(13-118)计算, 边缘最大应力为

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{pR_0}{\delta} \left[ 1.172 + 0.353\alpha_2 - 0.00558\alpha_2\beta + 0.0245\beta + 0.517(\beta - 52.5)^{1/3} \right. \\ &\quad \left. \times \left( \frac{R_2}{R_0} - 0.7 \right) \right] (1 - 1.5 \tan \alpha_1) \\ &= \frac{607.2 \times 60}{0.8} \left[ 1.172 + 0 - 0 + 0.0245 \times 60 + 0.517(60 - 52.5)^{1/3} \right. \\ &\quad \left. \times \left( \frac{35}{60} - 0.7 \right) \right] (1 - 1.5 \tan 5^\circ) \\ &= 100956.5\text{kPa} < [\sigma]_1 = 117600\text{kPa}\end{aligned}$$

#### 四、构造要求

##### (一) 补强板与管壳的连接

补强板与管壳理论上应成为整体, 因此补强板的曲率应与管壳外缘曲率一致, 并且结合紧密。除了孔口及板四周焊接外, 必要时, 板上宜布置塞焊孔(图13-23)。

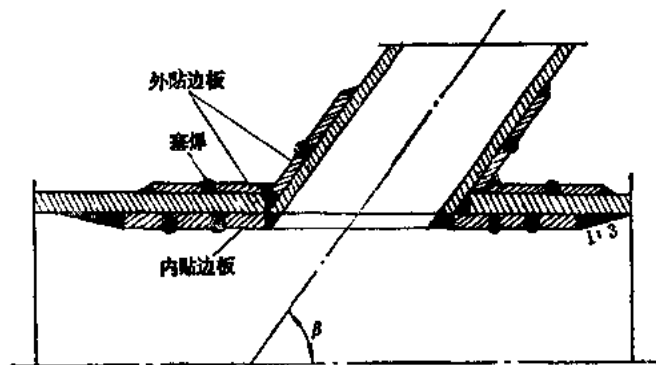


图 13-23 贴边岔管用塞焊加强连接形式

塞焊孔径不小于加强板厚, 亦不小于 $\phi 14$ 。焊孔视补强板宽度沿径向布置1~2排, 孔距25~30cm沿周向布置。焊接时, 先焊孔内周, 再分层焊填。焊孔离岔管相贯线及板外缘距离不少于管壳或补强板厚的3倍, 且不小于100mm。焊完后, 对塞焊体突出管外部

分适当敲击，以减小局部焊接应力。

(二) 岔管内壁焊缝的处理

岔管内壁焊缝在焊完后应打磨光滑；当管内设有补强板时，板外缘焊缝应呈平缓坡角（1:3），并且打磨光滑以改善流态。

(三) 叉管外壁的加固

设补强板后的岔管一般不另设其它加固措施。当管壁厚度小、管径相对大时，在岔管锐角部位的主、支管间设2~3片梯形肋板，可增加岔管整体刚度，减少管外混凝土浇筑时主、支管间不均匀外压力造成的附加应力。



# 第十四章 钢管附件结构

## 第一节 管 法 蓝

### 一、管法蓝在钢管结构中的应用

管法蓝用于下列场合：

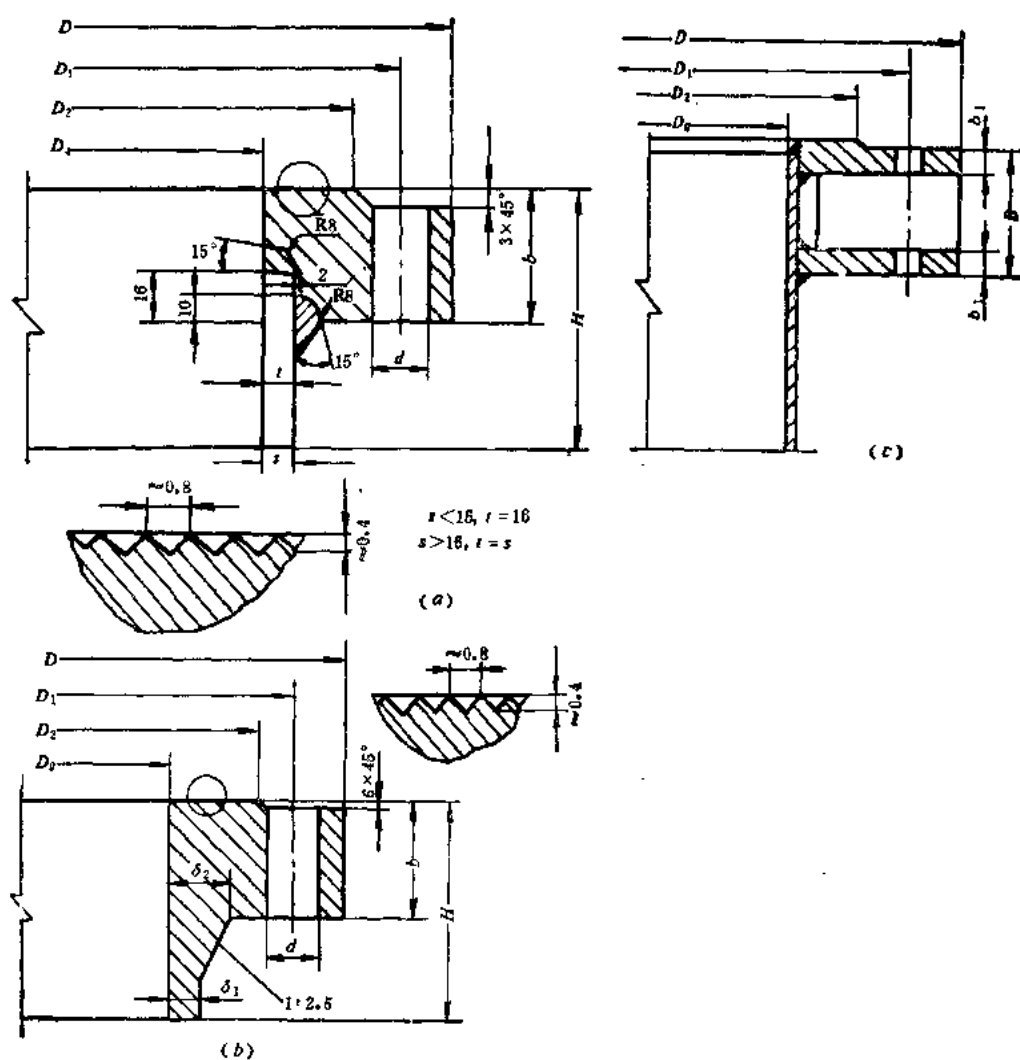


图 14-1 各种法兰接口形式

(a)平焊法兰接口形式；(b)颈管法兰接口形式；(c)组合型法兰接口形式

- (1) 钢管与带有法蓝的水轮机蜗壳连接;
- (2) 钢管与带有法蓝的伸缩节、调压阀、接合节、闸阀连接;
- (3) 小直径钢管以法蓝连接, 分段在现场组装。

## 二、标准法蓝

标准法蓝中常使用平焊形和对焊形。内压力较大时选用带凸凹形密封面的法蓝和带榫槽密封面的法蓝。图14-1(a)和14-2(a)、(b)给出平焊形法蓝[JB159-73], 图14-2中的(b), 和(c)、(d)为有对接焊口的长颈法蓝[JB1160-73]。

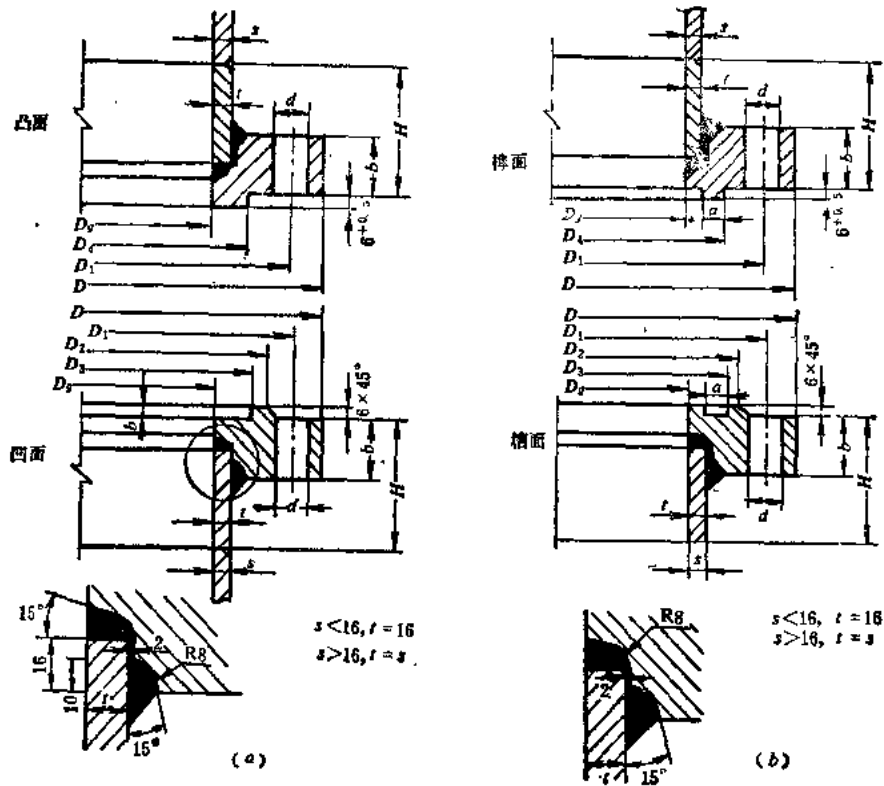


图 14-2 高压法蓝接口 (一)

(a) 凸凹密封面; (b) 榫槽密封面;



标准管法蓝的内压力有245、588、981、1569、2452、3924、6278kPa, 共7个压力等级。选用时, 按计入水击压力的设计内水压力要求接近、但不超过相近标准压力等级的原则来选择。各档次的标准法蓝尺寸列于下述各表中。表14-1给出国际单位制压力与以往常使用的工程单位制压力相对照的法蓝最大适用公称直径。

表 14-1 法 蓝 公 称 直 径

国际单位标准压力 (kPa)	工程单位制标准压力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	平焊法蓝最大公称直径 (mm)	长颈对焊法蓝最大公称直径 (mm)
245	2.5	3000	—
588	6	2400	2000
981	10	1800	2000
1569	16	1400	1800
2452	25	800	1400
3924	40	600	1000
6278	64	—	800

1. 平焊法蓝[JB159-73]系列尺寸表(表14-2)

2. 长颈对焊法蓝[JB1160-73]系列尺寸表(表14-3)

3. 法蓝用止漏垫片

法蓝间用非金属垫片或O型橡胶垫圈。垫片尺寸系列如表14-4所列。

榫槽密封面、凸凹密封面法蓝用非金属软垫尺寸系列如表14-5所列。

4. 法蓝及垫片的要求

平焊法蓝用钢材A3或20号钢制作, 螺栓用A3钢或A5钢制作, 螺母一般为A3钢。法蓝表面应平整、光滑, 垫片或垫圈表面粗糙度最大允许值为 $3.2\mu\text{m}$ 。法蓝不得有裂纹、毛刺和汽孔。与钢管连接焊缝高度应略大于钢管壁厚。

对焊长颈法蓝用20号或25号钢制作, 螺栓用35号或45号钢制作, 螺母用25号钢或35号钢制作。法蓝的垫片或垫圈范围应光洁, 光洁度按 $\nabla_3$ 或 $\nabla_4$ 控制。法蓝不得有汽孔、裂纹、毛刺等缺陷。与法蓝连接的钢管厚度超过法蓝颈基厚度 $\delta_1$ 时, 可适当加长颈长 $H$ 和焊缝的直角边长, 使之略大于管壁厚度。

非金属软垫片常用普通橡胶板, 其物理机械性能如表14-7所示。

### 三、非标准法兰设计

通常以矩形截面法蓝用于非标准件设计中比较方便。图14-3为矩形法蓝(包括长颈法蓝)及作用荷载。

1. 矩形法蓝

法蓝设计包括下列内容:

- (1) 法蓝截面尺寸拟定;
- (2) 荷载计算;
- (3) 垫片面积确定;

表 14-2 平 焊 法 蓋 系 列 尺 寸 規 格 (mm)

公称直径 $D_s$	法 盖										螺 栓		法兰重量 (kg)
	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$b$	$H$	$a$	$a_1$	$d$	规 格	数 量	
$p_t=245\text{kPa}$													
2400	2560	2515	2470	2460	2457	46	125	17	14	27	M24	76	277
2600	2760	2715	2670	2660	2657							80	300
2800	2960	2915	2870	2860	2857							84	323
3000	3160	3115	3070	3060	3057	88	382						
$p_t=588\text{kPa}$													
(1700)	1860	1815	1770	1760	50	140	17	14	27	M24			
1800	1960	1915	1870	1860	58	155							
(1900)	2060	2015	1970	1960									
2000	2160	2115	2070	2060									
2200	2360	2315	2270	2260	60	160							
2400	2560	2515	2470	2460									
$p_t=981\text{kPa}$													
(1100)	1260	1215	1170	1160	1157	46	125	17	14	27	M24	44	129
1200	1360	1315	1270	1260	1257							46	141
(1300)	1460	1415	1370	1360	1357	50	140					48	168
1400	1560	1515	1470	1460	1457							52	180
(1500)	1660	1615	1570	1560	1557	56	155					56	215
1600	1760	1715	1670	1660	1657							60	229
(1700)	1860	1815	1770	1760	1757	60	160					64	256
1800	1960	1915	1870	1860	1857							68	270

续表

公称直径 $D_s$	法 盘										螺 栓		决定重量 (kg)
	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$b$	$H$	$a$	$a_1$	$d$	规格	数量	
$p_s=1569\text{kPa}$													
700	860	815	770	755	753	40	126	15	13	27	M24	32	76.2
800	960	915	870	855	853	46	125					36	95.4
900	1060	1015	970	955	953							40	106
1000	1160	1115	1070	1055	1053			15	13			44	130
(1100)	1260	1215	1170	1160	1157	50	140	17	14	27	M24	46	143
1200	1360	1315	1270	1260	1257							48	155
(1300)	1460	1415	1370	1360	1357	56	155					52	187
1400	1560	1515	1470	1460	1457	60	160					56	212
$p_s=2425\text{kPa}$													
600	760	715	670	655	653	40	120	15	13	27	M24	28	66.1
(650)	810	765	720	705	703	46	125					32	78.3
700	860	815	770	755	753	50	140					36	92.1
800	960	915	870	855	853	56	155					40	117
$p_s=3924\text{kPa}$													
400	560	515	470	455	453	40	120	15	13	27	M24	24	45.3
(450)	610	565	520	505	503	46	125					28	55.4
500	660	615	570	555	553							28	61.2
(550)	710	665	620	605	603	50	140					32	73.2
600	760	715	670	655	653	56	155					32	89.2

表 14-3 长颈对焊法兰系列尺寸表 (mm)

公称直径		法 兰										螺 栓		法兰重量			
$D_r$		$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$H$	$a$	$a_1$	$\delta_1$	$\delta_2$	$R$	$d$	规 格	数 量	(kg)
$p_r=588\text{kPa}$																	
(1700)		1860	1815	1770	1760	1757	50	95								60	188
1800		1960	1915	1870	1860	1857	56	100	17	14	16	26	12	17	M24	64	218
(1900)		2060	2015	1920	1960	1957										68	232
2000		2160	2115	2070	2060	2057	60	105								72	253
$p_r=981\text{kPa}$																	
(1100)		1260	1215	1170	1160	1157	46	90								44	116
1200		1360	1315	1270	1260	1257										44	126
(1300)		1460	1415	1370	1360	1357	50	95								48	149
1400		1560	1515	1470	1460	1457										52	156
(1500)		1660	1615	1570	1560	1557	56	100	17	17	16	26	12	27	M24	56	182
1600		1760	1715	1670	1660	1657										60	197
(1700)		1860	1815	1770	1760	1757	60	105								64	220
1800		1960	1915	1870	1860	1857										68	239
(1900)		2095	2040	1980	1960	1957	65	125								68	343
2000		2195	2140	2080	2060	2057	70	130								72	378

续表

公称直径 $D_e$	法										蓝			螺 栓		法兰重量 (kg)
	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$H$	$a$	$a_1$	$\delta_1$	$\delta_2$	$R$	$d$	规格	数量	

$p_f=1569\text{kPa}$																
500	640	600	565	555	553	553	30	70	15	13	12	22	23	M20	24	32.9
(550)	650	650	615	605	603	603	36	75								
800	740	700	665	655	653	653	36	75	15	13	12	22	23	M20	28	42.4
(850)	750	750	715	705	703	703	36	75								
700	860	815	770	755	753	753	40	85	15	13	12	22	23	M20	32	68.2
800	960	915	870	855	853	853	46	90								
900	1060	1015	970	955	953	953	46	90	15	13	12	22	23	M20	40	101
1000	1160	1115	1070	1055	1053	1053	50	95								
(1100)	1260	1215	1170	1160	1157	1157	50	95	15	13	12	22	23	M20	44	112
1200	1360	1315	1270	1260	1257	1257	50	95								
(1300)	1460	1415	1370	1360	1357	1357	56	100	15	13	12	22	23	M20	52	158
1400	1560	1515	1470	1460	1457	1457	60	105								
1500	1690	1640	1600	1560	1557	1557	65	125	15	13	12	22	23	M20	56	269
1600	1795	1740	1680	1660	1657	1657	70	130								
(1700)	1895	1840	1780	1760	1757	1757	75	135	15	13	12	22	23	M20	64	343
1800	1995	1940	1880	1860	1857	1857	75	135								



$$\underline{p_i = 3924 \text{ kPa}}$$

续表

公称直径 $D_f$	法														螺		法 定 重 量 (kg)
	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$H$	$a$	$a_1$	$\delta_1$	$\delta_2$	$R$	$d$	规 格	数 量	

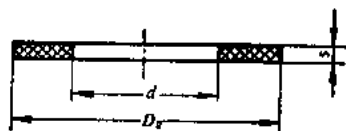
$p_f=3924\text{kPa}$																	
650	845	790	730	705	703	60	120									32	117
700	895	840	780	755	753	65	125									36	135
800	995	940	880	855	853				15	13	20	32	15	30	M27	40	151
900	1095	1040	980	955	953	70	130									48	178
1000	1195	1140	1080	1055	1053	75	135									56	197

$p_f=6278\text{kPa}$																	
300	460	415	370	355	353	46	90									20	35.6
(350)	510	465	420	405	403						16	26	12	27	M24	24	10.6
400	560	515	470	455	453	56	100		15	13						28	60.7
(450)	645	590	520	505	503											24	75.5
500	695	640	570	555	553	60	120				20	32	15	30	M27	28	91.7
(550)	745	690	620	605	603	65	125									32	107
600	810	750	700	680	678	70	130					36		33	M30	32	134
(650)	860	800	750	720	728	70	135		17	15	22	36				36	145
700	950	880	820	800	798	75	155									32	206
800	1050	980	920	900	898	80	160				26	42	18	39	M36	26	314

表 14-4

光滑密封面法蓝用非金属软垫片尺寸[JB1161-73]

(mm)



公 称 直 径 $D_f$	垫片内径 $d$	公 称 压 力 $P_t$ (kPa)					
		245	588	981	1569	2452	3924
400	415			450	455		470
(450)	465				505		520
500	515		550	500	555	565	570
(550)	565		600		605	615	620
600	615		650		655	665	670
(650)	665		700		705	715	720
700	715	750		755			770
800	815	850		855			870
900	915	950		955			970
1000	1015			1055			1070
(1100)	1115		1155	1170		1170	
1200	1215		1255	1270		1270	
(1300)	1315		1355	1370		1370	
1400	1415		1455	1470		1470	
(1500)	1515		1555	1570		1570	
1600	1615		1655	1670		1670	
(1700)	1715	1755		1770		1770	
1800	1815	1855		1870		1870	
(1900)	1915	1955	1970	1970			
2000	2015	2055	2070	2070			
2200	2215	2255	2270				
2400	2420		2470				
2600	2620	2670					
2800	2820	2870					
3000	3020	3070					

表 14-5

槽槽密封面、凹凸密封面法蘭用非金属軟墊片尺寸

(mm)



公称 直径 $D_s$	公 称 压 力 $P_s$ (kPa)															
	245		588		981		1569		2452		3924		6278			
	垫 片 直 径															
	D	d	D	d	D	d	D	d	D	d	D	d	D	d	D	d
400					439	411	444	416							454	426
(450)					489	461	494	466							504	476
500			539	511			544	516							554	526
(550)			589	561			594	566							604	576
600			639	611			644	616					654	626	679	647
(650)			689	661			694	666					704	676	729	697
700	739	711			744	716							754	726	799	767
800	839	811			844	816							854	826	899	867
900	939	911			944	916							954	926		
1000					1044	1016							1054	1026		
(1100)			1144	1112	1159	1127					1159	1127				
1200			1244	1212	1259	1227					1259	1227				
1300			1344	1312	1359	1327					1359	1327				
1400			1444	1412	1459	1427					1459	1427				
(1500)			1544	1512	1559	1527		1559	1527							
1600			1644	1612	1659	1627		1659	1627							
(1700)	1744	1712			1759	1727		1759	1727							
1800	1844	1812			1859	1827		1859	1827							
(1900)	1944	1912			1959	1927										
2000	2044	2012			2059	2027										
2200	2244	2212	2259	2227												
2400			2459	2427												
2600	2659	2627														
2800	2859	2827														
3000	3059	3027														

O型合成橡胶密封圈系列及密封要求预压量见表14-6。

表 14-6

O 型合成橡胶密封圈系列及密封预压量

序	公称号码	密封圈断面尺寸 (mm)	标准压缩余量		法蓝密封圈槽尺寸(mm)	
			最大 (%)	最小 (%)	槽深度	槽宽度
1	P2~P10	$1.9 \pm 0.07$	31.5	20.8	$1.4 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.05 \end{smallmatrix}$	$2.9 \begin{smallmatrix} +0.15 \\ -0 \end{smallmatrix}$
2	P10A~P22	$2.4 \pm 0.07$	29.2	21.5	$1.8 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.05 \end{smallmatrix}$	$3.2 \begin{smallmatrix} +0.15 \\ -0 \end{smallmatrix}$
3	P22A~P50	$3.5 \pm 0.1$	26.1	19.1	$2.7 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.05 \end{smallmatrix}$	$4.5 \begin{smallmatrix} +0.15 \\ 0 \end{smallmatrix}$
4	P48A~P150	$5.7 \pm 0.15$	22.2	16.2		

表 14-7

橡胶板物理机械性能

橡胶板类型	牌 号	扯断力 不小于 (kPa)	扯断伸长率 不小于 (%)	永久变形 不大于 (%)	邵氏硬度 $\Delta$	老化系数 70℃×72h 不小于
普通橡胶板	1120	2943	250	35	60~75	0.65
	1125	4905	280	25	60~75	0.65
	1130	5886	300	35	60~75	0.70
	1140	7848	350	35	55~70	0.75
	1250	12753	400	30	50~65	0.80
	1260	14715	500	30	45~60	0.80

注 (1) 适用温度为  $-30^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ;

(2) 牌号 1120 适用于低压下工作; 1125、1130、1140 可在压力不大的条件下工作; 1250 具有较高耐压力及较好的弹性, 对于水压力超过 1472 kPa 时有较好的适应性; 1260 具有高弹性, 对于水压力超过 2000 kPa 时较适用。

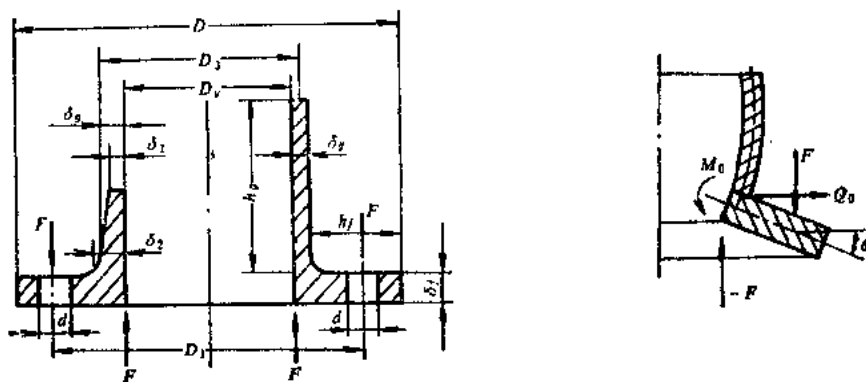


图 14-3 法蓝的几何特征及受力后变形形式

(4) 螺栓根数、螺栓直径及螺栓中心圆直径;

(5) 法蓝强度校核。

## 2. 法蓝截面尺寸

法蓝截面高度 $h_f$  (垂直管轴向)可参照与水压力相近的标准法蓝高度拟定,但最小高度 $h_{fmin}$ 不小于下式计算值:

$$h_{fmin} = 0.5(D-d) + 1.5d_0 \quad \text{当 } d < 0.25(D-d) \quad (14-1)$$

$$h_{fmin} = (2.8 \sim 3.5)d_0 \quad \text{当 } d > 0.25(D-d) \quad (14-2)$$

式中  $D$ ——垫片外径;

$d$ ——垫片内径;

$d_0$ ——螺栓直径。

法蓝厚度 $\delta_f$ 参照与水压力相近的标准法蓝厚度拟定。

## 3. 法蓝荷载

(1) 钢管轴向力 $\Sigma A$ ;

(2) 螺栓预压力 $F_u$ ;

(3) 内水压力 $p$ 。

螺栓拉紧后对法蓝盘面形成力 $F$ 的计算公式:

$$F = F_u + c \Sigma A \quad (14-3)$$

式中  $c$ ——垫片系数,取决于垫片刚度。据克林格尔提出资料,非金属垫片(软垫片) $c \approx 1$ ,即钢管传来的轴向力全由螺栓、法蓝全部传递给相邻管法蓝,为偏安全计,可取 $c = 1$ ;

$\Sigma A$ ——法蓝接头上游向伸缩节以下钢管轴向力,由表12-5中各式计算而定。当所设计法蓝接头位于镇墩上游位置时,应取负值;当法蓝接头位于镇墩下游位置,则 $\Sigma A$ 为镇墩至伸缩节间钢管的轴向力,取正值;

$F_u$ ——螺栓压紧垫片所需要的预压力,

$$F_u = kpA_d$$

其中  $k$ ——系数,取决于密封垫片的型式,对平面密封垫片: $k = 2 \sim 4$ ;对宽榫槽密封垫片: $k = 3 \sim 6$ ;对窄榫槽密封垫片: $k = 3 \sim 8$ ;对O型橡胶圈: $k = 3 \sim 8$ ;

$A_d$ ——垫片承压面积;

$p$ ——内水压力。

## 4. 垫片选择

平面垫片内径 $d$ 为钢管内径,外径 $D$ 由下式计算:

$$D = d \sqrt{\frac{k-m}{k-m-1}} \quad (14-4)$$

式中  $k$ ——系数,见式(14-3)注;

$m$ ——反映垫片材料的系数,查表14-8。

$$\text{垫片面积:} \quad A_d = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (14-5)$$

表 14-8

垫片材料系数  $m$ 

垫片材料	含有棉织品的橡胶	无棉织品或含少量石棉纤维的橡胶		O 型橡胶
		邵氏硬度 < 75	邵氏硬度 ≥ 75	
$m$	1.25	0.5	1.0	3 (硬度 < 75) 6 (硬度 75~85)

对 O 型垫圈以圆心截面面积值为  $A_d$  值。

#### 5. 螺栓根数及直径确定

法蓝螺栓的根数  $Z$ ，一般应为 4 的倍数，常用 24 根或 28 根，一机部标准中有少部分内容的法蓝采用 27 根。

在确定垫片材料及规格后，可用式 (14-3) 算得法蓝盘应承受的作用力  $F_s$ ，参照标准法蓝拟定螺栓根数  $Z$ ，每根螺栓截面积  $A_0$  用下式计算：

$$A_0 = \frac{F_s}{Z[\sigma_L^L]} \quad (14-6)$$

螺栓直径也可用上述数据直接求得，即

$$d \geq 1.772 \sqrt{\frac{F_s}{Z[\sigma_L^L]}} \quad (14-7)$$

式中  $[\sigma_L^L]$ ——螺栓的容许应力，根据采用钢号查有关机械零件手册资料。

最终采用的螺栓直径应采用不小于计算值的标准直径，可查 [GB793-66] 及 [GB31-66]，与之配套的螺母见标准 [GB45-66]、[GB52-66]，垫圈见标准 [GB95-66]。

#### 6. 螺栓中心圆直径的确定

螺栓中心圆直径  $D_1$  的确定，应满足下列要求：

- (1) 螺栓间距  $B_1$ 、不超过螺栓直径的 8 倍，但不小于螺栓直径的 4 倍；
- (2) 能安排已选定的螺栓根数；
- (3) 螺栓中心到法蓝根部（管壳外缘）的距离不宜小于螺栓直径  $d$  的 1.5 倍，一般可取 1.8 倍，以满足螺帽搬手旋转螺帽需要的间隙。如果最先拟定的法蓝高度  $h_f$  不能满足要求，可适当加大；
- (4) 法蓝螺栓孔壁至法蓝外径间应有 0.4~0.5 倍螺栓直径的裕量。

#### 7. 法蓝应力校核

- (1) 法蓝与管连接处的剪力及弯矩：

剪力（径向） $Q_0$ ：

$$Q_0 = \frac{\left(f_1 - \frac{\delta_f}{2\delta_s} T_1\right)(\delta_s + 0.233f_1 T_1)p - 2T_2(\delta_f + 0.538f_1)F_s}{1.86f_1\delta_s + T_1\left[\delta_f\left(2 + 0.116\frac{f_1}{\delta_s}T_1\right) + 1.61f_1\delta_f + 0.866f_1^2\right]} \quad (\text{N/m}) \quad (14-8)$$

弯矩（径向） $M_0$ ：

$$M_0 = \frac{(\delta_1^2 T_1 + 1.86 f_1 \delta_1) Q_0 + \delta_1 T_1 F_s - 0.5 \delta_1 p \left( f_1^2 - \frac{\delta_1^2}{2 \delta_2} T_1 \right)}{1.5 T_1 \delta_1 - 3.464 \delta_2} \quad (\text{N} \cdot \text{m/m}) \quad (14-9)$$

式中  $f_1 = \sqrt{D_1 \delta_1}$ ;

$$T_1 = \frac{\delta_1^2 (3D_1^2 - 5D_2^2)}{\delta_1^2 (D_1^2 - D_2^2)};$$

$$T_2 = \frac{3.58 \delta_1^2}{\delta_1^2 (D_1^2 - D_2^2)} \left[ \frac{D_1^2}{3} \ln \frac{D_1}{D_2} + 0.1 (D_1^2 - D_2^2) \right];$$

其余各符号意义见图14-3所示。

(2) 法蓝盘根部管壁应力:

$$\text{轴向 } \sigma_1^a = \frac{6M_0}{\delta_1^2}; \quad \sigma_1^a = \frac{F_s + 0.25\pi p(D_1 - \delta_1)^2}{\pi D_1 \delta_1}$$

$$\text{顺管轴向应力} \quad \sigma_x = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (\text{kPa}) \quad (14-10)$$

(3) 法蓝盘应力:

$$\text{径向 } \sigma_1^r = \frac{6}{\delta_1^2} (M_0 - 0.5 \delta_1 Q_0); \quad \sigma_1^r = \frac{Q_0}{\delta_1} + p$$

$$\text{径向应力} \quad \sigma_{r,\max} = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (\text{kPa}) \quad (14-11)$$

径向应力在法蓝盘与管连接面外缘为压应力。

$$\begin{aligned} \text{圆周向 } \sigma_1^\theta &= \sigma_1^r + \frac{0.8}{\delta_1^2 (D_1^2 - D_2^2)} \left[ 0.447 F_s (D_1^2 - D_2^2) + D_1^2 \right. \\ &\quad \times \left. \left( -1.49 F \ln \frac{D_1}{D_2} + 7.5 \delta_1 Q_0 - 15 M_0 \right) \right] \\ \sigma_1^\theta &= \frac{\delta_1^2}{4 \delta_2^2} T_1 (Q_0 + \delta_1 p) \end{aligned}$$

$$\text{周向应力} \quad \sigma_{\theta,\max} = \sigma_1^\theta + \sigma_2^\theta \quad (\text{kPa}) \quad (14-12)$$

此应力在与钢管连接面的内缘为拉应力。

$\sigma_x$ 、 $\sigma_{r,\max}$ 、 $\sigma_{\theta,\max}$ 应该小于容许应力值。

## 第二节 伸 缩 节

### 一、伸缩节构造及形式

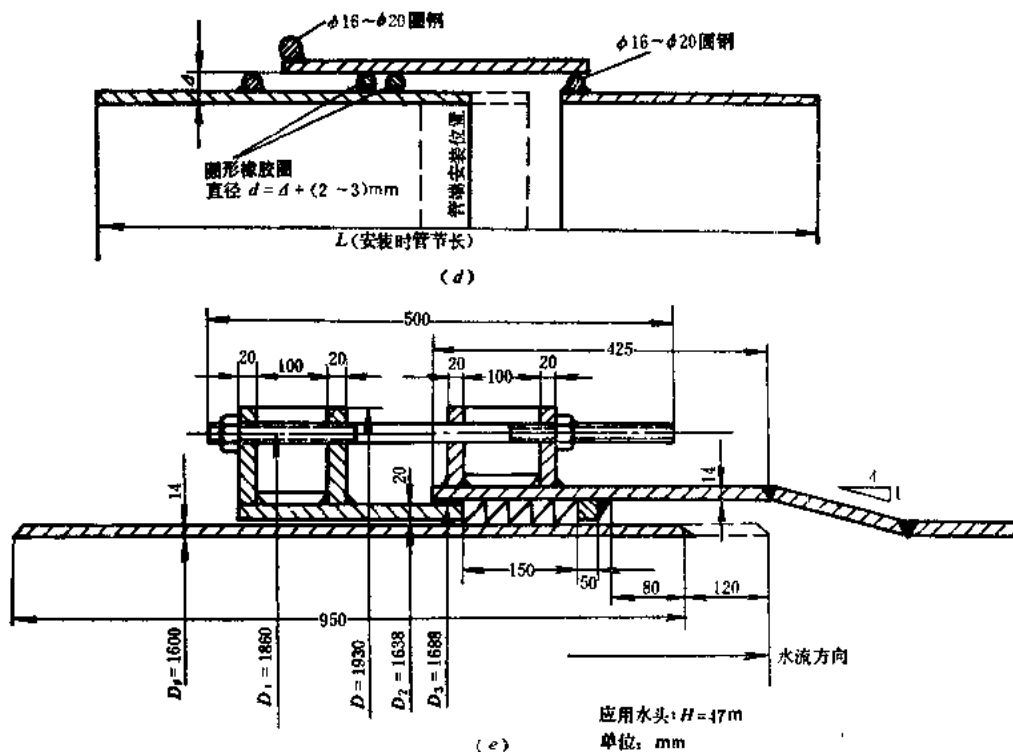
《规范》(SD144-85)中第2.2.4条指出:“明管宜做成分段式。转弯处设有镇墩,其间钢管用支墩支承。两镇墩间设有伸缩节。伸缩节宜设在镇墩下游。”

伸缩节结构随管径和设计内水压力以及布置的具体条件,有多种形式,如图14-4所示。国内小水电建设中广泛应用套管式(承插式)伸缩节。国外还采用过折皱式及盘状伸缩节,这两种伸缩节结构对钢的材质要求高,制作难度大,国内水电建设中很少采用。

套管式伸缩节为适应多种工作条件,也有不同的结构形式(图14-4),其中图(a)为单作用伸缩节,用于一般仅有温度变形的条件下;图(b)为双作用伸缩节,除适应温度变







形以外,还允许前后管轴有 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 的角变位,以适应支承墩体可能发生的沉陷变形。图(c)专门为沉陷较大的钢管所设计的伸缩节,结构十分复杂,内套管插入端,还有球面段,使止水填料不致因角变位而失效,球面的弦长及曲率由比较确切的变形量计算确定,钢管的回转中心不一定与管轴重合,要根据估算的变形情况而定。图(d)为使用O型橡胶圈做止水材料的伸缩节,结构比较简单,O型胶圈预压 $2\sim 3\text{mm}$ ,就可以有效止水,在广东省一些小水电站中,压力钢管采用这种伸缩节结构,设计水头可达 $60\text{m}$ 以上。图(e)为组合法蓝的伸缩节结构形式,法蓝由两个厚度不大的圆环及固定于环间的肋板组成。适用于《HD》值较大,标准法蓝盘厚度太大,材料供应、或制作条件受限制的情况下。图14-5为折皱式及盘形伸缩节。

## 二、伸编节的结构尺寸拟定

伸缩节由外套管、内套管、调压圈、止水填料(盘根)、填料盒档圈、调压螺栓和螺母组成(图14-6)。

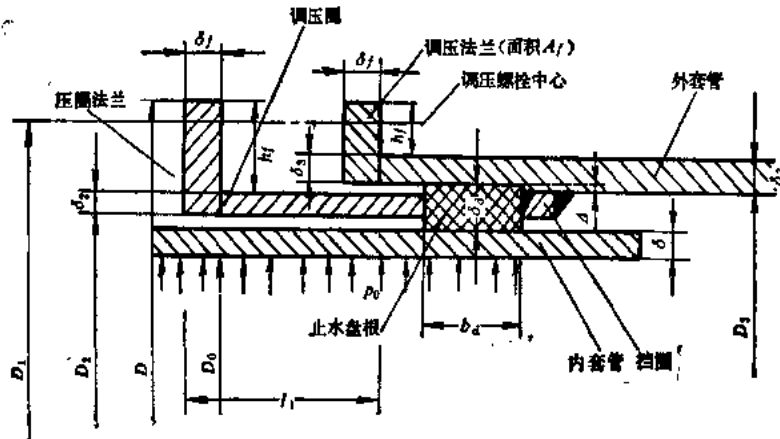


图 14-6 伸缩节几何特征

### (一) 止水填料

止水填料用方断面或圆断面橡胶圈；浸（煮）牛油或4号钙基脂的石棉绳、麻绳、橡皮蕊麻绳。计算水头低于100m时，可用橡皮圈或油浸麻绳，较高水头时，也有在麻类填料两端加设橡胶绳，形成橡胶-油麻混合型止水填料。填料一般4~6圈，填料盒孔隙10~20mm。

填料有标准成品，一些小水电站在建设中也常自行制备。下列各表给出填料成品。

### 1. 油浸石棉盘根 (表14-9)

表 14-9

牌号: YS250

形 状	符 号	直径或方形断面边长 (mm)	规格公差范围(mm)		每卷重量 (kg)
			直径或边长	公 差	
方的——穿心或一至多层编结	F	10、13、16、19、22、 25、28	3~5 6~10	±0.3 ±0.4	≤25
圆的——中间是扭制芯子，外边是一至多层编结	Y	10、13、16、19、22、 25、28	13~16 19~25	±0.6 ±0.8	

## 2. 橡胶石墨盘根 (表14-10)

### 3. 方圆形橡皮条盘根 (表14-11)

盘根橡胶的物理机械性能要求如表14-12所示。

#### 4. 油浸棉、麻盘根 (沪Q/JB116-62)

### 5. 橡胶螺旋盘根

101型——吸有润滑油或稠油，外表敷有鳞状石墨。

表 14-10

牌号: XS250

边 长 (mm)	公 差 (mm)	外 形	长 度
10	$\pm 0.4$	卷成螺旋状或圆盘形, 螺旋的内径大于盘根规格 4 倍	每根为 3.5~4m, (允许有不短于 1m 的短段)
13、16	$\pm 0.6$		
19、22、25	$\pm 0.8$		

表 14-11

方 圆 橡 皮 条 (沪Q/HG16-019-63)

圆 形	直 径	尺 寸	12	14	16	20	25	30	
	(mm)	允许公差	±0.50			±1.0			
	长 度 (m)		不低于 5			不低于 5			
方 形	边 长	尺 寸	13×13		16×16		20×20		25×25
	(mm)	允许公差	±0.5			±0.75			
	长 度 (m)		不低于 5						

表 14-12

盘 根 橡 胶 的 物 理 机 械 性 能

	指 标 名 称	普 通 方、圆 条	耐 油 方、圆 条
1	扯断力(kPa)不小于	2943	2943
2	伸长率(%)不小于	250	200
3	永久变形(%)不大于	50	40
4	邵氏硬度	16mm以上的	75±5
		16mm以下的	65±5
5	老化系数70℃×72h, 不低于	0.7	—
6	在室温下浸汽油48h后重量, 体积变化不大于	—	10%
7	在室温下浸机油48h后, 重量、体积变化不大于	—	5%

表 14-13

尺 寸 及 允 许 公 差

正方形边长(mm)	3、5	6、8、10	13、16	19、22、25	28、32
允许公差(mm)	$\pm 0.3$	$\pm 0.4$	$\pm 0.6$	$\pm 0.8$	$\pm 1.0$

102型——未吸油、不涂石墨。适用工作温度 0~80℃。

## (二) 填料盒挡圈

填料盒指填置止水填料的空腔, 由内、外套管及挡圈形成。外套管内圆焊接一个圆环形成了挡圈, 这种形式应用十分广泛。

表 14-14

性 能 指 标

技术 指标	型号及名称	M200 油浸棉盘根	M160 油浸麻盘根
容重(N/cm <sup>3</sup> )		$8.8 \times 10^{-3} \sim 12.74 \times 10^{-3}$	$8.8 \times 10^{-3} \sim 12.74 \times 10^{-3}$
耐温度极限(°C)		100	100
耐压力极限(kPa)		19620	15696
吸水率不大于		30	30
含浸渍油脂的重量(%)不小于		35	35

表 14-15

螺旋盘根尺寸 (沪Q/HG16-091-64)

截面宽×高(mm)	允 许 公 差	长 度 ≥(mm)	每条理论重量(kg)
10×10	±0.7	3040	0.4~0.6
11×11	±0.7	2800	0.456~0.57
13×13	±1.0	3360	0.76~0.95
11×14	±1.0	3200	0.8~1.0
16×16	±1.0	3480	1.2~1.5
19×19	±1.5	3600	1.68~2.1
22×22	±1.5	3600	2.36~2.95

挡圈顺管轴向长30~40mm,两端面均用连续焊缝满焊。靠内套管的一面宜车圆,有条件时,最好连同填料盒作喷镀防锈金属膜处理。挡圈内缘与内套管的间隙一般控制在2~3mm之内,有适应沉陷要求的双向伸缩节,间隙可放宽,但亦不宜过大,以防止填料被挤出。

### (三) 外套管

#### 1. 外套管在管轴向的长度

顺管轴向,外套管的长度包括法蓝及套管局部变形段,填料盒结构段,温度变形裕量段以及连接钢管的过渡段。

法蓝及套管局部变形段的长度,一般不少于法蓝厚及管壁变形弹性线半波长之和,即

$$L_1 \geq \delta_f + 1.732 \sqrt{D_s \delta_s} \quad (14-13)$$

式中  $\delta_f$ ——法蓝厚度;

$D_s$ ——套管平均直径;

$\delta_s$ ——套管壁厚。

填料盒结构段长由填料采用圈数及填料截面尺寸确定,一般为40~100mm。

温度变形裕量段是给内套管因温度变化增长、缩短时预留的空间,此段的长度  $L_2$  由下式估算:

$$L'_2 = \alpha L (T_{\max} - T_{\min}) + C \quad (14-14)$$

式中  $\alpha$ ——钢的线胀系数,  $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$ ,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$L$ ——伸缩节到固定此段钢管的镇墩之间的钢管长。如伸缩节设置在两相邻镇墩的中间, 则  $L$  应是此两镇墩间钢管长;

$T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ ——设计钢管所采用的最高计算温度和最低计算温度, 运行期水温变化幅度一般比较小, 检修期或管内满水停机时, 温度变化可能起控制作用。缺乏实际资料时  $T_{\max}$  可按  $60^\circ\text{C}$  计,  $T_{\min}$  可按  $4.5^\circ\text{C}$  计。高寒地区应采用当地实测数据;

$C$ ——安全裕量, 不宜少于  $40\text{mm}$ 。

过渡段长度与过渡结构形式有关。一般情况下采用锥管将外套管与钢管连接, 锥顶角不超过  $15^\circ$  (见图 14-4 a、e)。过渡结构也有采用在外套管与钢管之间插一节钢管, 此钢管的一端插入外套管, 另一端套在邻接钢管外, 通过焊接成整体。套接的长度不少于管壁厚度的 6 倍。

## 2. 外套管的管壁厚度

外套管的壁厚选择要考虑:

- (1) 填料对外套管压力;
- (2) 法蓝与管壳连接处的变形应力;
- (3) 套管与过渡锥管连接处的局部应力。

止水填料对套管的压力应不小于此伸缩节位置处设计水压力, 一般可用设计水压力的  $(1.25 \sim 1.5)$  倍, 用熟知的锅炉公式拟定壁厚。

法蓝根部的变形应力通过应力校核 (无内水压条件) 确定。对于  $[HD]$  值较小的情况, 套管壁厚先由垫料压力拟定, 通过法蓝根部应力校核就可以满足。对于  $[HD]$  值比较大的情况, 可适当加厚与法蓝盘连接处的套管壁, 或用长颈法蓝的形式 (图 14-5 a)。

外套管与后部邻接的锥形过渡段连接处存在局部应力。《规范》(SD144-85) 的附图 4.2.5 给出应力集中系数参考曲线, 可以在先行拟定管壁厚度基础上, 计入应力集中系数进行核算。

初拟外套管壁厚时可用下式估算:

$$\delta_s = \frac{(1.1 \sim 1.25)pD_s}{0.85[\sigma]\phi} + C \quad (14-15)$$

式中  $p$ ——所设计伸缩节处的设计内水压力;

$D_s$ ——外套管平均直径, 近似以内径代替;

$[\sigma]$ ——容许应力。止水填料段用  $[\sigma] = 0.5\sigma_s$  计算;

$\phi$ ——焊接系数,  $\phi = 0.9 \sim 0.95$ ;

$C$ ——锈蚀裕量, 取  $C \approx 2\text{mm}$ 。

当内壁管需要在车床上车圆时, 所选择的钢板厚度要计入加工裕量, 一般为  $1 \sim 2\text{mm}$ 。

#### (四) 内套管

内套管就是钢管插入外套管的部分。长度包括填料盒段长、温度变形裕量段长以及自填料端至邻接钢管焊缝间的长度。温度变形裕量段长同外套管，应满足温度下降时内套管不致滑出填料段范围。填料盒端至邻接钢管焊缝之间的长度应不少于  $(400 + L_1)$  mm,  $L_1$  为调压圈长 (见图14-6)。

内套管的壁厚比邻接钢管壁厚增加10%~15%。当相邻钢管壁厚由构造要求确定 (外压稳定要求或最小管壁厚度) 时，内套管壁厚不必另外加厚，也即可采用与钢管相同壁厚。

#### (五) 调压圈

调压圈一端设调压法蓝，另一端顶住止水填料 (图14-6)，实际是一节短管。管的长度不少于  $2.45\sqrt{R_2\delta_2}$ ，其中： $R_2$  为调压圈的平均半径，可近似取内半径； $\delta_2$  为壁厚。同时要求调压圈法蓝盘面与外套管法蓝盘面之间保持  $(100 \sim 120)$  mm 的间距，以方便调节对止水填料的压力和调节螺栓帽的操作。

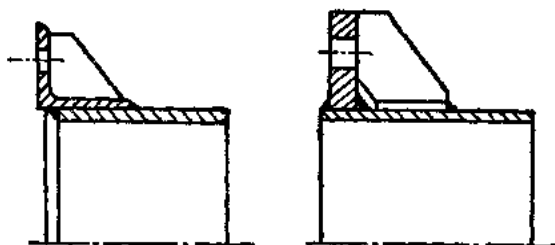


图 14-7 加肋板的平焊法蓝

调压圈厚度由调压法蓝根部应力要求和内外套管的空隙决定。厚度应比内外套管的间隙小  $(2 \sim 3)$  mm。当法蓝根部应力比较大时，可改平焊法蓝为长颈对接法蓝，或平焊法蓝后加肋板 (图14-7)。管径比较大，法蓝盘材料受限制时，常采用

带组合法蓝的结构形式 (图14-8)。

表10-4中给出的若干小水电站采用伸缩节尺寸资料，可供拟定尺寸时参考。

对于水头高、直径小的电站钢管，伸缩节结构采用铸铁或铸钢件，可能更经济，加工后尺寸的精度 (图14-4 a、b) 能较好满足要求。

### 三、法蓝螺栓及其应力校核

伸缩节法蓝不同于管法蓝，它不承受内水压力，且一般情况下属非标准法蓝。法蓝形式及尺寸可自行拟定 (见前节非标准法蓝尺寸拟定)，也可参照标准法蓝系列尺寸拟定，但应采用最小标准内压力等级。

#### 1. 法蓝荷载

调压圈及外套的法蓝仅受压紧止水填料所需要旋紧螺栓力和内外套管因温度变化发生相对位移时填料与内套管壁的摩擦力。

一根螺栓给法蓝的力  $F_b$  为

$$F_b = 1.25p(\delta_a B_a + b_a B_a f) \quad (14-16)$$

式中  $p$  ——包括水击压力在内的伸缩节处设计内水压力；

$\delta_a$  ——填料厚度 (图14-6)；

$b_a$  ——填料长度；

$B_a$  ——螺栓间距，螺栓根圆周向，由螺栓中心圆周长除螺栓根数求得；

$f$  ——填料与管壁的摩擦系数。对橡胶， $f = 0.4$ ，对油浸麻类， $f = 0.3$ 。

法蓝单位周长所受的作用力 $F'$ 由下式计算:

$$F' = F_0 / B_0 \quad (14-17)$$

$$F' = \frac{Z A_0 \sigma_0}{\pi D_2} \quad (14-18)$$

在两式中取大值。

式中  $Z$  —— 调压螺栓根数;

$A_0$  —— 每根螺栓的根部面积;

$\sigma_0$  —— 每根螺栓的屈服极限值;

$D_2$  —— 调压圈内直径 (图14-6)。

## 2. 法蓝根部内力及应力计算

调压圈法蓝单位周长上受力 $F$ 作用后, 根部弯矩 $M$ , 由下式计算:

$$M_0 = M_1 \frac{1}{1 + \frac{\beta \delta_1}{2} + \frac{2.3026}{\beta D_2} \left( \frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^3 \lg \left( 1 + \frac{2h_1}{D_2} \right)} \quad (14-19)$$

式中  $M_1$  —— 为沿法蓝周长分布的单位周长弯矩,

$$M_1 = F' \left( \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} - \frac{\delta_2}{2} \right);$$

$$\beta = \frac{1.282}{\sqrt{R_2 \delta_2}}, \quad \text{其中 } R_2 = \frac{D_2}{2};$$

$\delta_2$  —— 压圈在法蓝根部的厚度;

$D_2$  —— 压圈内径;

$\delta_1$  —— 法蓝厚度;

$h_1$  —— 法蓝盘高度。

法蓝根部还同时产生剪力 $Q_0 = \beta M_1$ , 此处较小, 一般可忽略。

法蓝根部的弯曲应力为:

$$\sigma_1 = \pm \frac{6M_1}{\delta_1^2} \quad \left( \begin{array}{l} \text{管内壁为+，受压} \\ \text{管外壁为一，受拉} \end{array} \right) \quad (14-20)$$

根部压应力为:

$$\sigma_2 = - \frac{F'}{\delta_2} \quad (14-21)$$

根部最大应力

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (14-22)$$

最大应力应不超过材料在受弯情况下的允许应力。

外套管法蓝高度 $h_1$ 小于调压圈的法蓝高度, 在外套管的法蓝根部壁厚不少于调压圈管壁厚情况下, 采用同调压圈法蓝盘材料及厚度, 根部应力可以不进行校核。

## 3. 组合法蓝

由两个较薄的法蓝盘焊于管端, 中间用肋板加以固定的组合型法蓝 (双法蓝) 形式, 用以代替很厚的平焊法蓝盘, 在大口径伸缩节结构中有较大实用性, 但在计算应力的方法上



还不够成熟,作为一种近似的计算方法在小水电伸缩节计算中可以采用。据有关文献<sup>●</sup>介绍这种法蓝的尺寸符号如图14-8所示。其计算方法如下:

调压圈根部单位周长上作用的弯矩 $M_0$ 由下式计算:

$$M_0 = \frac{F'(r_1 - r_2 - 0.5\delta_2)}{1 + \frac{b(1+2\delta_1)}{2} + \frac{(-\mu^2)(6b^2\delta_1 + 12b^2\delta_1^2 + 8\delta_1^3)\ln(1+h_1/r_2) + b^3\delta_2/2r_2}{2Br_2\delta_2^3}} \quad (14-23)$$

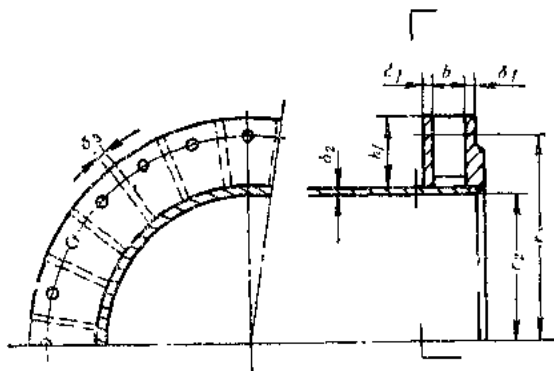


图 14-8 带组合型法蓝的调压圈

式中  $r_1$ ——螺栓中心圆半径;  
 $r_2$ ——调压圈内半径;  
 $\delta_2$ ——调压圈管壁厚度;  
 $\delta_1$ ——单片法蓝厚度;  
 $\mu$ ——钢材泊桑比;  
 $b$ ——两片法蓝盘的间距;  
 $h_1$ ——法蓝的高度。

求得根部弯矩后,应力数值仍利用式(14-20)、式(14-

21)、式(14-22)计算。

外套管的法蓝可采用调压圈法蓝相同的厚 $\delta_1$ 及盘距 $b$ 。

#### 4. 调压螺栓

调压螺栓采用双头螺栓。螺栓强度应按低于法蓝强度的要求进行设计,以增加法蓝的安全度。

由式(14-16)计得螺栓应承受的力 $F_0$ 后,参照标准管法蓝螺栓根数,由式(14-24)计算每根螺栓应有的根部面积 $A_0$ ,即

$$A_0 = \frac{F_0}{Z \cdot \sigma_0} \quad (14-24)$$

小水电中,螺栓材料常用A3,  $\sigma_0 = 2400 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

如果算得的螺栓直径过细,可先选用标准螺栓,调整螺栓根数 $Z$ ,但螺栓间距 $B$ ,不宜大于螺栓直径的12倍。

#### 四、组合法蓝的结构要求

组合法蓝的两片法蓝盘之间设肋板,肋板沿圆周等距分布。由于组合法蓝的应力分析系根据铁木辛柯的圆环扭转原理导出<sup>●</sup>,因此肋片应保证两片法蓝盘变形同步。肋片数宜于不少于螺栓根数,同时要求不影响搬手转动螺帽所需要的空间。肋片厚度不小于法蓝盘间距的 $\left(\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10}\right)$ 。

● 《双法蓝压圈的应力计算》,长江流域规划办公室刘奕光,1982年4月。

● 《材料力学》,铁木辛柯。

法蓝盘厚度可近似以两片肋板间盘的扇形面积按三边固定一边自由的板, 受一根螺栓的集中荷载时所需要的厚度确定。但不少于根部壁厚的(1.5~2)倍。

### 第三节 钢管检修孔

#### 一、检修孔构造

检修孔(进入孔)用于钢管内部检查维护。钢管上开孔, 焊接颈管, 颈管端部设密封盖板。盖板与颈管用法蓝连接(图14-9)。

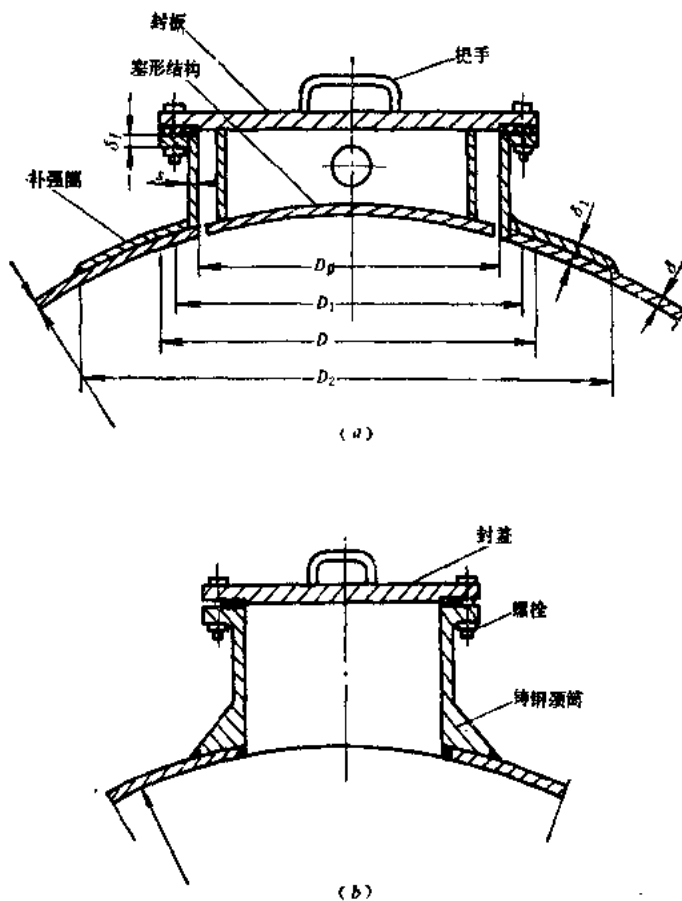


图 14-9 进入孔结构

(a)焊接颈筒进入孔; (b)铸造颈筒进入孔

图14-9(a)是焊接件组成的检修孔结构, 图14-9(b)表示颈管是铸钢件。封盖下部设有一个导流塞, 塞下部有轮廓与被割去的管壳部分相似的钢板, 通过这种结构来减少水头损失。导流塞内外水压平衡。

图 14-10 是一段凑合管节。当管径小, 水压力不高时, 在钢管的合适位置布置这种管节, 可以代替进入孔, 但实用上不如检修孔运行方便。

检修孔的净孔直径不少于  $D_k = 450\text{mm}$ , 钢管开孔的周围用补强圈加强。铸钢做成的

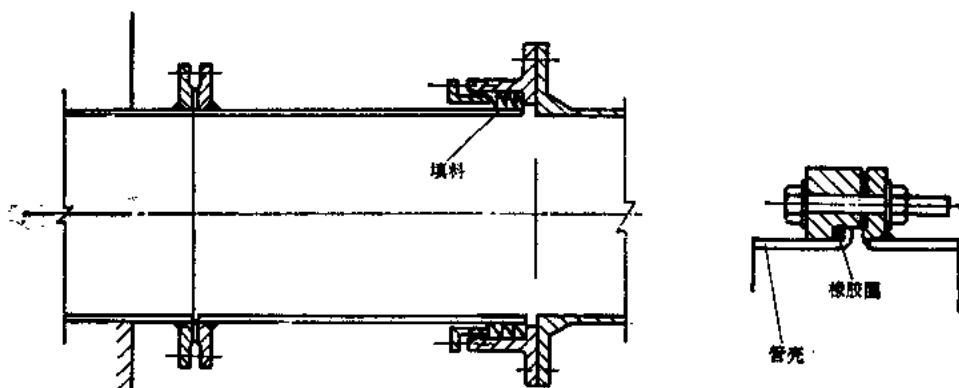
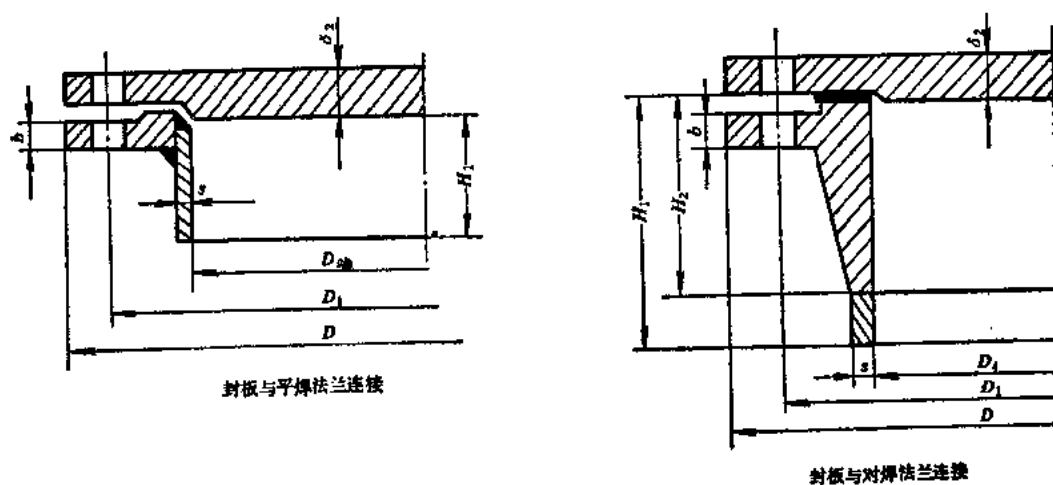


图 14-10 可拆卸的湊合管节结构

表 14-16

检修孔系列尺寸 (材料: 16Mn)



法兰形式	公称压力 $P_r$ (kPa)	公称直径 $D_k$ (mm)	$D$	$D_1$	$\delta_f$	$s$	$\delta_s$	$H_1$	$H_2$	螺 栓		总 重 (kg)
										数量	直径×长度	
平 焊 法 兰	245.25	450	565	525	20	6	20	270	—	20	M16×60	76.5
		500	615	575	20	6	22	270	—	20	M16×60	91.5
	588.6	450	570	530	22	6	22	270	—	20	M16×65	83
		500	630	585	26	6	26	270	—	20	M20×75	111.5
	981	450	595	545	32	8	32	270	—	20	M22×90	123.5
		500	650	600	32	8	32	270	—	20	M22×90	146
	1569.6	400	570	515	34	10	36	270	—	12	M27×100	137
		450	620	565	38	10	38	270	—	16	M27×100	167
对焊 法兰	2452.5	400	610	550	44	14	42	270	115		M30×160	204
		450	660	600	46	14	48	270	115		M30×165	265

颈管下部有锥形过渡段, 因此钢管开孔周围不必设置补强圈。

## 二、检修孔尺寸系列

压力钢管检修孔结构可套用压力容器的检修进入孔尺寸系列, 表 14-16 中列出这个系列的技术数据。

表 10-5 中列出国内若干小水电站钢管中曾采用过的检修孔技术数据, 可供设计套用。

## 三、钢管管壳补强

补强圈焊在孔周管壳外缘, 圈面弯曲, 曲率同钢管外壳, 内缘与颈管外壁焊接。在补强圈采用厚度与管壁相同时补强圈外径  $D_2$  (图 14-9a) 由下式决定:

$$D_2 = 2D_k - 4\sqrt{D_k(\delta - kD_k)} \quad (14-25)$$

式中  $k = \frac{p}{2[\sigma] - p}$ ;

$p$  —— 钢管检修孔位置的设计水压力;

$[\sigma]$  —— 材料在正常工作条件下的容许应力;

$D_k$  —— 颈管内径;

$D_s$  —— 钢管内径;

$\delta$  —— 钢管开孔处壁厚。

当补强圈厚度  $\delta_2$  与钢管壁厚  $\delta$  不相同, 补强圈外径  $D_2$  用下式计算:

$$D_2 = \frac{\delta}{\delta_2} \left[ D_k - D'_k + 2\delta_k + \frac{\delta_2}{\delta} (D_k + 2\delta_k) \right] \quad (14-26)$$

式中  $D_k$  —— 可以不进行补强的小孔口允许直径,  $D'_k = 8.1\sqrt{D_k\delta\left(1 - \frac{kD_k}{\delta}\right)}$ ;

$\delta_k$  —— 颈管壁厚;

$\delta_2$  —— 补强圈厚度;

其余符号意义同式 (14-25)。

确定  $D_2$  后, 可按下式初步判断拟定的  $D_2$  及  $\delta_2$  能否满足要求。

$$\varphi\delta_2(D_2 - D'_k - \delta_k) \geq \delta(D_k + \delta_k) \quad (14-27)$$

式中  $\varphi$  表示焊接系数,  $\varphi = 0.9$ ; 其余符号意义同前式。

补强圈材质一般宜与母管材质相同, 避免变形时或焊接时的局部应力。

## 四、检修孔盖板、颈管法兰及螺栓

检修孔盖板宜采用标准系列, 材料可用铸钢或厚钢板, 法兰垫片范围的加工粗糙度一般用  $(8 \sim 16) \mu\text{m}$ 。

导流塞不承受水压力, 可用 6mm 钢板制作。塞体分两部分, 即短管及代替割去管壳部分的弯曲板, 两者焊成整体 (图 14-9a), 固定在封盖底部。水压力较小时, 封盖重量不大, 导流塞与封盖焊成整体, 一般不会给开启封盖造成困难。当水压力很大, 封盖重量大。结构处理上尽量采用设在封盖一侧的铰链形式, 封盖重量由铰传给颈管, 这种情况下, 导流塞如果焊在封盖上, 则颈管应该尽量短, 但不少于 300mm, 导流塞与颈管间要有足够空隙, 以便在封盖绕铰转动时, 塞体与颈管避免碰撞。

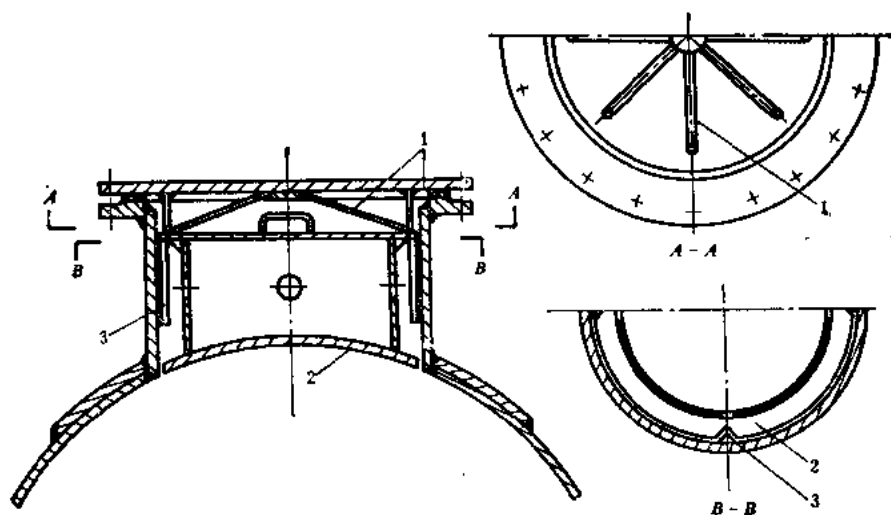


图 14-11 活动式导流塞进人孔结构  
1—锁定架；2—导流板；3—支承角钢

图 14-11 中的导流塞与封盖分离，单独支承在颈管的 4 个托架上。导流塞比较轻，易于在打开封盖后取出。

颈管法蓝及螺栓设计一般宜采用标准系列。特殊情况下需要非标准件时，按本章第一节非标准管法蓝设计方法进行。

颈管高度（自钢管顶部算至法蓝面的距离）不少于 300mm。颈管壁厚取决于：

- (1) 设计水压力作用的环拉应力；
- (2) 端部法蓝盘根部变形应力；
- (3) 基部与钢管连接处的变形应力；
- (4) 法蓝盖板水压力形成颈管轴向拉应力。

颈管厚度在设计内水压力时需要的壁厚用锅炉公式计算，一般均比钢管小，但不应小于 6 mm。颈管端面的法蓝根部应力分析按本章第一节中非标准法蓝应力分析公式进行核算。

颈管与钢管连接处的应力计算，按在设计内水压力下颈管变形与钢管开孔后孔壁变形相容的原理，以弹性力学方法计算<sup>①</sup>。近似计算可用下列方法进行。

设检修孔后，钢管展开后的孔近似为椭圆。钢管的环向应力在开孔前为  $\sigma_s$ ，按锅炉公式  $\sigma_s = \frac{pD_s}{2\phi[\sigma]}$ ，开孔后，最大应力在椭圆长半径的顶部，此处应力为：

$$\sigma_{\max} = \alpha \sigma_s$$

$$\alpha = \frac{1 + \rho \left( 2.57 + \frac{D_s}{D_t} \sqrt{\frac{2\delta_s}{D_s}} \right)}{1 + \rho \frac{\delta_s}{(\delta_s + \delta)} \sqrt{\frac{2\delta_s}{D_s}}}$$

① 《压力钢管》，潘家铮编著，科学技术卫生出版社，1958年第8版。

式中  $\rho = \frac{D_k}{D_s} \sqrt{\frac{D_s}{2\delta}}$ ;

$D_k$ ——颈管内径;

$\delta_k$ ——颈管壁厚度;

$\delta_s$ ——加强圈厚度;

$\delta$ ——钢管壁厚度;

$D_s$ ——钢管内径。

计算得到的孔壁最大应力  $\sigma_{max} \leq 0.67\sigma_s$ , 即钢材屈服极限  $\sigma_s$  的 0.67 倍。此近似计算式适用于  $\frac{D_k}{\delta} \geq 10$ 、 $\frac{D_k}{D_s} \geq 0.25$  条件下。

## 第四节 阀 头

钢管在下列情况时管端需要用阀头:

- (1) 钢管已安装就位, 发电机组分期安装, 用阀头封住没有机组的钢管端部;
- (2) 钢管分段进行水压试验。

### 一、阀头形式

阀头形式根据钢管的直径及水压力选用。常见的阀头几种形式 (如图 14-12 所示) 叙

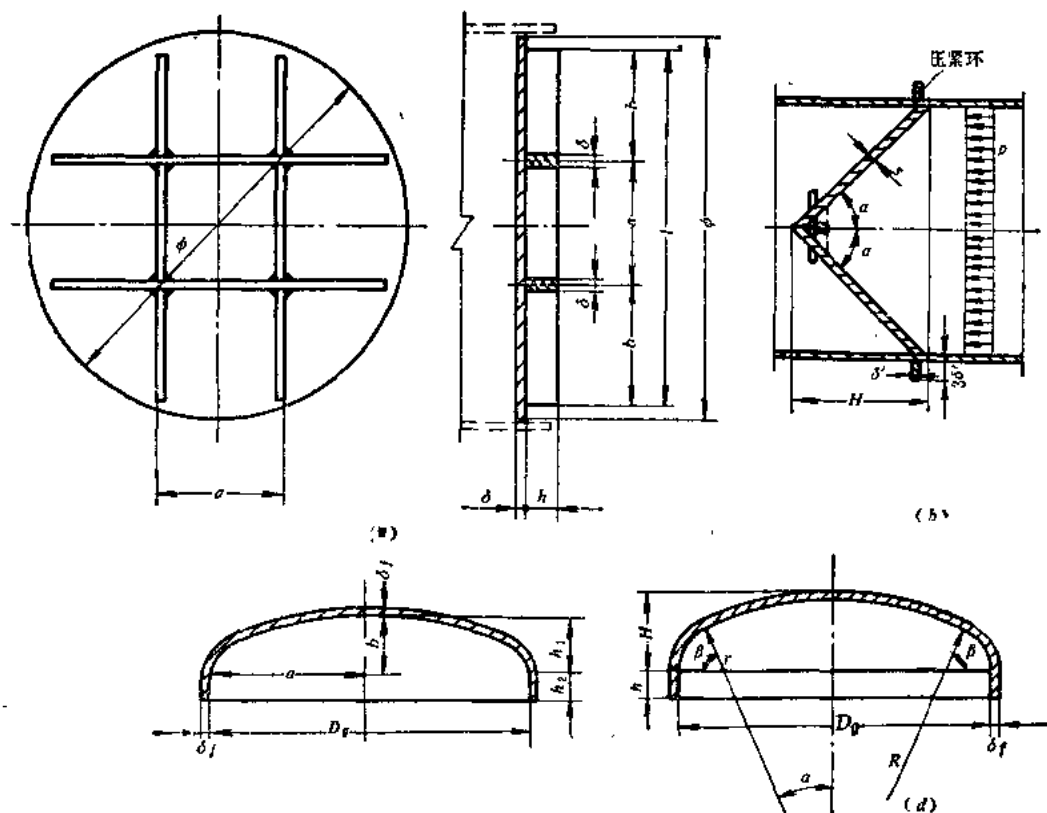


图 14-12 阀头的几种形式

表 14-17

有肋平板闷头的典型设计资料

编号	名称	规格 (直径×厚度) (长×高×宽)	单位	数量	材料	重量 (kg)		闷头 外径 D (mm)	闷头及 肋条厚 度δ (mm)	肋条 长度 l (mm)	肋条间距 (mm)		试 验 压 力 (kPa)	适用的 管壁厚 度 (mm)	闷头焊 入管端 深度h (mm)
						单重	总重				a	b			
p=245.25kPa φ450(mm)															
1	圆板	φ464×7	个	1	A3	9.31	9.31	464	7		150	140	392.4	6	45
2	肋条	430×45×7	根	4	A3	1.085	4.26			430					
p=245.25kPa φ500(mm)															
1	圆板	φ515×8	个	1	A3	13.06	13.06	515	8		168	156	392.4	6	45
2	肋条	480×45×8	根	4	A3	1.36	5.42			480					
p=245.25kPa φ600(mm)															
1	圆板	φ614×9	个	1	A3	20.9	20.9	614	9		198	186	392.4	7	55
2	肋条	570×55×9	根	4	A3	2.21	8.86			570					
p=245.25kPa φ700(mm)															
1	圆板	φ704×10	个	1	A3	30.5	30.5	704	10		224	213	392.4	7	65
2	肋条	650×65×10	根	4	A3	3.32	13.28			650					
p=245.25kPa φ800(mm)															
1	圆板	φ802×11	个	1	A3	43.6	43.6	802	11		258	246	392.4	8	70
2	肋条	750×70×11	根	4	A3	4.53	18.1			750					
p=245.25kPa φ900(mm)															
1	圆板	φ902×12	个	1	A3	60.16	60.16	902	12		274	263	392.4	8	80
2	肋条	800×80×12	根	4	A3	6.016	24.04			800					
p=245.25kPa φ1000(mm)															
1	圆板	φ1000×13	个	1	A3	8.00	8.00	1000	13		320	310	392.4	9	95
2	肋条	940×95×13	根	4	A3	9.09	36.4			940					
p=245.25kPa φ1200(mm)															
1	圆板	φ1200×15	个	1	A3	13.3	13.3	1200	15		380	370	392.4	9	110
2	肋条	1120×100×15	根	4	A3	14.5	58.0			1120					

续表

编号	名称	规格 (直径×厚度) (长×高×宽)	单位	数量	材料	重量 (kg)		网头 外径 D (mm)	网头及 肋条厚 度δ (mm)	肋条 长度 l (mm)	肋条间距 (mm)		试 验 压 力 (kPa)	适用的 管壁厚 度 (mm)	网头焊 入管端 深度h (mm)
						单重	总重				a	b			
p=588.6kPa φ450(mm)															
1	圆板	φ464×10	个	1	A3	13.2	13.2	464	10		150	140	981	6	60
2	肋条	430×60×10	根	4	A3	2.02	2.10			430					
p=588.6kPa φ500(mm)															
1	圆板	φ515×11	个	1	A3	17.98	17.98	515	11		168	156	981	6	65
2	肋条	480×65×11	根	4	A3	2.69	10.77			480					
p=588.6kPa φ600(mm)															
1	圆板	φ614×13	个	1	A3	30.18	30.18	614	13		198	186	981	7	75
2	肋条	570×75×13	根	4	A3	4.36	17.4			570					
p=588.6kPa φ700(mm)															
1	圆板	φ704×14	个	1	A3	42.7	42.7	704	14		224	213	981	7	90
2	肋条	650×90×14	根	4	A3	6.42	25.7			650					
p=588.6kPa φ800(mm)															
1	圆板	φ802×16	个	1	A3	63.36	63.36	802	16		258	246	981	8	95
2	肋条	750×95×16	根	4	A3	8.94	35.8			750					
p=588.6kPa φ900(mm)															
1	圆板	φ902×17	个	1	A3	85.14	85.14	902	17		274	263	981	8	110
2	肋条	800×110×17	根	4	A3	11.7	46.9			800					
p=588.6kPa φ1000(mm)															
1	圆板	φ1000×19	个	1	A3	116.9	116.9	1000	19		320	310	981	9	120
2	肋条	940×120×19	根	4	A3	16.8	67.2			940					
p=588.6kPa φ1200(mm)															
1	圆板	φ1200×22	个	1	A3	194.9	194.9	1200	22		380	370	981	9	150
2	肋条	1120×22	根	4	A3	29.0	115.9			1120					

注 表中肋条间距 $a$ ,  $b$ 见图14-12(a)。



述如下:

(1) 为通常见的无加劲肋的平板阀头, 适用于管径、水压较小的钢管, 阀头与钢管焊接。管壁厚度与阀头板厚比值较小时, 板与阀头连接处宜加焊劲板。

(2) 为有加劲肋条的平板阀头, 适用于管径较小, 水压力较大的情况下。加劲肋条焊在钢板上, 或者是整体浇铸的铸钢板阀头。

(3) 为锥形阀头, 适用在管径较大, 中等水压情况下。阀头由钢板卷制焊接成形。锥顶处宜开进入孔, 用法蓝与圆盖连接。

(4) 为椭圆形阀头。椭圆的长、短轴比  $\frac{a}{b} = 2$ 。化工部门有定型系列。

(5) 为有两个曲面组成的蝶形阀头, 曲面半径分别为  $R$  和  $r$ 。

## 二、阀头尺寸

### (一) 无肋平板阀头

阀头板厚参照标准法蓝拟定, 直径应大于管外径(20~30)mm, 如有沿圆周分布的劲板, 则按需要加大。

### (二) 有肋平板阀头

已有典型设计资料列于表14-17中。

### (三) 锥形阀头尺寸系列 (JH3010-59)

锥形阀头标记示例如: 无折边锥形封盖  $2\alpha = 90^\circ$ , 内径为 1000mm, 厚度为 6mm 的阀头, 标成: 无折边锥形阀头  $90^\circ D_1 1000 \times 6$  JH3010-59。

锥形阀头尺寸系列如表14-18所示。

表 14-18

锥 形 阀 头 尺 寸 系 列

直 径 $D_1$ (mm)	锥 高 $H$ (mm)	厚 度 $s$ (mm)			
		4	6	8	10
		重 量 (kg)			
400	200	5.7			
500	250	8.8	14.1		
600	300	12.8	19.2		
700	350	17.3	26.1	35	
800	400	22.7	34.2	45.6	
900	450		43.2	58	
1000	500		53.5	71.4	
1200	600		76.6	102	
1400	700		104	138	
1600	800		136	181	
1800	900		173	230	
2000	1000		215	282	
2200	1100			346	430
2400	1200			415	511
2600	1300			480	600
2800	1400			555	694
3000	1500			629	850

(四) 椭圆形闷头尺寸系列 (JB1154-73)

闷头尺寸系列如表14-19所示。

表 14-19

椭圆形闷头尺寸系列

单位: mm

直 径 $D_s$	曲面高度 $h_1$	直边高度 $h_2$	直 径 $D_s$	曲面高度 $h_1$	直边高度 $h_2$	直 径 $D_s$	曲面高度 $h_1$	直边高度 $h_2$
400	100	25	900	225	25	1600	400	50
		40			40	1700	425	25
(450)	112	25			50			40
		40	1000	250	25			50
		50			40	1800	450	25
500	125	25			50			40
		40	1100	275	25			50
		50			40	(1900)	475	25
550	137	25			50			40
		40	1200	300	25			50
		50			40	2000	500	25
600	150	25			50			40
		40	1300	325	25			50
		50			40	2200	550	25
(650)	162	25			50			40
		40	1400	350	25			50
		50			40	2300	575	25
700	175	25			50			40
		40	1500	375	25			50
		50			40	2400	600	25
800	200	25			50			40
		40	1600	400	25	2600	650	25
		50			40			40
						2800	700	40
								50

标记示例: 内径为 800mm, 厚度为 6mm 的椭圆形闷头, 标成:  $D_s 800 \times 6, JB1154-73$ 。

### 三、闷头厚度估算

#### (一) 椭圆形闷头

$$\delta_t = \frac{pD_s}{(4[\sigma]\varphi - p)} \frac{D_s}{2h_1} \quad (14-28)$$

#### (二) 锥形闷头

$$\delta_t = \frac{pD_s}{2\cos\alpha[\sigma]\varphi} \quad (14-29)$$

当锥形闷头的中心角  $2\alpha$  超过按  $\frac{p}{[\sigma]\varphi}$  所对应的  $\alpha^\circ$  时 (表14-20), 则闷头与钢管连接处的管外缘应加焊一个压紧环。

压紧环所需要的面积  $A$  可由下式计算:

表 14-20

锥形闸头的  $\Delta'$  值

$p/[\sigma]\varphi$	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
$\Delta'$	13	18	22	25	28	31

$$A = \frac{p}{[\sigma]\varphi} \left( \frac{D_i^2 \operatorname{tg} \alpha}{8} \right) \left( 1 - \frac{\Delta^\circ}{\alpha^\circ} \right) \quad (14-30)$$

以上三式中:

- $p$ ——设计内水压力;
- $D_i$ ——钢管内径;
- $[\sigma]$ ——钢材容许应力,  $[\sigma] = 0.5\sigma_s$ ;
- $\varphi$ ——焊缝系数,  $\varphi = 0.9 \sim 0.95$ ;
- $h_1$ ——闸头曲面高度 (图14-12);
- $\alpha$ ——锥的半中心角。

## 第五节 通气孔及补气阀

### 一、通气孔及补气阀的设置条件

钢管通气孔应该设在钢管进口的闸门室结构中, 且用在事故工作闸门采用后止水的情况下。断面形式一般为矩形, 电站引用流量很小的情况下, 需要的孔面积较小, 往往采用圆断面埋管形式。

补气阀对所有水电站来说, 并不是一定要装设的设备。它仅在钢管局部位位置的管轴高程接近或高于沿管轴的最小压力示坡线, 并且经过论证, 证明设补气阀比修改管轴高程经济合理时, 才在局部位位置设补气阀, 以防钢管外压失稳。有些高水头水电站的机组和厂内事故阀门之间亦应考虑设置补气阀, 以保证事故阀门紧急关闭时, 阀后钢管的管壳稳定。当钢管平压充水时, 通气孔、补气阀应能充分排气, 不产生喷水。

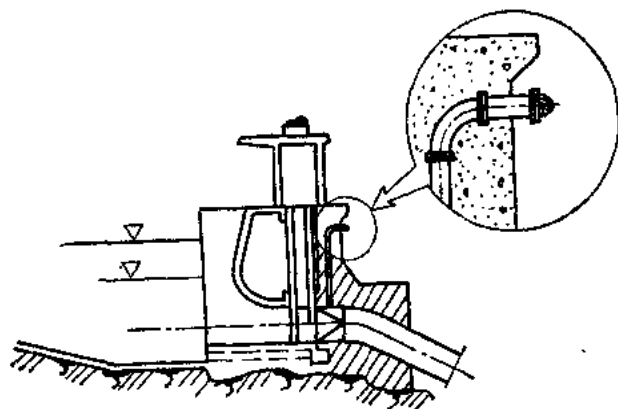


图 14-13 钢管进口通气孔结构

### 二、通气孔、补气阀结构

图14-13中的通气孔(管)设在压力前墙中事故闸门后面的渐变段顶部, 用钢管或铸铁管埋在墙体中, 空气出入口应高出前池中最高壅水位 (0.4~0.6) m, 从闸门平台引出或用弯管在墙的下游缘引出。图14-14为水机厂家提供的定型结构, 可根据管内、外压差

$\Delta p$ 及流量 $Q$ ，查产品目录。

当在闸门平台引出时，出入口应设半球形或平面保护网，以防止杂物或小动物吸入并堵塞孔口。电站引用流量比较大时，孔口面积较大，常用预留矩形通气孔道。当用钢管做通气孔时，管外要设拉锚结构，防止管口万一被堵塞时通气管失稳。

图14-14为国内哈尔滨电机厂提供的补气阀典型结构，作为水轮机设备附件提供。

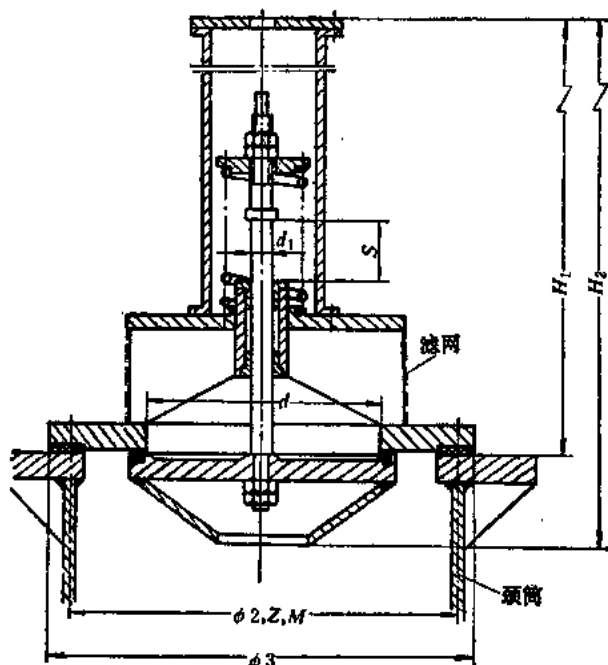


图 14-14 定型化的补气阀结构

### 三、通气孔、补气阀过流面积计算

(一) 按通气量和允许风速确定面积

$$a = \frac{Q_s}{400c\sqrt{\Delta p}} \quad (14-31)$$

式中  $a$ ——通气孔最小面积 ( $\text{m}^2$ )；

$Q_s$ ——正常水头水轮机导水叶全开时的水轮机过流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )；

$c$ ——空气流量系数，一般取  $c=0.6$ ；

$\Delta p$ ——允许通气管内外压力差，要求能承受  $\Delta p=0.2 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

(二) 经验公式确定面积

《水利水电工程钢闸门设计规范》(SDJ13-78)规定中，最小通气孔面积  $a$ ，约为钢管面积的 3%~5%。

美国采用下式计算最小通气孔面积：

$$a = 0.0000361 \left( \frac{P^2 L}{H^2} \right)^{0.546} \quad (14-32)$$

式中  $a$ ——通气孔最小面积 ( $\text{m}^2$ ) ;

$P$ ——机组额定出力 ( $\text{kW}$ ) ;

$H$ ——机组额定水头 ( $\text{m}$ ) ;

$L$ ——通气孔埋管长度 ( $\text{m}$ ) 。

(三)《规范》(SD144-85)建议值

对坝内管, 通气孔面积取管道面积的  $5\% \sim 7\%$ 。对小水电明管的通气孔面积本手册建议适当加大, 以适应明管较长增大防失稳可靠度的要求, 宜不小于钢管面积的  $15\%$ 。

#### 四、通气孔、补气阀的防冻

高寒地区的小水电站, 通气孔、补气阀应很好注意防冰冻措施。通气孔管道中水体在电站运行中处于死水状态, 易于结冰。因此管道周围混凝土体不宜少于  $50\text{cm}$ ; 在上游水位正常变化幅度范围内设电阻加热措施等; 闸室顶部设操作管理房, 避免通气口裸露于大气中。

补气阀不宜设在露天钢管上。一般情况下, 位于厂房水轮机层内的补气阀可不考虑专门的防冻措施。

# 第十五章 钢管支承结构

## 第一节 镇 墩

### 一、镇墩设计内容

镇墩设计内容包括:

- (1) 计算不同工况下镇墩所受的荷载;
- (2) 确定抗滑稳定需要的体积力;
- (3) 根据计算的体积力, 初步拟定镇墩型式、形状和几何尺寸;
- (4) 校核地基承载力, 拟定钢管与镇墩、镇墩与地基间的固结设施;
- (5) 按钢管安装方式、锚固措施来确定镇墩施工分期、架立管道的支架及锚固埋件等构造。

### 二、有关规定及设计参考数据

#### (一) 抗滑稳定安全系数

通常属三、四级建筑物的小型水电站压力钢管, 镇墩抗滑稳定安全系数 $K$ , 按国内经验约为1.3~1.5。设计水头大于200m、管径大于1m时, 按《规范》(SD144-85)第1.0.1条, 可考虑提高钢管设计等级, 此时,  $K$ 宜取大值。

管道设置地区虽有地震, 但防震要求不高, 设计烈度不超过七度时, 按《SDJ10-78》规定, 一般不计地震荷载, 仅采用防震措施。位于地震区, 且设防烈度超过八度, 需要计入地震力时, 抗滑稳定安全系数 $K$ 仍不宜低于1.2。

#### (二) 镇墩与地基的摩擦系数

镇墩与地基的摩擦系数 $f$ , 若无实测资料, 可按地基含水的饱和程度参考表15-1所列数据采用。

表 15-1 土 壤 的 摩 擦 系 数

土 壤 名 称	摩擦系数 $f$	土 壤 名 称	摩擦系数 $f$
卵、砾石	0.5~0.6	粘 土	0.2~0.3
砂 土	0.5~0.6	火 成 岩	0.65~0.7
砂 壤 土	0.35~0.6	石灰岩及砂岩	0.5~0.65
粘 壤 土	0.25~0.35	半岩石类(泥灰岩、泥岩、砂土页)	0.35~0.5

#### (三) 地基应力及容许承载力

镇墩基础应力应满足:

- (1) 任何工况下, 基础应力不超过地基容许承载力;

(2) 任何工况下, 尽量使基础应力分布比较均匀且不允许出现拉应力, 也即基础应力重心不超过基础面积核心范围(长、宽方向的三分点区内);

(3) 基础下地基软弱夹层出露较高时, 容许承载力按软弱夹层取值。

地基容许承载力应由地质勘察部门提出可靠数据。如果缺乏有关资料, 设计镇墩时, 参考表15-2~表15-5所列工业与民用建筑中常用资料, 分析取值。

考虑到水电站镇墩受水流流动时压力脉动(包括水击压力)对地基变形的不利影响, 采用表中数据时, 可适当降低。

表 15-2 岩 基 容 许 承 载 力 单位: kPa

岩石类别	风化程度	微风化	中等风化	强风化
硬质岩石		$\geq 9920$	1470~2450	490~980
软质岩石		1470~1960	680~1176	196~490

表 15-3 碎石类地基容许承载力 单位: kPa

土壤名称	密实度	密实	中实	稍密
卵石	石	784~980	490~784	294~392
碎石	石	686~882	392~686	196~494
圆砾	砾	490~686	294~490	196~494
角砾	砾	392~588	196~392	147~196

注 (1) 表中数据适用于骨架颗粒空隙全部由中砂、粗砂或硬塑、坚硬状态的粘性土所充填的情况下。

(2) 当粗颗粒为中等风化或强风化时, 按风化程度适当降低容许承载力。当颗粒间呈半胶结状态时, 可适当提高容许承载力。

表 15-4 地 基 容 许 承 载 力 单位: kPa

地 基	容 许 承 载 力	地 基	容 许 承 载 力
完整的厚层基岩, 稍有裂隙	极限抗压强度的1/7	带砂土的碎石、砾石土壤	588
节理裂隙发育, 但排列整齐呈砌石状	588~1470	带粘土的碎石、砾石土壤	245~392
泥 灰 岩	245~735	由结晶形岩石形成的砂砾及卵石土壤	490
硅化、粘土	392~588	由沉积岩石形成的砂砾及卵石土壤	294

注 按基本荷载。

表15-4至表15-5中列出水电建设有关文献中的地基容许承载力, 可与表15-2、表15-3对比参考。

表15-2、表15-3和表15-5按文献所载, 均依“基本”荷载取值。

三、镇墩形式及选择

(一) 镇墩形式

1. 按构造形式分类

- (1) 封闭式镇墩 (图15-1);
- (2) 半封闭式镇墩 (图15-2);
- (3) 开敞式镇墩 (图15-3)。

2. 按工作条件分类

- (1) 单管镇墩;
- (2) 多管联合镇墩 (图15-4)。

3. 按建筑材料分类

- (1) 混凝土镇墩或埋石混凝土镇墩;
- (2) 水泥砂浆砌条石或浆砌块石镇墩 (图15-5)。

表 15-5 砂类地基容许承载力 单位:kPa

土壤类型	密实度	
	密实	中实
砾砂及粗砂	441	343
中砂	343	245
稍湿细砂	294	196
湿的及饱和的细砂	245	147
稍湿微砂	245	196
湿砂	196	147
饱和砂	147	98

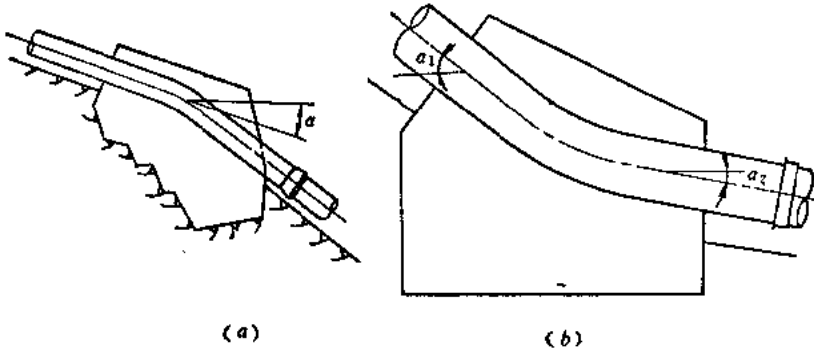


图 15-1 封闭式镇墩形式示意

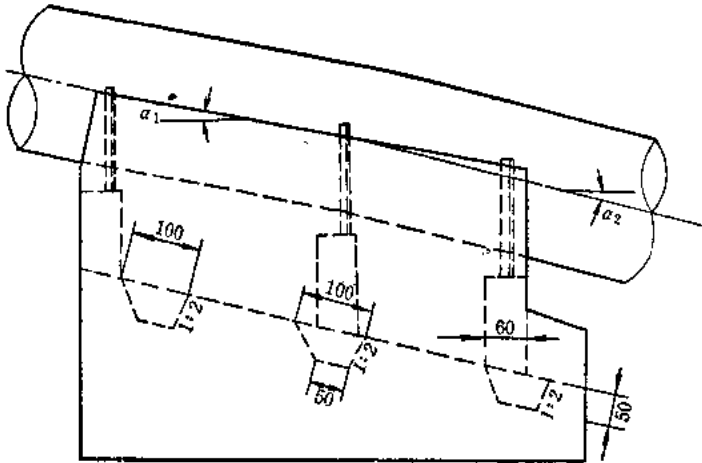


图 15-2 半封闭式镇墩 (单位: mm)

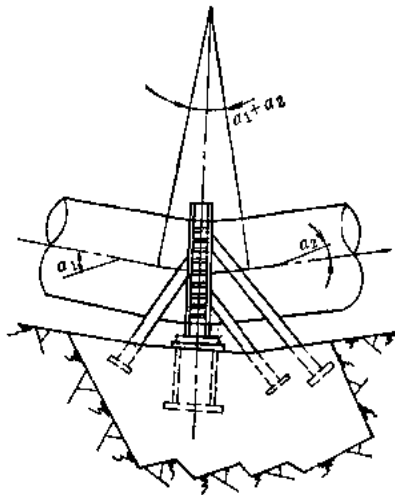


图 15-3 开敞式镇墩



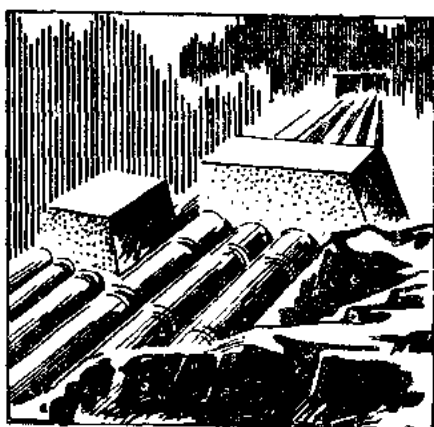


图 15-4 多管联合镇墩

## (二) 镇墩选型

镇墩型式选择取决于抗滑稳定需要的墩体体积量、墩体材料供应条件、钢管直径、锚固段长度、地基容许承载力及地质条件。

一般情况下，镇墩型式按下列条件选择：

(1) 当计算所得的镇墩体积力  $G_d \leq 0$  时，镇墩仅起锚固管段及传力给地基的作用，宜选择开敞式镇墩或半封闭式镇墩；

(2) 当计算所得的镇墩体积力  $G_d > 0$ ，但小于封闭式镇墩按包裹管段所需要的混凝土重量时，宜选择半封闭式镇墩。

封闭式镇墩通常应用在弯管向上凸或计算所得的抗滑稳定体积力较大的情况。

图15-5所示的封闭式镇墩，设计体积较大。为节省混凝土量，钢管上方混凝土设计成箱体，用块石回填。国内一些小型水电站钢管的镇墩，也有在混凝土墩体上部以浆砌条石或块石来增加镇墩的抗滑能力，减少混凝土方量（图15-6）。

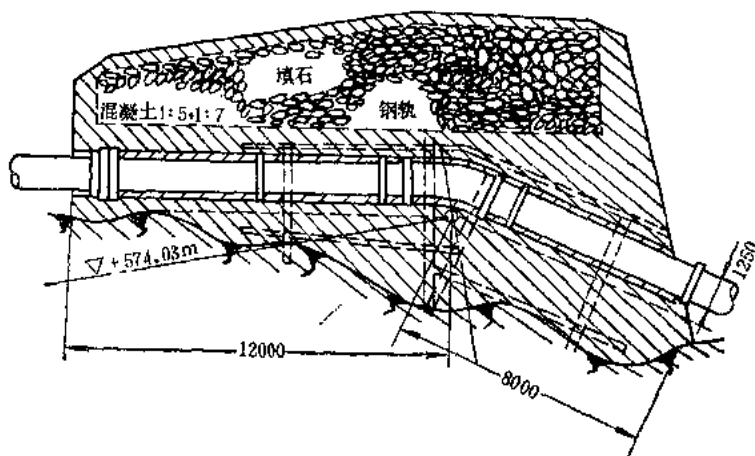


图 15-5 挪威Rjukan电站用填石加重的镇墩  
(单位: mm)

浆砌条石或块石砌筑的镇墩较多应用在管径很小 ( $D_0 \leq 50 \sim 60 \text{cm}$ )、水头不大的小II型水电站。

电站供水采用单管单机或一管两机，管槽中有多管并列时，可将镇墩连接在一起成多管联合镇墩形式，这对镇墩工作条件、可靠性的提高很有意义。

## 四、镇墩构造

### (一) 镇墩构造要求

镇墩设在管线转弯处，和直线段长度超过 150m 的直管段上。钢管靠锚固结构（如止推环）固定在镇墩中。设计钢管与墩体的锚固措施时，不宜考虑粘结力和摩擦力。

混凝土镇墩依靠自身重量与地基的摩擦起“镇定”作用，混凝土标号一般用 100 号。

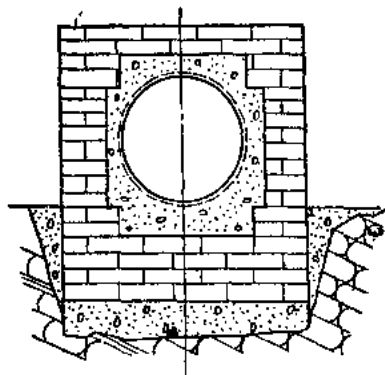


图 15-6 浆砌条石镇墩

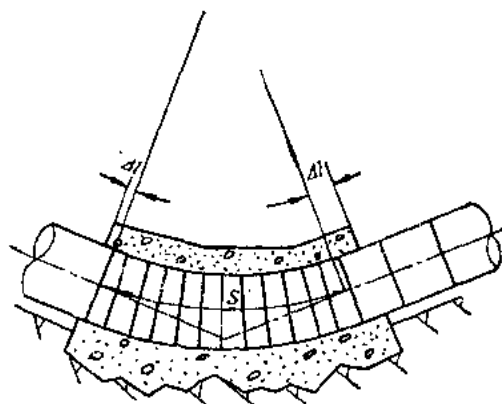


图 15-7 弯管弧长示意

当管径较大、水头较高，墩体体积大，管壁周围需用温度筋时，用150号混凝土。

对弯管处的镇墩来说，封闭式镇墩及半封闭式镇墩在管轴方向的宽度  $B$ ，应不少于弯管的弧长  $S$  和两端各  $\Delta l = 3.5\sqrt{R\delta}$  长度之和，即

$$B \geq S + 2 \times 3.5\sqrt{R\delta} \quad (15-1)$$

式中  $R$  —— 钢管半径；

$\delta$  —— 钢管壁厚；

$S$ 、 $l$  —— 弯管弧长和镇墩内管轴长度（图15-7）。

实际资料表明墩体长度  $L$  一般不少于管径的（1.6~2.2）倍，即

$$L \geq (1.6 \sim 2.2)D, \quad (15-2)$$

且管两侧墩体的厚度不少于40cm。

当弯管处于空间转角状态时，墩体宽度宜适当加大，使钢管作用力及墩体自重的合力不超过基础底面的核心范围（长、宽度的1/3范围）。

多个单管连在一起的联合镇墩，墩体长度受管中心距控制，同时，要考虑钢管分期安装因素及镇墩施工方式的影响。

钢管进水口结构亦起镇墩作用，其中，钢管弯管管节以开敞的或半封闭的形式固定在进水建筑物的末端。

紧靠厂房的镇墩，一般应该用缝与厂房分开，厂房墙与管体间设垫层。如镇墩与厂房水下块体结合成整体，钢管的抗滑稳定应考虑厂房的作用，此时，钢管镇墩工程量可得到减少。这种布置形式在钢管的仰角较小甚至水平的情况下是比较合适的。但必须考虑镇墩与厂房不均匀沉陷的可能性。钢管墩座底部与厂房块体相连，成整体底板时，应配置必要的钢筋，见图15-8。

## （二）钢管与镇墩的锚固

镇墩中钢管的锚固件，有焊接在弯管管节或直管上的止推环，安装架设钢管时点焊在钢管上的临时支承件。止推环用角钢或扁钢加工成环形，焊接在管外壁，焊缝承受管滑动力形成的剪应力。图15-9中的止推环上还焊有短节角钢，以增加与镇墩混凝土的锚固

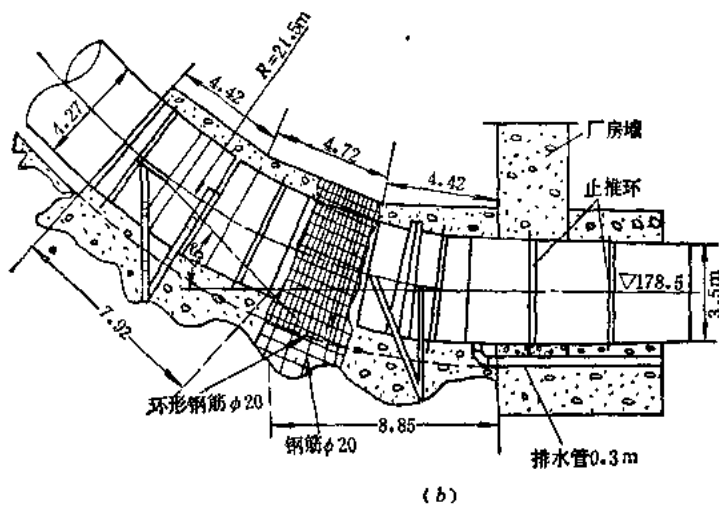
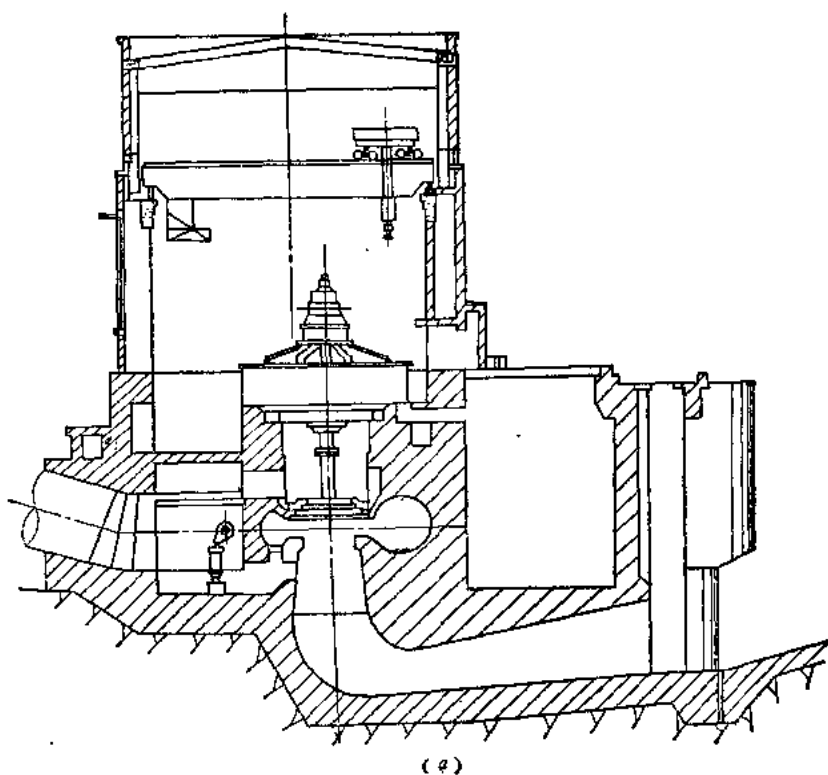


图 15-8 墩体与厂房墙相连的镇墩结构  
(单位: m)

作用。

镇墩中压力钢管在安装时, 利用墩体一期混凝土中预埋的架立件(角钢或钢管混凝土短柱)和钢支架、拉杆及螺杆千斤顶等架设固定钢管, 待调整定位后, 这些架立元件一般都埋设在镇墩中, 形成实际上的锚固件(图15-10)。

设计中只考虑钢管止推环的作用, 也即环与管壁的焊缝承受全部滑动推力, 安装过程中的架设件对管体的锚固力不计入抗推力中, 同时, 支撑结构和拉杆焊在钢管管壁上, 以

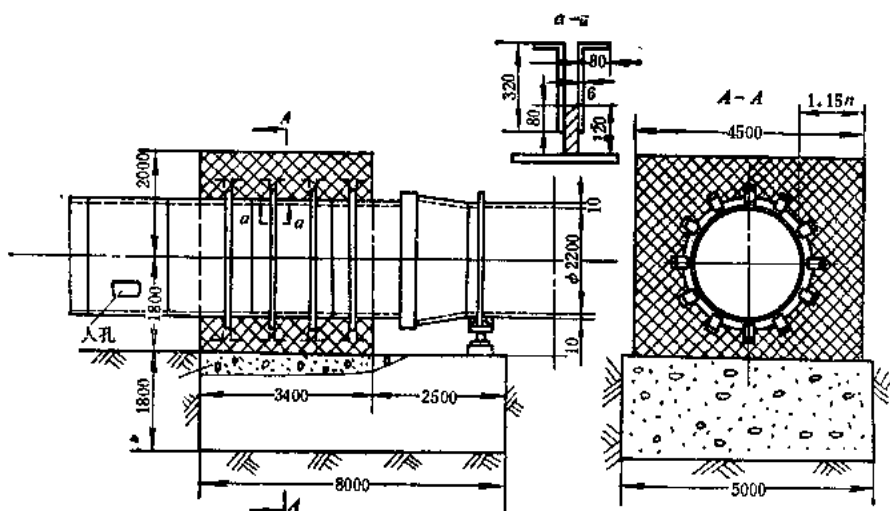


图 15-9 钢管与镇墩的锚固形式  
(单位: mm)

克服浇筑二期混凝土时, 钢管所受到的上抬力。

### (三) 镇墩的施工分期

#### 1. 封闭式镇墩及半封闭式镇墩

镇墩分两期施工, 第一期镇墩底板。底板顶部高程按钢管架立安装、绑扎管外钢筋方便的要求, 以及尽可能减少二期混凝土浇筑量的要求来确定; 其中预埋安装钢管所需要的架立件视埋入管节的长度、转弯形式(平面转弯、立体转弯)和曲率布置 2 排到 4 排(图 15-2、图 15-10), 架立件的位置应按钢管节轮廓在一期混凝土基面上的投影定位。一期混凝土一般呈台阶形或键槽形, 以增加与二期混凝土的整体性, 镇墩承受水平力较大时, 一、二期混凝土接合面应设插筋。

第二期墩体施工在钢管安装就位后进行。小水电工程中往往采用埋石混凝土以节约水泥量。

浆砌石镇墩的第一期墩体用 100 号混凝土, 找平后的厚度 0.4~0.5m。第二期墩体用 75 号水泥砂浆(灰:砂=1:4)砌条石或块石。在钢管周围 30~40cm 范围内仍宜用 100 号混凝土填筑。对于半封闭镇墩和浆砌石镇墩, 管周围不必设置温度钢筋。

#### 2. 开敞式镇墩

开敞式镇墩的钢管依靠支承件将力传至墩体, 支承件埋固于镇墩混凝土中, 且与钢管固接。

镇墩的一期墩体预留埋件、锚固件的插孔, 待安装就位后, 插入锚固件, 这样可减少安装定位的难度。定位、固定就绪后, 预留孔中填灌 150 号细骨料混凝土, 混凝土标号一般应高于墩体混凝土的标号。

### 五、镇墩设计计算

压力钢管运行过程中, 不同工况(如水位变化、水温、流量变化、充、放水、检修等)下, 钢管对镇墩的作用力不同, 合力的方向和大小随工况而变化。镇墩体积、几何外

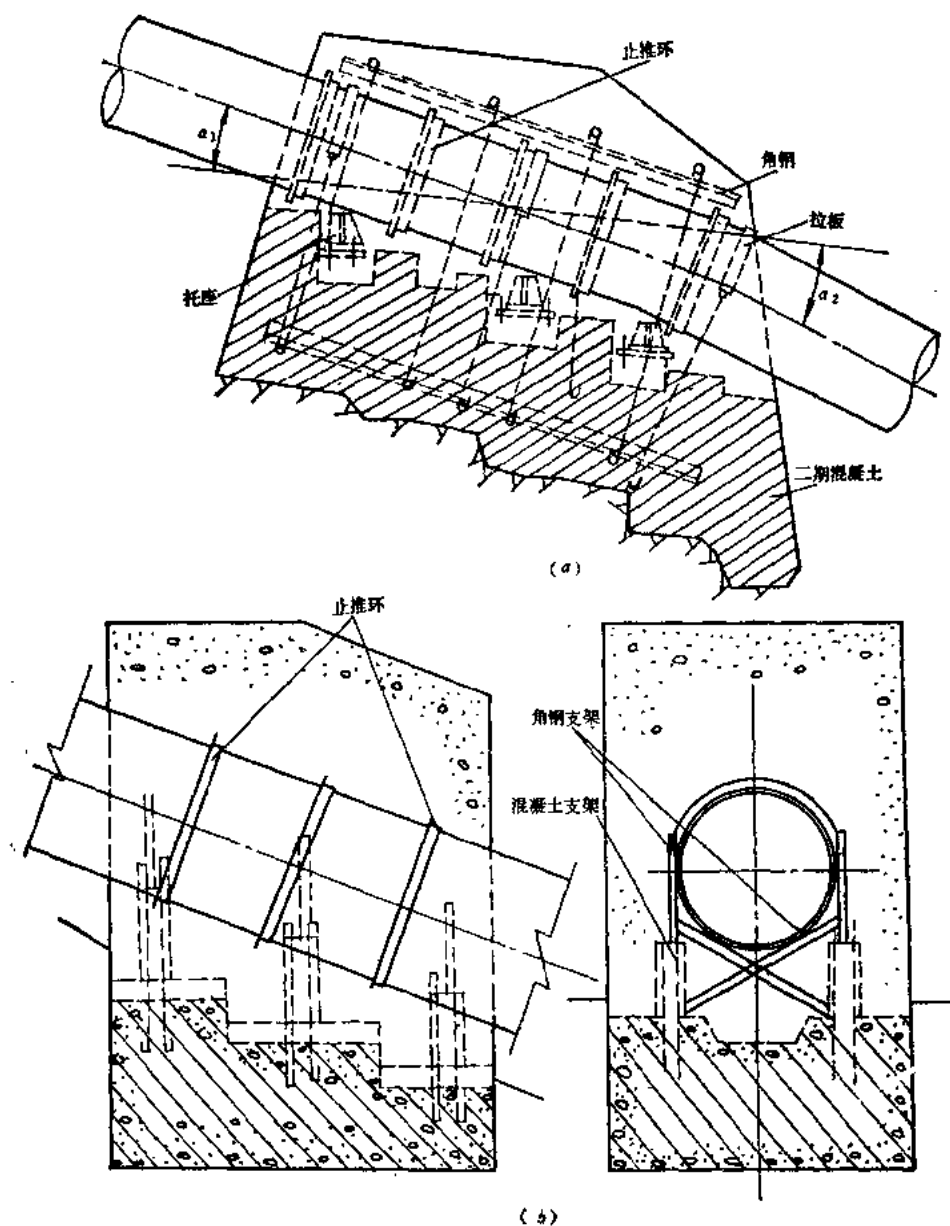


图 15-10 镇墩中钢管的架立、锚固件

形、以及地基形式的确定，应分析不同工况下力的组合，按抗滑稳定最不利的条件进行初步拟定，再按其余工况进行校核。

#### (一) 荷载及其组合

##### 1. 轴向力

- (1) 钢管金属结构自重的轴向分力  $A_1$ ;
- (2) 闸头或阀门的水压力  $A_2$ ;
- (3) 镇墩内弯管前、后端的水压力  $A_3$ ;

- (4) 渐缩管节前、后端水压力差  $A_1$ ;
- (5) 镇墩前、后两个伸缩节端面水压力  $A_2$ ;
- (6) 温度变化时, 伸缩节止水填料对钢管变形的摩擦力  $A_6$ ;
- (7) 温度变化时, 中间支墩对钢管变形的摩擦力  $A_7$ ;
- (8) 弯管中水流离心力的管轴向分力  $A_8$ 。

有关项中的水压力指包括水锤压力在内的计算水压力, 各个力的计算公式见表12-5。 $A_1$ 随钢管有无渐缩管节结构而确定其有或无。闷头荷载  $A_2$  由机组分期安装或水压试验等具体情况而定。

## 2. 垂直管轴的法向力

镇墩前、后钢管自重  $Q_s$  及水重  $Q_w$  形成对镇墩的法向分力。计算时, 镇墩上游侧仅计入半个支墩跨段, 镇墩下游侧则计算至伸缩节。

## 3. 其它力

- (1) 镇墩自重  $G_d$ ;

- (2) 镇墩内钢管水重  $Q'_w$  (忽略钢管自重)。

## 4. 不同工况下力的组合

- (1) 运行情况:

温升时:

镇墩上、下游方向受的管轴向力:

$$A_1 + A_2 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8;$$

管轴法向力:  $(Q_s + Q_w) \cos \alpha$ ;

铅直方向力:  $G_d + Q'_w$ 。

温降时:

镇墩上、下游方向受到的轴向力:

$$A_1 + A_2 + A_4 + A_5 - A_6 - A_7 + A_8;$$

管轴的法向力:  $(Q_s + Q_w) \cos \alpha$ ;

铅直方向力:  $G_d + Q'_w$ 。

温升及温降时各个力组合及方向如图

15-11所示。

- (2) 检修情况:

温升时: 轴向力:  $A_1 + A_6 + A_7$ ;

管轴法向力:  $Q_s \cos \alpha$ ;

铅直方向力:  $G_d$ 。

温降时: 轴向力:  $A_1 - A_6 - A_7$ ;

管轴法向力:  $Q_s \cos \alpha$ ;

铅直方向力:  $G_d$ 。

- (3) 水压试验情况: 水压试验作为特殊工况, 荷载为校核荷载。

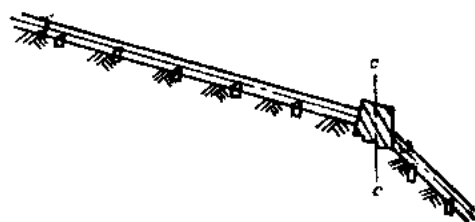
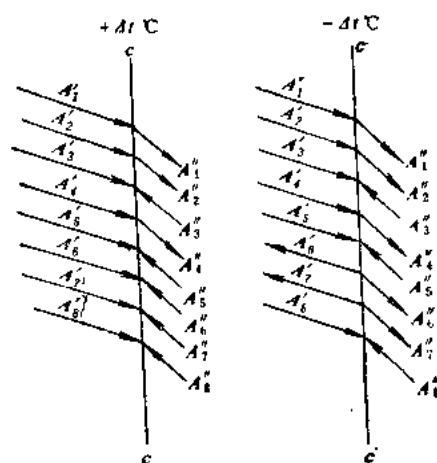


图 15-11 镇墩荷载

管轴向力:  $A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$ ;

管轴法向力:  $(Q_s + Q_w) \cos \alpha$ ;

铅直方向力:  $G_d$ 。

镇墩埋入地表以下一般比较深, 如地基属软基, 镇墩四周有回填料, 可计入上游向静土压力, 但不可计入被动土压力; 埋置不深的镇墩, 抗滑稳定计算中不计入上、下游缘承受的静土压力。

## (二) 抗滑稳定计算

计得镇墩上、下游轴向力和法向力以及前、后管重后, 按镇墩基础条件所确定的地基开挖面方向, 将上述各力分解成对地基面的滑动推力和垂直力, 利用下式计算镇墩抗滑稳定需要的重量  $G_d$ :

$$G_d = \frac{K \sum x}{f} + \sum y \quad (\text{kN}) \quad (15-3)$$

式中  $K$ ——抗滑稳定安全系数,  $K=1.3 \sim 1.5$ ;

$f$ ——镇墩与地基间摩擦系数(表15-1);

$\sum x$ ——平行于地基开挖面推力之和, kN;

$\sum y$ ——垂直于地基开挖面分力之和, kN, 当  $\sum y$  指向地基面用“—”, 背向地基面用“+”。

在各种工况中, 镇墩体积一般由推力最大、向下垂直力最小, 或向上垂直力最大的那一组力决定。

由下式计算镇墩体积  $V_d$ :

$$V_d = \frac{G_d - Q'_w}{\gamma_d} \quad (\text{m}^3) \quad (15-4)$$

式中  $G_d$ ——镇墩重, N;

$Q'_w$ ——镇墩中钢管水重, N;

$\gamma_d$ ——镇墩材料容重, 混凝土的容重按《SDJ20-78》可取  $\gamma_d=2.4$ , t/m<sup>3</sup>; 浆砌条石或块石镇墩, 视石料容重及空隙率,  $\gamma_d=1.8 \sim 2.2$ , t/m<sup>3</sup>。

## (三) 镇墩几何尺寸的拟定

计算得镇墩体积  $V_d$  后, 可据此决定镇墩尺寸。镇墩几何尺寸的拟定应满足不超过地基允许承载力、不出现拉应力以及锚固管体的要求。多数情况下, 尺寸拟定和地基应力校核工作同时进行, 需要经过几次试算也可借助电子计算机一次得出。镇墩形状宜于设计成矮胖型, 使地基反力的合力易于控制在基础断面“核心”范围内。手算拟定镇墩体积形状, 可用图解法。先假定镇墩宽度(垂直管轴向)不变, 把沿管轴向剖面取出, 以面积重心位置当成镇墩在纵剖面的重心位置, 调整剖面及重心位置, 使钢管对镇墩作用力与镇墩重心力形成的合力不超过底面长度(轴向平面)的三分点范围(图15-12)。

用图解法大体定形后, 再用解析法详细地计算墩体重心, 然后计算各力对底面中心的直压力 and 力矩, 最后计算出地基应力。

各种工况下, 钢管对镇墩作用力不同(包括力值及方向), 要求所设计镇墩在各种不



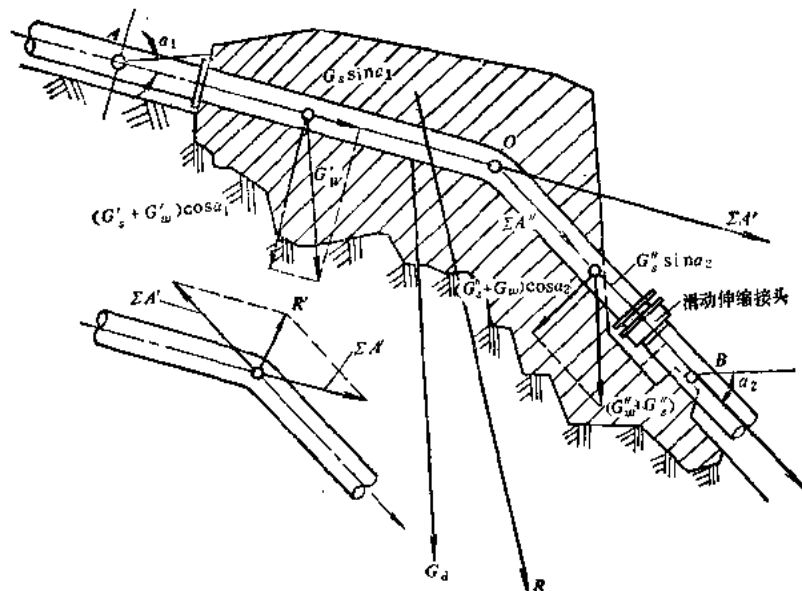


图 15-12 镇墩作用各力计算示意

同工况下都具有抗滑稳定性及合理的地基应力。按前述，镇墩体积系由最大滑动推力及最小垂直作用力情况决定，而镇墩体积几何形状及尺寸，宜按计入墩体重量后的最大垂直力（对基础而）进行设计，然后校核其它工况的地基应力及抗滑稳定性。

墩体底部的高度要满足施工分期要求，即一期底板厚度及安装钢管的施工空隙、宽度应考虑管体形状、直径、安装架设件的埋置、温度筋的绑扎以及两侧墩体最小厚度。墩体在管轴平面内的长度，按选用的墩体型式而采用不同长度，而最小长度应由包住弯管段及其两端部分直管段的要求来确定。

镇墩底面一般设计成平底面或齿形面，放在坚固、完整的岩基上。镇墩底面最好垂直于各组荷载组合中合力最大的方向（图15-12），同时，应考虑到基岩的产状、层面、主节理方向及倾角等，防止沿层而或节理面滑动。完整的厚层基岩上设计镇墩，还可以考虑以较薄的混凝土墩体配合插入基础的锚杆，以减小镇墩体积。地质条件许可时，直接利用基岩及锚杆固定钢管，这种情况下，镇墩体积可达最小值。

按地基承载力估算的镇墩最小基础面积 $\omega_d$ 由下式计算：

$$\omega_d = \frac{R}{\alpha[\sigma]_d} \quad (\text{m}^2) \quad (15-5)$$

式中  $R$ ——镇墩对地基的总作用力， $R = \Sigma y + G'_d$ ，kN； $\Sigma y$ 为钢管对镇墩作用合力对地基垂直分力，在 $\Sigma y$ 向上时为“－”，向下为“＋”；

$G'_d$ ——镇墩自重垂直底面方向的分力，kN；

$[\sigma]_d$ ——地基容许承载力，见表15-2至表15-10，kPa；

$\alpha$ ——为地基应力不均匀系数， $\alpha = 0.25 \sim 0.5$ 。

#### （四）镇墩地基应力校核

地基应力应分别考虑温升、温降情况，并根据运行、检修以及水压试验等工作状态，对选定的底面积 $\omega_d$ 进行校核。镇墩边缘的应力按下式计算：



$$\sigma = \frac{\Sigma y + G'_d}{\omega_d} \left( 1 \pm \frac{6e}{l} \right) \leq [\sigma]_d \quad (\text{kPa}) \quad (15-6)$$

式中  $e$  ——垂直于基础面的合力（包括镇墩自重）对基础面中心的偏心距，m；

$$e = \frac{\Sigma M}{\Sigma y + G'_d} \quad (15-7)$$

$\Sigma M$  ——作用于钢管上各个力及镇墩自重对基础面中心的力矩之和， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；

$l$  ——力矩 $\Sigma M$ 作用平面内（轴向）镇墩基础长度，m。

当基础开挖成水平状态时，式（15-6）中 $(\Sigma y + G'_d)$ 即为各垂直分力与镇墩自重之和。

## 六、空间弯管的镇墩设计

钢管在立面和平面内同时转弯，在此处设置镇墩时，镇墩工作除同仅有立面转弯的镇墩相同处以外，还要考虑由于平面内同时转弯形成的空间力系对镇墩滑动和地基应力的影响。镇墩的构造要求与前述相似。

### （一）立体转角计算

图15-13为管轴立体转弯形式。立体转角 $\Delta$ 与立面、平面上投影角之间的关系。

平面内，上、下两段管轴间立体转角 $\Delta$ 投影为 $\psi$ ，立面内，立体转角 $\Delta$ 的投影为 $(\alpha_2 - \alpha_1)$ ， $\alpha_1$ 为上段管轴与水平线的夹角， $\alpha_2$ 为下段管轴与水平线的夹角。下段管也可能上翘（倒虹吸管），如立面图中虚线所示。各夹角之间关系如下式所示：

$$\cos \Delta = \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos \psi \pm \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \quad (15-8)$$

式中右端第二项的“+”，适用于 $\alpha_1$ 在水平线以上， $\alpha_2$ 在水平线以下（图15-13中的实线）；“-”适用于 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 均在水平线以上的情况（图中II虚线所示）。

钢管布置的平面及立面图上，转角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\psi$ 都不是钢管弯曲平面内的实际转角 $\Delta$ ，因而 $\Delta$ 角数值对弯管的制作、安装很重要。镇墩设计，仍以平、立面布置图上投影角为依

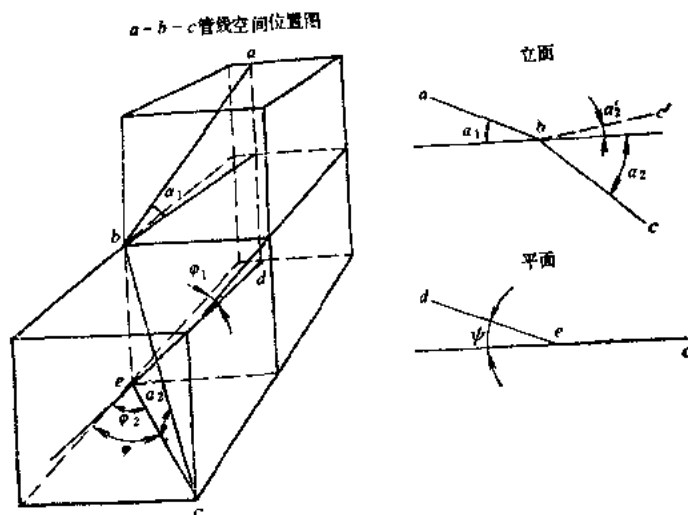


图 15-13 管线（a-b-c）空间位置透视

据，以确定由钢管上、下游端作用于镇墩各力的方向。

(二) 镇墩构造

埋置立体弯管的镇墩，在各种工况下受滑动力的方向不固定，合力对地基的作用点位置在两个方向（平面）内变动。镇墩抗滑稳定要求的体积由在多种工况中钢管对镇墩水平推力最大、同时向下压力最小（或向上抬升力最大）的那一组力决定。基础面积确定及地基应力校核中起决定作用的仍是向下及水平方向最大的一组力。

图15-14的弯管在平面、立面内都转了一个角度，呈开敞形式，配件焊接较多。

有空间转角的封闭镇墩在小水电中较普遍，半封闭较少用。

封闭式、半封闭式镇墩的基础底面形状，一般为五边形或四边形。

弯管在镇墩中的锚固方式同平面弯管的锚固相同。

开敞式镇墩基础底面宜处理成四边形，以便施工。钢管外的止推环（锚固环）通过支架柱与镇墩相连。支架柱的轴与弯管对镇墩最大作用合力方向最好一致，柱断面由最大作用合力计算决定。由于各种工况作用下弯管对镇墩作用力方向及大小不固定，在按不利荷

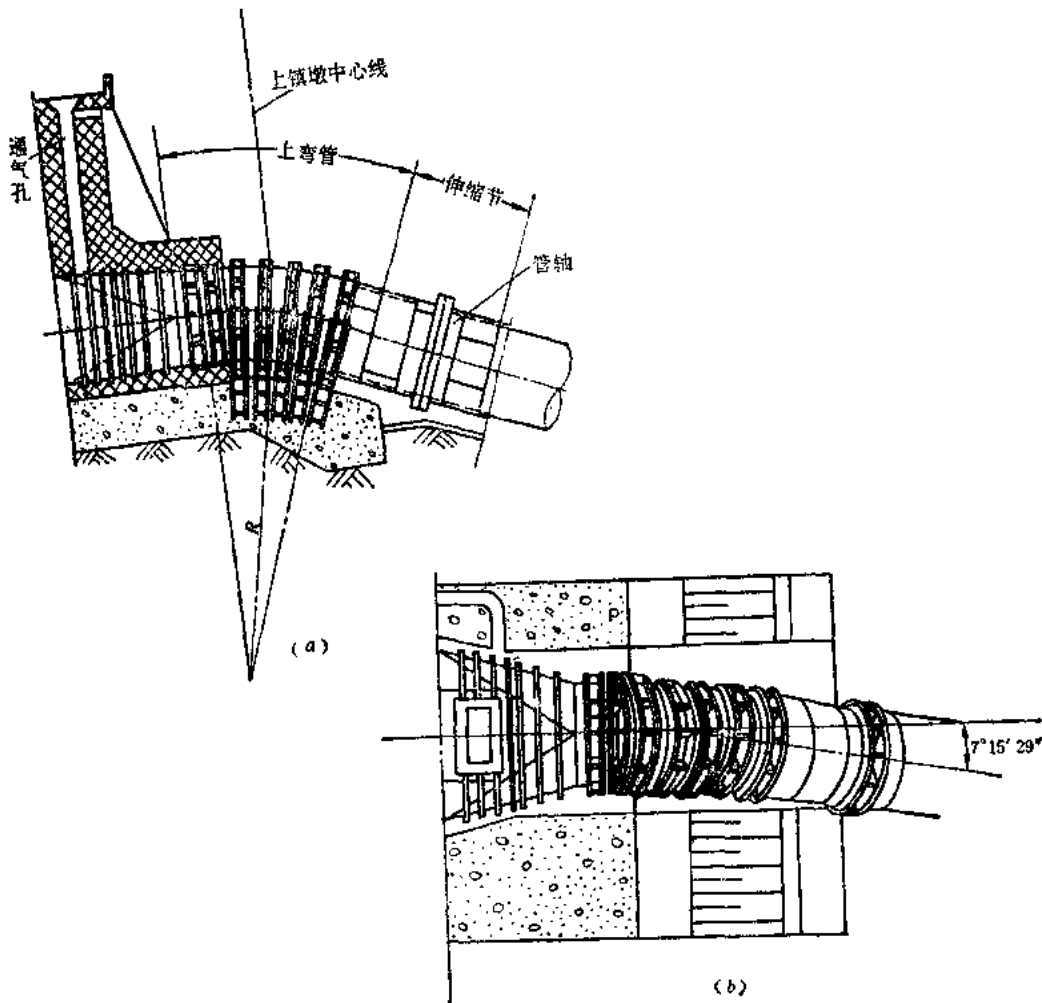


图 15-14 弯管的立体转角

载组合确定支架柱方向及断面后, 对其它工况下支柱的应力应进行校核, 必要时加焊侧向支撑 (图15-15)。

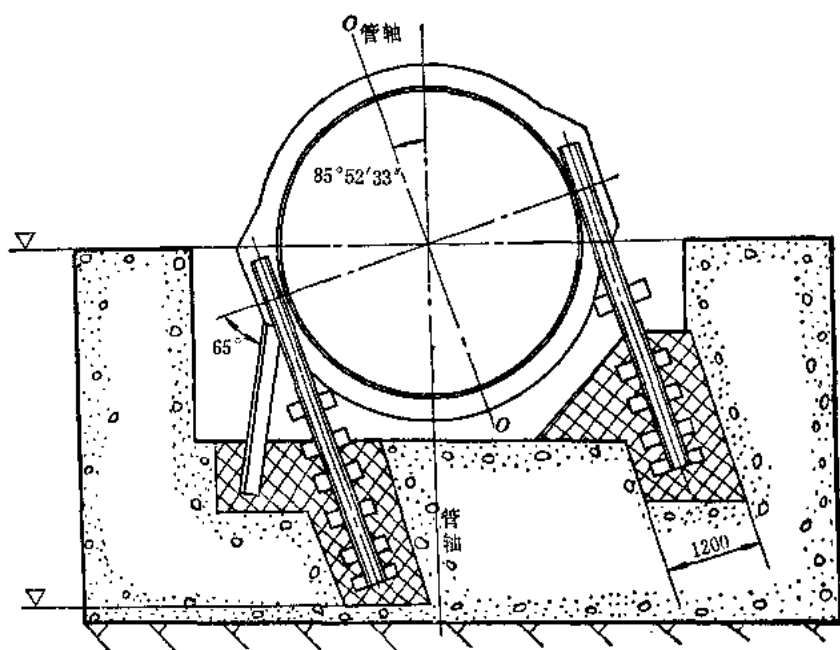


图 15-15 加焊侧向支撑的弯管

镇墩的比较合宜形式同样是有较大基础底面积的“宽矮”式, 这种情况下, 合力对地基的作用点, 比较容易控制在底面“核心”范围内。

### (三) 镇墩稳定体积力计算

图 15-16 规定镇墩计算的坐标。坐标原点与管轴交点重合。

$\Sigma A'$  及  $\Sigma A''$  为三个坐标方向的分力, 用下列各式计算:

$$x' = \Sigma A' \cos \alpha_1 \cos \psi_1 \quad (\text{kN}) \quad (15-9)$$

$$y' = \Sigma A' \cos \alpha_1 \sin \psi_1 \quad (\text{kN}) \quad (15-10)$$

$$z' = \Sigma A' \sin \alpha_1 \quad (\text{kN}) \quad (15-11)$$

$$x'' = \Sigma A'' \cos \alpha_2 \cos \psi_2 \quad (\text{kN}) \quad (15-12)$$

$$y'' = \Sigma A'' \cos \alpha_2 \sin \psi_2 \quad (\text{kN}) \quad (15-13)$$

$$z'' = \Sigma A'' \sin \alpha_2 \quad (\text{kN}) \quad (15-14)$$

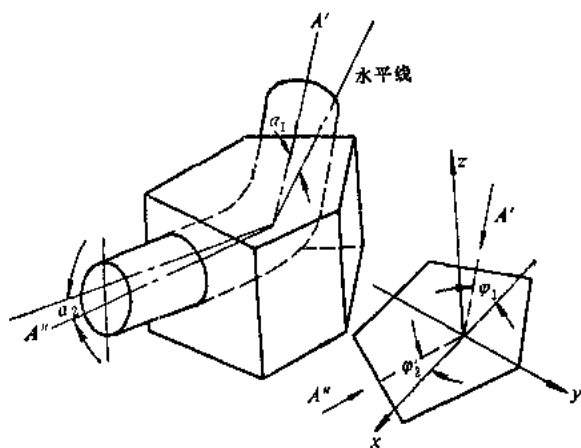


图 15-16 空间弯管的镇墩受力示意

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ —垂直面投影角;  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ —平面投影角

镇墩保持稳定需要的体积力  $G_d$ , 由下式计算:

$$G_d = \frac{K \sqrt{\Sigma x'^2 + \Sigma y'^2}}{f} + \Sigma z' \quad (\text{kN}) \quad (15-15)$$

所需要的镇墩几何体积按式 (15-4) 计算, 即:

$$V_d = \frac{G_d - Q'_w}{\gamma_d} \quad (\text{m}^3)$$

以上两式中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\psi_1$ 、 $\psi_2$  如图15-16所示;

$K$ ——抗滑稳定安全系数,  $K=1.3\sim 1.5$ ;

$\Sigma x$ —— $x'$  及  $x''$  的代数和, kN;

$\Sigma y$ —— $y'$  及  $y''$  的代数和, kN;

$\Sigma z$ —— $z'$  及  $z''$  的代数和, kN;

$f$ 、 $Q'_w$ 、 $\gamma_d$  同式 (15-3)、式 (15-4) 所注。

#### (四) 镇墩地基应力计算

镇墩的地基应力, 分别用下列式计算:

$$\sigma_{x'} = \frac{G_d \pm \Sigma z}{\omega_d} \pm \frac{\Sigma M_{y_0}}{J_{y_0}} l_{y_0} \quad (z_0 - x_0 \text{ 轴平面, kPa}) \quad (15-16)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{G_d \pm \Sigma z}{\omega_d} \pm \frac{\Sigma M_{x_0}}{J_{x_0}} l_{x_0} \quad (z_0 - y_0 \text{ 轴平面, kPa}) \quad (15-17)$$

式中  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$ ——基础底面的坐标轴, 坐标中心与镇墩底面形心重合;

$\Sigma x$ 、 $\Sigma y$ 、 $\Sigma z$ ——弯管对镇墩作用力在三个方向分力, 如式 (15-15), kN;

$\Sigma M_{y_0}$ ——为  $\Sigma x$ 、 $\Sigma y$ 、 $\Sigma z$  对底面  $y_0$  轴的力矩和, kN·m;

$\Sigma M_{x_0}$ ——为  $\Sigma x$ 、 $\Sigma y$ 、 $\Sigma z$  对底面  $x_0$  轴的力矩和, kN·m;

$J_{x_0}$ 、 $J_{y_0}$ ——基础底面对  $x_0$  轴、 $y_0$  轴的惯矩,  $\text{m}^4$ ;

$l_{x_0}$ 、 $l_{y_0}$ ——地基应力计算点到  $x_0$ 、 $y_0$  轴的距离, m;

$\omega_d$ ——镇墩基础底面积,  $\text{m}^2$ 。

当弯管偏角在平面上的投影角很小时, 可按平面弯管的要求进行镇墩近似设计, 镇墩体积误差不大。

### 七、镇墩中钢管锚固件

#### 1. 锚固件的环数 $n$ 和厚度 $t$ 按剪切力估算

封闭或半封闭镇墩中, 钢管外壳焊止推环, 使之锚固在镇墩混凝土中。钢管轴向推力通过环传到镇墩, 钢管的法向力由管壁传递给镇墩 (钢管向下突), 或通过拉杆传递给墩体 (钢管向上突)。

根据钢管对镇墩的推力设计锚固环, 可忽略混凝土与钢管管壁粘结力。环承受剪切力, 环的设置数  $n$  和环的厚度  $t$ , 按下式估算:

$$\tau = \frac{(\Sigma A' - \Sigma A'' \cos \psi) \alpha}{\pi n \varphi (D_0 + 2\delta) h_t} \leq [\tau] \quad (\text{kPa}) \quad (15-18)$$

式中  $\Sigma A'$ 、 $\Sigma A''$ ——镇墩上、下游端的钢管推力, kN;

$n$ ——环数;

$\varphi$ ——反映焊缝处应力损失的系数,  $\varphi=0.8\sim 0.9$ ;

$D_0$ ——钢管内径, m;

- $\delta$  ——管壁实际厚度, m;  
 $h_r$  ——环与管壁焊缝高度, m;  
 $[\tau]$  ——锚固环焊缝抗剪容许应力, kPa;  
 $\alpha$  ——反映各环受力不均的裕度系数,  $\alpha=(1.2\sim1.5)$ ;  
 $\psi$  ——镇墩前后钢管的仰角差值。

环与管壁焊缝高度不小于环厚的0.8倍。

2. 锚固件环数和厚度按环周长估算

半封闭镇墩的锚固件环数及环厚度 $t$ , 按埋入混凝土墩体中的环周长 $S$ 计算

$$t \geq \frac{(\sum A' - \sum A \cos \psi) \alpha}{n \varphi [\tau] S} \quad (\text{m}) \quad (15-19)$$

环圈数 $n$ 不宜少于2, 环的厚度 $t$ 不小于8mm。

3. 拉杆设置

镇墩中的拉杆将钢管与它底部混凝土墩体连结成整体。拉杆上端与锚固环焊接, 下部焊在镇墩一期混凝土的预埋件上, 或用螺栓固定在镇墩的基脚螺栓上(图15-10、图15-17)。

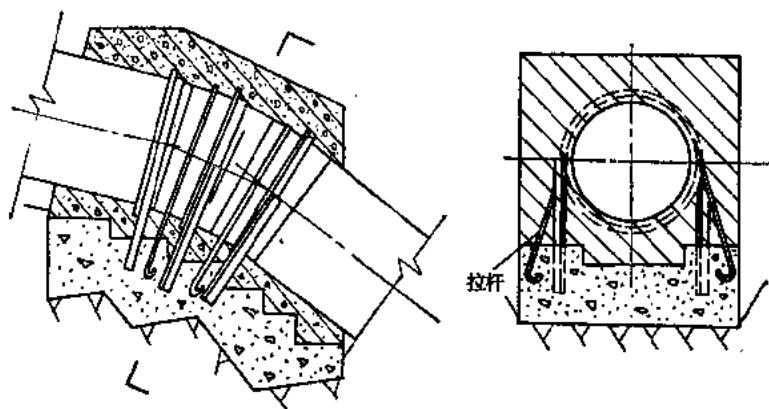


图 15-17 固定在镇墩一期混凝土的钢管架立埋件

拉杆常用角钢、槽钢或钢板角钢焊成的“I”、“L”形截面, 也可用圆钢。

拉杆一般与安装支架结合, 支架用角钢或槽钢点焊固定在钢管上。当弯管向上突时, 按上抬力校核支架截面积。拉杆计算截面尺寸一般较小, 往往按构造要求配置, 即每个锚固环两侧配置, 常用 $\phi 16 \sim \phi 24$ 圆钢。

4. 地脚螺栓设计

图15-18的镇墩, 用地脚螺栓将刚性环固定在墩体上。对于上抬力不大, 转角较小的弯管比较适用。管两侧环截面扩大成支座, 以便设置地脚螺栓。地脚螺栓应符合《GB 799-67》或《Q/ZB187-73》规定。

图15-18中弯管向下凹, 止推环的支座及钢管管壁均向混凝土墩体传递压力。设计时, 不考虑管壁的传力作用, 按照下压力及墩体容许承压力设计支座结构。地脚螺栓按构造要

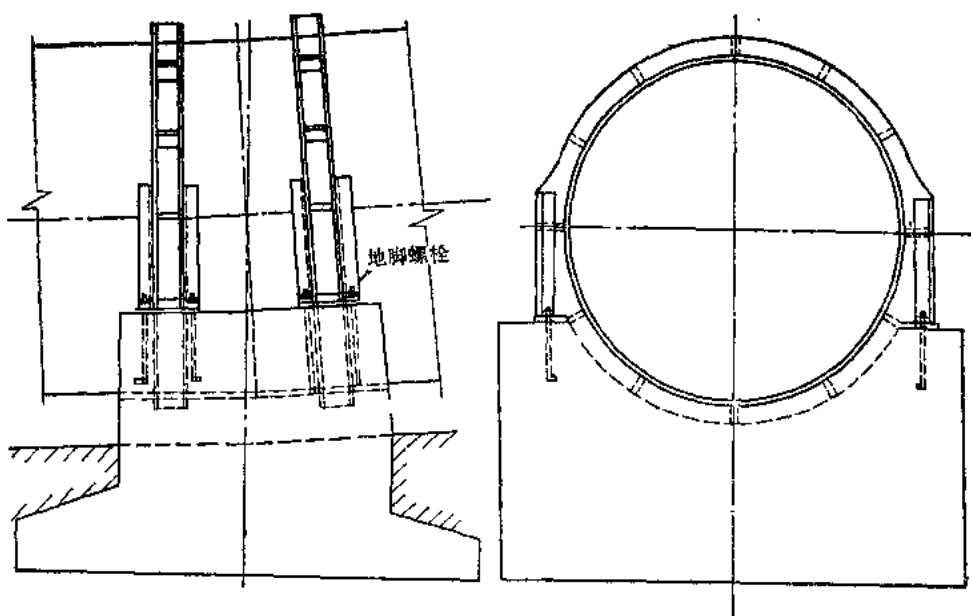


图 15-18 用地脚螺栓将环固定

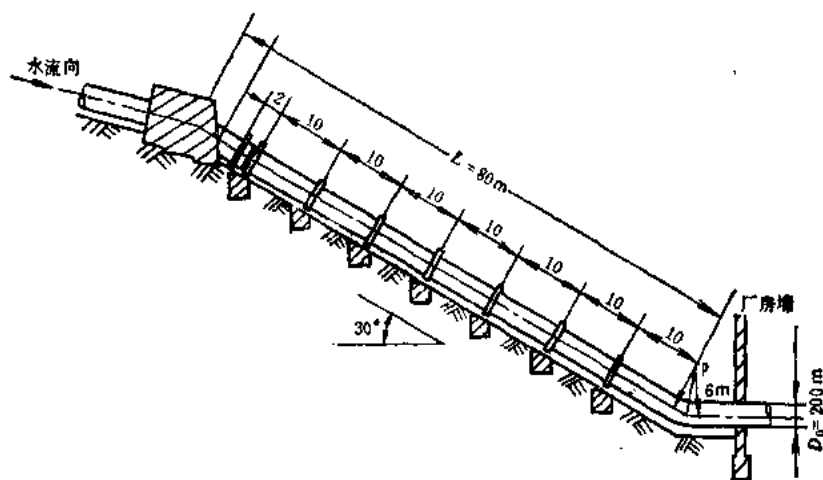


图 15-19 钢管布置纵剖面

求选择，但不少于M24。

#### 八、镇墩设计算例

试确定某水电站的压力钢管的一个镇墩体积和几何外形。此镇墩靠近厂房，与厂房间有沉陷缝分开。镇墩前（上游）段钢管管轴敷设角  $\alpha = 30^\circ$ ，镇墩后（下游）钢管管轴呈水平状态，布置情况如图15-19所示。

（一）计算资料

- （1）管径：钢管内径  $D_i = 2\text{m}$ ，平均直径  $D_m = 2.012\text{m}$ ；
- （2）管壁厚：计算壁厚  $\delta = 0.01\text{m}$ ，实际厚度  $\delta' = 0.012\text{m}$ ；
- （3）计算水头：上游方向与所设计镇墩相邻的伸缩节，其中心轴的计算水头  $H_1 = 28\text{m}$ 。下游方向的相邻伸缩节，中心轴计算水头  $H_2 = 69\text{m}$ 。镇墩上游端的管轴计算水头

为  $H_2 = 64.5\text{m}$ , 下游端管轴计算水头  $H_3 = 67\text{m}$ ;

(4) 管内计算流速  $V = 5\text{m/s}$ ;

(5) 伸缩节内止水盘根用油浸麻及橡皮圈, 止水盒宽  $D_2 = 0.3\text{m}$ , 平均摩擦系数  $\mu_2 = 0.4$ ;

(6) 支墩用滚轴式, 摩擦系数  $f = 0.1$ ;

(7) 镇墩上游端至伸缩节的管轴长  $L_1 = 72\text{m}$ , 下游端至伸缩节  $L_2 = 1\text{m}$ ;

(8) 支墩间距  $l = 10\text{m}$ ;

(9) 地基与支墩摩擦系数  $f = 0.45$ ;

(10) 地基容许承载力  $[\sigma]_d = 294\text{kPa}$ 。

(二) 运行条件下作用在镇墩上的基本荷载

(1) 钢管自重的轴向分力  $A'_1$ 。

$$\begin{aligned} A'_1 &= q_1 L \sin \alpha = \pi D_m \delta L_1 \gamma_s \sin \alpha \\ &= \pi \times 2.012 \times 0.012 \times 72 \times 76.93 \times \sin 30^\circ \\ &= 210.07\text{kN} \end{aligned}$$

计入附件增重12%后,  $A'_1 = 210.07 \times 1.12 = 235.28\text{kN}$

(2) 镇墩上、下游端内水压力  $A_2$ ;

$$\text{上游端 } A'_2 = \frac{\pi}{4} D_1^2 \gamma_w H = \frac{\pi}{4} \times 2^2 \times 9.8 \times 64.5 = 1985.80\text{kN}$$

$$\text{下游端 } A'_2 = \frac{\pi}{4} D_1^2 \gamma_w H = \frac{\pi}{4} \times 2^2 \times 9.8 \times 67 = 2062.77\text{kN}$$

(3) 伸缩节管端水压力  $A_2$ ;

$$\begin{aligned} \text{上游伸缩节 } A'_2 &= \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \gamma_w H = \frac{\pi}{4} \times (2.024^2 - 2^2) \times 9.8 \times 28 \\ &= 20.81\text{kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{下游伸缩节 } A'_2 &= \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \gamma_w H = \frac{\pi}{4} \times (2.024^2 - 2^2) \times 9.8 \times 69 \\ &= 51.29\text{kN} \end{aligned}$$

(4) 温度变化时, 伸缩节止水盘根对管壁摩擦力  $A_3$ , 考虑在进行水压试验时不应产生漏水现象, 盘根压缩力可取为计算水压力的1.25倍。

$$\begin{aligned} \text{上游伸缩节 } A'_3 &= \pi D_1 b_2 \mu_2 \gamma_w H = \pi \times 2.024 \times 0.3 \times 0.4 \times 9.8 \times 1.25 \times 28 \\ &= 261.72\text{kN} \end{aligned}$$

$$\text{下游伸缩节 } A'_3 = \pi \times 2.024 \times 0.3 \times 0.4 \times 9.8 \times 1.25 \times 69 = 644.95\text{kN}$$

(5) 温度变化时, 支墩对管壁的摩擦力  $A_3$ ;

上游方向  $A_3 = (q_1 + q_w) l f \cos \alpha$

$$q_1 = \pi D_m \delta \gamma_s = \pi \times 2.012 \times 0.012 \times 1 \times 76.93 = 5.835\text{kN}$$

计入附件重0.12 $q_1$ , 实际单位长管重  $q_1 = 6.535\text{kN}$

$$q_w = \frac{\pi}{4} D_1^2 \gamma_w = \frac{\pi}{4} \times 2^2 \times 1 \times 9.8 = 30.79\text{kN}$$

$$\therefore A'_7 = (6.535 + 30.79) \times 10 \times 0.1 \times \cos 30^\circ = 32.32 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{7个支墩的总阻力 } \Sigma A'_7 &= (6.535 + 30.79) \times (10 \times 6 + 5 + 2) \times 0.1 \times \cos 30^\circ \\ &= 216.57 \text{ kN} \end{aligned}$$

(6) 镇墩中弯管水流离心力  $A_8$ :

$$A'_8 = A''_8 = \frac{V_0^2}{g} \cdot \frac{\pi}{4} \gamma_w D^3 = \frac{5^2}{9.81} \times \frac{\pi}{4} \times 9.8 \times 2^3 = 78.46 \text{ kN}$$

(7) 镇墩前、后钢管对镇墩的法向力:

镇墩前半跨管的法向力:

$$Q' = \Sigma(q_s + q_w) \cdot \frac{l}{2} \cos \alpha = 37.325 \times \frac{10}{2} \times \cos 30^\circ = 161.62 \text{ kN}$$

镇墩后管段长的法向力:

$$Q'' = 37.325 \times 1 \times \cos 0^\circ = 37.325 \text{ kN}$$

(三) 检修条件下镇墩的基本荷载

(1) 钢管自重轴向分力  $A'_1$ :

$$A'_1 = 235.28 \text{ kN}$$

(2) 温度变化时, 伸缩节盘根摩擦力  $A_2$ :

$$\text{上游端 } A'_2 = 261.72 \text{ kN}$$

$$\text{下游端 } A''_2 = 644.95 \text{ kN}$$

(3) 温度变化时, 支墩、管壁间摩擦力  $A_3$ :

$$\text{上游端 } A'_3 = q_s \Sigma l f \cos \alpha = 6.535 \times 67 \times 0.1 \times \cos 30^\circ = 37.92 \text{ kN}$$

(4) 镇墩前、后钢管重对镇墩的法向力:

镇墩前的半跨钢管法向力:

$$Q'_4 = q_s \cdot \frac{l}{2} \cos \alpha = 6.535 \times 5 \times \cos 30^\circ = 28.30 \text{ kN}$$

镇墩到下游方向的伸缩节间, 钢管的法向力:

$$Q''_4 = q_s \cdot l \cos \alpha = 6.535 \times 1 \times \cos 0^\circ = 6.535 \text{ kN}$$

(四) 校核情况下, 作用于镇墩的校核荷载

在本例情况下, 电站等级属四级, 管道不长, 仍按四级建筑物设计, 校核荷载只有水压试验时的作用力。水压试验的压力按正常情况设计水压力的1.25倍计算。

(1) 钢管管重轴向分力  $A'_1$ :

$$\text{按前面计算结果 } A'_1 = 235.28 \text{ kN}$$

(2) 镇墩上、下游端的内水压力  $A_2$ :

$$\text{上游端 } A'_2 = 1985.80 \times 1.25 = 2482.25 \text{ kN}$$

$$\text{下游端 } A''_2 = 2062.77 \times 1.25 = 2578.46 \text{ kN}$$

(3) 伸缩节端面水压力  $A_3$ :

$$\text{上游伸缩节 } A'_3 = 20.81 \times 1.25 = 26.01 \text{ kN}$$

$$\text{下游伸缩节 } A''_3 = 51.29 \times 1.25 = 64.11 \text{ kN}$$

(4) 镇墩前、后钢管重、水重对镇墩的法向力:

$$\text{镇墩前 } Q' = 161.62 \text{ kN}$$



镇墩后  $Q'' = 37.325\text{kN}$

(五) 荷载组合后的水平、垂直分力

1. 运行工况

(1) 温升时:

1) 自上游方向指向镇墩:

$$\Sigma A' = A'_1 + A'_2 + A'_3 + A'_4 + A'_5 + A'_6 = 2798.64\text{kN}$$

水平方向分力  $\Sigma A' \cos \alpha = 2798.64 \times \cos 30^\circ = 2423.69\text{kN} (\rightarrow)$

垂直方向分力  $\Sigma A' \sin \alpha = 2798.64 \times \sin 30^\circ = 1399.32\text{kN} (\downarrow)$

2) 自下游方向指向镇墩:

$$\Sigma A'' = A''_1 + A''_2 + A''_3 + A''_4 = 2837.47\text{kN} (\leftarrow)$$

镇墩后管段呈水平状态,  $\Sigma A''$  无垂直分力。

3) 法向力:

$Q'$  的水平分力  $Q' \sin \alpha = 161.62 \times \sin 30^\circ = 80.81\text{kN} (\leftarrow)$

$Q'$  的垂直分力  $Q' \cos \alpha = 161.62 \times \cos 30^\circ = 139.97\text{kN} (\downarrow)$

$Q''$  为垂直力  $Q'' = 37.325\text{kN} (\downarrow)$

所以温升时总的水平推力  $\Sigma x$ 、垂直力  $\Sigma y$  分别为:

$$\Sigma x = 2423.69 - 2837.47 - 80.81 = -494.59\text{kN} (\leftarrow)$$

$$\Sigma y = 1399.32 + 139.97 + 37.325 = 1576.62\text{kN} (\downarrow)$$

(2) 温降时:

1) 自上游方向指向镇墩的力:

$$\begin{aligned} \Sigma A' &= A'_1 + A'_2 + A'_3 - A'_4 - A'_5 + A'_6 = 235.28 + 1985.80 \\ &\quad + 20.81 - 261.72 - 216.57 + 78.46 = 1842.06\text{kN} \end{aligned}$$

水平方向分力  $\Sigma A' \cos \alpha = 1842.06 \times \cos 30^\circ = 1595.27\text{kN} (\rightarrow)$

垂直方向分力  $\Sigma A' \sin \alpha = 1842.06 \times \sin 30^\circ = 921.03\text{kN} (\downarrow)$

2) 自下游方向指向镇墩的力:

$$\begin{aligned} \Sigma A'' &= -A''_1 - A''_2 + A''_3 - A''_4 = -2062.77 - 51.29 + 644.95 \\ &\quad - 78.46 = -1547.57\text{kN} (\leftarrow) \end{aligned}$$

3) 法向力:

水平分力  $Q' \sin \alpha = 161.62 \times \sin 30^\circ = 80.81\text{kN} (\leftarrow)$

垂直分力  $Q' \cos \alpha = 161.62 \times \cos 30^\circ = 139.98\text{kN} (\downarrow)$

$$Q'' = 37.325\text{kN} (\downarrow)$$

所以温降时总的水平推力  $\Sigma x$ 、垂直力  $\Sigma y$ :

$$\Sigma x = 1595.27 - 1547.57 - 80.81 = -33.11\text{kN} (\leftarrow)$$

$$\Sigma y = 921.03 + 139.98 + 37.325 = 1098.335\text{kN} (\downarrow)$$

2. 检修状况

(1) 温升时:

1) 自上游方向指向镇墩的力:

$$\begin{aligned}\Sigma A' &= \bar{A}'_1 + A'_2 + A'_3 = 235.28 + 261.72 + 37.92 \\ &= 534.92 \text{ kN}\end{aligned}$$

( $A'_3$ 中只计入钢管自重部分)

$$\text{水平方向分力 } \Sigma A' \cos \alpha = 534.92 \times \cos 30^\circ = 463.25 \text{ kN (} \rightarrow \text{)}$$

$$\text{垂直方向分力 } \Sigma A' \sin \alpha = 534.92 \times \sin 30^\circ = 267.46 \text{ kN (} \downarrow \text{)}$$

2) 自下游方向指向镇墩的力:

$$\Sigma A'' = A''_3 = 644.95 \text{ kN (} \leftarrow \text{)}$$

3) 法向力:

$$\text{水平方向分力 } Q' \sin \alpha = 28.30 \times \sin 30^\circ = 14.15 \text{ kN (} \leftarrow \text{)}$$

$$\text{垂直方向分力 } Q' \cos \alpha = 28.30 \times \cos 30^\circ = 24.51 \text{ kN (} \downarrow \text{)}$$

$$Q'' = 6.535 \text{ kN (} \downarrow \text{)}$$

所以温升时, 总的水平推力  $\Sigma x$ 、总的垂直力  $\Sigma y$  为:

$$\Sigma x = 463.25 - 644.95 - 14.15 = -195.85 \text{ kN (} \leftarrow \text{)}$$

$$\Sigma y = 267.46 + 24.51 + 6.535 = 298.51 \text{ kN (} \downarrow \text{)}$$

(2) 温降时:

1) 自上游指向镇墩的力:

$$\begin{aligned}\Sigma A' &= A'_1 + A'_2 + A'_3 = 235.28 + 261.72 \\ &\quad - 37.92 = -64.36 \text{ kN (} \leftarrow \text{)}\end{aligned}$$

$$\text{水平方向分力 } \Sigma A' \cos \alpha = 64.36 \times \cos 30^\circ = 55.74 \text{ kN (} \leftarrow \text{)}$$

$$\text{垂直方向分力 } \Sigma A' \sin \alpha = 64.36 \times \sin 30^\circ = 32.18 \text{ kN (} \uparrow \text{)}$$

2) 自下游指向镇墩的力:

$$\Sigma A'' = A''_3 = 644.95 \text{ kN (} \rightarrow \text{)}$$

3) 法向力:

$$\text{水平方向分力 } Q' \sin \alpha = 28.30 \times \sin 30^\circ = 14.15 \text{ kN (} \leftarrow \text{)}$$

$$\text{垂直方向分力 } Q' \cos \alpha = 28.30 \times \cos 30^\circ = 24.51 \text{ kN (} \downarrow \text{)}$$

$$Q'' = 6.535 \text{ kN (} \downarrow \text{)}$$

$$\begin{aligned}\text{所以总的水平推力 } \Sigma x &= -55.74 + 644.95 - 14.15 \\ &= 575.06 \text{ kN (} \rightarrow \text{)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{总的垂直力 } \Sigma y &= -32.18 + 24.51 + 6.535 \\ &= -1.135 \text{ kN (} \uparrow \text{)}\end{aligned}$$

3. 校核情况 (水压实验)

(1) 自上游指向镇墩的力:

$$\Sigma A' = A'_1 + A'_2 + A'_3 = 235.28 + 2482.25 + 26.81 = 2743.54 \text{ kN}$$

$$\text{水平方向分力 } \Sigma A' \cos \alpha = 2743.54 \times \cos 30^\circ = 2375.98 \text{ kN (} \rightarrow \text{)}$$

$$\text{垂直方向分力 } \Sigma A' \sin \alpha = 2743.54 \times \sin 30^\circ = 1371.77 \text{ kN (} \downarrow \text{)}$$

(2) 自下游指向镇墩的力:

$$\Sigma A'' = A''_3 + A''_2 = 2578.46 + 64.11 = 2642.57 \text{ kN (} \leftarrow \text{)}$$

(3) 法向力:

$$\text{水平方向分力} \quad Q' \sin \alpha = 161.62 \times \sin 30^\circ = 80.81 \text{ kN} (\leftarrow)$$

$$\text{垂直方向分力} \quad Q' \cos \alpha = 161.62 \times \cos 30^\circ = 139.97 \text{ kN} (\downarrow)$$

$$Q'' = 37.325 \text{ kN} (\downarrow)$$

$$\text{所以总的水平推力} \quad \sum x = 2375.98 - 2642.57 - 80.81 = -347.40 \text{ kN} (\leftarrow)$$

$$\text{总的垂直力} \quad \sum y = 1371.77 + 139.97 + 37.325 = 1549.07 \text{ kN} (\downarrow)$$

计算成果列于表15-6。

表 15-6

计 算 成 果

序	作用力 计算值	工作条件		运行工况		检修状况		水压试验情况
				温升	温降	温升	温降	
1	水平推力 (kN) $\rightarrow$			-494.59	-33.11	-195.85	575.06	-347.40
2	垂直压力 (kN) $\downarrow$			1576.62	1098.335	298.51	-1.135	1549.07

(六) 抗滑稳定需要的体积力

由成果可见, 在镇墩与地基间摩擦系数为  $f = 0.45$  的情况下, 当垂直分力与水平分力之比小于  $\frac{1}{0.45} = 2.22$  时, 镇墩体积取决于镇墩抗滑稳定所需的重量, 且按最不利工况确定镇墩重量。表中数据表明: 在本例情况下, 检修钢管温度下降的条件需要镇墩稳定体积最大。

由式 (15-3), 抗滑稳定体积力为  $G_d$ :

$$G_d = \frac{1.3 \times 575.06}{0.45} + 1.135 = 1662.42 \text{ kN}$$

(七) 镇墩体积及几何尺寸拟定

镇墩体积由式 (15-4) 计算, 式中镇墩内钢管水重, 按弯管长近似估算, 弯管水重:

$$G'_w = \rho \frac{\alpha}{180^\circ} \pi \frac{\pi}{4} D_0^3 \gamma = 6 \times \frac{30^\circ}{180^\circ} \times \frac{\pi^2}{4} \times 2^3 \times 9.8 = 96.72 \text{ kN}$$

$$\therefore V_d = \frac{G_d - G'_w}{\gamma_k} = \frac{1662.42 - 96.72}{21.56} = 72.62 \text{ m}^3$$

拟定镇墩几何尺寸时, 按地基容许承载力粗估基础面积, 最大垂直力为  $1576.62 \text{ kN}$  (见表中运行情况的温升项), 计入镇墩重, 总的垂直力最大值为  $R_1 = \sum y = 1576.62 + 1662.42 + 96.72 = 3335.76 \text{ kN}$ 。

按式 (15-5), 最小基础面积为:

$$\omega_d = \frac{R_1}{\alpha [\sigma]_d} = \frac{3335.76}{0.75 \times 294} = 15.13 \text{ m}^2$$

按构造要求, 钢管两侧混凝土厚采用  $0.4 D_0$ , 即  $b' = 0.4 \times 2 = 0.8 \text{ m}$ , 镇墩最小宽  $b = 2b' + (D_0 + 2\delta) = 2 \times 0.8 + 2.024 = 3.624 \text{ m}$ , 根据初步计算基础面宽度取为  $4.4 \text{ m}$ , 基础面最小长度为

$$l = \frac{\omega_d}{b} = \frac{15.13}{4.4} = 3.4 \text{ m}$$

按裹住弯管及部分直管段要求, 基础面长度应取  $l = 5.50 \text{ m}$ 。综合上述诸方面, 采用

表 15-7 镇墩地基应力

序	力矩及项目	工作条件		运行工况		检修状况		水压试验情况	镇墩混凝土重力作用	镇墩内钢管水重作用	备注
		计算值	温度	升温	降温	升温	降温				
1	水平推力形成力矩 (顺时针为正, kN·m)	-494.59 × 2.30 = -1137.56	-33.11 × 2.30 = -76.15	-195.85 × 2.30 = -450.46	575.06 × 2.30 = 1322.64	-347.40 × 2.30 = -799.02					第三项和第四项应分别计入镇墩混凝土重力和镇墩内钢管水重作用
2	垂直力形成力矩 (顺时针为正, kN·m)	1576.62 × 0.64 = 1009.04	1098.335 × 0.64 = 702.93	298.51 × 0.64 = 191.05	-1.135 × 0.64 = -0.73	1549.07 × 0.64 = 991.40			-1662.42 × 0.23 = -382.36	96.72 × 0.64 = 61.90	
3	力矩总和 (kN·m)	-448.98	306.32	-579.87	1001.45	-128.08					
4	垂直力总和 (kN)	3335.76	2857.48	2057.65	1758.01	3308.21					
5	对基础中心偏心距 (m)	-0.13	+0.11	-0.28	+0.57	-0.04					
6	镇墩上游边缘应力 (kPa)	157.39	103.91	111.00	117.82	142.67					
7	镇墩下游边缘应力 (kPa)	118.29	132.25	59.06	27.47	130.74					

表 15-8 镇墩抗滑安全系数 K

序	力矩及项目	工作条件		运行工况		检修状况		水压试验情况
		计算式	安全系数	升温	降温	升温	降温	
		$K = \frac{f(G_d + 2Y)}{\sum x}$	3.03	38.80	4.51	1.30	4.28	

基础面积为 $\omega_d=4.4 \times 5.5\text{m}$ ，镇墩平均高度为：

$$h = \frac{V_d}{l \times b} = \frac{72.62}{5.5 \times 4.4} = 3.00\text{m}$$

按此尺寸，镇墩设计成半封闭形式如图15-20所示。

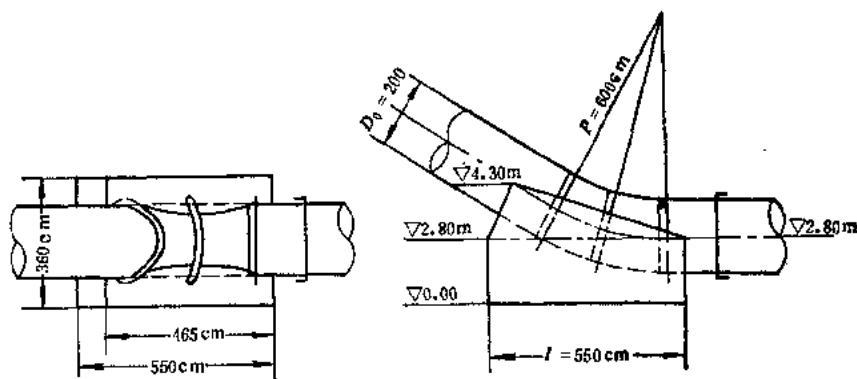


图 15-20 半封闭镇墩

#### (八) 地基应力及抗滑安全系数

##### 1. 地基应力计算

镇墩几何形状以管轴为中心左右对称，按平面问题计算镇墩纵剖面的重心位置，重心离上游边缘距离为2.52m。已知各种工况下的作用力集中在前后管轴的交点上，计算各作用力及镇墩、镇墩内钢管水重（检修时不计入水重）对镇墩底面中心的力矩，以垂直力和力矩值，代入式（15-6）计算镇墩基础应力。计算成果列成表15-7形式：

##### 2. 镇墩抗滑安全系数(表15-8)

#### (九) 锚固措施及混凝土分期(略)

## 第二节 支 墩

### 一、支墩设计要求及参考数据

#### (一) 支墩作用及设计要求

设在镇墩之间直线段上的中间支墩，把钢管自重和水重的法向分量（垂直管轴向）传给地基，并防止钢管向两侧变形。

在一般的分段式布置形式中，钢管一端固定在镇墩中，另一端则是伸缩节。支墩不限制温度引起的钢管轴向变形。

支墩设计应满足下列要求：

- (1) 任何工况下，墩体不发生滑动现象，抗滑稳定安全系数K不小于1.3；
- (2) 墩体的地基应力不超过容许承载力，并且不因地基应力不均而引起倾斜；
- (3) 支承结构简单，受力明确；
- (4) 在可能发生沉陷的地基上（软基），支承结构应考虑运行中调整钢管支承点高程的可能性。

支墩间距应通过钢管应力分析, 并考虑安装条件、支座型式、地基条件等因素确定。在相邻两镇墩之间, 宜按等距布置。设有伸缩节的一跨, 间距宜缩短, 以保证伸缩节正常工作。

(二) 支墩设计计算内容

- (1) 选择支墩型式;
- (2) 支墩荷载及不同工况下荷载组合;
- (3) 计算抗滑稳定要求的支墩体积;
- (4) 拟定支墩几何形状尺寸;
- (5) 不利工况下的地基应力校核;
- (6) 拟定的支承结构型式、尺寸、进行强度校核;
- (7) 墩体施工分期及支承结构锚固设计(与制作、安装单位共同拟定)。

(三) 钢管与支墩的摩擦系数

摩擦系数按表15-9选用。

表 15-9 钢 管 与 支 墩 摩 擦 系 数

材 料 接 触 类 别	摩 擦 系 数	备 注
钢与钢滑动摩擦	0.5	不常加油
钢与钢滑动摩擦	0.25	经常加油
钢与干混凝土摩擦	0.42~0.59	随混凝土表面光洁条件而定
钢与垫有油毡(或石墨片)的混凝土摩擦	0.5	
有滚轮(轴)的滚动摩擦	0.05	摩擦面清洁
有滚轮(轴)的滚动摩擦	0.1	摩擦面不清洁

二、支墩形式及选择

支墩包括管体支承结构及墩体两部分。支墩型式随管径、支墩跨距、敷设角度(倾角)而定, 且随设计人员经验而变化。但大致可按工作方式分为滑动式及滚动式两大类, 还有一种“摇摆式”, 但在小型水电站建设中应用较少。两大类支墩型式中, 常用以下几种形式:

(一) 滑动式支墩

1. 鞍槽形无支承环滑动支墩(图15-21)

钢管直接搁在顶部为鞍形的墩座上, 鞍座内有钢或铸铁的弧形垫板, 钢管与垫板接触部位不另外加强, 当管壁较薄时, 也可另加弧形托板, 或将鞍座部位的管节适当加厚, 加厚段长可按支墩在管轴向的长度及 $2.34\sqrt{R\delta}$ 之和确定, 其中 $R$ 为管平均半径,  $\delta$ 为壁厚。

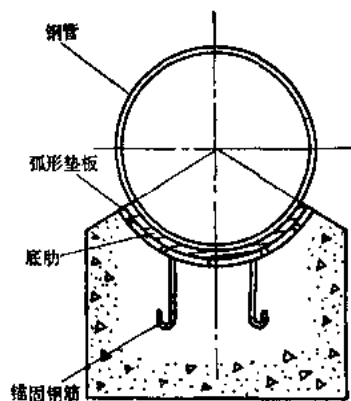


图 15-21 无支承环的鞍式支座

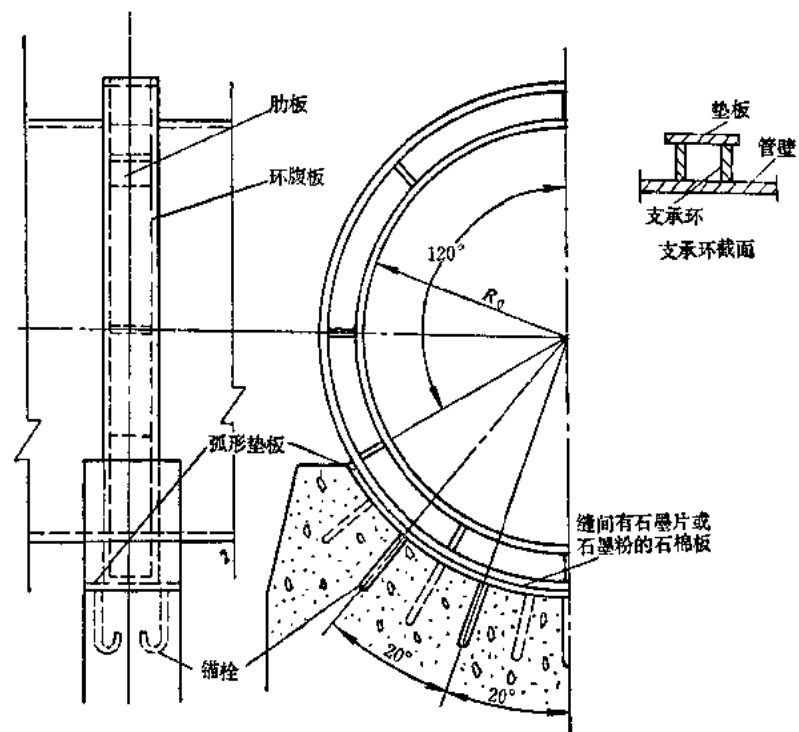


图 15-22 有支承环的鞍式支座（鞍槽型）

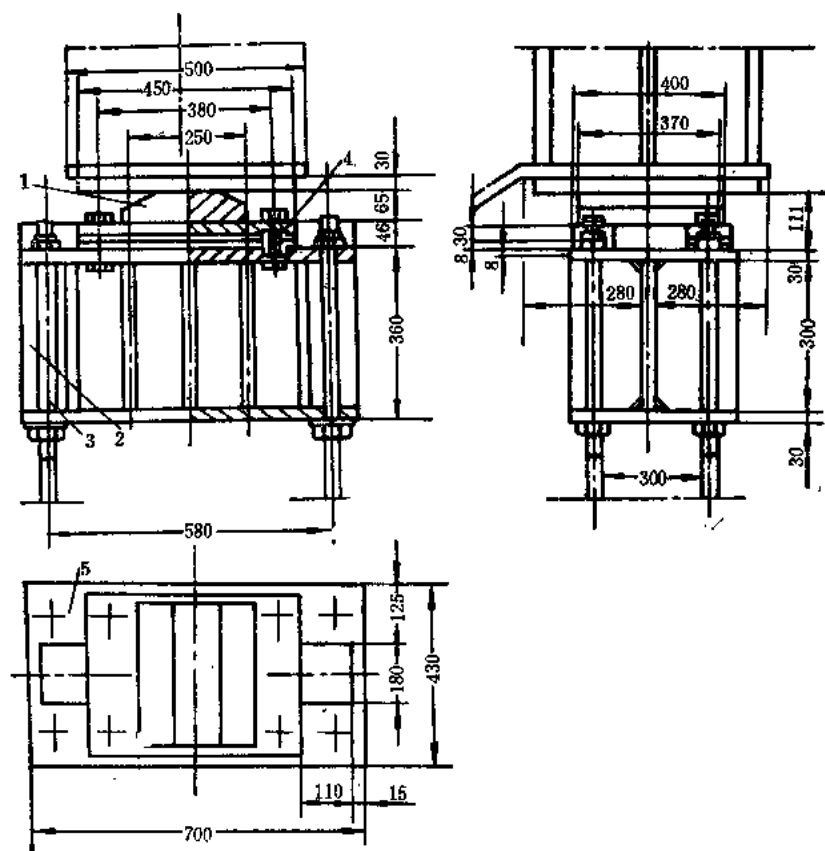


图 15-23 平面型支墩（单位：mm）

1—支承板；2—焊接锚固垫板；3—锚固螺栓；4—垫片；5—侧向挡块

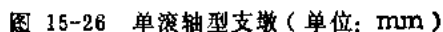




(1) 滑轨型(图15-24)。支承环支柱使荷载通过设在墩体顶部的钢轨传给墩体, 钢轨锚固在顶部。

## (二) 滚动式支墩

支承环两侧支柱和墩座的承压板之间，设一滚轴，钢管在发生温度变形时，滚轴在承压板上滚动。滚轴两侧设防滑装置。当法向荷载较小时，滚轴直径小（图15-26）；当法向荷载较大时，需要的滚轴直径也大，此时，若采用实心圆柱则不经济，在这种情况下，采用上、下两端有圆柱面的肋板组合滚轴更有利（图15-29）。



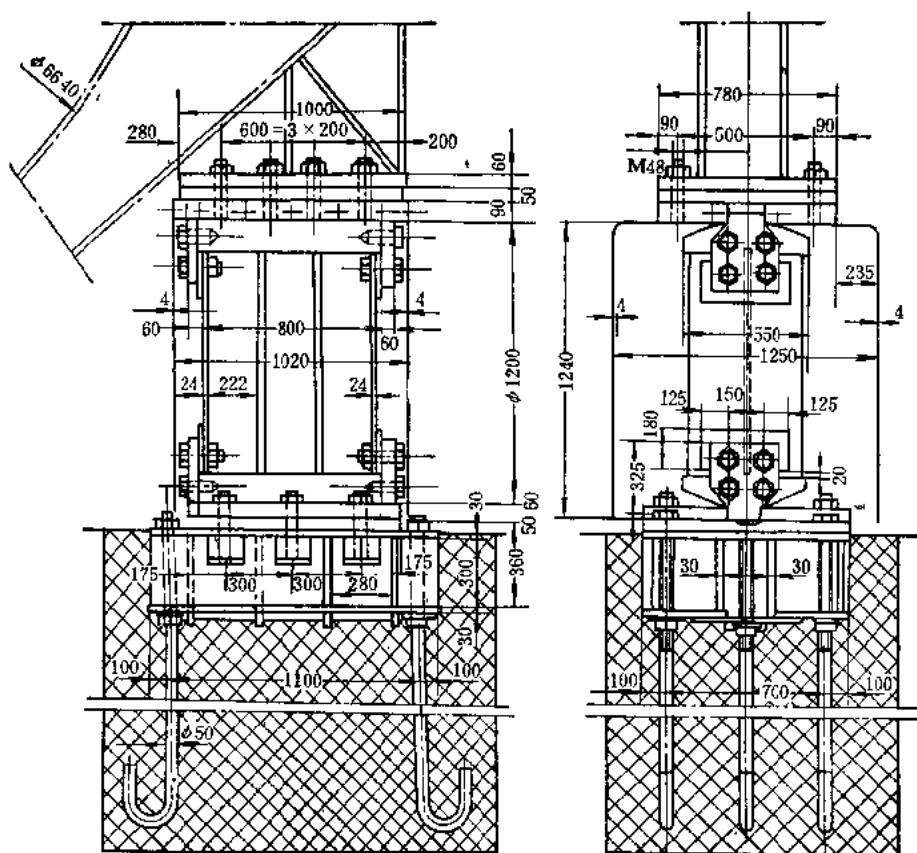


图 15-27 摇摆式支墩 (单位: mm)

## 2. 多滚轴型 (图15-28)

这种支承结构与单滚轴相似, 因法向荷载较大, 以多个较小直径的实心滚轴传递法向力, 滚轴间由链杆保持固定间距。

## 3. 可调整支承点高度的单滚轴型

适用于地基有少量沉陷的支承 (图15-29)。

### (三) 支墩选型

滑动式支墩无论是面接触滑动还是线接触滑动, 支承结构都比较简单, 制作、安装比较方便。滚动式支墩相对复杂, 制作和安装的技术要求较高, 造价相对贵。

无支承环的鞍槽形滑动支座直接由钢管管壁传递荷载, 管壁一般刚度小, 抗局部变形能力弱, 直接与支座接触造成较大局部应力, 这种支座适用于管径  $D \leq 1.0\text{m}$  的情况。当管壁较厚、支墩跨距较小、管断面和管壁刚度大, 也可使用在管径超过  $1.0\text{m}$  的情况。

有支承环的滑动支墩, 管壳刚度得到加强, 局部应力有较大改善。但摩擦阻力大, 摩擦阻力作用点与管轴不重合, 对钢管支承结构和管身造成附加力 (图 15-30), 对管壁应力有一定影响, 但数值不大。对支承环的横向加劲肋的设置来说, 考虑到附加力矩的影响, 肋间距不宜过大。根据《规范》(SD144-85), 这种支墩可用于管径  $D = 1 \sim 3\text{m}$  的情况。如威卡泼坝的泄水钢管直径为  $2.44\text{m}$ , 也采用了这种支承结构 (图15-31)。

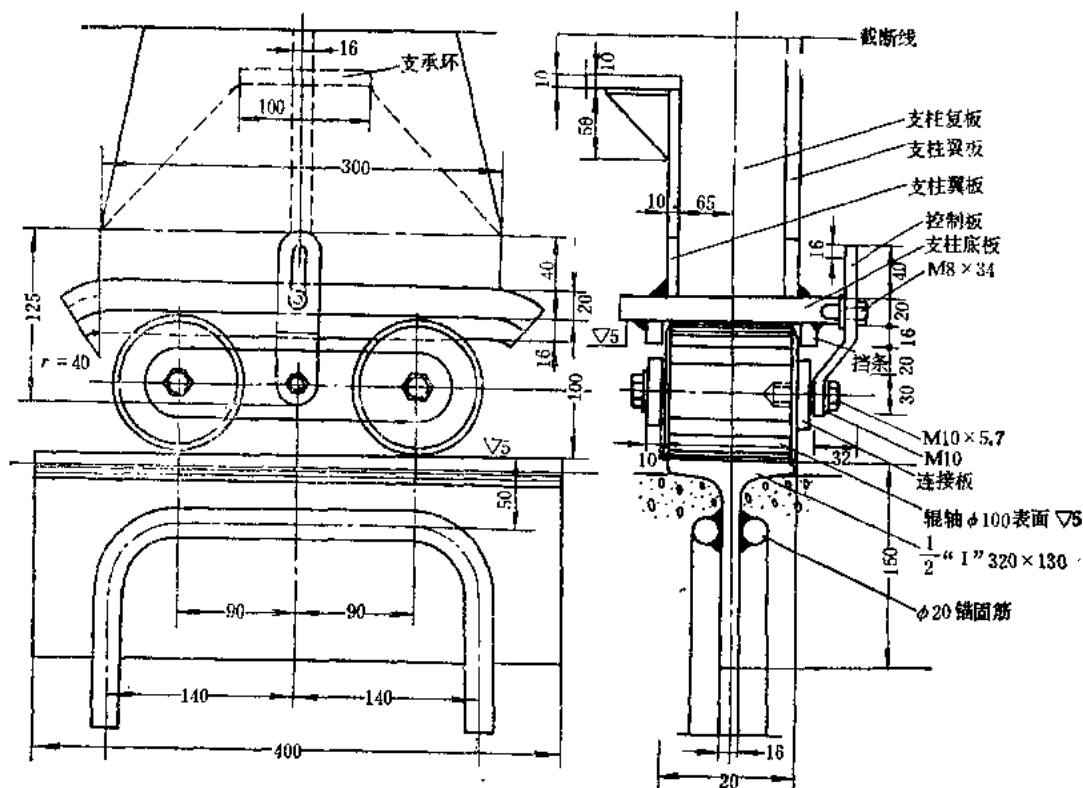


图 15-28 多滚轴型支墩 (单位: mm)

滚动式支墩摩擦阻力小, 支承结构相对合理, 适用范围较广。但结构比较复杂, 造价贵于滑动式, 安装要求高, 在小管径 $D \leq 1.0 \sim 1.5\text{m}$ 时, 采用这种结构形式不一定经济。故《规范》(SD144-85)规定, 滚动式支墩用在管径 $D > 2\text{m}$ 的情况。

### 三、墩座设计

#### (一) 墩座构造

墩座采用100号混凝土或75号水泥砂浆砌料石(条石或块石)。浆砌条石或块石的墩座一般适用于管径 $D \leq 600\text{mm}$ 的情况。

各类型支墩施工一般按两期施工。第一期浇筑底板, 埋设安装钢管用的架立埋件, 墩座上部的支承结构通过锚栓固定在墩座一期混凝土中。第二期在钢管安装调整定位后进行。支承结构安装也可用预埋螺栓孔的方法, 或将支承件连同墩座顶部埋件(弧形垫板、承压板、垫板、地脚螺栓)一起固定在已就位的钢管上, 浇筑二期混凝土后, 待混凝土硬化后再使墩顶部件与管体解脱, 这种做法易于提高复杂支承结构的安装精度。

墩体在垂直于管轴的宽度方向呈鞍形或矩形, 管地间净空隙高度不少于60cm。

支墩墩座的基础面处理类同镇墩, 可开挖成平面, 或垂直于地基反力的倾斜面。

#### (二) 作用于支墩的荷载及其组合

##### 1. 支墩的荷载

(1) 支墩跨间钢管自重和水重的法向分力,

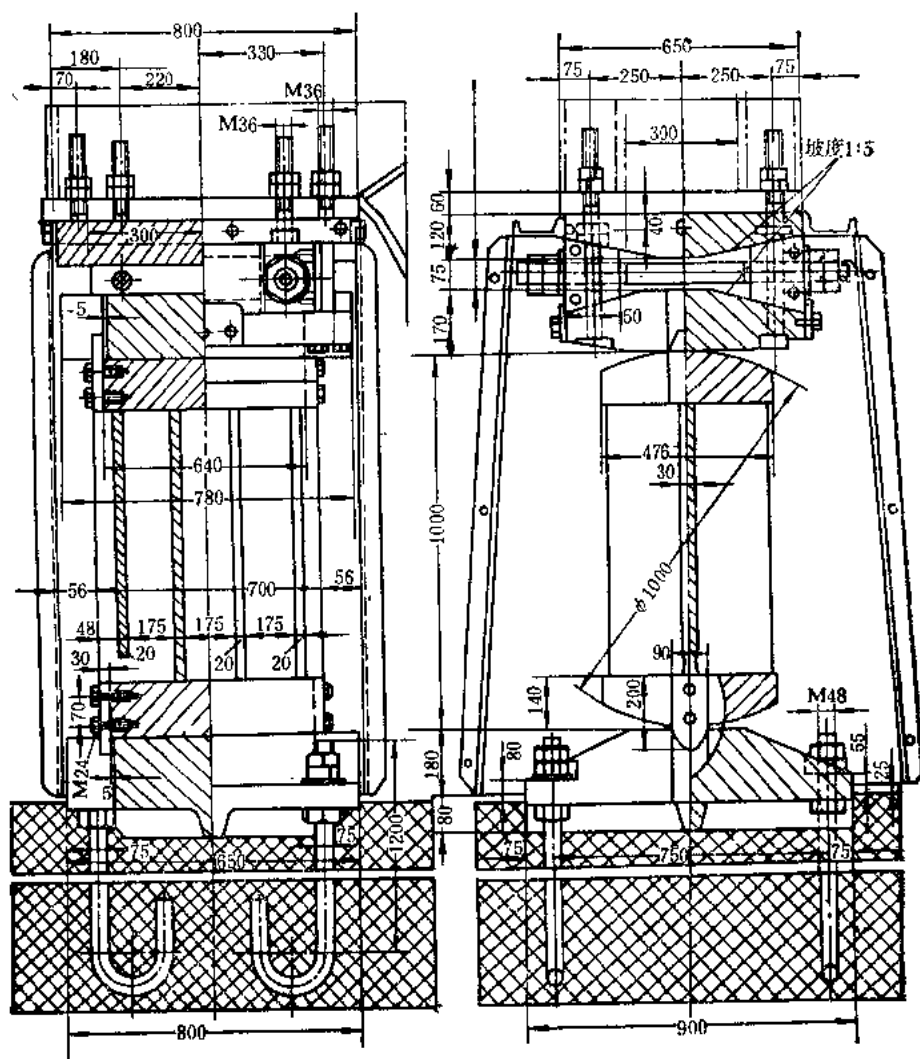


图 15-29 可调整支承点高度的单滚轴型 (单位: mm)

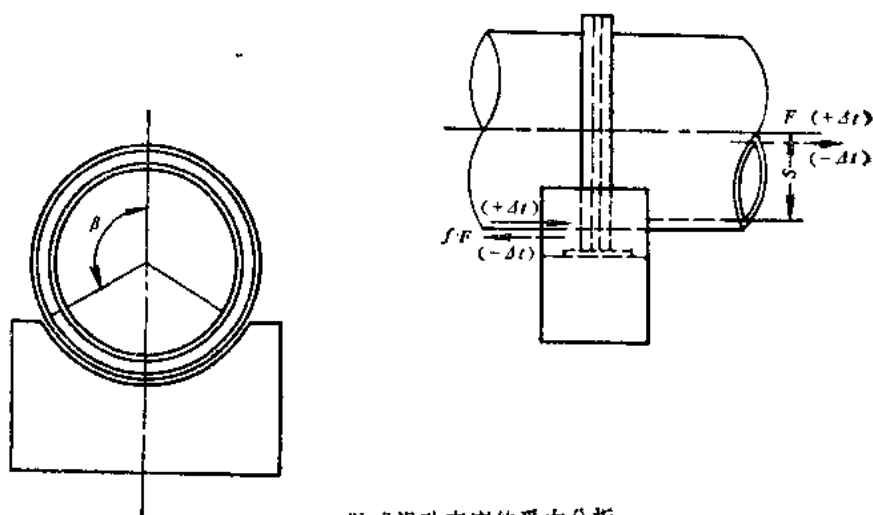


图 15-30 鞍式滑动支座的受力分析

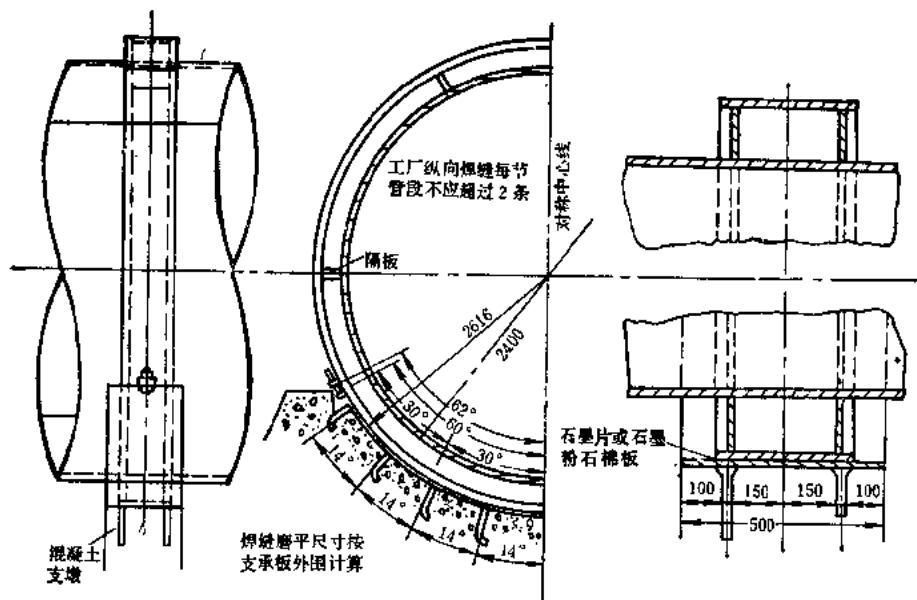


图 15-31 有横向加劲肋的支承结构 (单位: mm)

$$Q_s = m\pi(D_0 + \delta)\delta\gamma_s l \cos\alpha \quad (\text{kN}) \quad (15-20)$$

$$Q_w = \frac{\pi}{4} D_0^2 l \gamma_w \cos\alpha \quad (\text{kN}) \quad (15-21)$$

(2) 温度变化时, 钢管对支墩的摩擦阻力;

$$A_f = \pm(Q_s + Q_w)f \quad (\text{kN}) \quad (15-22)$$

(3) 支墩自重  $G_d$ 。

上三式中  $Q_s$ ——1跨钢管的自重法向分力, kN;

$m$ ——钢管附件重量系数,  $m=0.13\sim0.16$ ;

$D_0$ ——钢管内径, m;

$\delta$ ——钢管壁厚, m;

$\gamma_s$ ——钢容重,  $\gamma_s=76.93\text{kN/m}^3$ ;

$\gamma_w$ ——水容重,  $\gamma_w=9.8\text{kN/m}^3$ ;

$l$ ——支墩间距, 或支座前后各半跨长度之和, m;

$Q_w$ ——1跨管内水重法向分量, kN;

$\alpha$ ——钢管敷设角(倾角°);

$A_f$ ——钢管摩擦阻力。当伸缩节紧靠镇墩下缘时,位于伸缩节下游方向的支墩承受力  $A_f$ , 温升时指向上游, 为负值; 当伸缩节位于镇墩的中间部位, 则伸缩节上游侧的各支墩上, 温升所形成的  $A_f$  为正值, 指向下游, 而伸缩节下游侧各支墩上, 温升的  $A_f$  为负值, 指向上游(图 15-32)。温降时,  $A_f$  方向与温升相反;

$f$ ——摩擦系数, 按支墩类型查表 15-9。

混凝土墩体埋置于地基中深度较大时, 可以考虑静土压力对墩体抗滑稳定的作用。

钢管对支墩的摩擦力作用在滑动面上, 对鞍形支墩, 摩擦力沿鞍槽分布, 力的重心离管轴距离  $S$  (在管轴铅直方向), 由式 (15-23) 计算:

$$S = \alpha_s D \quad (\text{m}) \quad (15-23)$$

式中  $\alpha_s$  为系数, 假定支座反力是均布于圆周, 则  $\alpha_s = \sin \beta / 2(\pi - \beta)$ ; 假定鞍座反力的分布形式按图 15-33 所示, 则

$$\alpha_s = \left[ \frac{1}{2} \cos \beta \times (\pi - \beta' - \sin \beta \cos \beta) + \frac{1}{3} \sin \beta (3 - \sin^2 \beta) \right] / 2(\pi - \beta' + \sin \beta \cos \beta);$$

$\beta$  为管座包角;  $\beta'$  为  $\beta$  的对应弧度,  $\beta' = \frac{\beta}{180^\circ} \times \pi$ 。

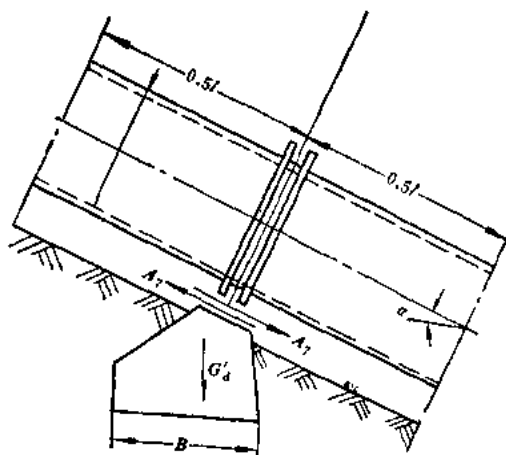


图 15-32 支墩墩体上的作用力

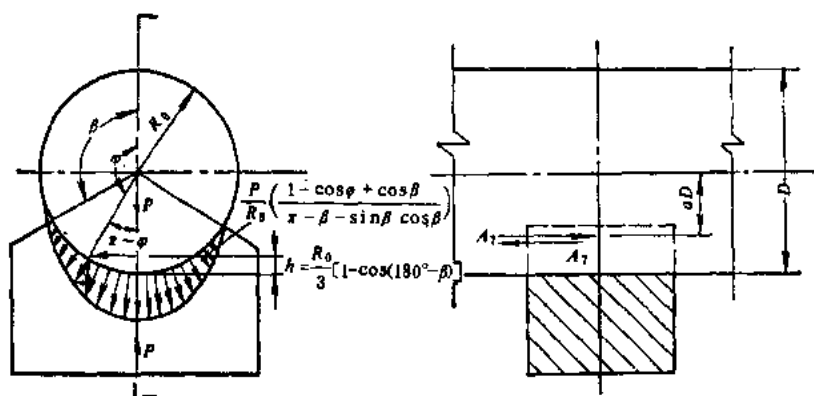


图 15-33 钢管对支座弧面的作用力

## 2. 荷载组合

运行情况 I: 温升摩擦力, 管重、水重法向力, 墩自重;

运行情况 II: 温降摩擦力, 管重、水重法向力, 墩自重;

空管检修和水压试验情况设计时可不予考虑。

### (三) 墩体体积及轮廓尺寸拟定

支墩体积力由抗滑稳定要求决定, 其确定方法与镇墩相同。计算时, 将  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $A_1$  分解成与地基平行及垂直的两组力  $\Sigma H$ 、 $\Sigma V$ , 按下式计算:

$$G_d = \frac{K \Sigma H}{f} - \Sigma V \quad (\text{kN}) \quad (15-24)$$

$$\text{体积} \quad V_d = \frac{G_d}{\gamma_d} \quad (\text{m}^3) \quad (15-25)$$

式中  $K$ ——安全系数,  $K=1.3$ ;

$f$ ——支墩与地基摩擦系数(表15-1);

$\gamma_d$ ——墩体材料容重, 见式(15-4)注。

当计算得到的 $G_d < 0$ 时, 按地基承载力决定底面积, 墩体形式按最小构造尺寸及传力需要决定, 还可用断面更小的钢筋混凝土支墩。

当 $G_d > 0$ 时, 按需要及构造拟定尺寸。

轮廓尺寸拟定按所选支墩型式、地基承载力及施工分期等条件进行, 仍应满足地基不出现拉应力, 因此墩体不宜太高。

支墩上钢管为直管节, 计算中各力按垂直面内力系平衡, 先利用图解法(图15-34)粗略拟定墩体轮廓, 再精确计算墩体重心位置, 各力对底面中心形成的力矩及垂直压力, 用式(15-6)、式(15-7)求得地基应力。图解时, 钢管荷载及墩体自重的合力应不超过底面长度的三分点。

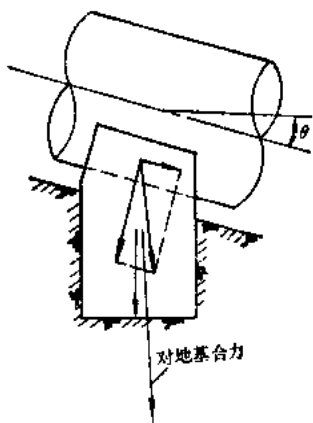


图 15-34 支墩对地基的作用力

墩体宽度(垂直管轴向)不应小于支承结构两

侧最外缘距离, 一般应比墩座顶部的承压垫板边缘宽出(15~20)cm。

#### 四、支墩算例

已知钢管内径 $D_0=800\text{mm}$ , 管壁厚度 $\delta=8\text{mm}$ , 计算段敷设角 $\alpha=38^\circ 27' 42''$ , 支座采用鞍式无支承环滑动形式, 间距 $l=6000\text{mm}$ , 钢管与支座间摩擦系数 $f_1=0.3$ , 混凝土支座与地基摩擦系数 $f_2=0.4$ , 地基容许承载力 $[\sigma]=480\text{kPa}$ 。试按抗滑稳定安全系数 $K \geq 1.3$ 的要求拟定支座尺寸, 并校算地基应力。

(一) 支座上作用荷载及荷载组合

(1) 钢管每米自重 $q_s$ :

$$q_s = \pi(D_0 + \delta)\delta\gamma_s = \pi \times (0.8 + 0.008) \times 0.008 \times 76.93 = 1.562\text{kN/m}$$

(2) 每米钢管中水的重量 $q_w$ :

$$q_w = 0.25\pi D_0^2 \gamma_w = 0.25 \times \pi \times 0.8^2 \times 9.8 = 4.926\text{kN/m}$$

(3) 每跨钢管自重及水重的法向力:

$$\begin{aligned} Q_s + Q_w &= (q_s + q_w)l \cos \alpha = (1.562 + 4.926) \times 6 \times \cos 38^\circ 27' 42'' \\ &= 30.482\text{kN} \end{aligned}$$

(4) 钢管对支座顶部的摩擦力 $A_t$ :

$$A_t = f_1(Q_s + Q_w) = 0.3 \times 30.482 = 9.145\text{kN}$$

(5) 力的组合及对支座基础面上的分力:

温升时, 对支墩基础的水平分力 $H$ (以向上游向为正):

$$\begin{aligned} H &= (Q_s + Q_w) \sin \alpha + A_t \cos \alpha = 30.482 \times \sin 38^\circ 27' 42'' + 9.145 \times \cos 38^\circ 27' 42'' \\ &= 26.12\text{kN} \end{aligned}$$

温升时, 对支墩基础的垂直分力 $V$ (以向下为正):

$$V = (Q_1 + Q_2) \cos \alpha - A_1 \sin \alpha = 30.482 \times \cos 38^\circ 27' 42'' - 9.145 \times \sin 38^\circ 27' 42'' \\ = 18.18 \text{ kN}$$

温降时, 对支墩基础的水平分力  $H$ :

$$H = (Q_1 + Q_2) \sin \alpha - A_1 \cos \alpha = 30.482 \times \sin 38^\circ 27' 42'' - 9.145 \times \cos 38^\circ 27' 42'' \\ = 11.79 \text{ kN}$$

温降时, 对支墩基础的垂直分力  $V$ :

$$V = (Q_1 + Q_2) \cos \alpha + A_1 \sin \alpha = 30.482 \times \cos 38^\circ 27' 42'' + 9.145 \times \sin 38^\circ 27' 42'' \\ = 29.56 \text{ kN}$$

(二) 抗滑稳定需要的支墩体积

(1) 温升时, 抗滑稳定要求墩体重量  $G_d$ :

$$G_d = \frac{KH}{f_2} - V = \frac{1.3 \times 26.12}{0.4} - 18.18 = 66.71 \text{ kN}$$

此重量对应的体积  $V_d = \frac{G_d}{\gamma_d} = \frac{66.71}{22.54} = 2.96 \text{ m}^3$

(2) 温降时, 抗滑稳定要求墩体的重量  $G_d$ :

$$G_d = \frac{1.3 \times 11.79}{0.4} - 29.56 = 8.758 \text{ kN}$$

此重量对应的体积  $V_d = \frac{8.758}{22.54} = 0.39 \text{ m}^3$

体积按温升条件决定。

(三) 拟定支墩尺寸并计算支墩重心位置

支墩的形式及尺寸, 初步拟定如图15-35所示。

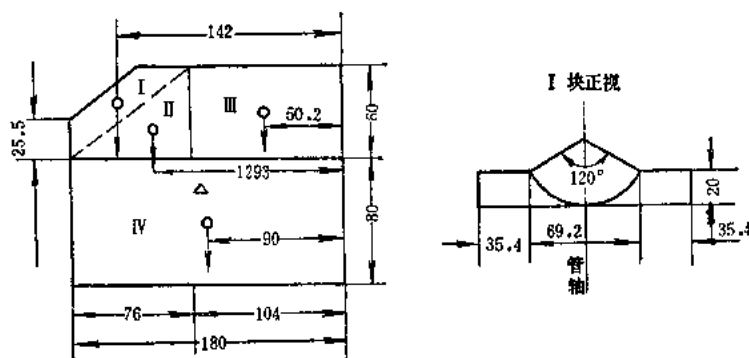


图 15-35 支墩的尺寸拟定 (单位: cm)

支墩在垂直管轴方向的截面重心及管轴重合。顺管轴向的截面重心计算时, 为方便计分成四部分, 即顶部I、腰部II、III和底部IV。I部的重心计算要计及鞍槽影响。各分块对支墩上游边缘的面积矩值列于表15-10。

墩体截面重心离上游端距离  $e$  为:

$$e = \frac{\sum \omega e'}{\sum \omega} = \frac{2.115}{2.441} = 0.866 \quad (\text{m})$$



表 15-10

各分块对支墩上游边缘的面积矩

计算面积 序	面 $\omega(\text{m}^2)$	面积重心距上游端长度 $e'(\text{m})$	面 积 矩 $\omega e'(\text{m}^3)$	累计面积矩 $\Sigma \omega e'(\text{m}^3)$
I	$\frac{1}{2} \times (0.555 + 0.965) \times 0.2 = 0.152$	1.42	0.2158	0.2158
II	$\frac{1}{2} \times (0.75 \times 0.6) = 0.225$	1.29	0.29	0.5058
III	$1.04 \times 0.6 = 0.624$	0.502	0.313	0.8188
IV	$0.8 \times 1.8 = 1.44$	0.90	1.296	2.115

## (四) 支墩地基应力校核

各力对地基的作用位置如图15-36所示。

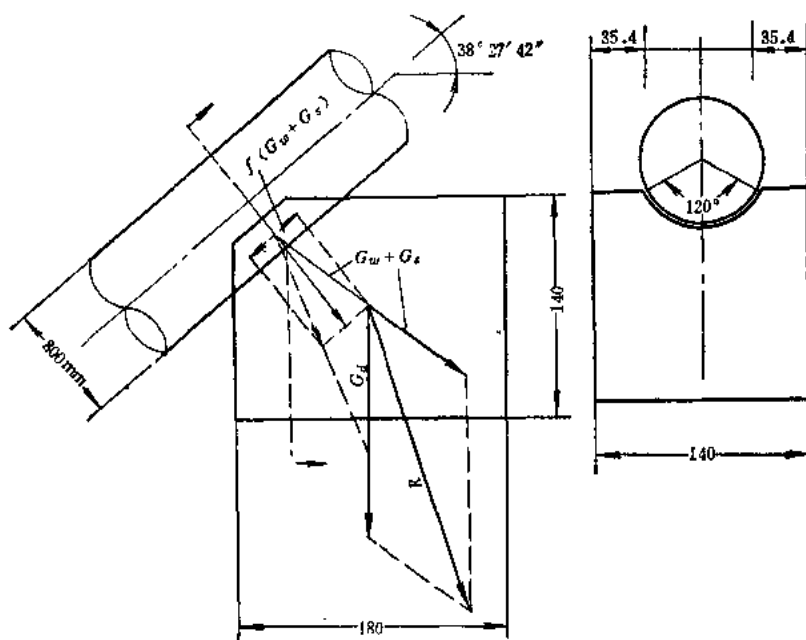


图 15-36 各力对地基的作用位置 (单位: cm)

在温升及温降条件下各力对基础中心的力矩计算如下表15-11。

温升的垂直力  $\Sigma V = 18.18 + 66.71 = 84.89 \text{ kN}$

垂直力的偏心距  $e = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} = \frac{20.037}{84.89} = 0.236 \text{ m}$

温降的垂直力  $\Sigma V = 29.56 + 66.71 = 96.27 \text{ kN}$

垂直力的偏心距  $e = \frac{-3.073}{96.27} = -0.032 \text{ m}$

基础面积  $\omega = 1.8 \times 1.4 = 2.52 \text{ m}^2$

地基应力:

表 15-11

各力对基础中心的力矩计算

序	温 度 状 态	作 用 力 来 源	水平推力 H (kN)	垂直压力 V (kN)	作用力与基础 中 心 距 (m)	对基础中心的 力 矩 (kN·m)	累 计 力 矩 (kN·m)
1	温 升	钢管自重、水重及温度变化	26.12		1.111	+29.098(顺)	+29.098(顺)
2				18.18	0.625	-11.329(逆)	+17.769(顺)
3		支墩自重		66.71	0.034	+2.268(顺)	+20.037(顺)
4	温 降	钢管自重、水重及温度变化	11.79		1.114	+13.134(顺)	+13.134(顺)
5				29.56	0.625	-18.475(逆)	-5.341(逆)
6		支墩自重		66.71	0.034	+2.268(顺)	-3.073(逆)

$$\begin{aligned}\text{温升时 } \sigma &= \frac{\sum V}{\omega} \left( 1 \pm \frac{6e}{B^2} \right) = \frac{84.89}{2.52} \times \left( 1 \pm \frac{6 \times 0.236}{1.4^2} \right) \\ &= 58.023 \text{ kPa (上游侧)} \\ &= 9.35 \text{ kPa (下游侧)}\end{aligned}$$

$$\text{温降时 } \sigma = \frac{96.27}{2.52} \left( 1 \pm \frac{6 \times 0.032}{1.4^2} \right) = 41.94 \text{ kPa (下游侧)} \\ = 34.46 \text{ kPa (上游侧)}$$

地基容许承载力 $[\sigma] = 486 \text{ kPa}$ , 设计值远小于允许值。温升时支墩上游侧与下游侧应力差比较大。计算外力中如计及上游侧墩面与开挖垂直基础面紧密接触, 可减少应力差。

### 第三节 支承结构设计

#### 一、支承环

##### (一) 支承环的截面形式

图15-37表示7种常见的支承环形式。用扁钢垂直或平行管壁布置的支承环, 结构简单, 见图(a)及图(c), 在法向荷载不大时选用; 以单圆环做腹板, 外缘或内、外缘焊接翼缘的型式, 见图(d)、图(e), 断面具有较大刚度, 抗弯能力较强, 用于较大管径和支墩跨距情况; 图(b)、图(f)用于大管径、较大跨距情况; 图(g)则连管壁都加厚了, 显然是因为腹板与管壁连接处出现了很大的局部应力, 按一些文献指出, 管壁加厚的长度由局部应力不超过容许应力及不短于管壁变形受环抑制而形成的弹性曲线半波长的2倍来决定, 即在环两侧各长 $b$

$$b = 0.78\pi\sqrt{R\delta} = 2.34\sqrt{R\delta} \quad (\text{m}) \quad (15-26)$$

式中  $R$ ——管半径, m;

$\delta$ ——管壁计算厚度, m。

腹板高与厚度的比值通常为10~12, 翼缘板厚略小于或等于腹板厚。小型电站建设中为了减少钢板供应品种规格, 支承环的各部分厚度一般与钢管管壁同厚。断面拟定应满足《TJ17-74》中第60条、第62条规定。翼缘与腹板间、腹板之间等间距布置肋, 一般8

~12片,视环自身稳定而定。在滑动型支承环与墩体承压结构接触部位,加劲肋间距应加密,以防温度变化时钢管轴向伸缩变形引起环的破坏。滚动型支承环依靠环两侧支柱,将法向力传给支墩承压结构,环与支柱连接处适当增加肋板数。

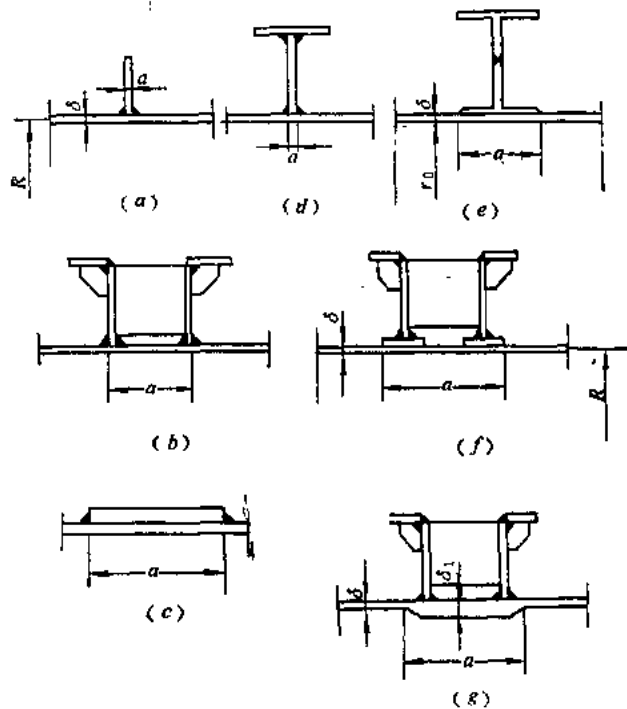


图 15-37 支承环的几种断面形式

## (二) 支承环与支柱连接形式

滑动支座或滚动支座都可能采用支柱传递法向力,支柱与环连接基本形式有两种,

(1) 由支承环局部扩大成支承短柱(图15-38b);

(2) 支柱与环分开加工,在工地现场组接,图15-38表示此种组接及加劲肋设置情况。

## (三) 支承环断面强度校核

支承环焊在管壁上。在内水压力、一跨管重和水重的法向分量以及支柱反力的作用下,环犹如环梁,环内纵切面上产生内力,包括弯矩 $M_R$ 、法向力 $N_R$ 、剪力 $S_R$ 。

环断面处于偏心受压或受拉状态,强度校核以偏心受压部分为主。按《TJ17-74》规定,偏心受压断面腹板高度 $h_0$ 与厚度 $\delta$ 之比应满足:

$$\frac{h_0}{\delta} \leq 100 \sqrt{\frac{\xi}{\sigma_{\max}}} \quad (15-27)$$

式中  $\xi$  ——系数,据  $\alpha_1 = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  查表15-12;

$\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  ——腹板在不考虑纵向稳定系数时的边缘最大、最小应力。

如果式(15-27)不能满足,则可调整断面,或设加劲板。劲板在腹板两侧成对设置,

表 15-12

系 数  $\xi$ 

$\alpha_1$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$\xi$	400	750	1100	1400	1600	1800	1950	2100	2100	2100

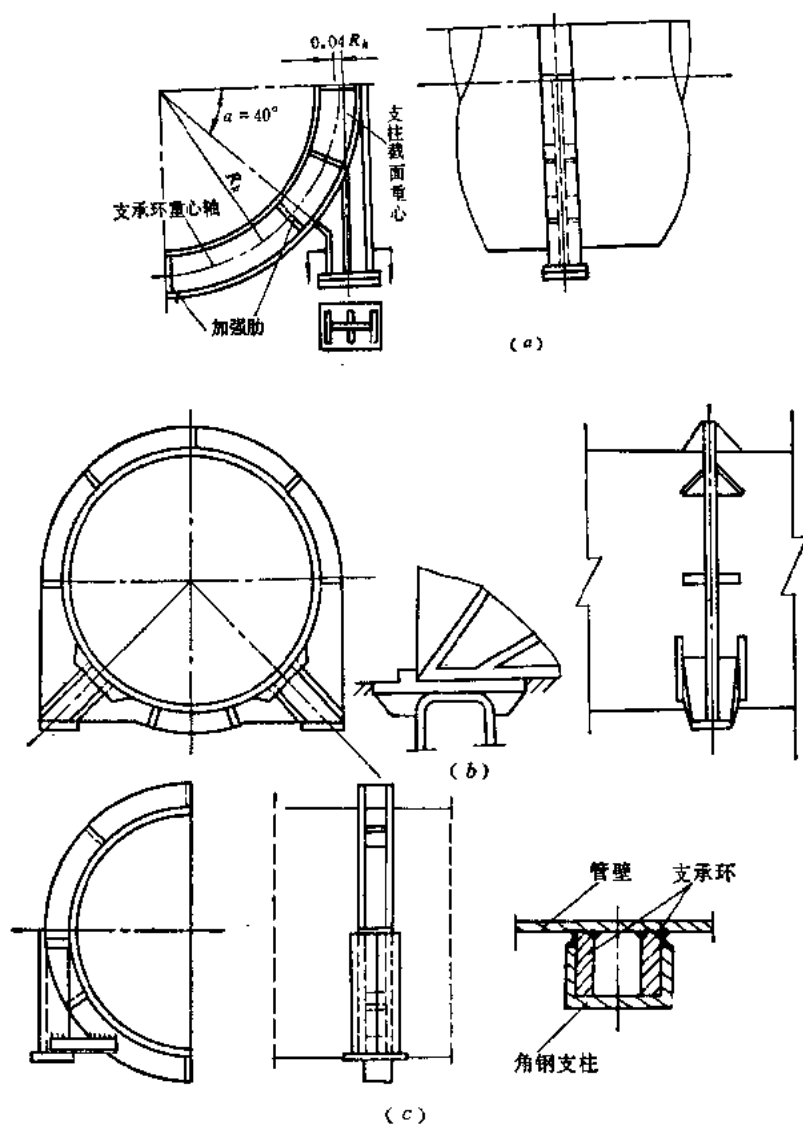


图 15-38 支承环及柱的结构形式

劲板外伸宽度应不小于厚度的10倍；厚度不应小于腹板厚的3/4。劲板间翼缘以压应力最大处作校核断面，用式（15-27）校核高厚比。

支承环自身强度，顶部（对应圆心角  $\theta = 0^\circ$ ）及底部（ $\theta = 180^\circ$ ）作计算点按表12-8中13、14项计算内力  $M_R$  及  $N_R$ ，再按下式计算应力：

$$\sigma_s = \frac{N_R}{\phi F} + \frac{M_R}{W_R} \leq [\sigma] \quad (\text{kPa}) \quad (15-28)$$

式中  $F$ ——支承环计算断面 (图15-41所示), 环两侧各计入  $0.78\sqrt{r\delta}$  长的等效管壁面积;

$\varphi$ ——纵向稳定系数, 与偏心率  $e$  及环细长比  $\lambda$  有关, 可查《钢结构设计规范》(TJ17-74)附录五;

$W_R$ ——支承环断面抗弯刚度, 参见表12-11。

按式(15-28)计算结果如能满足稳定要求, 环断面强度设计一般偏于安全。

## 二、滚动型支承结构强度校核

### (一) 支承柱

支承环断面形心, 宜安排在图15-39(a)所示位置, 即要求  $b:R_s=0.04$ 。计算支承柱内力及应力时, 假设支墩反力为集中荷载作用在环两侧, 实际上柱与环连接处范围较大, 刚度也有很大变化。由于计算困难, 按上述假设计算结果偏于安全。

在一跨钢管自重、水重的法向分力  $(Q_s+Q_w)$  及支柱与墩体摩擦力  $(Q_s+Q_w)f$  作用下, 支柱范围形成支承环截面内的弯矩  $M$ , 和管轴向摩擦力弯矩  $M_x$ , 以及支柱轴向压力  $N$  (图15-39b),  $M_x$  由摩擦力产生,  $M_y$  按支承环计算断面中两肩部内力取值 (图15-39a)。柱脚不论是滑动还是滚动结构, 均看成是“铰”。 $M_x$ 、 $M_y$  沿柱高成直线分布, 内力最大截面应力按式(15-29)、式(15-30)、式(15-31)计算, 最大应力在支承环外缘与柱连接处。

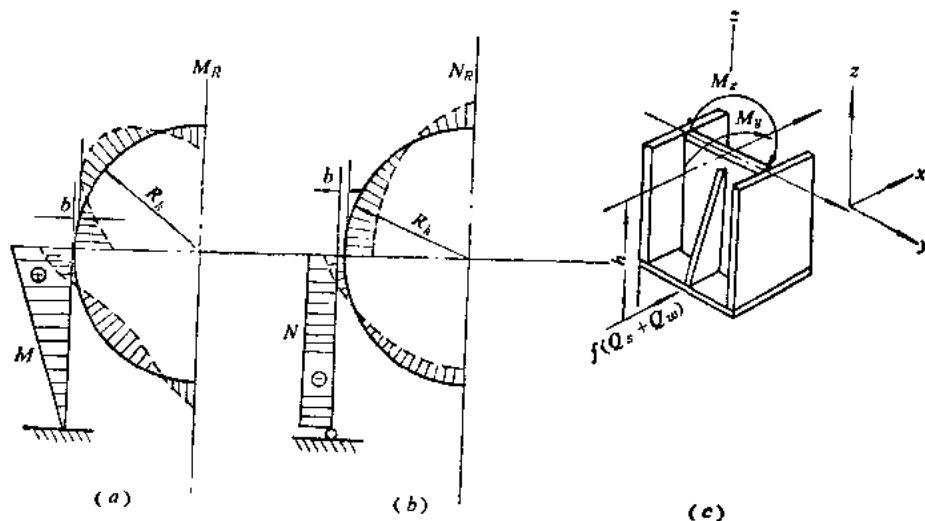


图 15-39 支柱内力示意

$$\sigma_x = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{W_x} \quad (\text{kPa}) \quad (15-29)$$

$$\sigma_y = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} \quad (\text{kPa}) \quad (15-30)$$

$$\tau_{xy} = \frac{NfS_y}{2bJ_y} \quad (\text{kPa}) \quad (15-31)$$

上三式中  $N=Q_s+Q_w$ , kN;

$M_y^{\max}$ 同支承环 $M_{a-}$ 、 $(F)$ 值,  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ;

$$M_x = \frac{1}{2}(Q_s + Q_w)fh, \text{ kN}\cdot\text{m};$$

$b$ ——图示柱 $y$ 向宽度,  $\text{m}$ ;

$h$ ——柱断面高度,  $\text{m}$ ;

$S_y$ ——柱断面对 $y$ 轴静矩,  $\text{m}^3$ ;

$J_y$ ——柱断面对 $y$ 轴惯矩,  $\text{m}^4$ ;

$f$ ——支承结构与支墩的摩擦系数。

图15-39(a)中的支柱焊接在环外缘, 焊缝承受剪力。按焊缝容许应力(表12-2及表12-4)计算焊缝长, 考虑钢管运行中的震动幅度比较小, 按下式计算每个支柱贴角焊缝长度。

$$\Sigma l_f \geq (Q_s + Q_w) / 1.4 h_f [\tau_f] \quad (\text{m}) \quad (15-32)$$

式中  $h_f$ ——焊缝高度, 一般取钢板厚的(0.8~1.0)倍;

$[\tau_f]$ ——贴角焊缝容许剪应力, 查表12-4。

## (二) 滚轴(或滚轮)

### 1. 构造要求

滚轴设置在支柱底部承压板及墩体顶部承压板之间, 与上、下承压板呈线接触型, 滚轴轴线与管轴垂直, 滚轴两端要设防滑措施, 图15-27所示防滑压板端部为渐开曲线, 也可用相近的圆弧线。

### 2. 滚轴直径、长度选择及强度验算

滚轴直径 $d$ 与长度 $b$ 的选择按它与上、下承压板接触应力不超过许可值进行。线接触应力按下式计算:

$$\sigma_{\max} = 0.418 \sqrt{\frac{2PE}{bd}} \leq 2.5\sigma_s \quad (\text{kPa}) \quad (15-33)$$

式中  $P$ ——一个支柱传递来的荷载,  $P = \frac{1}{2}(Q_s + Q_w)$ ,  $\text{kN}$ ;

$E$ ——材料弹性模量,  $\text{kPa}$ 。若两种材料弹模不同, 分别为 $E_1$ 、 $E_2$ , 则应采用折算弹性模量 $E'$ 进行计算:

$$E' = 2E_1E_2 / (E_1 + E_2)$$

$b$ ——滚轴长度,  $\text{m}$ ;

$d$ ——滚轴直径,  $\text{m}$ ;

$\sigma_s$ ——接触的两种材料中较小的屈服点,  $\text{kPa}$ 。若材料表面淬火处理, 则采用提高后的数值。

对于多个滚轴的支承结构, 上式中的 $d$ 用 $nd$ 来代替,  $n$ 为同一支柱下的滚轴数。

图15-42给出按滚轴或滚轮的铸钢、铸铁型号求出的力 $P$ 与 $bd$ 的关系, 可根据 $P$ 值确定需要的滚轴直径 $d$ 和长度 $b$ 。滚轴的最大长度不超过支柱在轴宽方向尺寸, 滚轴直径在80~250mm内选择。滚轴直径小时, 则可直接用棒钢加工; 直径较大时, 需要将棒钢锻

打加粗，或直接用铸钢件。对于两个半径为 $R_1$ 的滚轴组成的滚动结构（图15-28）形式，滚轴与埋在墩体中的弧形轨头接触，接触应力应满足下式：

$$\sigma = \xi_1 \sqrt[3]{\frac{PE^2}{R_2}} \leq \sigma, \quad (\text{kPa}) \quad (15-34)$$

式中  $\xi_1$ ——滚轴半径 $R_1$ 及轨顶曲率半径 $R_2$ 比值所决定的系数，根据《SDJ 13-78》， $\xi_1$ 值查表15-13；

$R_2$ ——轨顶曲率半径，查YB222-63、YB350-63、GB181~183-63。

表 15-13

$\xi_1$

值

$\frac{R_1}{R_2}$	1.00	0.90	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1
$\xi_1$	0.078	0.084	0.092	0.101	0.112	0.122	0.139	0.162	0.215	0.256	0.33

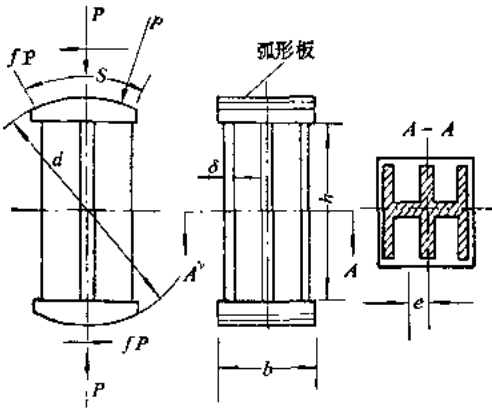


图 15-40 焊接成形的支承滚轮

一些资料指出：当支柱荷载超过 490 kN，或计算得的滚轴直径较大，直接采用圆钢有困难时，则可采用两个以上的滚轴或者图 15-40 所示组接结构形式。这种组接滚轴由上、下弧形板及中间肋板结构组成。弧形板曲面周长 $S$ 应大于钢管最大轴向变形长的两倍，即

$$S \geq 2\alpha \Delta t l \quad (\text{m}) \quad (15-35)$$

式中  $\alpha$ ——钢的线胀系数， $\alpha = 1.2 \times 10^{-6}$ ；

$\Delta t$ ——钢管安装温度与设计最高温度（或最低温度）的差值；

$l$ ——分段钢管离镇墩最近的一个支墩中心到镇墩边缘的距离，m。

中间板肋截面积 $A$ 由承受的壓力值 $P$ ，按轴心受压计算确定，即

$$A = \frac{P}{[\sigma]\varphi} \quad (\text{m}^2) \quad (15-36)$$

式中  $\varphi$ ——稳定系数，在腹板高 $h$ 与板厚 $\delta$ 之比小于30时，可取 $\varphi = 1$ 。

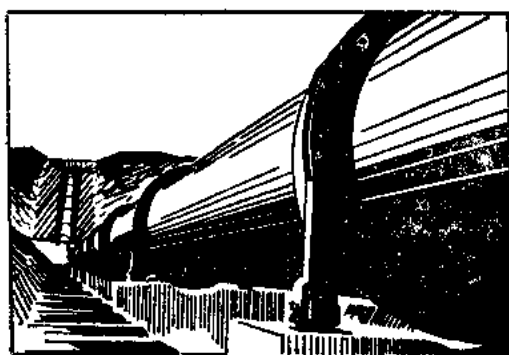
在管轴方向，要求腹板截面有较大的刚度。滚轴偏离安装位置时，腹板与弧形板间的连接焊缝承受压力 $P$ 和剪力 $P \sin \Delta$ ，应进行强度校核，焊缝高不少于板厚的0.8， $\Delta$ 为 $P$ 偏转角。

肋板保证腹板纵向稳定，厚板不小于腹板的3/4，一般等于或稍小于腹板厚。

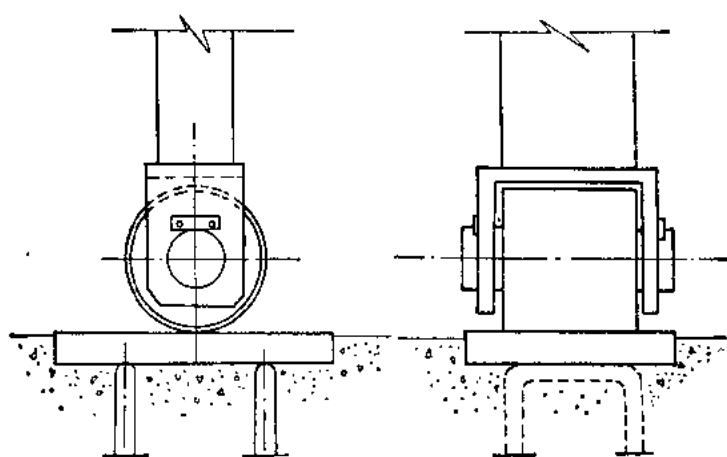
### (三) 滚轮

图15-41为闸门的滚轮结构在管支承中应用实例。滚轮用固定在支柱下底板的轮架和轴连接，温度变化时随钢管、支柱一起移动，支墩顶部埋置平面支承板，此平面方向与管轴平行。

滚轮直径 $d$ 及长度 $b$ 的选择按图15-42查用，且用式（15-33）验算接触应力。轮滚轴



(a)



(b)

图 15-41 滚轮结构

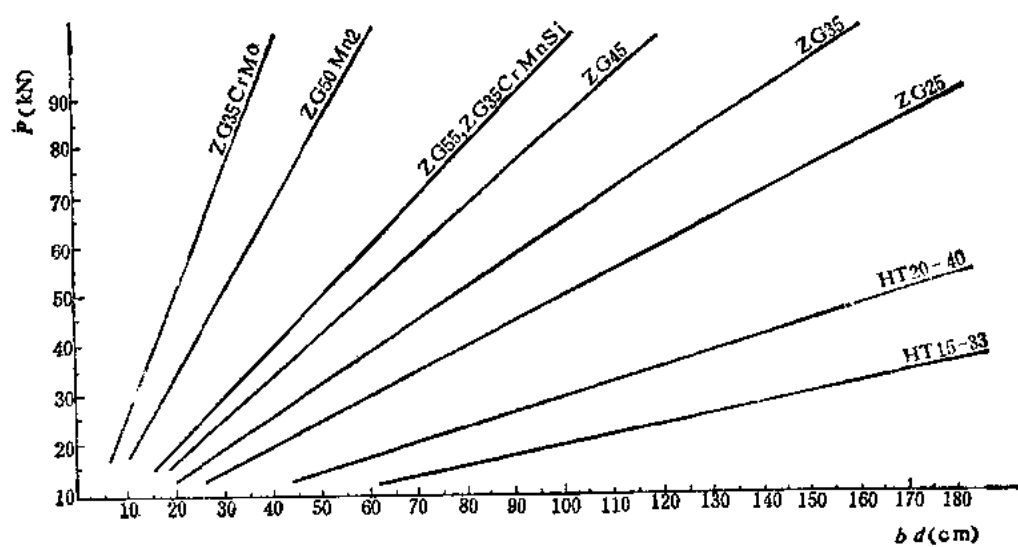


图 15-42 支承结构滚轮 $bd$ 值计算曲线



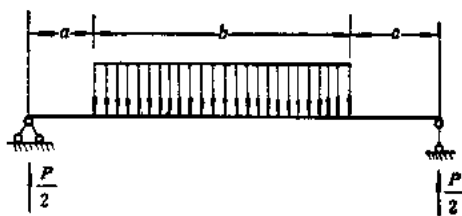


图 15-43 轮轴荷载示意图

直径  $d_1$  约为滚轮直径的  $(1/3 \sim 1/4)$ ，按下列诸式校核其应力。

1. 轮轴弯曲应力 (图 15-43)

$$\sigma = \frac{P(4a+b)}{0.785d_1^3} \leq [\sigma] \quad (\text{kPa}) \quad (15-37)$$

2. 轮轴剪应力

$$\tau = \frac{8P}{3\pi d_1^2} \leq [\tau] \quad (\text{kPa}) \quad (15-38)$$

3. 轮套承压应力

$$\sigma_{cs} = \frac{P}{d_1 b} \leq [\sigma_{cs}] \quad (\text{kPa}) \quad (15-39)$$

4. 轴承座局部紧接承压力

$$\sigma_{cl} = \frac{P}{2d_1 t} \leq [\sigma_{cl}] \quad (\text{kPa}) \quad (15-40)$$

式 (15-37) ~ 式 (15-40) 中:

$P$ ——一个支柱传下的荷载, 即半跨钢管法向荷载;

$$P = \frac{1}{2}(Q_s + Q_w) \quad (\text{kN})$$

$a$ 、 $b$ ——见图 15-43 所示, m;

$d_1$ ——轮轴直径, m;

$t$ ——一侧轮架支承板的厚度, m;

$[\tau]$ 、 $[\sigma]$ 、 $[\sigma_{cs}]$ 、 $[\sigma_{cl}]$ ——材料容许剪应力、抗拉抗压、或抗弯应力、局部承压应力和局部紧接承压应力, kPa。

#### (四) 防滑结构

防止滚轴偏离正常工作位置的措施较多, 单滚轴的防滑结构 (图 15-44a) 比较简单, 采用固定在滚轴上的挡条, 挡条两端嵌合在上、下承压板两侧的预留槽中。挡条的宽度应大于固定它的螺栓直径 3 倍, 固定螺栓最小直径不少于 8mm。挡条上、下端嵌入部分用渐开曲线, 或近似圆弧线, 这种措施使滚轴转动时, 挡条与上、下承压板间无“卡阻”现象。

图 15-44(b) 对组合型滚轴比较适用, 上下两片挡板固定在滚轴弧形板上, 嵌入承压板部分仍用渐开线。

图 15-44(c) 适用于直径较小的滚轴, 与图 15-44(a) 相仿, 但挡板固定在上承压板上, 挡板端部凸头突入滚轴孔中。

图 15-28 中的防滑结构比较适用于多个滚轴情况。

采用滚轮型式时, 不再设置附加的防滑结构, 由滚轮圆周一侧的突缘防侧移。

渐开线轮廓按式 (15-41)、式 (15-42) 求得:

$$x = \alpha_1 R \quad (15-41)$$

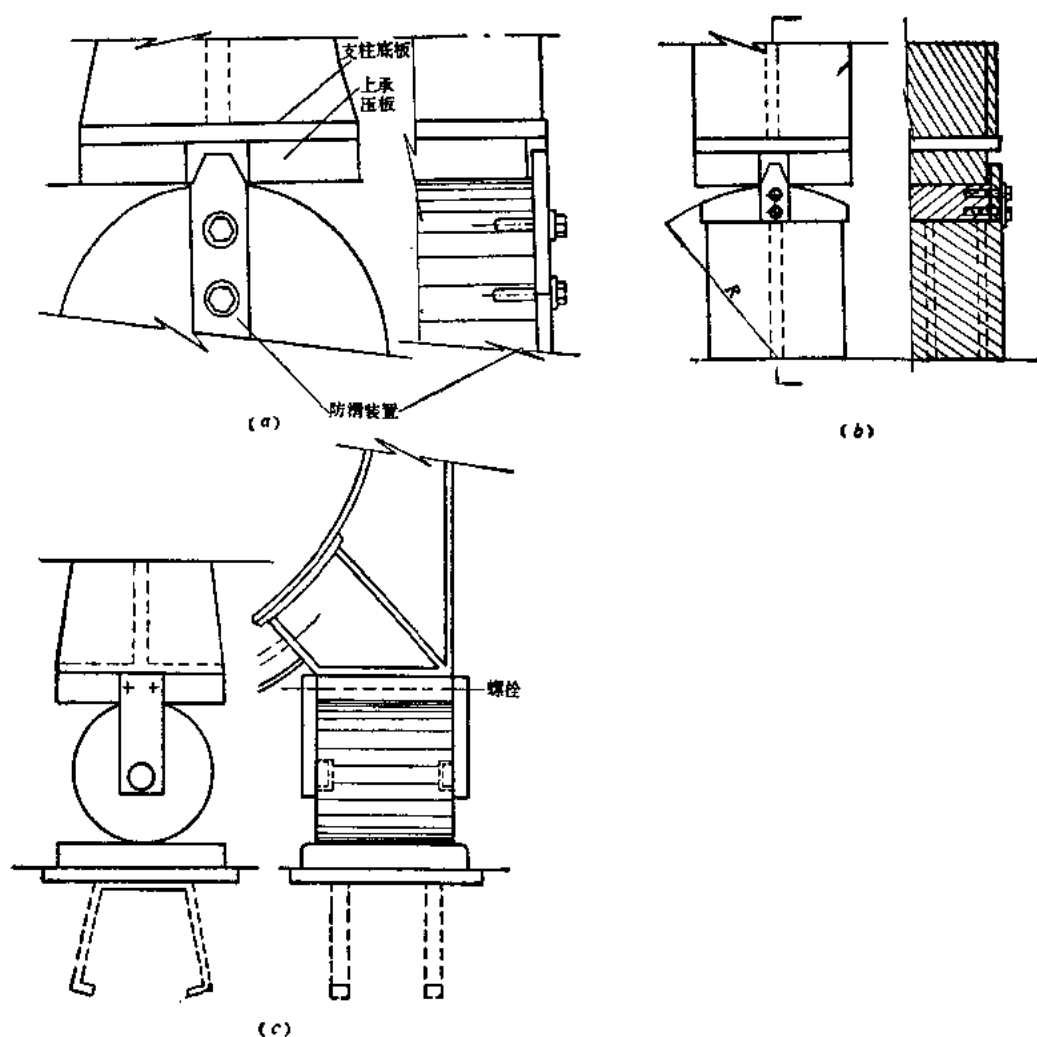


图 5-44 滚轮防滑移结构

$$y = \alpha_2 R \quad (15-42)$$

式中  $R$  —— 滚轴半径;

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  —— 与滚轮转动圆心角  $\theta$  有关的系数,

$$\alpha_1 = \cos \theta \left( \operatorname{tg} \theta - \frac{\theta}{180} \pi \right) \quad (15-43)$$

$$\alpha_2 = \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) - \sin \theta \left( \operatorname{tg} \theta - \frac{\theta}{180} \pi \right) \quad (15-44)$$

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  值可按圆心角查表 15-14。

【例 15-1】 支承滚轴半径  $r=90\text{mm}$ , 支承到镇墩边缘距离  $L=126\text{m}$ , 夏天钢管放空时最高温度  $60^\circ\text{C}$ , 安装合拢温度为常年平均气温  $22^\circ\text{C}$ , 采用挡条防滚轴滑动, 计算挡条端部渐开线。

钢管在支承座处最大轴向变位为:

$$\Delta L = \alpha \Delta t L = 1.2 \times 10^{-5} \times (60^\circ - 22^\circ) \times 126 = 0.057\text{m}$$

表 15-14

 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  值

$\alpha_1$	0.0243	0.0054	0.0097	0.0151	0.0216	0.0294	0.0382	0.0481	0.0590
$\alpha_2$	0.0001	0.0003	0.0009	0.0017	0.003	0.0048	0.0072	0.0102	0.0140
$\theta^\circ$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\alpha_1$	0.0710	0.084	0.098	0.112	0.128	0.144	0.161	0.178	
$\alpha_2$	0.0185	0.026	0.034	0.043	0.054	0.066	0.081	0.098	
$\theta^\circ$	22	24	26	28	30	32	34	36	

钢管温度变位时滚轴转动中心角  $\theta$ 

$$\theta = \frac{\Delta L}{r} = \frac{57}{90} = 0.6333 = 36^\circ 17' 14''$$

挡条端部渐开线轮廓计算按式 (15-41)、式 (15-42)。承压板厚 20mm, 挡条嵌入承压板 18mm, 拟定挡条宽 40mm, 计算时,  $x_{\max} = 18\text{mm}$ , 计算结果见表 15-15。

表 15-15

计 算 成 果 表

单位: mm

$\alpha_1$	0	0.0024	0.0097	0.0220	0.0380	0.0590	0.084	0.1120	0.1440	0.1780	0.2150
$\alpha_2$	0	0.0001	0.0009	0.0031	0.0075	0.0149	0.0260	0.0430	0.0660	0.0980	0.1410
$x$	0	0.20	0.87	1.90	3.40	5.3	7.60	10.10	12.90	16.00	19.30
$y$	0	0.01	0.08	0.28	0.67	1.30	2.40	3.87	5.97	8.84	12.70

挡条端部曲线按左右对称 (图 15-45) 绘制。

## (五) 滚轴承压板

滚轴承压板也称轴承板。承压板面积按滚轴在温度变化时产生的滚动段弧长 (上例中的  $\Delta L$ ) 的 2 倍及轴宽确定。置于墩体上的下承压板面积, 还应满足混凝土容许承压应力所需要的最小面积要求。两个镇墩间的各支承点在发生温度变化时, 轴向伸缩值随支承点离镇墩距离而变, 设计时, 应以离镇墩最远的一个支承点变位值为依据。

上、下承压板一般厚度在 20~40mm 之间, 用厚板或中厚板焊制成箱形结构。

## 1. 单滚轴承压板

承压板下的混凝土应力 (图 15-46)

$$\sigma_k = \frac{P}{ab} \left( 1 + \frac{6e}{b} \right) \leq [\sigma_k] \quad (\text{kPa}) \quad (15-45)$$

式中  $a$ 、 $b$  ——承压板平面尺寸, 其中  $b$  为管轴向长度, m;

$P$  ——作用在一个滚轴上的荷载, 即半跨管重和水重的法向分量,

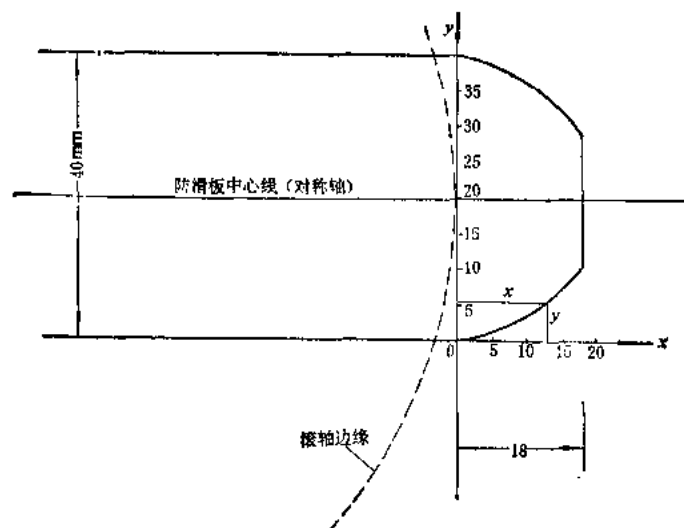


图 15-45 挡条端部曲线

$$P = \frac{1}{2} (Q_s + Q_w) \quad (\text{kN});$$

$e$  —— 荷载偏心距,  $e = e' + fh$ , m;

$f$  —— 滚动摩擦系数,  $f = 0.1$ ;

$h$  —— 承压板面到墩面距离, m;

$[\sigma_h]$  —— 支墩墩体的容许承压应力,

$$[\sigma_h] = \frac{0.75\beta R_s}{K} \quad (\text{kPa});$$

$K$  —— 局部承压安全系数, 按《SDJ20-78》可取 1.5;

$\beta$  —— 局部承压强度提高系数,  $\beta = \sqrt{\frac{ab}{a'b'}}$ , 其中  $a'$ 、 $b'$  分别为承压板下墩面尺寸 (图 15-46);

$R_s$  —— 墩体材料轴心抗压设计强度。对 100 号混凝土,  $R_s = 559 \text{ kPa}$ ;

$e'$  —— 温度变化时, 钢管支承偏离安装位置的最大值,

$$e' = \alpha L \Delta t (\text{m}).$$

## 2. 承压板的厚度

设厚度为  $h$ , 承压板材料容许抗弯强度为  $[\sigma]$ , 墩面容许承压应力  $[\sigma_h]$ , 厚度  $h$  按下式计算:

$$h = \left( \frac{[\sigma_h]}{[\sigma]} \frac{\left(e + \frac{b}{2}\right)^3}{b} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{cm}) \quad (15-46)$$

式中符号含 2 同式 (15-37)、式 (15-45)。

承压板最小厚度一般 0.015~0.02m, 即 15~20mm。

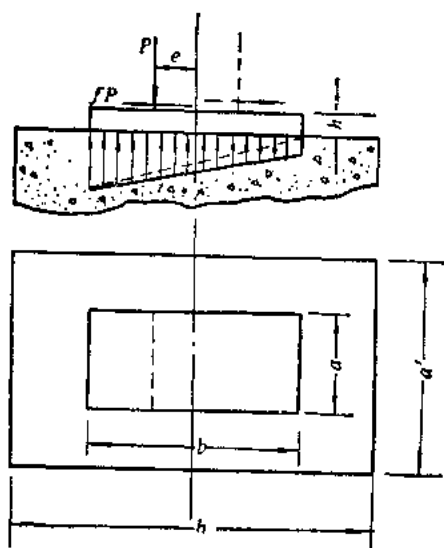


图 15-46 温度变化时支座应力

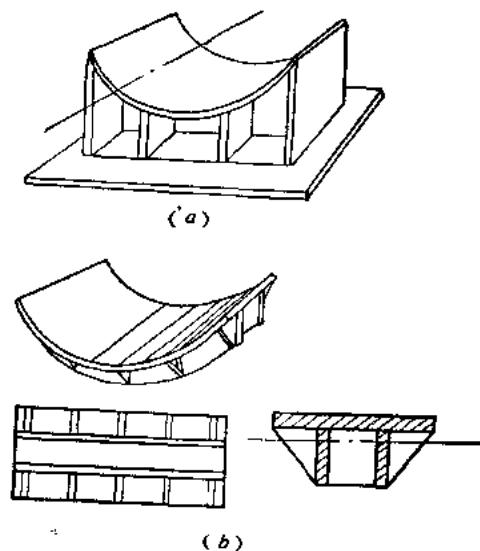


图 15-47 焊接式鞍形支座

### 3. 轨道承压

滚轴下采用铸钢轨道时, 设计同闸门槽埋件, 见第七章内容。

## 三、滑动型支承结构强度校核

### (一) 鞍槽支承

钢管直接与鞍形支座接触时, 承托的鞍座有两种构造形式, 即: 钢板焊接结构、铸钢或铸铁的支座; 有弧形钢垫的混凝土支座(图 15-47)。近似认为鞍座承受钢管法向力后的反力如图 15-33 所示。

水平分力总和为

$$F = (Q_w + Q_s) \left[ \frac{1 + \cos \beta - \frac{1}{2} \sin^2 \beta}{\pi - \beta + \sin \beta \cos \beta} \right] \\ = (Q_w + Q_s) K \quad (\text{kN}) \quad (15-47)$$

式中  $Q_w$ 、 $Q_s$ ——1 跨钢管的管重及水重法向分力, kN;

$\beta$ ——图 15-33 所示的角度。当  $\beta = 120^\circ$  时, 方括号内数值为: 0.204;

$K$ ——系数, 不同  $\beta$  角的  $K$  值见表 15-16。

$F$  力的位置在管轴下  $S = \alpha R_s$  处, 系数  $\alpha$  由  $\beta$  角从表 15-16 查出。

表 15-16

系 数  $K$  值

$\beta$	$90^\circ$	$95^\circ$	$100^\circ$	$105^\circ$	$110^\circ$	$115^\circ$	$120^\circ$	备 注
系数 $\alpha$	0.666	0.696	0.724	0.753	0.781	0.807	0.833	按鞍座反力抛物线分布
系数 $K$	0.318	0.298	0.279	0.259	0.240	0.222	0.204	

图 15-47 的金属支座形式中, 图 (a) 为钢板焊接件, 图 (b) 为铸钢或铸铁件, 钢筋混凝土 (图 15-22) 表面的垫板 (或支座) 用锚栓固定在混凝土中。

不论何种支座, 其对称中心截面 (图 15-48 中 I-I 截面) 所承受的拉力为  $F$  (式 15-47), 中心截面高度  $h$  可取管径的  $1/6$ 。

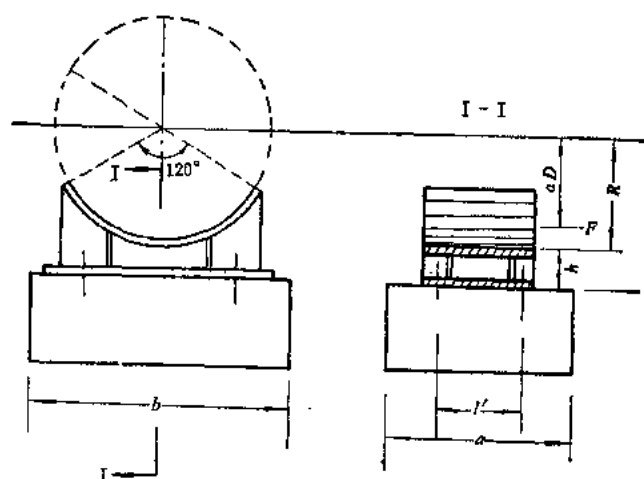


图 15-48 钢管鞍座板的固定方式

支座尺寸选择应满足强度要求。钢或铸铁支座材料强度较大, 易于满足应力要求。在应力不大的情况下, 支座形式及尺寸按构造要求决定。钢板焊接支座用的板厚一般不小于 8mm, 腹板可用单片或双片, 视钢管一跨法向力大小而定。加劲肋板在腹板两侧对称设置, 一般 3~4 片。铸铁支座的腹板、上下承压板的最小厚度  $t$ , 按采用的材料分别为:

HT20-40	$t=6\sim 8\text{mm}$
HT25-47	$t=8\sim 15\text{mm}$
HT35-54	$t=15\text{mm}$

铸钢的最小厚度不少于 8mm。

## (二) 钢或铸铁支座的地脚螺栓

地脚螺栓直径用 M16~M22, 设 4~6 根。螺栓截面承受温度变化时钢管与支座摩擦力所引起的对混凝土墩面作用力矩。按初选螺栓有效截面, 校核拉应力。摩擦力对墩面的力矩  $M$  为:

$$M = A_f [R_0 (1 - 2\alpha_s) + h] \quad (\text{J}) \quad (15-48)$$

当螺栓数为 4 时, 每根螺栓应力为:

$$\sigma = \frac{M}{2A_s l'} \leq [\sigma] \quad (\text{kPa}) \quad (15-49)$$

当螺栓数为 6 时, 上式分母中的 2 改成 3。

式中  $A_f$ ——钢管对支座摩擦力 (表 12-5), kN;

$\alpha_s$ ——系数, 查表 15-16;

$h$ ——鞍座最小截面高 (图 15-48), m;

$A_s$ ——螺栓单根截面积,  $\text{m}^2$ ;

$l'$ ——螺栓间距,  $\text{m}$ ;

$R_s$ ——钢管半径,  $\text{m}$ 。

### (三) 弧形垫板

图15-47中的弧形垫板, 如考虑垫板单独承受钢管对支座的水平推力, 则垫板的肋与垫板自身组成的纵截面, 应按水平推力对截面重心形成的力矩及拉力设计, 垫板顶部最大应力应小于板材容许应力; 如垫板背面不设肋, 则垫板所受的力转由板下的混凝土或钢筋混凝土承受。

带肋弧形垫板的截面沿管周方向不变, 则按管底处截面确定。混凝土鞍座在管底处最小截面承受弯矩近似按下式计算:

$$M = F[R_s(1 - 2\alpha_s) + h] \quad (\text{kN} \cdot \text{m}) \quad (15-50)$$

式中  $F$ ——水平推力,  $\text{kN}$ , 见式(15-47);

其余符号见式(15-49)注。

按混凝土矩形截面受弯时破坏阶段力矩平衡式:

$$KM = \gamma R_t W_t \quad (\text{kN} \cdot \text{m}) \quad (15-51)$$

式中  $K$ ——安全系数,

III级建筑物  $K = 3.3$  (基本荷载),

IV级建筑物  $K = 2.9$  (基本荷载);

$\gamma$ ——混凝土的塑性指数, 对矩形  $\gamma = 1.54$ ;

$R_t$ ——混凝土设计拉应力:

$R_t = 980 \text{ kPa}$  ——100号混凝土,

$R_t = 1274 \text{ kPa}$  ——150号混凝土;

$W_t$ ——截面抗弯特性,  $W_t = \frac{1}{6}ah^2$ ,  $\text{m}^3$ ;

$a$ ——混凝土墩体沿管轴向长,  $\text{m}$ 。

将上列已定值代入力矩平衡式(15-51), 可得简化式:

$$\frac{M}{ah^2} = 0.2567 \times R_t = 251.56 \quad \text{——100号混凝土}$$

$$\frac{M}{ah^2} = 0.2567 \times R_t = 327 \quad \text{——150号混凝土}$$

**【例 15-2】** 一水平设置的钢管, 管内径1000mm, 壁厚12mm。采用有弧形无肋垫板的鞍式混凝土支座, 混凝土标号100号。支座跨度6.80m。要求决定混凝土支座在管底部位的截面最小高度。

**【解】**

(1) 混凝土支座对钢管的包角  $\beta = 120^\circ$ 。

(2) 钢管对支座的水平推力(垂直管轴向)  $F$  计算:

$$\begin{aligned}\text{一跨钢管自重 } Q_s &= (D_0 + \delta) \pi \delta \gamma_s l = (1 + 0.012) \times \pi \times 0.012 \times 76.93 \times 6.8 \\ &= 19.958, \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\text{一跨钢管内水重 } Q_w = 0.25 \pi D_0^2 \gamma_w l = 0.25 \times \pi \times 1.0^2 \times 9.8 \times 6.8 = 52.339 \text{ kN}$$

$$\text{钢管对支座的推力 } F = (Q_s + Q_w) K = (19.958 + 52.339) \times 0.204 = 14.748 \text{ kN}$$

(3) 推力  $F$  对管底支座中面的弯矩  $M$  计算:

$$\begin{aligned}M &= F \left[ R(1-\alpha) + \frac{h}{2} \right] = 14.748 \times \left[ 0.506(1-0.833) + \frac{h}{2} \right] \\ &= 14.748 \times \left( 0.0845 + \frac{h}{2} \right) \text{ kN} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

(4) 管底支座最小高度  $h$  的计算:

由简化式, 对100号混凝土,  $M = 251.56 \times a \times h^2$ , 代入上式得:

$$14.748 \times \left( 0.0845 + \frac{h}{2} \right) = 251.56 \times a \times h^2$$

支座顺管轴长取为  $a = 0.3 \text{ m}$ , 则由此二次方程可解得管底部位支座最小高度, 应是  $h = 40.24 \text{ cm}$ .

把  $h = 40.24 \text{ cm}$  作为支座二期混凝土, 再计入一期混凝土厚度, 支座在管底部位的截面高度可定为  $80 \text{ cm}$ .

(四) 有支承环钢管的鞍槽垫板

垫板形式、结构构造和计算时的强度校核方式与无支承环时的垫板相同, 但垫板顺管轴向最小长度  $a$  则由下式决定:

$$a = 2\alpha \Delta t L + b + C \quad (15-52)$$

式中  $\alpha$  ——钢材线胀系数,  $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ;

$\Delta t$  ——钢管安装合拢温度与最高计算温度、最低计算温度差值中的大值;

$L$  ——所计算的支墩中心至镇墩端面的钢管长, 为方便附件制作和安装, 一般均以所设计管段中离镇墩最远的一个支墩作依据,  $\text{m}$ ;

$b$  ——钢管支承环的宽度, 取决于环同垫板接触处的环本身翼板宽,  $\text{m}$ ;

$C$  ——计算裕量, 一般取  $0.03 \sim 0.05 \text{ m}$ .

(五) 有支柱的承压结构

钢管支承环两侧设支柱, 柱靴与平面承压板接触, 按形式不同, 采用不同方法计算.

(1) 支柱的柱靴带弧形垫板计算. 弧形板固结在支柱底部, 圆柱形曲面, 曲面母线与管轴垂直, 弧形板宽同支承环翼板宽度, 曲面母线长度  $a_1$  可按式估算:

$$a_1 \approx 2(1.04R_h - R_0 - \delta) \quad (\text{m}) \quad (15-53)$$

式中  $R_h$  ——支承环径向截面重心与管轴距离,  $\text{m}$ ;

$R_0$  ——钢管内半径,  $\text{m}$ ;

$\delta$  ——钢管实际厚度,  $\text{m}$ .

弧形板由铸钢或铸铁制成, 由一跨管重  $Q_s$  及水重  $Q_w$  弧半径  $r$  最小值按下式估算:

$$r = \frac{Q_s + Q_w}{4a_1[\sigma_s]} \quad (\text{m}) \quad (15-54)$$



半径  $r$  及长  $a_1$  的数值, 一般应在校核弧形板与下支座板接触应力之后进行调正。调正时除满足材料强度许可条件外, 还应考虑制作要求。

$[\sigma_c]$  为弧形板折算径向容许压应力, 荷载低于 1176 kN 时, 按选用材料在表 15-17 中查取。

表 15-17		钢 材 容 许 压 应 力			单 位: MPa
材 料 规 格	铸 钢			灰 铸 铁	
	ZG25	ZG35	ZG45	HT15-33	HT20-40
$\sigma_c$	235.2	274.4	313.6		
$[\sigma_c]$	4.9	6.37	8.33	1.96	2.94

弧形板和与之接触的支墩顶部承压板, 按线接触校核接触面上最大压应力, 即

$$p_0 = 0.4 \sqrt{\frac{Q_1 + Q_2}{a_1 r \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}} \leq 2.5 \sigma_c \quad (\text{kPa}) \quad (15-55)$$

当两者材料相同时, 上式简化为

$$p_0 = 0.296 \sqrt{\frac{E}{a_1 r}} (Q_1 + Q_2) \quad (\text{铸钢}) \quad (\text{kPa}) \quad (15-56)$$

$$p_0 = 0.371 \sqrt{\frac{1}{a_1 r}} (Q_1 + Q_2) \quad (\text{灰铸铁, } E = 156.8 \times 10^6 \text{ kPa, } \mu = 0.27) \quad (15-57)$$

灰铸铁弹模  $E = (112.7 \sim 156.8) \times 10^6 \text{ kPa}$ , 泊桑系数  $\mu = 0.23 \sim 0.27$ 。

## (2) 座板

混凝土顶端的座板面积按式 (15-45) 拟定。座板可为钢板、钢板肋条焊接、铸钢或铸铁件。不论何种材料, 在弧形板传来的集中荷载和支墩反力作用下, 板内弯矩产生的应力不能超过板材容许应力。混凝土反力应不大于允许值。

安装温度下, 座板下混凝土应力是均布的。最不利条件产生在运行中温度最高的条件下, 这时弧形板产生的集中荷载偏离安装位置 (图 15-46), 偏离值  $e = \alpha \Delta t L (\text{m})$ ,  $\Delta t$  为最高或最低温度与安装温度相差的最大值。混凝土反力分布不均匀。在一跨管重  $Q_1$  和水重  $Q_2$  作用下, 最大混凝土应力  $\sigma_1$ 、最小应力  $\sigma_2$  按下列式计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{Q_1 + Q_2}{2ab} \left( 1 + \frac{6e}{b} \right) \quad (\text{kPa}) \\ \sigma_2 &= \frac{Q_1 + Q_2}{2ab} \left( 1 - \frac{6e}{b} \right) \quad (\text{kPa}) \end{aligned} \right\} \quad (15-58)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $e$  以 m 计,  $(Q_1 + Q_2)$  以 kN 计。

座板内最大弯矩  $M_{\max}$

$$M_{\max} = 0.125a \left( \frac{b}{2} - e \right)^2 \left[ \sigma_1 \left( 3 + \frac{2e}{b} \right) + \sigma_2 \left( 1 - \frac{2e}{b} \right) \right] \quad (\text{kN} \cdot \text{m}) \quad (15-59)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $e$  以  $\text{m}$  计,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  以  $\text{kPa}$  计。

所设计座板截面应满足的抗弯模数  $W$ :

$$W = \frac{M_{\max}}{[\sigma]} \quad (\text{m}^3) \quad (15-60)$$

对于由厚钢板或铸钢板做的座板, 要求的最小厚度  $h$  由下式计算:

$$h = \sqrt{\frac{6M_{\max}}{a[\sigma]}} \quad (\text{m}) \quad (15-61)$$

式中  $a$  以  $\text{m}$  计,  $M_{\max}$  以  $\text{kN} \cdot \text{m}$  计。

**【例 15-3】** 钢管内径  $D_0 = 1.4\text{m}$ , 壁厚  $\delta = 0.02\text{m}$  (图15-49), 支座跨度  $l = 12\text{m}$ , 敷设角  $\alpha = 25^\circ$ , 上支座弧形板焊在支承环两侧支柱底部, 下支座板埋置于混凝土墩体面上。弧形板及支座板均用35号铸钢, 混凝土用150号。距镇墩最远的一个支墩中心到镇墩管轴长  $64\text{m}$ ; 安装温度  $15.5^\circ\text{C}$ , 运行最高水温  $26.5^\circ\text{C}$ , 最低水温  $4.5^\circ\text{C}$ , 空管时最高温度  $60^\circ\text{C}$ , 最低温度  $-18^\circ\text{C}$ 。

铸钢容许抗弯应力  $[\sigma] = 117600\text{kPa}$ , 局部承压容许应力  $[\sigma_d] = 196000\text{kPa}$ , 直径平面容许承压应力  $[\sigma_s] = 6370\text{kPa}$ , 混凝土均匀受压容许应力  $[\sigma_h] = 5586\text{kPa}$ 。

(1) 荷载计算。一跨钢管自重及水重的法向力为:

$$\begin{aligned} Q_s + Q_w &= [\pi(D_0 + \delta)\delta l \gamma_s + 0.25\pi D_0^2 l \gamma_w] \cos \alpha \\ &= [\pi \times (1.4 + 0.02) \times 0.02 \times 12 \times 76.93 + 0.25 \times \pi \times 1.4^2 \times 12 \times 9.8] \\ &\quad \times \cos 25^\circ = 238.718\text{kN} \end{aligned}$$

(2) 弧形板计算。弧形板曲面母线长  $a$  (即板宽), 板长  $b$ , 按本例钢管支承柱尺寸拟定为  $a = 0.2\text{m}$ ,  $b = 0.15\text{m}$ 。弧形板的背面承受支柱底板传下的均布荷载  $q$ , 弧面受支座反力的集中荷载, 并通过板的对称中心截面, 中心截面所受弯矩为  $M$ ,

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{8} b^2 a \frac{(Q_s + Q_w)}{2ab} = \frac{1}{8} \times 0.15^2 \times 0.2 \times \frac{238.718}{2 \times 0.15 \times 0.2} \\ &= 2.238 \quad \text{kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\text{需要的抗弯模数: } W = \frac{M}{[\sigma]} = \frac{2.238}{117600} = 1.9 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

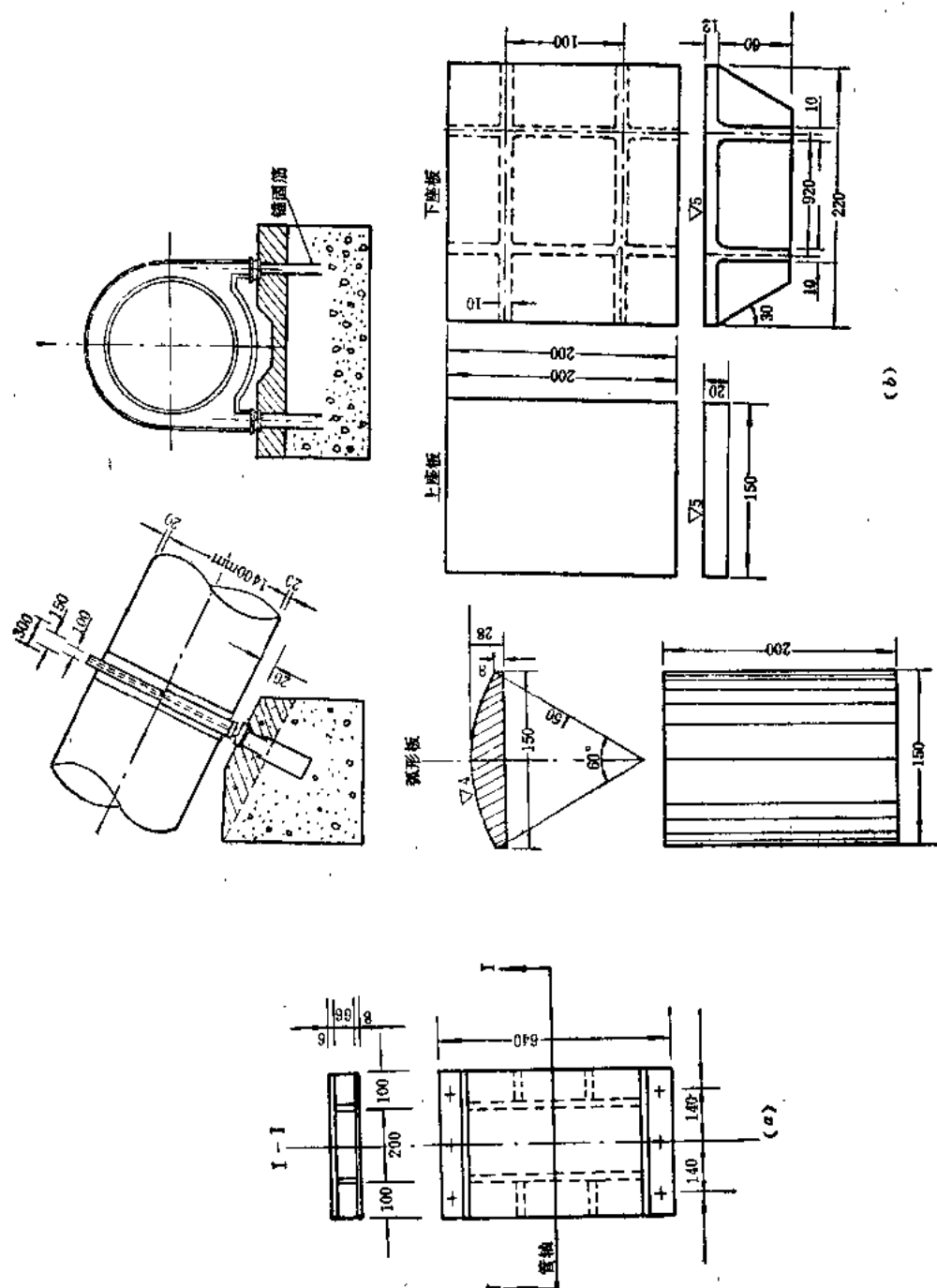
已知  $a$  后, 厚度  $h$  为:

$$h = \sqrt{\frac{6W}{a}} = \sqrt{\frac{6 \times 1.9 \times 10^{-5}}{0.2}} = 0.024 \text{m}$$

弧形板曲率半径  $r$  在已拟定  $h$ 、 $b$  及板两侧最小铸造厚度  $c$  后, 按几何关系,  $r$  由下式计算:

$$r = \frac{b^2}{8h} + \frac{h}{2}$$

为取整数方便, 设  $r = 0.15\text{m}$ ,  $c = 0.008\text{m}$ ,  $b = 0.15\text{m}$ , 则板中心断面的厚度  $h$  为:



$$h=r-\sqrt{r^2-\left(\frac{b}{2}\right)^2}+c=0.15-\sqrt{0.15^2-\left(\frac{0.15}{2}\right)^2}+0.008=0.028\text{m}$$

此厚度可满足按抗弯要求的厚度 $h=0.024\text{m}$ 。

与支座板接触应力校核:

式(15-56)给出的接触应力 $p_0$ 计算式,代入具体数据,即

$$\begin{aligned} p_0 &= 0.296 \sqrt{\frac{E}{ar}(Q_1+Q_2)} = 0.296 \sqrt{\frac{205.8 \times 10^6}{0.2 \times 0.15} \times 238.718} \\ &= 378788 \text{ kPa} \end{aligned}$$

《规范》(SDJ13-78)要求 $p_0 < 2.5\sigma_s = 2.5 \times 274400 = 686000 \text{ kPa}$ 。

因此,选定尺寸可以满足要求。

(3)座板计算。座板宽度与支柱底板及弧形板宽度等值,即 $a'=a=0.2\text{m}$ ,由混凝土墩容许的承压应力,座板长 $b'$ 为:

$$b' = \frac{Q_1+Q_2}{2a'[\sigma_s]} = \frac{238.718}{2 \times 0.2 \times 5586} = 0.11\text{m}$$

钢管支承在运行情况下最大变位值为:

$$\text{温升 } \Delta l = \alpha l \Delta t = 1.2 \times 10^{-5} \times 64 \times (26.5 - 15.5) = 0.0085\text{m}$$

$$\text{温降 } \Delta l = \alpha l \Delta t = 1.2 \times 10^{-5} \times 64 \times (15.5 - 4.5) = 0.0084\text{m}$$

钢管支承在检修情况下最大变位值为:

$$\text{温升 } \Delta l = \alpha l \Delta t = 1.2 \times 10^{-5} \times 64 \times (26.5 - 15.5) = 0.0085\text{m}$$

$$\text{温降 } \Delta l = 1.2 \times 10^{-5} \times 64 \times (15.5 + 18) = 0.0026\text{m}$$

$b'=10.68\text{cm}$ 已可满足温度变形要求,考虑到温度变化后在座板下的混凝土反力呈偏心状态,拟定 $b'=22\text{cm}$ ,座板下混凝土应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 按式(15-58)分别为:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{Q_1+Q_2}{2a'b} \left( 1 + \frac{6e}{b'} \right) = \frac{238.718}{2 \times 0.2 \times 0.22} \left[ 1 + \frac{6 \times (0.0257 + 0.0085)}{0.22} \right] \\ &= 5242.9 < 5586 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_2 = \frac{238.718}{2 \times 0.2 \times 0.22} \left( 1 - \frac{6 \times 0.0342}{0.22} \right) = 182.5 \text{ kPa}$$

与弧形板接触截面弯矩值 $M$ 按式(15-59)计算:

$$\begin{aligned} M &= 0.125a \left( \frac{b'}{2} - e \right)^2 \left[ \sigma_1 \left( 3 + \frac{2e}{b'} \right) + \sigma_2 \left( 1 - \frac{2e}{b'} \right) \right] \\ &= 0.125 \times 0.2 \times \left( \frac{0.22}{2} - 0.0342 \right)^2 \times \left[ 5242.92 \times \left( 3 + \frac{2 \times 0.0342}{0.22} \right) \right. \\ &\quad \left. + 182.49 \times \left( 1 - \frac{2 \times 0.0342}{0.22} \right) \right] \\ &= 2.5115 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

截面最大弯曲应力要求的座板厚 $h$ ,按式(15-61)为:

$$h = \sqrt{\frac{6 \times 2.5115}{0.2 \times 117600}} = 0.0253\text{m}$$

实际采用值为 $h=0.026\text{m}$ 的铸钢板。

若采用加肋的薄型铸钢结构(图15-49b), 则要求截面具有抗弯模量 $W$ 值可用式(15-60), 即:

$$W = \frac{M}{[\sigma]} = \frac{2.5115}{117600} = 2.136 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

拟定“II”字型截面板。板厚 $0.01\text{m}$ , 肋各厚 $0.01\text{m}$ , 高 $0.062\text{m}$ , 截面的抗弯模量 $W$ 可计得为 $W=2.2 \times 10^{-5} \text{m}^3$ , 此数大于要求的 $W=2.14 \times 10^{-5} \text{m}^3$ , 因此拟定的薄铸钢结构也可以满足要求。

## 第十六章 异形管节展开计算

### 第一节 概 述

异形管节指不同于直管段的管节,如锥形管、岔管、检修进入孔管段。这类管节的展开图是管节制作和安装所必须的施工图纸。小型水电站钢管的异形管节展开图可用三种方法求得,即:

#### 1.图解法

利用管节在三维坐标场中的投影关系,按几何方法图解得出。此法简单、明确,在管形比较复杂时,可避免繁琐的解析计算,但一般需采用较大图面(比尺  $1:1 \sim 1:\frac{1}{2}$ )制作,否则影响量值的精度。制作管节放样时,如果直接按  $1:1$  比尺放样,往往需要较大面积的放样场地。目前这种方法的文献资料比较多,可参看化工部门的管道制作手册。

#### 2.解析计算法

根据异形管节在三维坐标场中的三面投影图中点、线的几何关系导出公式。此法可用极坐标或直角坐标场进行,由几何公式计算后点绘出展开图尺寸,精确度高,制作放样毋需占用较大场地,尤其在管径、管身长度尺寸较大而需要几张钢板拼合时,解析计算法有利于控制各块钢板的展开形式及尺寸,控制纵、横焊缝位置,在《板金工展开计算》一书中有关按极坐标进行计算的详细介绍。

本手册介绍按直角坐标进行展开计算法。

#### 3.模比法

选定一个和所设计异形管节体形相似的图形和尺寸,按此图形放大或缩小。此法比较简单,但水电工程中,管节承受的水压力和直径变化比较大,展开图均以管壁中面(平均厚度)为准绘出,壁厚不同时,展开图中反映圆周长度的尺寸亦有差别,因此选择“模型管节”时应特别注意直径和壁厚的差别,并加以调整。

有些异形管节(如岔管),由于各电站分流要求、场地布置条件、钢管引进厂房方式、加工制作技术条件、运输安装方法等因素不同,直接套用时,应对诸多因素认真分析研究。

本章介绍直角坐标场中的解析计算公式,利用这些公式时,应注意以下各点:

(1)各个公式中的管径,均指管壁中面处的平均半径,也即内半径与管壁半厚之和。

(2)计算单位中,长度一律用“mm”,角度用“度”、“min、s”或“弧度”。

(3)三角函数或对数的真数,计算值的有效位数,应使尺寸长度满足比“mm”为单位的精确值再多一位尾数,以便作图或厂家制作放样时自行取舍。

(4) 以管体截面圆的圆心角作变量取值计算时, 视管径大小分别取圆心角 $5^\circ$ 或 $10^\circ$ , 管径小于1000mm时, 可取 $10^\circ$ , 当管径大于1000mm时, 宜取 $5^\circ$ 。

## 第二节 直管及锥管斜切展开计算原理

除检修进入人孔管节等两相接管的相贯线属三元二次曲线外, 一般的异形管的相贯线应设计成二元二次曲线, 因此基本上都是直管或锥管端面被某一平面斜切后的展开图形。它们的解析计算原理相同。

### 一、直管被平面斜切时的截面展开计算

图16-1为一直管被斜切, 直管半径 $R$ , 斜切后最短母线(素线)长 $l$ , 最长母线为 $(l+2R\tg\rho)$ , 其中 $\rho$ 为截面与垂直管轴截面的交角。

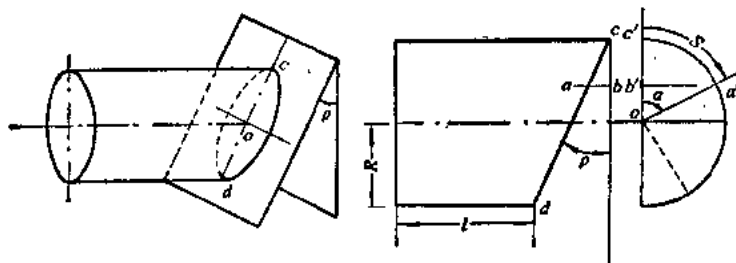


图 16-1 圆柱管斜截面示意

以截面圆周上任意点 $a$ 与底面的距离 $\overline{ab}$ 作展开图,  $a$ 点纵坐标为 $y_s$ , 正截面圆周上 $\widehat{a'c'}=S$ , 此为展开图横坐标 $x_s$ ,  $c'$ 点为展开图上坐标原点, 任意点 $a$ 的坐标由下式计算:

$$x_s = S = \frac{\alpha}{180} \pi R \quad (16-1)$$

$$y_s = \overline{ab} = R(1 - \cos\alpha) \tg\rho \quad (16-2)$$

式中  $\alpha$  —— 正截面圆上 $a'c'$ 弧长对应的圆心角。

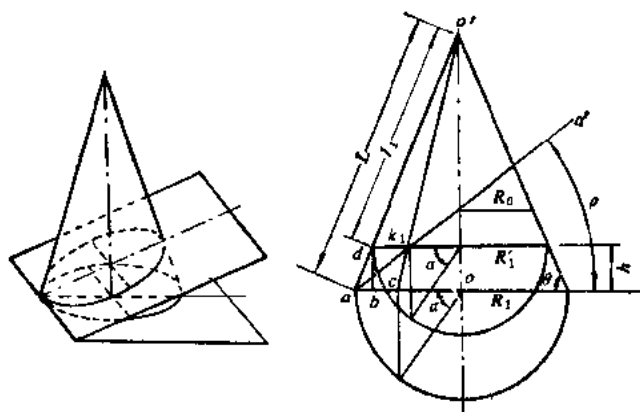


图 16-2 圆锥管斜截面示意

此时, 纵焊缝在 $c$ 点位置。

如使纵焊缝在圆柱的最短母线上, 则式(16-2)改为:

$$y_s = R(1 + \cos\alpha) \tg\rho \quad (16-3)$$

直管另一端展开是直线:

$y = l + 2R\tg\rho$ ,  $l$ 为直管最短母线长。以圆心角 $\alpha$ 为变量, 从 $0^\circ$ 开始, 间隔 $5^\circ$ 取值计算, 可得到以 $y$ 轴为对称轴的半边图形。

### 二、圆锥体被平面斜切时的截面展开计算

图16-2为一锥体底部被一平

面斜切示意。将斜切圆锥体简化成单线图，左半部斜截面与锥体母线任意交点  $K_1$  至锥顶的距离为  $l_1$ ，通过  $K_1$  而平行锥底面的截面与锥体交线是一圆，圆周上任一点（包括  $K_1$  点）至锥顶距离相等，因而  $K_1$  点至锥顶母线长与单线图中  $o'd$  长度相等，由几何关系可知：

$$l_1 = R'_1 / \cos \theta \quad (16-4)$$

$$R'_1 = R_1 - \overline{ab} \quad (16-5)$$

$$\overline{ab} = h / \operatorname{tg} \theta \quad (16-6)$$

$$R'_1 = R_1 - h / \operatorname{tg} \theta \quad (16-7)$$

$$\operatorname{tg} \rho = h / \overline{ac} \quad \text{即} \quad \overline{ac} = h / \operatorname{tg} \rho \quad (16-8)$$

$$\overline{co} = R'_1 \cos \alpha, \quad R_1 = \overline{ac} + \overline{co} \quad (16-9)$$

$$R_1 = h / \operatorname{tg} \rho + R'_1 \cos \alpha \quad (16-10)$$

$$\text{或} \quad R'_1 = (R_1 - h / \operatorname{tg} \rho) / \cos \alpha \quad (16-11)$$

联解式 (16-7) 和式 (16-11)，可写出：

$$(R_1 - h / \operatorname{tg} \rho) / \cos \alpha = R_1 - h / \operatorname{tg} \theta \quad (16-12)$$

化简式 (16-12) 可得：

$$h = R_1 \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \rho (\cos \alpha - 1) / (\operatorname{tg} \rho \cos \alpha - \operatorname{tg} \theta) \quad (16-13)$$

将式 (16-13) 代入式 (16-6) 并化简：

$$R'_1 \approx R_1 [1 - \operatorname{tg} \rho (\cos \alpha - 1) / (\operatorname{tg} \rho \cos \alpha - \operatorname{tg} \theta)] \quad (16-14)$$

将式 (16-14) 代入式 (16-4)，有下式：

$$l_1 = R_1 [1 - \operatorname{tg} \rho (\cos \alpha - 1) / (\operatorname{tg} \rho \cos \alpha - \operatorname{tg} \theta)] / \cos \theta \quad (16-15)$$

若以斜截面单线  $aa'$  与锥轴交点处锥半径  $R_0$  表示，则因：

$$R_1 \operatorname{tg} \rho / (R_1 - R_0) = \operatorname{tg} \theta \quad (16-16)$$

$$\text{可写成} \quad R_1 = R_0 \operatorname{tg} \theta / (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \rho) \quad (16-17)$$

由式 (16-17)，将式 (16-15) 改写成：

$$l_1 = [1 - \operatorname{tg} \rho (\cos \alpha - 1) / (\operatorname{tg} \rho \cos \alpha - \operatorname{tg} \theta)] R_0 \operatorname{tg} \theta / [\cos \theta (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \rho)] \quad (16-18)$$

式中  $\theta$  —— 锥体底角；

$\rho$  —— 为斜截面与锥底角的夹角；

$\alpha$  —— 为对应于任意点  $K_1$  的锥底面圆心角；

$R_0$  —— 为锥轴与斜截面交点处的锥体截面圆半径；

$R_1$  —— 为锥体底半径。

其中的  $\theta$ 、 $\rho$ 、 $R_0$  值均由设计拟定， $R_1$  可由式 (16-17) 算得，斜截面上任意点  $K_1$  至锥顶的母线长  $l_1$  随截面圆圆心角  $\alpha$  变化，此为一般极坐标展开的原理。

利用图16-3所示几何关系，将极坐标关系化成直角坐标关系，由下列式给出  $K_1$  点的直角坐标值：

$$x = l_1 \sin \gamma \quad (16-19)$$

$$y = \frac{R_1}{\cos \theta} - l_1 \cos \gamma \quad (16-20)$$



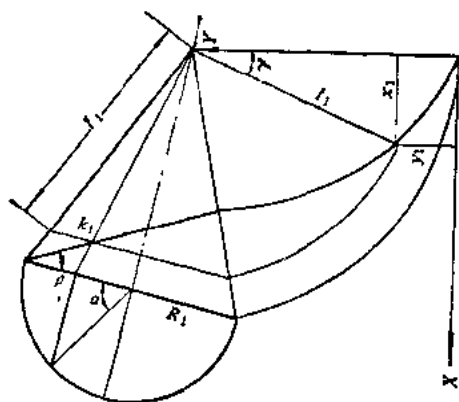


图 16-3 圆锥斜截面的展开曲线

式中  $l_1$  ——式 (16-15)、式 (16-18) 中的  
母线长;

$\gamma$  —— $K_1$  点在图 16-3 中对应的极坐标  
场中圆周角,  $\gamma = \alpha^\circ \cos \theta$ ;

$\alpha$  ——图 16-2 中锥底截圆的圆心角。

以  $\alpha^\circ$  为变量, 从  $\alpha = 0^\circ$  开始至  $180^\circ$ , 取  $5^\circ$  或  
 $10^\circ$  为增量, 逐点计算  $K_1$  点的直角坐标值, 纵  
坐标为被截锥台最长的一根母线。纵坐标为对  
称轴, 另半边图形由对称关系求出。

【例 16-1】一锥体, 锥底角  $\theta = 83^\circ$ , 锥  
底半径  $R_1 = 1212\text{mm}$ , 斜截面与锥底交角  $\rho =$   
 $20^\circ$ , 计算展开图形。

由式 (16-16) 计算  $R_0$ :

$$R_0 = R_1 \left( 1 - \frac{\text{tg} \rho}{\text{tg} \theta} \right) = 1212 \left( 1 - \frac{\text{tg} 20^\circ}{\text{tg} 83^\circ} \right) = 1157.8\text{mm}$$

由式 (16-18):

$$l_1 = \frac{R_0 \text{tg} \theta}{\cos \theta (\text{tg} \theta - \text{tg} \rho)} \left[ 1 - \frac{\text{tg} \rho (\cos \alpha - 1)}{\text{tg} \rho \cos \alpha - \text{tg} \theta} \right]$$

$$= \frac{1157.8 \times \text{tg} 83^\circ}{\cos 83^\circ (\text{tg} 83^\circ - \text{tg} 20^\circ)} \left[ 1 - \frac{\text{tg} 20^\circ (\cos \alpha - 1)}{\text{tg} 20^\circ \cos \alpha - \text{tg} 83^\circ} \right]$$

$\alpha^\circ$  角以  $5^\circ$  取值, 从  $0^\circ$  至  $180^\circ$ , 代入上式得  $l_1$ , 并入式 (16-19), 式 (16-20) 中, 可  
计得  $y$  轴半边的展开曲线上各点坐标, 列入下表 16-1。

表 16-1		曲 线 坐 标 $x, y$ 值																		单位: mm	
$\alpha^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180		
$x$	0.0	211.4	421.8	630.2	836.0	1038	1237	1431	1621	1808	1990	2169	2346	2521	2695	2869	3043	3219	3397		
$y$	0.0	9.3	37	82	143	219	306	404	508	618	730	842	953	1061	1163	1260	1350	1433	1509		

压力钢管实际为锥台。如锥底半径为  $R_1$ , 锥台上部顶圆半径为  $R_2$ , 以锥底斜切展开  
的坐标为准, 顶部正截面展开曲线坐标为  $x', y'$ , 计算公式为:

$$x' = \frac{R_2}{\cos \theta} \sin \gamma \quad (16-21)$$

$$y' = \frac{(R_1 + R_2)}{\cos \theta} + \frac{R_2}{\cos \theta} (1 - \cos \gamma) \quad (16-22)$$

$$\gamma = \alpha^\circ \cos \theta \quad (16-23)$$

### 第三节 弯管设计及其展开

#### 一、弯管设计

弯管连接上、下游直管段，钢管管线布置需要拟定弯管偏角（转角）。

直径小于350mm的弯管可采用成形的弧形铸铁管，两端有法蓝，与焊在直管端部的法蓝以螺栓连接。厂家生产的铸铁弯管转角有15°、22.5°、30°、45°、60°、90°六种标准型，公称压力有 $(2.5、6、10) \times 10^5 \text{Pa}$ 数种，选用时，可参看有关厂产品目录。

较大钢质弯管由钢板做成多节直线形单元管节连接成形，每一个单元管节一般为圆管，两端斜切，祇有在钢管需要转弯，随后连接锥管时，按《规范》（SD144-85）规定，应将弯管与锥管结合，设计成渐缩弯管，此时单元管节由圆管两端斜切变成锥管两端斜切，可利用第二节中所述原理进行展开计算。

弯管随电站厂房枢纽布置需要和地形、地质等条件，设计成平面转弯或立体转弯。无论何种转弯形式，弯管本身构造相同。平面布置的弯管转角等于与它连接的上、下游直管段管轴偏转角。立体布置的弯管转角 $\Delta$ 按第十五章中式（15-8）计算，即

$$\cos \Delta = \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \psi \pm \sin \theta_1 \sin \theta_2$$

式中符号意义见图15-13。

制作时，立体弯管的管轴线仍在一个平面之内，仅在安装时管端截面中心线有偏转。

图16-4所示弯管，转角为 $K$ ，分成若干单元直管节，相邻单元管节轴线偏角 $k$ ，弯管转弯半径为 $\rho$ 。

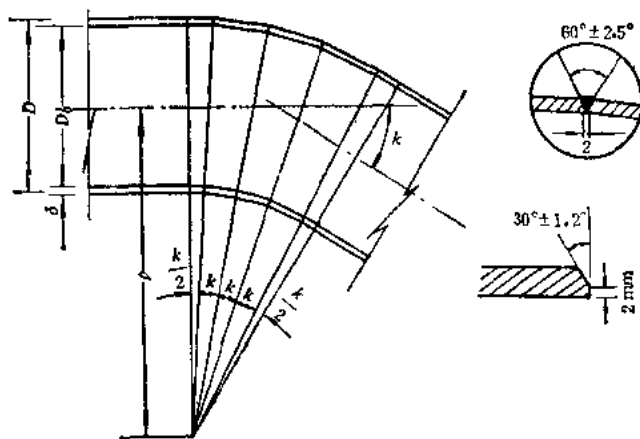


图 16-4 弯管结构分节

设计弯管时，注意以下几点：

（1）转弯半径按《规范》（SD144-85）规定，宜取 $\rho \geq 3D_0$ ，即不少于3倍管径。特殊情况下，可用 $\rho = (1.5 \sim 2)D_0$ ；

（2）相邻管节间偏角 $k$ 宜在5°~8°之间，可以减少圆管两端相贯线处由不平衡力引起的应力集中；

(3) 单元管节的最短母线长度不少于300mm或10倍壁厚;

(4) 相邻管节的纵焊缝应错开150mm以上, 按此布置焊缝位置;

(5) 为避免与弯管连接的直管被斜切, 减少斜切焊缝, 一般将某一个单元管节分成两相等小节, 分别安排在弯管的两端, 平截面与弯管上、下游的直管衔接, 斜切面与弯管的其余单元管节衔接。

展开后的单元管节, 宜结合出厂钢板长宽尺寸使尽可能安排在一张或数张钢板内, 以减少钢材消耗、减少焊缝长度, 并且错开纵焊缝位置(图16-5)。

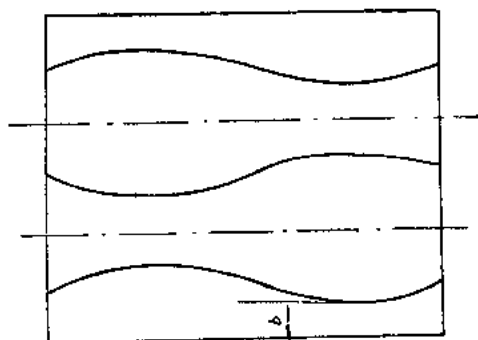


图 16-5 点线在一张钢板上的单元弯管节展开图形

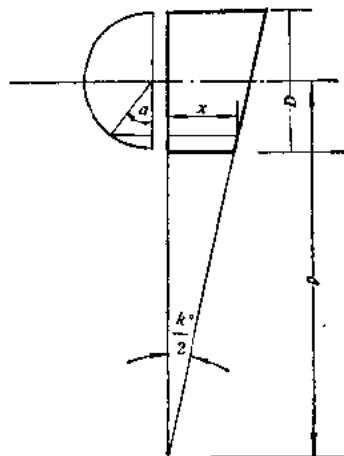


图 16-6 半单元管节几何特征

## 二、弯管单元管节的展开曲线计算

按本章第二节中所述直管斜切后的展开计算原理, 在确定了弯管转弯半径、管径及管壁厚度(见第十一章)后, 单元管节半边展开曲线坐标按下式计算:

$$x = \pi D \frac{\alpha^\circ}{180^\circ} \quad (16-24)$$

$$y = b \left[ 1 + \frac{D(1 - \cos \alpha)}{(2\rho - D)} \right] \quad (16-25)$$

式中  $\alpha$  —— 单元管节正截面圆的圆心角;

$D$  —— 管内径与管壁厚度(计入锈蚀裕量)之和, 即平均直径, mm;

$b$  —— 单元管节最短母线长的半值, mm;

$\rho$  —— 弯管转弯半径管节中间正截面上(管轴至回转中心的距离), mm,

$$\rho = \frac{b}{\tan \frac{k}{2}} + \frac{D}{2}$$

$k$  —— 相邻单元管节的管轴偏角。

图16-6为式(16-24)、式(16-25)中符号意义。

计算中, 内径 $D$ 、壁厚 $\delta$ 及弯管转角 $\Delta$ 均为已设计好的已知量, 按单元管节最短母线长 $b \geq 300\text{mm}$ 及相邻偏转角 $k \leq 8^\circ$ 的要求划分单元管节数后, 算出转弯半径 $\rho$ , 按 $\alpha = 0^\circ$ 至 $360^\circ$ , 增量以 $5^\circ$ 或 $10^\circ$ 取 $\alpha$ , 用式(16-24)、式(16-25)逐点计算展开曲线坐标。弯管

两端的半单元管节即可求得，横坐标为半单元管节的展开底线。对中间单元管节，以横坐标为对称轴，可得另半边展开图形。

【例 16-2】弯管转角  $\Delta = 60^\circ$ ，管内径  $D_0 = 800\text{mm}$ ，壁厚  $\delta = 24\text{mm}$ ，设计成 9 个单元管节，每个单元管节间偏角  $k = 60/9 = 6^\circ 40'$ 。b 取  $300\text{mm}$ ， $D = D_0 + \delta = 800 + 24 = 824\text{mm}$ ，代入  $\rho$  式：

$$\rho = \frac{b}{\tan \frac{k}{2}} + \frac{D}{2} = \frac{300}{\tan \frac{6^\circ 40'}{2}} + \frac{824}{2} = 5562.8\text{mm}$$

以  $5^\circ$  为增值， $\alpha$  从  $0^\circ$  变到  $360^\circ$  代入式 (16-24)，式 (16-25) 中，算得展开曲线坐标，并点绘成图形如图 16-7 所示，点值列于表 16-2。

表 16-2 展开曲线点值表 单位: mm

$\alpha^\circ$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$x$	0	36	72	108	144	180	216	252	288	324	360	395	431	467	503	539	575	611	647
$y$	300	300	300.3	300.8	301.4	302.2	303.2	304.3	305.6	307	309	310	312	314	316	318	320	322	324

$\alpha^\circ$	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180
$x$	683	719	755	791	827	863	899	935	971	1007	1043	1079	1114	1150	1186	1222	1258	1294
$y$	326	328	330	332	334	336	338	339	341	342	343.6	344.7	345.7	346.5	347.1	347.6	347.9	347.9

注 表中  $\alpha = 185^\circ \sim 360^\circ$  的数据从略。

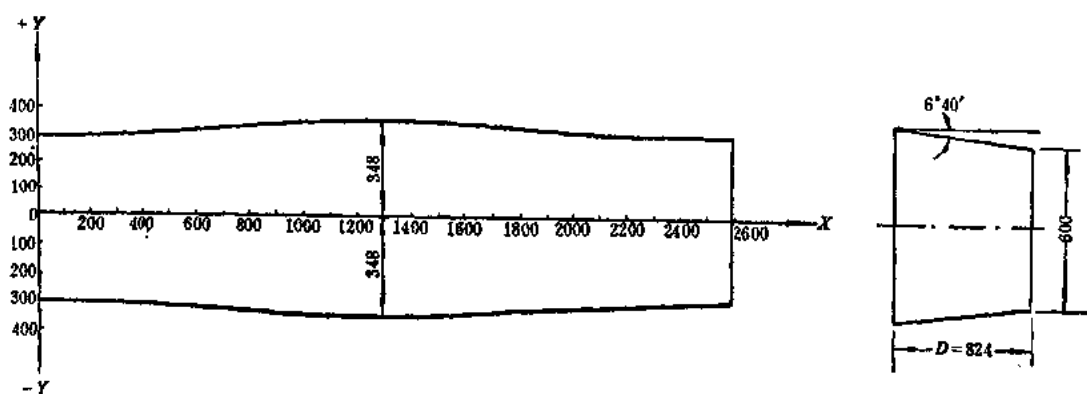


图 16-7 单元管节展开图形 (单位: mm)

## 第四节 锥管展开

### 一、锥管构造

锥管用来连接不同直径的钢管，实用中以渐缩形为主。锥管收缩的锥顶角不宜超过  $10^\circ$ ，以改善流态。

锥管制作展开图为扇形，一般情况下由多张钢板拼合，分别按位置和尺寸卷成瓦块后，组装焊接成形，设计时宜与制作厂配合，按构造要求安排好纵、横焊缝位置。

## 二、锥管展开曲线计算

锥管两端直径不同，若大口径端半径为 $R_1$ ，小口径端半径为 $R_2$ ，则展开曲线坐标按下列式组计算：

$$x_1 = \frac{R_1}{\cos\theta} \sin\gamma \quad (16-26)$$

$$y_1 = \frac{R_1}{\cos\theta} (1 - \cos\gamma) \quad (16-27)$$

$$y_2 = \frac{R_2}{\cos\theta} (1 - \cos\gamma) + \frac{(R_2 - R_1)}{\cos\theta} \quad (16-28)$$

式中  $\gamma$  —— 锥管正截面圆（大、小口径端均可）上，与计算点对应的圆心角  $\alpha$  与  $\cos\theta$  的乘积，即  $\gamma = \alpha \cos\theta$ ；

$R_1$  —— 锥大口径端圆断面的计算半径；

$R_2$  —— 锥小口径端圆断面的计算半径；

$R_i$  —— 计算半径，小口径端  $R_i = R_2$ ，大口径端  $R_i = R_1$ ；

$\theta$  —— 锥管底锥角， $\theta \geq 83^\circ$  为宜。

计算时以正截面圆的圆心角  $\alpha$  为自变量，从  $0^\circ$  至  $180^\circ$  按增量  $5^\circ$  或  $10^\circ$  取值，代入式（16-26）、式（16-27）、式（16-28）计算得坐标值。得到的曲线是以  $Y$  轴为对称轴的半边曲线，另半边由对称关系取得。图16-8中给出锥管及展开图形的几何量间关系。

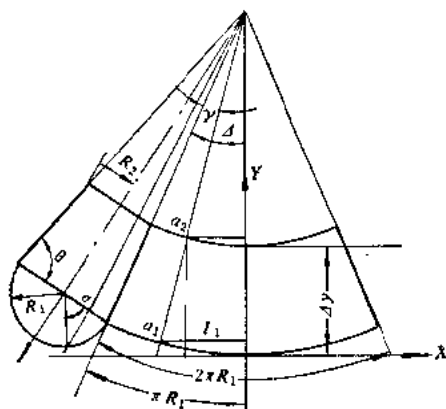


图 16-8 锥台展开图形

**【例 16-3】** 一锥管，锥底角  $\theta = 83^\circ$ ，两端半径分别为  $R_1 = 500\text{mm}$  及  $R_2 = 400\text{mm}$ ，壁厚  $\delta = 14\text{mm}$ ，求展开图。

锥管两端的计算半径为：

表 16-3

单位：mm

$\alpha^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$x_1$	0	88	176	265	353	441	529	617	704	791	878	964	1050	1135	1220	1304	1388	1471	1554
$y_1$	0	1	3	8	15	22	33	46	60	75	93	113	134	158	183	209	238	269	301
$x_2$	0	7.1	142	212	283	354	425	495	565	635	705	774	843	911	979	1047	1114	1181	1247
$y_2$	823	821	823	827	832	839	847	857	868	881	895	911	928	947	967	989	1012	1036	1062

$$R_1 + \frac{\delta}{2} = 500 + \frac{14}{2} = 507\text{mm}$$

$$R_2 + \frac{\delta}{2} = 400 + \frac{14}{2} = 407\text{mm}$$

$\alpha$  以  $10^\circ$  为增量, 代入式 (16-26)、式 (16-27)、式 (16-28), 计算结果如表 16-3 点绘成展开图形, 对称轴  $Y$  另半边按对称关系求得 (图 16-9)。

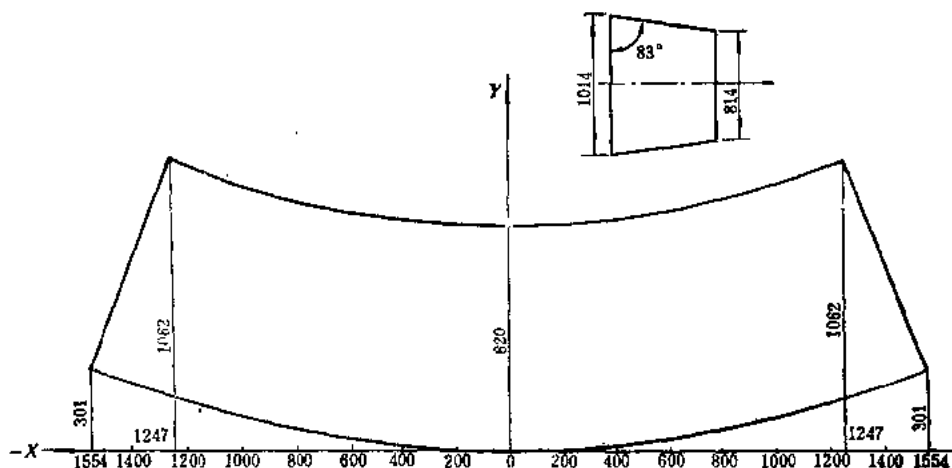


图 16-9 以直角坐标表示的锥台展开图形

## 第五节 对称三等径圆管分岔

图 16-10 为对称形式分岔的单线图, 这种分岔形式常用贴边补强或三梁形式加强。结构形式设计时, 使三个组成管节公切于一个虚拟的“球”壳上 (即公切球), 球半径同管半径, 这样, 三管的相贯线是二元二次曲线, 在岔管轴平面上的投影是直线。

图中的“o”点为相贯线  $ao$ 、 $bo$ 、 $co$  的交点, 交点与公切球圆心重合。为制作方便, 每个管节轴长  $L$ 。取等值,  $L$  值的决定, 应使管节的最短母线不少于 300mm。管节编号 I、II、III, 直径相同, II、III 管节体形相同。

### 一、主管 I 展开曲线计算

展开图上对应于管正截面圆心角  $\alpha$  的母线长, 用下列式计算:

$$x = \frac{\alpha^\circ}{180^\circ} \pi R \quad (16-29)$$

$$y = L = l \pm R \cos \alpha \tan \frac{\varphi}{4} \quad (16-30)$$

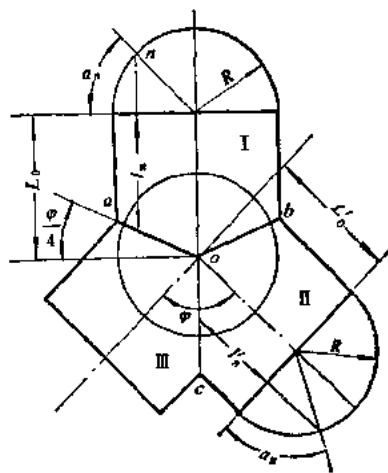


图 16-10 对称的三等径圆柱管分岔

式中  $\alpha$  —— I 管正截面圆心角;

$R$  —— I 管计算半径, 即内半径及壁厚半值之和,

$\varphi$  —— II、III 管节的分岔角。

计算时,  $\alpha$  从  $0^\circ$  开始变至  $180^\circ$ , 增量取  $5^\circ$  或  $10^\circ$ , 小管径也可以取  $15^\circ$ 。当  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  时, 式 (16-30) 中右边第二项取 “-” 号;  $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$  时取 “+” 号。展开图的 Y 轴为对称轴, 计算得至半边曲线图形, 另半边对称求得。展开图的 X 轴与 I 管节平端展开线重合。

## 二、支管 II、III 展开曲线计算

II、III 支管展开图式相同, 正截面圆心角  $\alpha$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围、 $90^\circ \sim 180^\circ$  范围分别用不同的公式计算。

相贯线  $oa$ ,  $ob$  展开用下式计算 ( $\alpha = 90^\circ \sim 180^\circ$ ):

$$x = \frac{\alpha^\circ}{180^\circ} \pi R$$

$$y = L'_i + R \cos \alpha \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4} \quad (16-31)$$

相贯线  $oc$  展开用下式计算 ( $\alpha = 0 \sim 90^\circ$ ):

$$x = \frac{\alpha^\circ}{180^\circ} \pi R$$

$$y = L'_i - \frac{R \cos \alpha}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \quad (16-32)$$

式中  $L'_i$  —— 支管 II、III 的管节轴线长;

$R$ 、 $\varphi$ 、 $\alpha$  符号同式 (16-29)、式 (16-30) 的符号。

算得展开曲线坐标后, 可点绘出展开图的半边图形。以 Y 座标轴可得到另半边图形, 横坐标与 II、III 支管的平端重合。

【例 16-4】一对称三等径圆管分岔, 管节轴长  $L_i = L'_i = 1000\text{mm}$ , 管节计算半径  $R = 500\text{mm}$ , 分岔角  $\varphi = 90^\circ$ , 求三个管节的展开图。

(1) 主管 I 展开计算。按式 (16-29)、式 (16-30), 取  $\alpha^\circ = 0, 10, 20, \dots, 180^\circ$ , 代入计算, 得到表 16-4 中所列相贯线  $oa$ 、 $ob$  的坐标值:

表 16-4  $oa$ 、 $ob$  展开坐标  $x$ 、 $y$  值 单位: mm

$\alpha^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$x$	0	87	175	262	349	436	524	611	698	785	873	960	1047	1134	1222	1309	1396	1484	1571
$y$	793	796	805	821	841	867	896	929	964	1000	964	929	896	867	841	821	805	796	793

(2) 支展 II、III 展开计算。在  $\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$  范围、以增量  $10^\circ$  取  $\alpha$ , 代入式 (16-29)、式 (16-32) 计算。 $\alpha = 90^\circ \sim 180^\circ$  范围、取  $\alpha$  值后代入式 (16-29)、式 (16-31) 计算, 得到相贯线  $oc$  及  $oa$  的展开坐标值, 列入表 16-5 中。

表 16-5

oc、oa 展开坐标  $x$ 、 $y$  值

单位: mm

$\alpha^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$x$	0	87	175	262	349	436	524	611	698	785	873	960	1047	1134	1222	1309	1396	1484	1570
$y$	500	508	530	567	617	679	750	829	913	1000	964	929	896	867	841	821	805	796	796

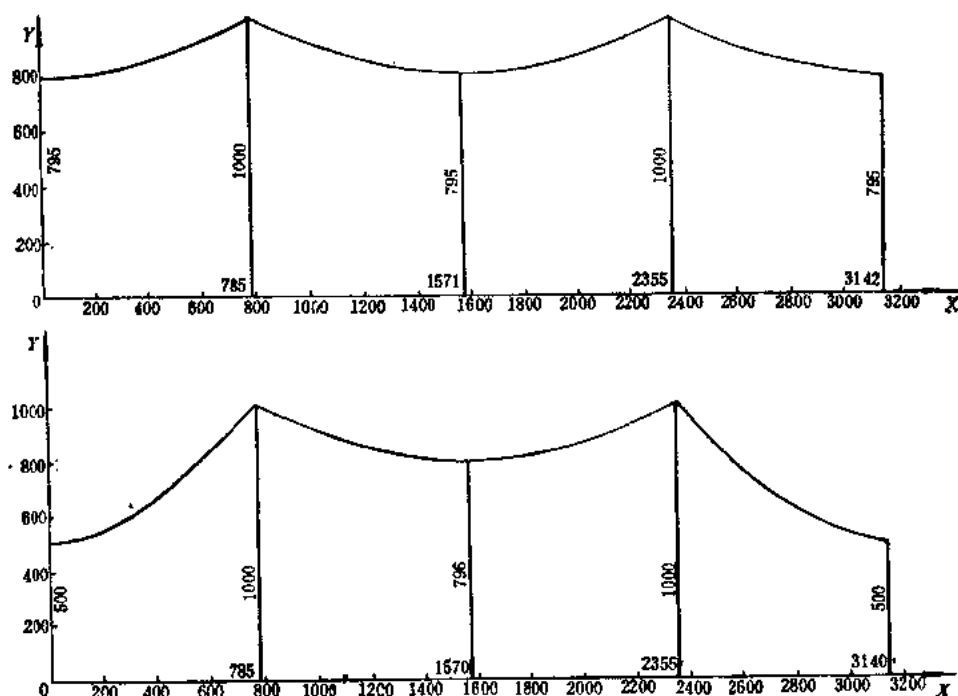


图 16-11 三等径分岔管节展开图形

图16-11为按表16-5点绘的 I、II、III管节展开图形。

## 第六节 圆管接对称二等锥支管分岔

图16-12为主管为圆管、支管为两个等锥支管的分岔管形式。这种岔管用于对称分岔，并以三梁结构加强的情况。

### 一、与体形有关的几何特征值

拟定体形时，岔管的主管内径取决于与之相接的上游侧钢管经济管径；两根支锥管与下游侧的钢管相接，衔接处设弯管，如转角不大，可省去弯管，这种情况下，锥支管的小口径端被斜切，展开计算按锥管被平面斜切处理（见本章第二节）。

锥支管的锥顶角宜按《规范》（SD144-85）第三节规定，控制在 $\theta = 10^\circ$ 以下，当分岔角较大时，可适当增大。

支锥管与主圆管均切于公切球，使相贯线成二元二次曲线。相贯线 $ac$ 为主管和II支管接合面投影，由此两管节轮廓线两两相交的交点连接成线定位（见图示），相贯线 $gc$ 为主管



I 与 II 支锥管接合线,  $fc$  为 II、III 支锥管的接合线, 均由相接两管轮廓线两两相交, 连交点定位。 $ac$ ,  $gc$ ,  $fc$  相交于  $c$  点, 与岔管轴线交点  $o$  一般不重合。这种岔管的展开图, 支锥管 II、III 相同。计算展开图之前应先求出几个特征几何值。

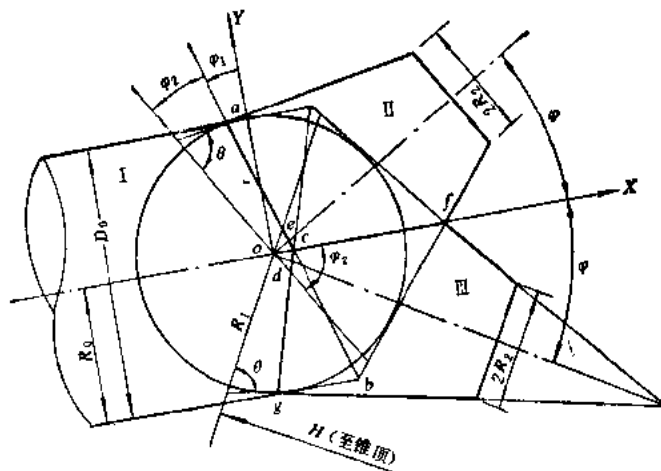


图 16-12 对称二等锥支管分岔几何特征

#### (一) 相贯线交点坐标

如图16-12所示XOY坐标场, 管轴交点与坐标原点重合, 相贯线上  $a$ 、 $g$ 、 $c$  三点的坐标分别由下列式计算,

$$\left. \begin{aligned} x_a &= R_0 \left[ \frac{1 - \sin(\theta + \varphi)}{\cos(\theta + \varphi)} \right] \\ y_a &= R_0 \end{aligned} \right\} \quad (16-33)$$

$$\left. \begin{aligned} x_g &= R_0 \left[ \frac{1 - \sin(\theta - \varphi)}{\cos(\theta - \varphi)} \right] \\ y_g &= -R_0 \end{aligned} \right\} \quad (16-34)$$

$$\left. \begin{aligned} x_c &= \frac{1}{2} (x_a + x_g) \\ y_c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16-35)$$

式中  $R$  ——主管 I 的计算半径;

$\theta$  ——支锥管 II 和 III 的锥底角;

$\varphi$  ——分岔角的半值。

#### (二) 相贯线与 Y 轴夹角

$ac$  线与 Y 轴夹角  $\psi_1$ , 由下式计算:

$$\psi_1 = \text{tg}^{-1} \frac{x_g - x_a}{2R_0} \quad (16-36)$$

另外, 还要计算  $ac$  线与 II 锥管的底面夹角  $\psi_2$ ,  $\psi_2$  可由下式计算:

$$\psi_2 = \varphi - \psi_1 \quad (16-37)$$

相贯线  $ac$  与 II 锥管轴交点  $e$  处, 锥的截面半径  $R_e$  由下式计算:

$$R_1 = R_0 \left[ 1 - \frac{x_c (\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \psi_1) \cos \theta}{R_0} \right] \quad (16-38)$$

式中  $R_1$ ——II、III锥管的锥底半径（通过三个管节轴线交点），

$$R_1 = R_0 / \sin \theta$$

## 二、主管I的展开计算

主管I的展开，实际是本章第二节中圆管一端被两个平面斜切后的曲面展开，此两个斜切平面不在同平面内，交线通过c点。以展开图形的Y轴为对称轴，半边展开曲线坐标用下列式计算：

$$x = R_0 \pi \left( 1 - \frac{\alpha}{180^\circ} \right) \quad (16-39)$$

$$y = l_0 \mp R_0 \operatorname{tg} \psi_1 \cos \alpha \quad \begin{matrix} (0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ) \\ (90^\circ < \alpha \leq 180^\circ) \end{matrix} \quad (16-40)$$

式中  $l_0$ ——主管I轴长；

$R_0$ ——主管I计算半径；

$\psi_1$ ——相贯线ac与图16-12中Y轴夹角；

$\alpha$ ——主管I正截面上计算点对应的圆心角。

$\alpha$ 作计算变量，以 $5^\circ$ 或 $10^\circ$ 为增量，从 $\alpha = 0^\circ$ 算至 $\alpha = 180^\circ$ 。 $l_0$ 的拟定应满足主管I展开后的最短母线不少于300mm的要求。管节另一端展开为一直线，即 $y = l_0$ 。图16-13为主管I单线图及展开后图的形式。

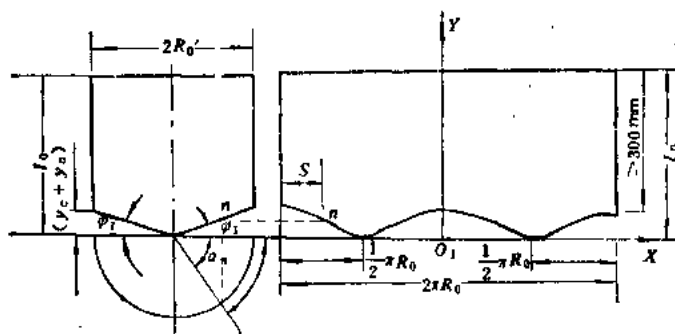


图 16-13 主管I单线图及展开图的形式

## 三、锥支管的展开计算

### (一) 小口径端的展开

锥支管II、III体形及几何尺寸相同。小口径端的展开曲线坐标用下列式计算（当后面紧接弯管时）：

$$x = \frac{R_1}{\cos \theta} \sin(\Delta - \gamma) \quad (16-41)$$

$$y = \frac{R_1}{\cos \theta} [1 - \cos(\Delta - \gamma)] + \frac{R_1 - R_2}{\cos \theta} \quad (16-42)$$

式中  $R_1$ ——大口径端的计算半径， $R_1 = R_2 / \sin \theta$ ；

$R_2$ ——小口径端的计算半径;

$\Delta$ ——展开图上扇形圆心角,  $\Delta = 180^\circ \cos \theta$ ;

$\gamma$ ——展开图上计算点对应圆心角,  $\gamma = \alpha \cos \theta$ ;

$\theta$ ——锥支管的锥底角;

$\alpha$ ——正截面圆上计算点对应的圆心角, 作变量, 以  $5^\circ$  或  $10^\circ$  为增量, 从  $0^\circ$  计算到  $180^\circ$ 。

由式 (16-41)、式 (16-42) 可得展开图上对称轴 Y 的半边图形, 另半边由对称关系求得。

## (二) 大口径端的展开

大口径端与主管及另一支锥管相贯。在锥管正截面圆心角  $0 \leq \alpha \leq \alpha_c$  范围内, 展开曲线按下列式计算:

$$x = \frac{R_1}{\sin \theta} \left[ \operatorname{tg} \theta - \frac{\cos \alpha}{\operatorname{ctg} \psi_1 + \operatorname{ctg} \theta \cos \alpha} \right] \sin(\Delta - \gamma) \quad (16-43)$$

$$y = \frac{R_1}{\cos \theta} - \frac{R_1}{\sin \theta} \left[ \operatorname{tg} \theta - \frac{\cos \alpha}{\operatorname{ctg} \psi_1 + \operatorname{ctg} \theta \cos \alpha} \right] \cos(\Delta - \gamma) \quad (16-44)$$

式中  $\psi_1$ ——锥底与相贯线 cf 的夹角,  $\psi_1 = 90^\circ - (\psi_1 + \psi_2)$ ;

$\alpha_c$ ——相贯线交点 c 的对应圆心角;

其余符号同式 (16-41)、式 (16-42) 的说明。

正截面圆心角在  $\alpha_c < \alpha \leq 180$  范围内, 展开曲线由下式计算:

$$x = \frac{R_2}{\sin \theta} \left[ \operatorname{tg} \theta + \frac{\cos \alpha}{\operatorname{ctg} \psi_1 - \operatorname{ctg} \theta \cos \alpha} \right] \sin(\Delta - \gamma) \quad (16-45)$$

$$y = \frac{R_2}{\cos \theta} + x_c \frac{\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \psi_2}{\sin \theta} - \frac{R_2}{\sin \theta} \left[ \operatorname{tg} \theta + \frac{\cos \alpha}{(\operatorname{ctg} \psi_1 - \operatorname{ctg} \theta \cos \alpha)} \right] \times \sin(\Delta - \gamma) \quad (16-46)$$

式中  $R_2$ ——II 锥管 (所展开的锥管) 管轴与相贯线 ac 的交点处锥管半径;

其余符号同前, 其中相贯线 ac 与 II 锥管底夹角  $\psi_2$ , 按式 (16-37) 计算。

图 16-14 为各量值的几何意义及锥管节 II (或 III) 展开图式。

相贯线交点 c 的对应圆心角  $\alpha_c$  由下式计算:

$$\alpha_c = \cos^{-1} \left( \frac{x_c}{R_1} \sin \varphi \right)$$

展开图中 c 点圆心角  $\gamma_c = \alpha_c \cos \theta$

其中, c 点坐标  $x_c$ , II、III 锥管底半径  $R_1$  及分岔角半值, 在拟定岔管体形时, 作为特征几何量值已经确定或计算求得。

## (三) 相贯线 cf 处有内插肋时的展开计算

如果岔管加强梁采用部分插入管壳内 (如渔子溪 I 级电站的 U 梁) 或用月牙肋加强, 则应将肋板 (或 U 梁腹板) 所占位置从 II、III 锥管展开图中扣除。扣除宽度为肋板半厚及焊缝间隙之和。焊缝间隙为 2mm。

按图16-15, 肋板厚度为 $T$ 。相贯线 $cf$ 系由岔管管壳中面衔接交线, 设肋板后, 锥管与肋板表面交线为 $c'f'$ 。

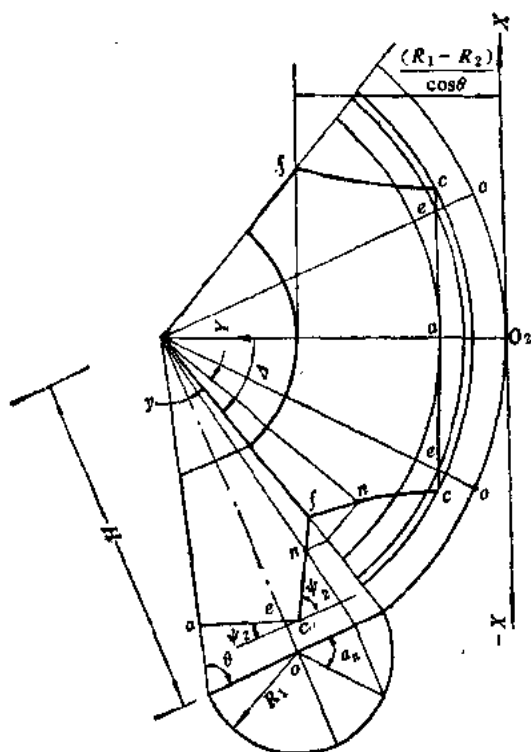


图 16-14 锥管节II (或III) 展开图式

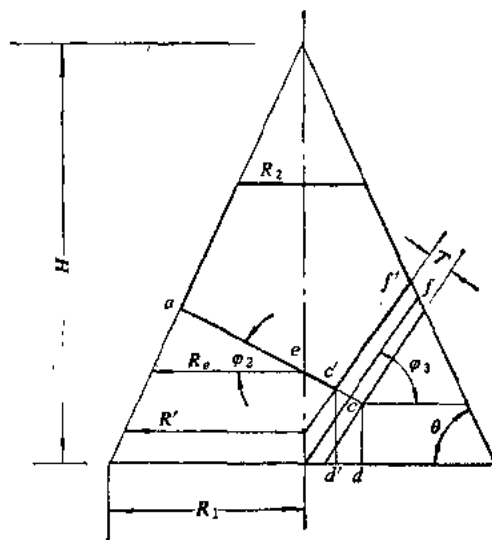


图 16-15 计入加强结构肋板厚的分岔管节几何形状

计入肋板厚度之后, 锥管正截面圆心角为 $0 \leq \alpha' \leq \alpha'_0$ 时,  $c'f'$ 的展开曲线仍按式(16-43)、式(16-44)计算, 但式中 $R_1$ 应以 $R'_1$ 代替,  $R'_1$ 为:

$$R'_1 = R_1 \left( 1 - \frac{T}{2H \cos \psi} \right) \quad (16-47)$$

式中  $T$ ——肋厚;

$H$ ——II、III锥体高,  $H = R_1 \tan \theta$ ;

$\psi$ , 见式(16-44)说明。

由于 $c$ 点位置改变至 $c'$ ,  $\alpha'_0$ 由下式计算:

$$\alpha'_0 = \cos^{-1} \left( \frac{x_c - 0.5T \tan \psi}{R_1} \sin \varphi \right) \quad (16-48)$$

【例 16-5】一对称二等锥支管分岔管, 体形设计数据为: 总管计算半径 $R_1 = 500\text{mm}$ , 轴长 $l_1 = 800\text{mm}$ ; 锥管小口径端计算半径 $R_2 = 354\text{mm}$ , 锥底角 $\theta = 83^\circ$ ; 分岔角 $2\varphi = 60^\circ$ 。有U形梁插入分岔处, 梁腹板厚 $T = 30\text{mm}$ 。计算三个管节的展开图形。

1. 几何特征值计算

参照图16-12单线图, 计算 $a$ 、 $g$ 、 $c$ 三点坐标。

$a$ 点:

$$x_s = R_s \left[ \frac{1 - \sin(\theta + \varphi)}{\cos(\theta + \varphi)} \right] = 500 \times \left[ \frac{1 - \sin(83^\circ + 30^\circ)}{\cos(83^\circ + 30^\circ)} \right]$$

$$= -101.7 \text{ mm}$$

$$y_s = R_s = 500 \text{ mm}$$

g 点:

$$x_g = R_g \left[ \frac{1 - \sin(\theta - \varphi)}{\cos(\theta - \varphi)} \right] = 500 \times \left[ \frac{1 - \sin(83^\circ - 30^\circ)}{\cos(83^\circ - 30^\circ)} \right]$$

$$= 167.3 \text{ mm}$$

$$y_g = -R_g = -500 \text{ mm}$$

c 点:

$$x_c = \frac{1}{2}(x_s + x_g) = \frac{1}{2}(-101.7 + 167.3) = 32.8 \text{ mm}$$

$$y_c = 0$$

ac 相贯线与 Y 轴夹角  $\psi_1$  为:

$$\psi_1 = \text{tg}^{-1} \frac{(x_g - x_s)}{2R_s} = \text{tg}^{-1} \frac{(-101.7 + 167.3)}{2 \times 500} = 15.0574199^\circ = 15^\circ 3' 27''$$

相贯线 ac 与 II 锥管底夹角  $\psi_2$  为:

$$\psi_2 = \varphi - \psi_1 = 30^\circ - 15^\circ 3' 27'' = 14^\circ 56' 33''$$

相贯线 ac 与 II 锥轴交点 e 的锥体截面半径  $R_e$  为:

$$R_e = \frac{R_s}{\sin \theta} \left[ 1 - \frac{x_c (\cos \varphi + \sin \varphi \text{tg} \psi_2) \cos \theta}{R_s} \right] = \frac{500}{\sin 83^\circ}$$

$$\times \left[ 1 - \frac{32.8 (\cos 30^\circ + \sin 30^\circ \cdot \text{tg} 14^\circ 56' 33'') \cos 83^\circ}{500} \right]$$

$$= 499.7 \text{ mm}$$

相贯线 cf 与 II 锥底夹角  $\psi_3$  为:

$$\psi_3 = 90^\circ - (\psi_1 + \psi_2) = 90^\circ - (15^\circ 3' 27'' + 14^\circ 56' 33'') = 60^\circ$$

2. 主管 I 展开计算

按式 (16-39)、式 (16-40) 计算, 最终得到表 16-6 所列数据。

据表中数值点绘主管 I 展开图形如图 16-16 所示。

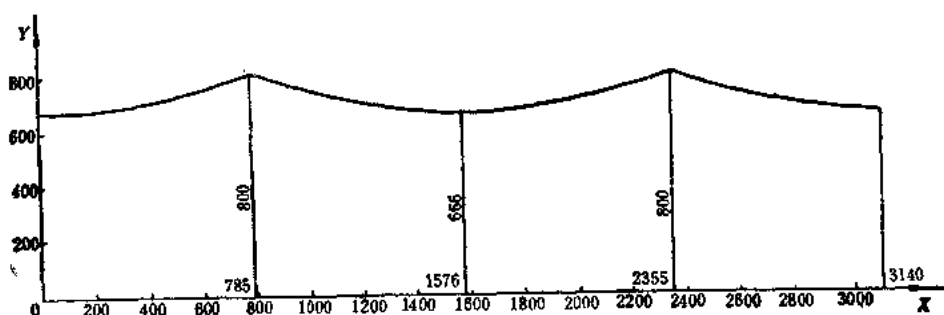


图 16-16 主管 I 的展开图形

表 16-6

单位: mm

$\alpha'$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$x$	1570	1439	1308	1178	1047	916	785	654	523	395	262	130	0
$y$	666	670	684	705	733	765	800	765	733	705	684	670	666

## 3. 支锥管II (或III) 展开计算

(1) 相贯线交点  $c$  所对应的正截面圆心角  $\alpha_c$ 。由式 (16-48):

$$\alpha'_c = \cos^{-1} \left( \frac{x_c - \frac{T}{2} \operatorname{tg} \psi_1}{R_1} \sin \psi \right) = \cos^{-1} \left( \frac{32.8 - 15^\circ \times \operatorname{tg} 15^\circ 3' 27''}{500 \div \sin 83^\circ} \sin 30^\circ \right) \\ = 88^\circ 21' 50''$$

(2) 小口径端展开。由式 (16-41)、式 (16-42) 计算, 式中作变量的圆心角  $\alpha$ , 在  $0^\circ$  至  $180^\circ$  范围取值计算, 本例为节省篇幅, 以  $15^\circ$  为增量; 锥管的大、小口径端半径值为:

$$R_1 = R_0 / \sin \theta = 500 / \sin 83^\circ = 503.8 \text{ mm}$$

$$R_2 = 354 \text{ mm}$$

式 (16-41)、式 (16-42) 计算结果列于表 16-7 中。

表 16-7

小口径端展开坐标  $x$ 、 $y$  值

单位: mm

$\alpha'$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$x$	1084	997	910	822	732	642	552	461	369	277	185	93	0
$y$	1443	1409	1379	1351	1326	1304	1285	1269	1256	1246	1238	1233	1232

点绘表中数值, 可得图 16-17 中对称轴  $Y$  一侧的展开曲线。

(3) 相贯线  $ac$  ( $gc$ )、 $cf$  的展开。由式 (16-43)、式 (16-44), 使正截面圆心角  $\alpha$  自  $0^\circ$  变到  $\alpha'_c = 88^\circ 21' 53''$ , 分别代入公式计算。本例对锥 II (III) 取圆心角增量为  $10^\circ$ , 得表 16-8 中的数值。

表 16-8

 $ac$ 、 $cf$  展开坐标  $x$ 、 $y$  值

单位: mm

$\alpha'$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	$88^\circ 21' 53''$
$x$	1264	1200	1142	1087	1035	986	936	887	835	796
$y$	979	944	893	825	741	640	522	388	239	103

注 表中 mm 以下数值以四舍五入规则进位。

在 $\alpha=88^{\circ}21'53''$ 至 $180^{\circ}$ 范围按式(16-45)、式(16-46)计算,成果列入表16-9中。计算结果点绘出锥II展开图形如图16-17。

表 16-9 圆心角展开坐标 $x$ 、 $y$ 值

$\alpha^{\circ}$	$88^{\circ}21'53''$	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$x$	796	690	601	513	426	339	254	169	84	0
$y$	103	346	353	364	369	376	382	387	389	391

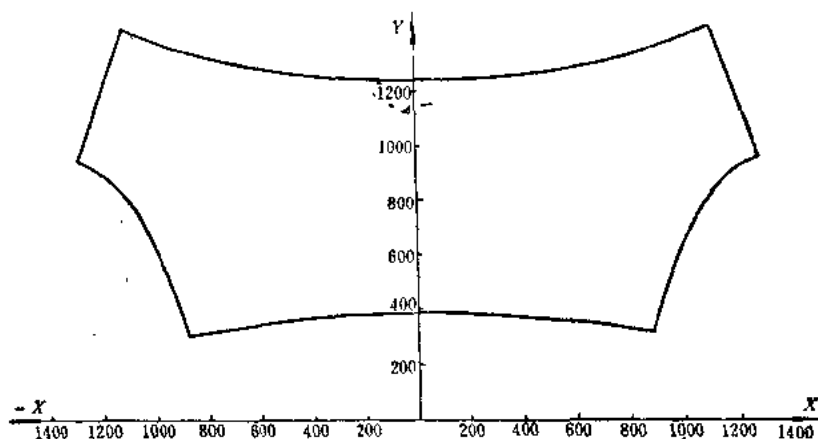


图 16-17 锥管II展开图形

## 第七节 锥管上圆柱支管分岔

主管为锥形管、支管为圆管,这种分岔形式如图16-18所示。

锥形管分岔后流量减少,管径缩小,流态比较好。这种岔管较多用于三梁式、环梁加强结构或贴边加强的结构中。

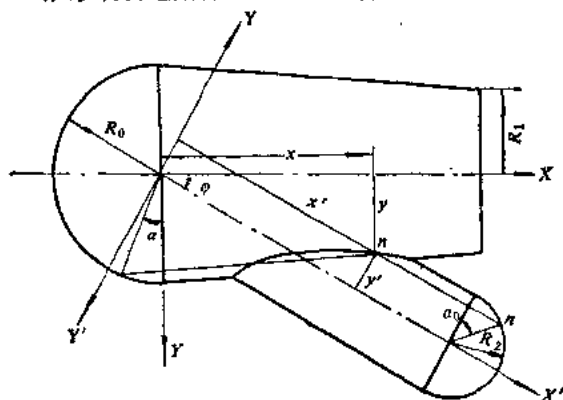


图 16-18 锥管上圆柱管分岔几何图形

锥管前、后断面直径决定于与之连接的钢管经济管径,锥底角 $\theta$ 一般不小于 $80^{\circ}$ ,最好按 $83^{\circ}$ 以上。分岔角 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。体形拟定后,锥管大半径 $R_0$ ,小半径 $R_1$ 及圆管半径 $R_2$ ,分岔角 $\varphi$ 、锥底角 $\theta$ 均已成已知数据。

### 一、相贯线方程式及特征点坐标与相贯线计算

在岔管的轴平面投影图中(图16-18),以管轴交点为坐标原点,主管轴为 $X$ 轴,建立坐标场。这种岔管的相贯线是三元二次曲线。而在 $X-Y$ 坐标场中,相贯线为二元二次曲线,方程式为:

$$y^2 + Axy - (Bx^2 - Cx + D) = 0 \quad (16-49)$$

式中  $A = 2\operatorname{ctg}\varphi$ ,  $B = 1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\theta \sin^2\varphi}$ ,  $C = \frac{2R_1}{\operatorname{tg}^2\theta \sin^2\varphi}$ ,  $D = \frac{R_1^2 - R_2^2}{\sin^2\varphi}$

相贯线锐角区  $a$  点坐标位置为:

$$x_a = \frac{R_1 \cos\varphi + R_2}{\sin\varphi + \operatorname{ctg}\theta \cos\varphi} \quad (16-50)$$

$$y_a = R_1 \left( 1 - \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\theta + 1} \right) - \frac{R_2}{\sin\varphi \operatorname{tg}\theta + \cos\varphi} \quad (16-51)$$

$b$  点的坐标位置为:

$$x_b = \frac{R_1 \cos\varphi - R_2}{\sin\varphi + \operatorname{ctg}\theta \cos\varphi} \quad (16-52)$$

$$y_b = R_1 \left( 1 - \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\theta + 1} \right) + \frac{R_2}{\sin\varphi \operatorname{tg}\theta + \cos\varphi} \quad (16-53)$$

相贯线上任意点  $n$  的坐标位置, 按式 (16-49) 计算。计算时, 以  $x$  为变量,  $x_a \leq x \leq x_b$ , 代入公式。为计算方便, 式 (16-49) 改写成  $y$  对  $x$  的函数方程, 即:

$$y = 0.5[-Ax + \sqrt{(A^2 + 4B)x^2 - 4Cx + 4D}] \quad (16-54)$$

相贯线  $\widehat{ab}$  在  $X$ 、 $Y$  坐标场的 I 象限中, 所以式 (16-54) 中的  $y$  共轭负根无意义。计算相贯线  $\widehat{ab}$  时, 靠近  $a$ 、 $b$  处的计算点距应取小, 中间位置的点距可取大。

## 二、圆支管的展开计算

支管展开计算时, 应另设坐标场, 如图16-18中的  $X'$ 、 $Y'$  坐标, 以方便计算。此坐标与原坐标  $X$ 、 $Y$  之间有下列关系:

$$x' = x \cos\varphi + y \sin\varphi \quad (16-55)$$

$$y' = x \sin\varphi - y \cos\varphi \quad (16-56)$$

将相贯线上各点坐标  $(x, y)$  按此关系式转换成  $X'$ 、 $Y'$  坐标场中的坐标位置, 并用式 (16-57) 求出各计算点对应于截面圆的圆心角  $\alpha'$ :

$$\alpha' = \cos^{-1} \left( \frac{y'}{R_1} \right) \quad (16-57)$$

通过坐标换算, 同时可得相贯线上  $a$ 、 $b$  点的新坐标位置, 即  $a(x'_a, y'_a)$  及  $b(x'_b, y'_b)$ 。

已得到相贯线  $\widehat{ab}$  在支管坐标场中位置及各点所对应的圆心角后, 就可顺利进行支管展开图上各点的坐标计算。

设展开图的坐标系为  $X_1$ 、 $Y_1$ 。支管最短母线在岔管的锐角部位, 通过  $a$  点, 由制作要求确定最短母线  $l_s \geq 300\text{mm}$ 。相贯线  $\widehat{ab}$  的展开曲线上各点位置由下式计算:

$$x_1 = \pi R_2 \frac{\alpha'}{180^\circ} \quad (16-58)$$

$$y_1 = (x' - x'_a) + L_s \quad (16-59)$$

式中  $R_2$ ——支管计算半径;

$\alpha'$ ——相贯线上各点对应的圆心角, 以度为单位;



$x'_b$ ——相贯线上钝角部位  $b$  点的坐标值 (对  $X'$ 、 $Y'$  坐标)。

展开图上横坐标轴线与支管平口端的展开图形重合。

### 三、锥主管展开计算

#### 1. 大口径端

锥管大、小口径端展开均为扇形, 展开曲线在坐标场  $X_1$ 、 $Y_1$  中的各点坐标由下式计算:

$$y_1 = \frac{R_0}{\cos\theta} \{1 - \cos[(180^\circ - \alpha)\cos\theta]\} \quad (16-60)$$

$$x_1 = \frac{R_0}{\cos\theta} \sin[(180^\circ - \alpha)\cos\theta] \quad (16-61)$$

#### 2. 小口径端

$$y_1 = \frac{R_1}{\cos\theta} \{1 - \cos[(180^\circ - \alpha)\cos\theta]\} + \frac{R_0 - R_1}{\cos\theta} \quad (16-62)$$

$$x_1 = \frac{R_1}{\cos\theta} \sin[(180^\circ - \alpha)\cos\theta] \quad (16-63)$$

式中  $R_0$ 、 $R_1$ ——分别为锥管大口径端和小口径端的计算半径;

$\theta$ ——锥底角;

$\alpha$ ——锥管正截面上以  $a$  点所在母线起算的圆心角。在计算中,  $\alpha$  作变量,  $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$ , 可求得对应于  $\alpha$  的计算点坐标。另半边图形按以  $Y_1$  轴为对称轴求得。

#### 3. 与支管相贯的孔口展开

锥、支管连接处, 锥管孔口展开成蛋形曲线。曲线上各计算点坐标按下列公式计算:

$$y_1 = \frac{R_0}{\cos\theta} - \left( \frac{R_0}{\cos\theta} - \frac{x}{\sin\theta} \right) \cos\gamma' \quad (16-64)$$

$$x_1 = \left( \frac{R_0}{\cos\theta} - \frac{x}{\sin\theta} \right) \sin\gamma' \quad (16-65)$$

式中  $\gamma'$  为蛋形孔上计算点在展开图上对应的圆心角。

$$\gamma' = \cos\theta \left[ \cos^{-1} \left( \frac{y}{R_0 - x \operatorname{ctg}\theta} \right) \right]$$

此  $\gamma'$  式中的  $x$ 、 $y$  指确定图 16-17 中相贯线  $\widehat{ab}$  时, 在  $x_a \leq x \leq x_b$  范围内, 对应于各计算点的  $x$ 、 $y$  值 (式 16-54)。

点绘式 (16-60) ~ 式 (16-65) 各式计算成果, 即可得出锥管的展开图形。

**【例 16-6】** 设计一岔管, 主管为锥形, 支管为圆管。锥管入口大半径  $R_0 = 500\text{mm}$ , 出口小半径  $R_1 = 380\text{mm}$ , 锥底角  $\theta = 83^\circ$ 。支管半径  $R_2 = 250\text{mm}$ , 分岔角  $\varphi = 45^\circ$ , 分岔锐角部位过  $a$  点的母线长  $L_a = 300\text{mm}$ , 要求计算主、支管节的展开图曲线坐标。

#### 1. 几个几何特征系数及锥高值计算

特征系数

$$A = 2 \operatorname{ctg}\varphi = 2 \times \operatorname{ctg}45^\circ = 2$$

$$B = 1 + \frac{\operatorname{ctg}^2\theta}{\sin^2\varphi} = 1 + \frac{\operatorname{ctg}^2 83^\circ}{\sin^2 45^\circ} = 1.0302$$

$$C = \frac{2R_0 \operatorname{ctg} \theta}{\sin^2 \varphi} = \frac{2 \times 500 \times \operatorname{ctg} 83^\circ}{\sin^2 45^\circ} = 245.569$$

$$D = \frac{R_0^2 - R_1^2}{\sin^2 \varphi} = \frac{500^2 - 250^2}{\sin^2 45^\circ} = 375000$$

锥高  $H = R_0 \operatorname{tg} \theta = 500 \times \operatorname{tg} 83^\circ = 4072.173 \text{ mm}$

2. 岔管在轴平面上相贯线的投影曲线

由式 (16-50) 及式 (16-52) 求得  $x$  的取值范围:

$$x_1 = \frac{R_0 \cos \varphi + R_1}{\sin \varphi + \operatorname{ctg} \theta \cos \varphi} = \frac{500 \times \cos 45^\circ + 250}{\sin 45^\circ + \operatorname{ctg} 83^\circ \times \cos 45^\circ} = 760.2 \text{ mm}$$

$$x_2 = \frac{R_0 \cos \varphi - R_1}{\sin \varphi + \operatorname{ctg} \theta \cos \varphi} = \frac{500 \times \cos 45^\circ - 250}{\sin 45^\circ + \operatorname{ctg} 83^\circ \times \cos 45^\circ} = 130.4 \text{ mm}$$

相贯线投影方程式为:

$$y = 0.5(-Ax + \sqrt{x^2(A^2 + 4B) - 4(x + 4D)})$$

$$= 0.5(-2x + \sqrt{8.1208x^2 - 982.276x + 15 \times 10^5})$$

在  $x_1, x_2$  的范围内取若干  $x$  值, 由上式计算对应的  $y$  值, 得相贯线投影曲线上各点坐标, 列于下表 16-11 中。

表 16-11 相贯线投影曲线各点坐标值 单位: mm

$x$	130.4	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410	430	450
$y$	484	469.5	456	444	433	423	414	406	400	393	388	383	380	377	375	373	372
$x$	470	490	510	530	550	570	590	610	630	650	670	690	710	730	750	760	760.2
$y$	371	371	372	373	374	376	378	380	383	386	389	393	396	400	404	407	407

3. 圆支管展开曲线

(1) 相贯线坐标转换。由式 (16-55) 及式 (16-56), 将表 16-11 中各点  $x, y$  坐标转换成圆支管坐标场  $X', Y'$  中的坐标值, 换算结果列于表 16-12 中。

表 16-12 圆支管展开曲线坐标值 单位: mm

$x'$	434	438	443	448	454	461	469	478	487	497	507	519	530	542	555	568	581
$y'$	-250	-226	-202	-178	-157	-136	-116	-96	-77	-58	-41	-24	-7	9	25	40	55
$x'$	595	609	624	638	653	669	684	700	716	733	749	766	782	799	816	825	825
$y'$	70	84	98	111	124	137	150	162	175	187	189	210	222	233	244	249	250

(2) 相贯线展开曲线坐标计算。由式(16-57)计算出与 $y'$ 对应的圆心角 $\alpha'$ ;

$$\alpha' = \cos^{-1} \left( \frac{y'}{R_2} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{y'}{250} \right) (^{\circ})$$

由式(16-58)、式(16-59)计算展开线曲线端坐标, 即:

$$x_1 = \pi R_2 \frac{\alpha'}{180} = \pi \times 250 \times \frac{\alpha'}{180} = 4.3633 \times \alpha'$$

$$y_1 = (x' - x'_1) + L_2 = x' - 434 + 300 = x' - 134$$

由表16-12中 $x'$ 、 $y'$ 值代入上面三个式子中, 算得结果列于表11-13中。

表 16-13 相贯线展开曲线坐标 $x$ 、 $y$ 值 单位: mm

$x_1$	785	674	628	593	563	537	513	491	471	452	434	416	400	383	367	352	337
$y_1$	300	304	309	314	320	328	335	344	353	363	374	385	396	408	421	434	447
$x_2$	322	307	292	278	263	247	232	216	199	182	163	143	120	92	54	0	
$y_2$	461	475	490	504	520	535	550	566	582	599	615	632	648	666	682	691	

#### 4. 锥管展开曲线

(1) 锥管大口径端。用式(16-60)、式(16-61)计算:

$$y_1 = \frac{R_0}{\cos \theta} \{1 - \cos[\cos \theta (180^\circ - \alpha^\circ)]\}$$

$$= \frac{500}{\cos 83^\circ} \{1 - \cos[\cos 83^\circ (180^\circ - \alpha^\circ)]\}$$

$$x_2 = \frac{R_0}{\cos \theta} \sin[\cos \theta (180^\circ - \alpha^\circ)] = \frac{500}{\cos 83^\circ} \sin[\cos 83^\circ (180^\circ - \alpha^\circ)]$$

$\alpha^\circ$ 从 $0^\circ$ 变化至 $180^\circ$ , 本例为节省篇幅, 变化增量按 $15^\circ$ , 结果如表16-14所示。

表 16-14 锥管大口径端展开曲线 $x_1$ 、 $y_2$ 值 单位: mm

$\alpha^\circ$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$y_1$	297	250	207	168	133	102	75	52	33	19	8	2	0
$x_2$	1533	1411	1287	1162	1047	909	781	652	522	392	262	131	0

(2) 锥管小口径端。以 $\alpha^\circ$ 从 $0^\circ$ 变至 $180^\circ$ , 增量按 $15^\circ$ , 用式(16-62)、式(16-63)计算展开曲线各点坐标。

$$y_2 = \frac{R_1}{\cos \theta} \{1 - \cos[\cos \theta (180^\circ - \alpha^\circ)]\} + \frac{R_0 - R_1}{\cos \theta}$$

$$= \frac{380}{\cos 83^\circ} \{1 - \cos[\cos 83^\circ (180^\circ - \alpha)]\} + \frac{500 - 380}{\cos 83^\circ}$$

$$x_1 = \frac{R_1}{\cos \theta} \sin[\cos(180^\circ - \alpha^\circ)] = \frac{380}{\cos 83^\circ} \sin[\cos(180^\circ - \alpha)]$$

计算结果列入下表16-15。

表 16-15		锥管小口径端展开曲线 $x_1$ 、 $y_1$ 值											单位: mm
$\alpha^\circ$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$y_1$	1210	1175	1142	1112	1086	1062	1042	1024	1010	999	991	986	985
$x_1$	1165	1072	978	883	787	691	593	495	397	300	200	100	0

(3) 与支管相贯处蛋形孔口。用表16-11中各点坐标 $(x, y)$ 及式(16-64)、式(16-65)计算:

$$y_1 = \frac{R_0}{\cos \theta} - \left( \frac{R_1}{\cos \theta} - \frac{x}{\sin \theta} \right) \cos \gamma = \frac{500}{\cos 83^\circ} - \left( \frac{500}{\cos 83^\circ} - \frac{x}{\sin 83^\circ} \right) \cos \gamma$$

$$x_1 = \left( \frac{R_1}{\cos \theta} - \frac{x}{\sin \theta} \right) \sin \gamma = \left( \frac{500}{\cos 83^\circ} - \frac{x}{\sin 83^\circ} \right) \sin \gamma$$

$$\gamma = \cos \theta \left[ \cos^{-1} \left( \frac{y}{R_0 - x \operatorname{ctg} \theta} \right) \right] = \cos 83^\circ \left[ \cos^{-1} \left( \frac{y}{500 - x \operatorname{ctg} 83^\circ} \right) \right]$$

计算结果列入下表16-16。

将表16-11至表16-16的结果点绘成图, 即得本例要求的半边图形(图16-19), 另半边展开图由对称关系确定。

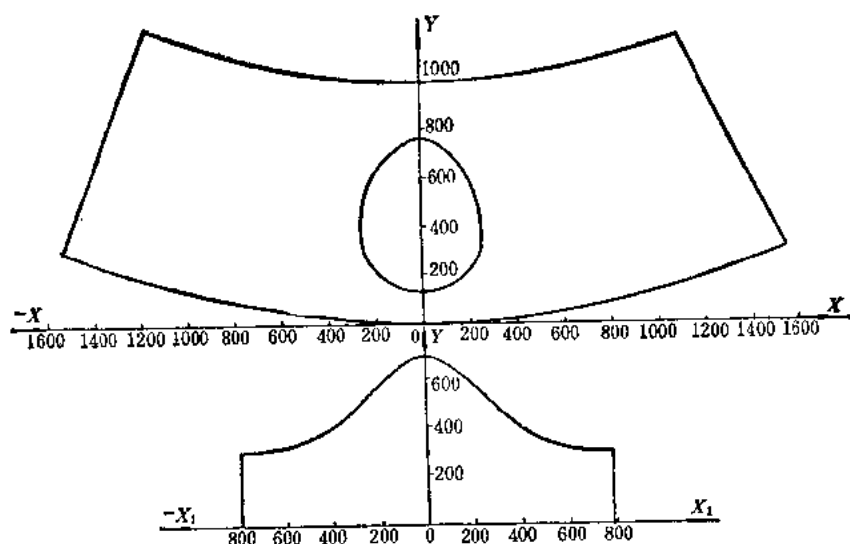


图 16-19 图16-18的两个管节展开图

表 16-16

蛋形孔口展开坐标 $x_1$ 、 $y_1$ 值

单位: mm

$y_1$	131	153	174	195	217	238	259	280	300	321	341	362	382	402	423	443	463
$x_1$	6	110	149	177	200	217	231	241	249	256	260	263	264	264	263	261	257

$y_1$	482	502	522	542	561	581	601	620	640	660	679	698	717	737	756	766
$x_1$	253	248	242	235	227	218	208	197	185	171	156	138	117	91	53	8.3

## 第八节 三倒锥分岔

岔管由一个顺水流向呈渐扩形倒锥和两个呈渐缩形支锥管组成, 前、后连接锥形或圆形直管及弯管, 以过渡到钢管主、支管径。由于三个管节分岔相贯处直径扩大, 由分岔引起的水头损失减少, 有利于在分岔处设置内插的加强结构。这种岔管是月牙肋岔管的典型形式(见十三章)。三个锥管公切于一个虚拟的球壳表面(均以管壳中面为准), 这样, 它们的相贯线成二元二次曲线, 在岔管的单线图上, 相贯线是三条直线。实际工程中, 这种岔管有对称型“Y”分岔和非对称的“卜”型分岔两种, 从计算看, 实质是一样的, 仅是轴线间夹角不同而已。岔管的轴线走向和与前后管节连接形式由厂区枢纽建筑布置决定。岔管三个基本管节与前、后相接管节的相贯线, 仍应按公切于球壳的要求设计, 使相贯线成二元二次曲线, 但相贯线不一定与三倒锥管的轴线垂直, 视布置要求设计。

### 一、岔管的几何特征值

#### (一) 符号及符号脚标含义

图13-14、图13-15中给出岔管单线图及各几何量的含义。其中 $R_r$ 为公切球半径,  $\alpha$ 为锥顶角半值,  $R$ 为进、出口端半径,  $A$ 为轴长(三根轴交点与公切球中心重合),  $\theta$ 为管壳单线相交处的偏角,  $\omega$ 为三根轴的夹角,  $S$ 为管壳交点至管端的距离(单线图),  $\rho$ 为相贯线与相邻管轴夹角。

几何量的脚标与所表示的管节有关。若以I锥代表倒锥形的主锥, II锥代表分岔后的主岔锥, III锥代表分岔后的支岔锥, 脚标1、2、3分别代表I、II、III锥, 如 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ ,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 等。相邻管节间夹角、偏角, 标以相邻管节代号。如I、II锥间管轴夹角表示成 $\omega_{12}$ , I锥管壳延长线与II锥管壳偏角表示成 $\theta_{12}$ 等, 余皆类同。

各锥管的 $A$ 、 $\alpha$ 、 $R$ 和相邻锥管的夹角, 公切球半径 $R_r$ , 由设计拟定岔管体形时确定(见第十三章)。

三个锥管相贯线相交于 $c$ 点, I、II锥相贯线为 $ac$ , I、III锥相贯线为 $bc$ , II、III锥相贯线为 $dc$ 。图13-16给出三个锥管各自的坐标场。

I锥的坐标系为 $X_1$ 、 $Y_1$ 、 $Z_1$ , II锥的坐标系为 $X_2$ 、 $Y_2$ 、 $Z_2$ , III锥的坐标系为 $X_3$ 、 $Y_3$ 、 $Z_3$ , 相贯线在各坐标系中的位置由 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 四个特征点决定。

### (二) I 锥相贯线特征点坐标计算

#### 1. 相贯线交点 c 的坐标

为与《规范》(SD144-85)一致,先确定 c 点在 III 锥中坐标。坐标值  $x_{3c}$ 、 $z_{3c}$  按下式计算:

$$x_{3c} = R_r \left[ \frac{\cos \omega_{23} \sin(\alpha_2 - \alpha_1) - \cos \omega_{13} \sin(\alpha_2 - \alpha_1) - \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos \alpha_1 \sin \omega_{23} + \cos \alpha_2 \sin \omega_{31} + \cos \alpha_3 \sin \omega_{12}} \right] \quad (16-66)$$

$$z_{3c} = R_r \left[ \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) \sin \omega_{12} + \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \sin \omega_{23}}{\cos \alpha_1 \sin \omega_{23} + \cos \alpha_2 \sin \omega_{31} + \cos \alpha_3 \sin \omega_{12}} \right] \quad (16-67)$$

式中  $x_{3c}$ 、 $z_{3c}$ ——对 III 锥的坐标  $X_3$ 、 $Y_3$ 、 $Z_3$  而言;

$R_r$ ——公切球半径;

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ ——I、II、III 锥的半锥顶角;

$\omega_{12}$ 、 $\omega_{23}$ 、 $\omega_{31}$ ——三个锥管管轴的夹角(图13-14)。

对 I 锥坐标场, c 点坐标值由已求得的  $x_{3c}$ 、 $z_{3c}$  通过下式换算:

$$x_{1c} = -x_{3c} \sin(\omega_{31} - 90^\circ) - z_{3c} \cos(\omega_{31} - 90^\circ) \quad (16-68)$$

$$z_{1c} = x_{3c} \cos(\omega_{31} - 90^\circ) - z_{3c} \sin(\omega_{31} - 90^\circ) \quad (16-69)$$

#### 2. 相贯线上 a 点坐标

$$S_{12} = \frac{A_1}{\sin \alpha_1} - R_r \left( \operatorname{tg} \frac{\theta_{12}}{2} + \operatorname{tg} \alpha_1 \right) \quad (16-70)$$

$$x_{1a} = R_1 + S_{12} \sin \alpha_1 \quad (16-71)$$

$$z_{1a} = A_1 - S_{12} \cos \alpha_1 \quad (16-72)$$

#### 3. 相贯线上 b 点坐标

$$S_{13} = \frac{A_1}{\cos \alpha_1} - R_r \left( \operatorname{tg} \frac{\theta_{13}}{2} + \operatorname{tg} \alpha_1 \right) \quad (16-73)$$

$$x_{1b} = -(R_1 + S_{13} \sin \alpha_1) \quad (16-74)$$

$$z_{1b} = A_1 - S_{13} \cos \alpha_1 \quad (16-75)$$

式中  $S_{12}$ 、 $S_{13}$ ——a、b 点至 I 锥入口端母线长, 见图16-20。

### (三) II 锥相贯线特征点坐标计算

#### 1. c 点坐标

c 点在 II 锥坐标系  $X_2$ 、 $Y_2$ 、 $Z_2$  中的位置,

以式(16-66)、式(16-67)求得的  $x_{3c}$ 、

$z_{3c}$  代入下列式换算:

$$x_{2c} = x_{3c} \sin(90^\circ - \omega_{23}) + z_{3c} \cos(90^\circ - \omega_{23}) \quad (16-76)$$

$$z_{2c} = -x_{3c} \cos(90^\circ - \omega_{23}) + z_{3c} \sin(90^\circ - \omega_{23}) \quad (16-77)$$

#### 2. a 点坐标

a 点坐标由下列式计算:

$$S_{21} = \frac{A_2}{\cos \alpha_2} - R_r \left( \operatorname{tg} \frac{\theta_{21}}{2} + \operatorname{tg} \alpha_2 \right) \quad (16-78)$$

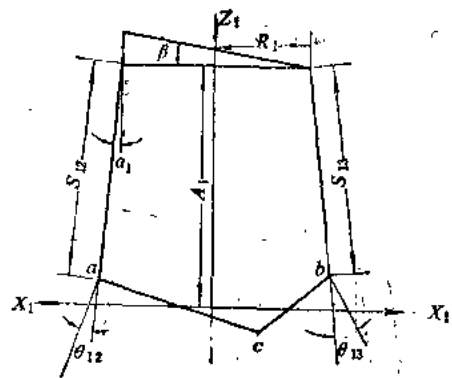


图 16-20 三倒锥岔管的管节 I 几何图形

$$x_{1d} = -(R_2 + S_{21} \sin \alpha_2) \quad (16-79)$$

$$z_{1d} = A_2 - S_{21} \cos \alpha_2 \quad (16-80)$$

### 3. d 点坐标

d 点坐标由下列式计算:

$$S_{23} = \frac{A_2}{\cos \alpha_2} - R_r \left( \operatorname{tg} \frac{\theta_{23}}{2} + \operatorname{tg} \alpha_2 \right) \quad (16-81)$$

$$x_{2d} = R_2 + S_{23} \sin \alpha_2 \quad (16-82)$$

$$z_{2d} = A_2 - S_{23} \cos \alpha_2 \quad (16-83)$$

上列式中  $R_2$ ——II 锥出口端半径;

$\alpha_2$ ——II 锥半锥顶角;

$A_2$ ——公切球心至 II 锥出口端轴长;

$S_{21}$ ——a 点至 II 锥出口端断面的母线长;

$S_{23}$ ——d 点至 II 锥出口端断面的母线长;

$\omega_{23}$ ——II、III 锥管轴间夹角;

$R_r$ ——公切球半径;

$\theta_{21}$ 、 $\theta_{23}$ ——见图 16-21。

图 16-21 为 II 锥各几何量的图示。

### (四) III 锥相贯线特征点坐标计算

#### 1. c 点坐标

c 点坐标由式 (16-66)、式 (16-67) 计算。

#### 2. b 点坐标

b 点坐标由下列式计算:

$$S_{31} = \frac{A_3}{\cos \alpha_3} - R_r \left( \operatorname{tg} \frac{\theta_{31}}{2} + \operatorname{tg} \alpha_3 \right) \quad (16-84)$$

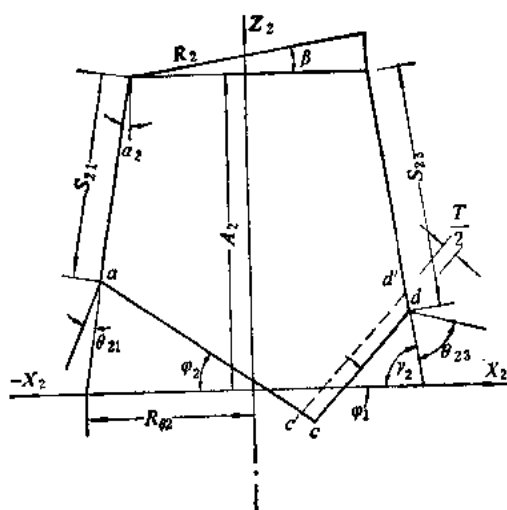


图 16-21 三倒锥岔管组成管节II几何图形

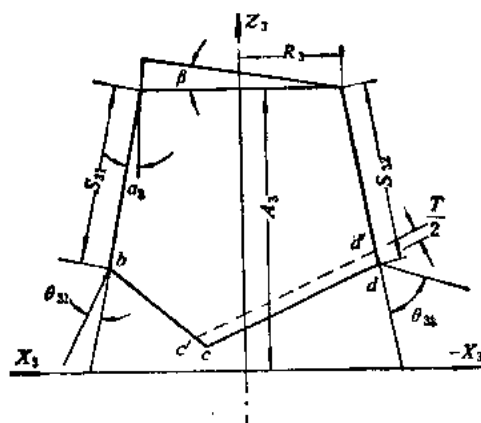


图 16-22 三倒锥岔管组成管节III几何图形

$$x_{1b} = R_1 + S_{31} \sin \alpha_1 \quad (16-85)$$

$$z_{1b} = A_1 - S_{31} \cos \alpha_1 \quad (16-86)$$

3.  $d$  点坐标

$d$  点坐标由下列式计算:

$$S_{32} = \frac{A_1}{\cos \alpha_1} - R_1 \left( \tan \frac{\theta_{31}}{2} + \tan \alpha_1 \right) \quad (16-87)$$

$$x_{1d} = -(R_1 + S_{32} \sin \alpha_1) \quad (16-88)$$

$$z_{1d} = A_1 - S_{32} \cos \alpha_1 \quad (16-89)$$

式中  $R_1$  —— I 锥出口端半径;

$\alpha_1$  —— I 锥半锥顶角;

$A_1$  —— 公切球心至 I 锥出口端断面的轴长;

$S_{31}$  —— I 锥上  $b$  点至出口端断面的母线长;

$S_{32}$  —— I 锥上  $d$  点至出口端断面的母线长;

$\theta_{31}$ 、 $\theta_{32}$  —— I 锥与 II 锥、III 锥在  $b$ 、 $d$  点的偏角。

图 16-22 为 III 锥各几何量及坐标系图。

## 二、I、II、III 锥的展开曲线计算

三个锥管相贯处的形式, 均为大口径端被两个不同方向的平面斜切, 另一端按本节所列图式均为平端, 因此展开计算原理相同。小口径端如与弯管连接, 则应计算出相贯面与锥管底面的夹角, 由式 (16-19)、式 (16-20) 计算。应注意: 在小口径端与弯管连接时, 相贯线与此处的公切球心一般不重合, 展开曲线计算前, 应该按几何关系计算出公切球心离相贯线与管轴交点的距离, 将此距离加到岔管管节轴长  $A$  中去, 以计算小口径端的展开曲线。其次, 小口径端的展开曲线与分岔处的展开曲线共用一个坐标系, 因此, 应对式 (16-19)、式 (16-20) 进行调正, 即计入  $c$  点与小口径端调正后的轴长。

### (一) I 锥展开

#### 1. 相贯线 $a-c-b$

展开按下列步骤进行:

(1) 计算  $c-a$ 、 $c-b$  相贯线在  $X_1$ 、 $Y_1$ 、 $Z_1$  坐标场中的斜率  $m$ ,

$$m_{ac} = \frac{z_{1c} - z_{1a}}{x_{1c} - x_{1a}} \quad (16-90)$$

$$m_{cb} = \frac{z_{1b} - z_{1c}}{x_{1b} - x_{1c}} \quad (16-91)$$

(2) 计算  $c$  点在 I 锥正截面圆中对应的圆心角  $\theta_{1c}$ :

$$\theta_{1c} = \cos^{-1} \frac{x_{1c}}{[R_1 + (A_1 - z_{1c}) \tan \alpha_1]} \quad (16-92)$$

式中  $\alpha_1$  —— I 锥半锥顶角;

$R_1$ 、 $A_1$  —— I 锥进口端半径和不计进口前邻接管影响时的管轴长 (见图 16-20);

$x_{1c}$ 、 $z_{1c}$  ——  $c$  点坐标值, 见式 (16-71)、式 (16-72);

$x_{1a}$ 、 $z_{1a}$  ——  $a$  点坐标值, 见式 (16-68)、式 (16-69);



$x_{1c}, z_{1c}$ ——b点坐标值, 见式(16-74)、式(16-75)。

(3) 展开曲线上每一个计算点都在正截面圆上有一个圆心角 $\theta^\circ$ , 以 $\theta$ 为变量, 从 $\theta = 0^\circ$ 至 $\theta = \theta_{1c}$ , 取节距 $5^\circ$  (或 $10^\circ$ ), 即 $\theta = 0, 5^\circ, 10^\circ, \dots, \theta_{1c}$ , 代入下列式组, 计算从a到c对应于各 $\theta$ 的展开曲线坐标值:

$$\gamma_1 = 90^\circ - \alpha_1 \quad (16-93)$$

$$R_{1c} = R_1 + \frac{A_1 - z_{1c}}{\operatorname{tg} \gamma_1} \quad (16-94)$$

$$K_1 = \frac{R_{1c} \cos \theta - x_{1c}}{\frac{1}{m_{ac}} + \frac{\cos \theta}{\operatorname{tg} \gamma_1}} \quad (16-95)$$

$$L_1 = \frac{R_{1c} \operatorname{tg} \gamma_1 - K_1}{\sin \gamma_1} \quad (16-96)$$

$$x_1 = L_1 \sin[\cos \gamma_1 (180^\circ - \theta)] \quad (16-97)$$

$$y_1 = \frac{R_{1c}}{\cos \gamma_1} - L_1 \cos[\cos \gamma_1 (180^\circ - \theta)] \quad (16-98)$$

(4) 以 $\theta = \theta_{1c}$ 至 $180^\circ$ , 取节距 $5^\circ$  (或 $10^\circ$ ), 按除 $\theta_{1c}$ 外, 一般其余以整数度取值, 代入式(16-93)至式(16-98)中, 但 $m_{ac}$ 改用 $m_{cb}$ , 计算出从c点到b点展开曲线上各点坐标。

展开图以 $X_1$ 、 $Y_1$ 为坐标系。此坐标系与图13-16、图16-20的坐标系无关, 仅为作图延用一般习惯, 脚标“1”表示对I锥而言。

由上面计算结果点绘出I锥a-c-b相贯线展开的半边图形, 另半边以 $Y_1$ 为对称轴, 按对称关系求得。

## 2. I锥进口端

进口端面如为正截面圆, 则展开曲线按式(16-26)、式(16-27)计算, 并修正坐标。即按下列式:

$$x_1 = \frac{R_1}{\sin \alpha_1} \sin[\cos(180^\circ - \theta)] \quad (16-99)$$

$$y_1 = \frac{R_1}{\sin \alpha_1} \{1 - \cos[\cos(180^\circ - \theta)]\} + \frac{R_{1c} - R_1}{\sin \alpha_1} \quad (16-100)$$

如进口端与另一管连接(弯管或直管), 由邻接公切球被两管公切所决定的相贯线与I管正截面线夹角为 $\beta$  (见图16-20, 此处正截面通过公切球中心)。则展开曲线由下列式计算:

$$A = -\operatorname{tg}(90^\circ + \beta)(A_1 + R_1 \operatorname{tg} \beta - z_{1c}) \quad (16-101)$$

$$x_1 = \left[ \frac{R_{1c}}{\sin \alpha_1} - \frac{R_{1c} \cos \theta - A}{\cos \alpha_1 \operatorname{tg}(90^\circ + \beta) + \sin \alpha_1 \cos \theta} \right] \sin[\sin \alpha_1 (180^\circ - \theta)] \quad (16-102)$$

$$y_1 = \frac{R_{1c}}{\sin \alpha_1} - \left[ \frac{R_{1c}}{\sin \alpha_1} - \frac{R_{1c} \cos \theta - A}{\cos \alpha_1 \operatorname{tg}(90^\circ + \beta) + \sin \alpha_1 \cos \theta} \right] \cos[\sin \alpha_1 (180^\circ - \theta)] \quad (16-103)$$

式中  $R_1$ ——通过公切球心的 I 锥正截面半径;

$\beta$ ——相贯线与通过公切球心正面的夹角;

$R_{1c}$ 、 $\alpha_1$ ——含义与 I 锥  $a-c-b$  相贯线展开各公式中符号相同;

$\theta$ ——I 锥截面圆中心角。

同样以  $\theta$  为变量,  $\theta = 0^\circ$  至  $180^\circ$ , 节距  $5^\circ$  (或  $10^\circ$ ), 代入上面式 (16-102)、式 (16-103) 逐点计算, 即可得表示在  $a-c-b$  展开曲线同一坐标场中的 I 锥进口端展开曲线的半边图形上各点位置, 另半边以  $Y_1$  为对称轴求得。

## (二) II、III 锥的展开

II、III 锥基本形式相同, 仅是几何尺寸不同, 相贯线的斜率有区别, 因此计算方法相同。相贯线  $cd$  处有月牙肋板,  $cd$  线是肋板中面上 II、III 锥相贯位置。实际上 II、III 锥与肋板侧面相交线  $c'd'$  才是展开计算依据。计算中应根据肋板厚修正相贯线坐标位置。

展开计算公式一样, 对 II、III 锥仅是符号脚标变化和  $c$  点在不同的象限。下列出 II 锥展开公式。

### 1. 相贯线 $d-c-a$

计算按下列步骤进行:

(1) 计算  $ca$ 、 $cd$  在  $X_2$ 、 $Y_2$ 、 $Z_2$  坐标场中的斜率,

$$m_{ac} = -\frac{Z_{2a} - Z_{2c}}{X_{2a} - X_{2c}} \quad (16-104)$$

$$m_{cd} = -\frac{Z_{2d} - Z_{2c}}{X_{2d} - X_{2c}} \quad (16-105)$$

式中  $x_a$ 、 $z_a$ —— $a$  点坐标, 由式 (16-79)、式 (16-80) 计算;

$x_c$ 、 $z_c$ —— $c$  点修正前坐标, 由式 (16-76)、式 (16-77) 计算;

$x_d$ 、 $z_d$ —— $d$  点修正前坐标, 由式 (16-82)、式 (16-83) 计算。

(2) 计算计入月牙肋半厚后的相贯线  $c'd'$  上  $c'$ 、 $d'$  的坐标位置。设肋板厚度  $T$  (蚀裕量在内), 图 16-21 中的虚线为修正相贯线后, 管壳与肋表面相接线位置:

$$\overline{dd'} = \frac{T}{2\sin(180^\circ - \varphi_1 - \gamma_2)} \quad (16-106)$$

$$\overline{cc'} = \frac{T}{2\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad (16-107)$$

$d'$  的坐标为:

$$x_{d'} = x_d - \overline{dd'} \cos \gamma_2 \quad (16-108)$$

$$z_{d'} = z_d + \overline{dd'} \sin \gamma_2 \quad (16-109)$$

$c'$  的坐标为:

$$x_{c'} = x_c - \overline{cc'} \cos \varphi_1 \quad (16-110)$$

$$z_{c'} = z_c + \overline{cc'} \sin \varphi_1 \quad (16-111)$$

式中  $\gamma_2$ ——II 锥底角,  $\gamma_2 = 90^\circ - \alpha_2$ ;

$\alpha_2$ ——II 锥半锥顶角;

$\varphi_1$ ——相贯线 $cd$ 的倾角,  $\varphi_1 = |\operatorname{tg}^{-1} m_{cd}|$ ;

$\varphi_2$ ——相贯线 $ac$ 的倾角,  $\varphi_2 = |\operatorname{tg}^{-1} m_{ac}|$ 。

(3) 计算 $c'$ 点在II锥正截面圆中对应的圆心角 $\theta_{c'}$ ;

$$\theta_{c'} = \cos^{-1} \frac{x_{c'}}{[R_2 + (A_2 - z_{c'}) \operatorname{tg} \alpha_2]} \quad (16-112)$$

式中的 $A_2$ 、 $\alpha_2$ 、 $R_2$ 见图16-21。

(4) 以 $\theta=0^\circ$ 至 $\theta_{c'}$ , 取节距 $5^\circ$  (或 $10^\circ$ ), 即 $\theta=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, \dots, \theta_{c'}$ , 代入下列式计算:

$$R_{c'} = R_2 + \frac{A_2 - z_{c'}}{\operatorname{tg} \gamma_2} \quad (16-113)$$

$$K_2 = \frac{R_{c'} \cos \theta - x_{c'}}{\frac{1}{m_{cd}} + \frac{\cos \theta}{\operatorname{tg} \gamma_2}} \quad (16-114)$$

$$L_2 = \frac{R_{c'} \operatorname{tg} \gamma_2 - K_2}{\sin \gamma_2} \quad (16-115)$$

$$x_2 = L_2 \sin [\cos \gamma_2 (180^\circ - \theta)] \quad (16-116)$$

$$y_2 = \frac{R_{c'}}{\cos \gamma_2} - L_2 \cos [\cos \gamma_2 (180^\circ - \theta)] \quad (16-117)$$

展开图的坐标系为 $X_2$ 、 $Y_2$ 。此坐标系与图16-21中坐标系无关, 仅按展开图习惯表示法, 脚标2表示II锥的展开。

点绘式(16-113)、式(16-114)计算成果, 可得到以 $Y_2$ 为对称轴的半边 $a-c'-d'$ 展开曲线, 另半边由对称关系求得。

## 2. II锥出口端

锥管出口端的展开处理与I锥进口端相同。

**【例 16-7】** 一月牙肋岔管, 共有八个管节组成, 其中II、III、VI管节为基本管节, 其余为过渡连接管节。岔管的形式如图16-23所示, 几何尺寸及角度标注在图中, 要计算各管节的展开图形。

为压缩篇幅, 仅对本例的II、VI管节进行展开计算, 以说明方法。

### 一、II管节展开计算 (相当于本节介绍的I锥, 脚标用“1”)

(一) 计算基本数据

(1) II锥管半锥顶角 $\alpha_1 = 7^\circ$ ;

(2) 管轴长 (公切球心至公切球心)  $A_1 = 1230.8\text{mm}$ ;

(3) 公切球半径 $R_T = 916\text{mm}$ ;

(4) II锥入口端半径 $R_1 = 771.8\text{mm}$ ;

(5) II锥入口端与所连接管节的公切球半径 $R_T = 766\text{mm}$ ;

(6) 其它有关数据:  $\omega_{12} = 166^\circ$ ,  $\omega_{13} = 137^\circ$ ,  $\omega_{23} = 57^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0^\circ$ ,  $\theta_{13}' = 16^\circ$ ,  $\theta_{23} = 96^\circ$ ,  $\alpha_2 = 7^\circ$ ,  $\alpha_3 = 20^\circ$ 。

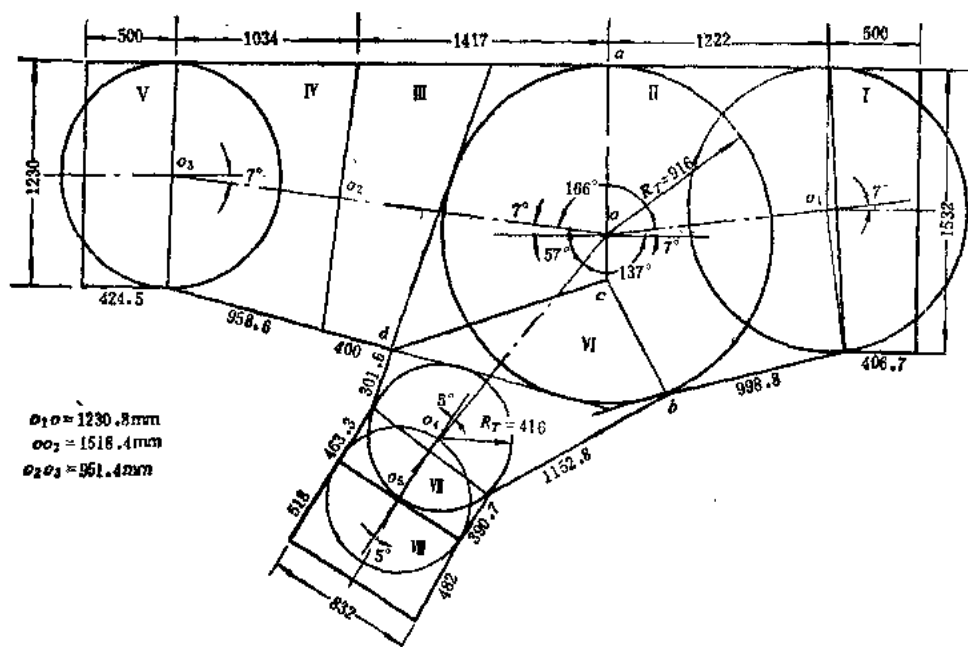


图 16-23 T形三倒锥岔管的几何尺寸图

(二) 相贯线  $a$ 、 $c$ 、 $b$  点坐标位置计算

由式 (16-66)、式 (16-67) 计算  $x_{3c}$ 、 $z_{3c}$  得:

$$x_{3c} = 916 \left[ \frac{\cos 57^\circ \sin(20^\circ - 7^\circ) - \cos 137^\circ \sin(20^\circ - 7^\circ) - \sin(7^\circ - 7^\circ)}{\cos 7^\circ \sin 57^\circ + \cos 7^\circ \sin 137^\circ + \cos 20^\circ \sin 166^\circ} \right]$$

$$= 151.4 \text{ mm}$$

$$z_{3c} = 916 \left[ \frac{\sin(20^\circ - 7^\circ) \sin 137^\circ + \sin(20^\circ - 7^\circ) \sin 57^\circ}{\cos 7^\circ \sin 57^\circ + \cos 7^\circ \sin 137^\circ + \cos 7^\circ \sin 166^\circ} \right]$$

$$= 180.4 \text{ mm}$$

由式 (16-68)、式 (16-69) 换算成  $x_{1c}$ 、 $z_{1c}$ , 即  $c$  点坐标:

$$x_{1c} = -151.4 \sin(137^\circ - 90^\circ) - 180.4 \cos(137^\circ - 90^\circ)$$

$$= -233.76 \text{ mm}$$

$$z_{1c} = 151.39 \cos(137^\circ - 90^\circ) - 180.4 \sin(137^\circ - 90^\circ)$$

$$= -28.7 \text{ mm}$$

$a$  点坐标计算由式 (16-70)、式 (16-71)、式 (16-72) 进行:

$$S_{1a} = \frac{1230.8}{\cos 7^\circ} - 916 \left( \tan \frac{0^\circ}{2} + \tan 7^\circ \right)$$

$$= 1127.6 \text{ mm}$$

$$x_{1a} = 771.8 + 1127.6 \sin 7^\circ = 909.2 \text{ mm}$$

$$z_{1a} = 1230.8 - 1127.6 \cos 7^\circ = 111.6 \text{ mm}$$

$b$  点坐标计算由式 (16-73)、式 (16-74) 和式 (16-75) 进行:

$$S_{13} = \frac{1230.8}{\cos 7^\circ} - 916 \times \left( \operatorname{tg} \frac{16^\circ}{2} + \operatorname{tg} 7^\circ \right) \\ = 998.8 \text{ mm}$$

$$x_{16} = -(771.8 + 998.8 \sin 7^\circ) = -893.5 \text{ mm}$$

$$z_{16} = 1230.8 - 998.8 \cos 7^\circ = 239.4 \text{ mm}$$

II锥图形如图16-24。

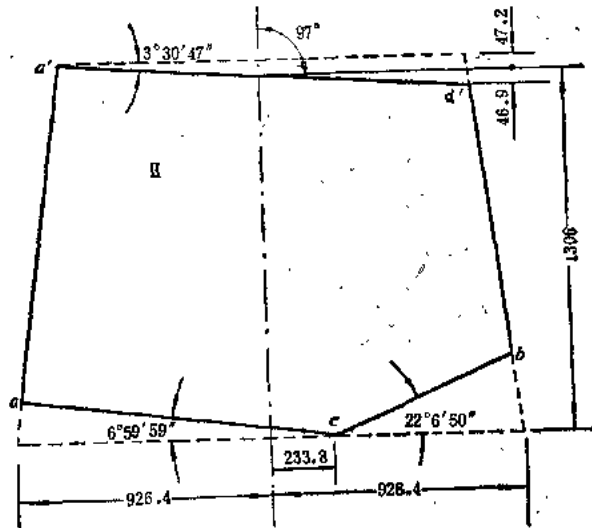


图 16-24 三倒锥岔管的II管节几何尺寸

(三) 相贯线  $a-c-b$  展开计算

(1)  $a-c$ 、 $c-b$  线在坐标场中的斜率  $m$ ：

$$m_{ac} = \frac{111.6 + 28.7}{909.2 + 233.76} = 0.122780922$$

$$(\varphi_2 = 6^\circ 59' 59'')$$

$$m_{cb} = \frac{239.4 + 28.7}{-893.5 + 233.76} = -22.11396739$$

$$(\varphi_1 = -22^\circ 6' 50'')$$

(2)  $c$  点在 II 锥正截面圆中对应的圆心角  $\theta_{1c}$ ：

$$\theta_{1c} = \cos^{-1} \frac{-233.76}{[771.8 + (1230.8 - 28.7) \operatorname{tg} 7^\circ]} \\ = 104^\circ 43' 46''$$

$$\theta_{1c} = 180^\circ - \theta_{1c} \\ = 75^\circ 16' 14''$$

(3) 以  $X_1$ 、 $Y_1$  为坐标场计算 II 锥展开图。由式 (16-93) ~ 式 (16-98)，即：

$$\gamma_1 = 90^\circ - 7^\circ = 83^\circ,$$

$$R_{1c} = 771.8 + \frac{1230.8 + 28.7}{\operatorname{tg} 83^\circ} = 926.45 \text{ mm}$$

$$K_1 = \frac{926.45 \cos \theta + 233.76}{\frac{1}{-22.11396739} + \frac{\cos \theta}{\tan 83^\circ}}$$

$$L_1 = \frac{926.45 \tan 83^\circ - K_1}{\sin 83^\circ}$$

$$x_1 = L_1 \sin[\cos 83^\circ (180^\circ - \theta)]$$

$$y_1 = \frac{926.45}{\cos 83^\circ} - L_1 \cos[\cos 83^\circ (180^\circ - \theta)]$$

设  $\theta = 0^\circ$  至  $75^\circ$  以  $10^\circ$  为节距, 用上式计算得下表 16-17 结果, 而对  $\theta = 75^\circ 16' 14''$  则单独以求出  $c$  点位置。  $\theta = 80^\circ$  至  $180^\circ$ ,  $K_1$  中  $m$  用  $m_c$  代替, 仍用上述式计算, 亦列入表 16-17 中。

表 16-17		锥管Ⅱ展开坐标 $x_1$ 、 $y_1$ 值																		单位: mm		
$x_1$	2739	2598	2525	2454	2314	2175	2036	1896	1755	1678	1679	1603	1441	1279	1118	857	796	636	477	318	159	0
$y_1$	801	739	706	671	595	514	427	235	220	188	183	180	167	158	151	147	144	142	142	141.4	141.3	141.3

图 16-25 为 II 锥展开图。图中下端曲线由表 16-17 点绘,  $Y_1$  轴右边图形按对称关系求得。

#### (四) II 锥进口端相贯线展开

进口端与邻接管公切于半径为  $R_r = 766\text{mm}$  的公切球上。由几何关系求得相贯线与通过球心进口端正截面夹角  $\beta = 3.5^\circ$ 。由相贯线  $a-c-b$  展开计算中已知的  $A_1$ 、 $R_1$ 、 $\alpha_1$ 、 $R_{1c}$  的数值, 通过式 (16-101)、式 (16-102)、式 (16-103), 取  $\theta = 0^\circ$  至  $180^\circ$ , 节距  $10^\circ$ , 代入式中计算:

$$A = -\tan(90^\circ + 3.5^\circ)(1230.8 + 771.8 \tan 3.5^\circ + 28.7)$$

$$= 21364.44$$

$$x_1 = \left[ \frac{926.45}{\sin 7^\circ} - \frac{926.45 \cos \theta - 21364.44}{\cos 7^\circ \tan(90^\circ + 3.5^\circ) + \sin 7^\circ \cos \theta} \right]$$

$$\times \sin[\sin 7^\circ (180^\circ - \theta)]$$

$$y_1 = \frac{926.45}{\sin 7^\circ} - \left[ \frac{926.45}{\sin 7^\circ} - \frac{926.45 \cos \theta - 21364.44}{\cos 7^\circ \tan(90^\circ + 3.5^\circ) + \sin 7^\circ \cos \theta} \right]$$

$$\times \cos[\sin 7^\circ (180^\circ - \theta)]$$

得到的展开曲线上各点坐标列于表 16-18 中。

表 16-18	锥管 II 进口端展开坐标 $x_1$ 、 $y_1$ 值																		单位: mm
$x_1$	2366	2240	2113	1984	1855	1724	1593	1461	1329	1196	1063	930	797	664	531	398	265	133	0
$y_1$	1728	1679	1635	1595	1558	1526	1497	1472	1450	1431	1415	1402	1391	1382	1375	1370	1366	1364	1363

点绘表16-18、表16-17在同一坐标场中，即得II锥管的半边图形。图中Y轴另半边由对称绘出。

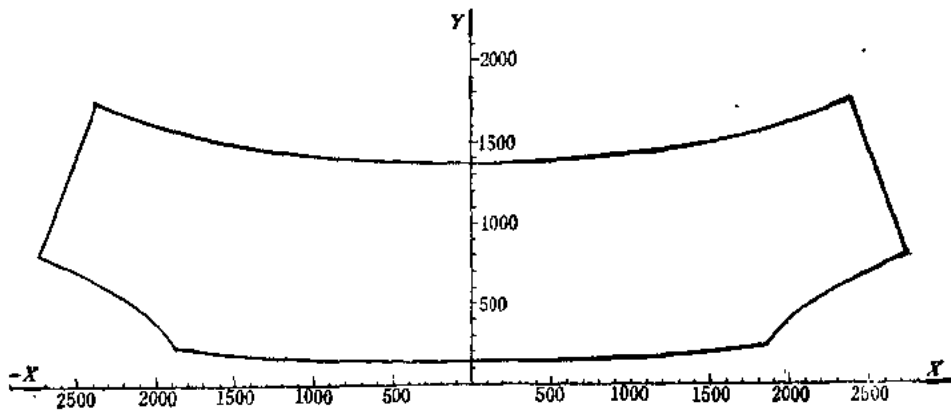


图 16-25 三倒锥岔管的管节II展开图形

## 二、III管节展开计算（相当于本节介绍的II锥，脚标用“2”）

### （一）计算基本数据

- （1）III锥管半锥顶角 $\alpha_2 = 7^\circ$ ；
- （2）管轴长（公切球心至III锥出口） $A_2 = 1518.4\text{mm}$ ；
- （3）公切球半径 $R_T = 916\text{mm}$ ；
- （4）III锥入口端半径 $R_1 = 922.9\text{mm}$ ；
- （5）III锥出口端半径 $R_2 = 736.4\text{mm}$ ；
- （6）其它有关数据： $\omega_{21} = 166^\circ$ ， $\omega_{23} = 57^\circ$ ， $\omega_{13} = 137^\circ$ ， $\theta_{11} = 0^\circ$ ， $\theta_{13} = 96^\circ$ ， $\theta_{23} = 16^\circ$ ， $\alpha_1 = 7^\circ$ ， $\alpha_3 = 20^\circ$ ，月牙肋板厚 $T = 70\text{mm}$ 。

### （二）相贯线a、c、d点坐标位置计算

由II锥的计算中，已得 $x_{2c} = 151.4\text{mm}$ ， $z_{2c} = 180.4\text{mm}$ ，根据式（15-76）、式（15-77）求 $x_{2c}$ 、 $z_{2c}$ ：

$$\begin{aligned} x_{2c} &= 151.4 \sin(90^\circ - 57^\circ) + 180.4 \cos(90^\circ - 57^\circ) \\ &= 233.8\text{mm} \\ z_{2c} &= -151.4 \cos(90^\circ - 57^\circ) + 180.4 \sin(90^\circ - 57^\circ) \\ &= -28.7\text{mm} \end{aligned}$$

a点坐标位置计算按式（16-78）～式（16-80）进行：

$$\begin{aligned} S_{21} &= \frac{1518.4}{\cos 7^\circ} - 916 \left( \tan \frac{0^\circ}{2} + \tan 7^\circ \right) \\ &= 1417.3\text{mm} \\ x_{2a} &= -(736.4 + 1417.3 \sin 7^\circ) = -909.1\text{mm} \\ z_{2a} &= 1518.4 - 1417.3 \cos 7^\circ = 111.7\text{mm} \end{aligned}$$

d点坐标位置计算按式（16-81）～式（16-83）进行：

$$S_{23} = \frac{1518.4}{\cos 7^\circ} - 916 \left( \operatorname{tg} \frac{96^\circ}{2} + \operatorname{tg} 7^\circ \right) = 400 \text{ mm}$$

$$x_{2d} = 736.4 + 400 \sin 7^\circ = 785.2 \text{ mm}$$

$$z_{2d} = 1518.4 - 400 \cos 7^\circ = 1121.4 \text{ mm}$$

图16-26为VI锥图形(即基本管节III)。

(三) 相贯线 $a-c'-d'$ 展开计算

(1)  $ac$ 、 $cd$ 在 $X_1$ 、 $Y_1$ 、 $Z_1$ 坐标场中的斜率。由式(16-104)、式(16-105)代入 $a$ 、 $c$ 、 $d$ 坐标值,得

$$m_{ac} = \frac{111.7 + 28.7}{-909.1 - 233.8} = -0.12285453, \quad \varphi_2 = 7^\circ 0' 14''$$

$$m_{cd} = \frac{1121.4 + 28.7}{785.2 - 233.8} = 2.085798226, \quad \varphi_1 = 64^\circ 23' 7''$$

(2)  $cd$ 处有月牙肋板,修正相贯线。肋侧与III锥相贯 $c'd'$ 。由式(16-108)、式(16-109)计算 $d'$ 坐标:

$$x_{2d'} = 785.2 - \frac{70 \cos 83^\circ}{2 \sin(180^\circ - 64^\circ 23' 7'' - 83^\circ)} = 777.3 \text{ mm}$$

$$z_{2d'} = 1121.4 + \frac{70 \sin 83^\circ}{2 \sin(180^\circ - 64^\circ 23' 7'' - 83^\circ)} = 1185.9 \text{ mm}$$

由式(16-110)、式(16-111)计算 $c'$ 坐标:

$$x_{2c'} = 233.8 - \frac{70 \cos 7^\circ 0' 14''}{2 \sin(7^\circ 0' 14'' + 64^\circ 23' 7'')} = 197.1 \text{ mm}$$

$$z_{2c'} = -28.7 + \frac{70 \sin 7^\circ 0' 14''}{2 \sin(7^\circ 0' 14'' + 64^\circ 23' 7'')} = -24.2 \text{ mm}$$

(3)  $c'$ 点在正截面圆中对应的圆心角 $\theta_{2c'}$ :

$$\theta_{2c'} = \cos^{-1} \frac{197.1}{[736.4 + (1518.4 + 24.2) \operatorname{tg} 7^\circ]} = 77^\circ 42' 29''$$

(4)  $d'c'$ 、 $c'a$ 展开:取展开图坐标系 $X_2$ 、 $Y_2$ (此坐标与管节单线图的坐标系无关),由式(16-113)~式(16-117)计算相贯线 $d'c'$ 段,此段斜率 $m_{d'c'}$ 与 $m_{ac}$ 相同。

$$\gamma_2 = 90^\circ - 7^\circ = 83^\circ, \quad R_{2c'} = 922.9 + \frac{1518.4 + 24.2}{\operatorname{tg} 83^\circ} = 1112.3 \text{ mm}$$

$$K_2 = \frac{1112.3 \cos \theta - 197.1}{\frac{1}{2.085798226} + \operatorname{tg} 83^\circ}, \quad L_2 = \frac{1112.3 \operatorname{tg} 83^\circ - K_2}{\sin 83^\circ} \text{ mm}$$

$$x_2 = L_2 \sin[\cos 83^\circ (180^\circ - \theta^\circ)] \text{ mm}$$

$$y_2 = \frac{1112.3}{\cos 83^\circ} - L_2 \cos[\cos 83^\circ (180^\circ - \theta^\circ)] \text{ mm}$$

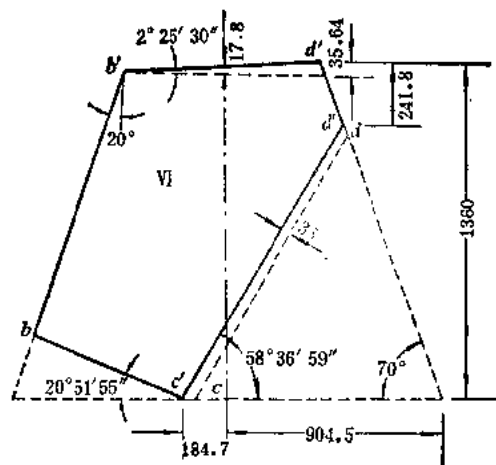


图 16-26 三倒锥岔管的管节XI几何尺寸



以 $\theta=0^\circ$ 至 $77^\circ42'29''$ , 以 $10^\circ$ 为节距, 分别代入上面式组中, 求得 $d'c'$ 展开曲线坐标值如表16-19所示。再 $m_{c,c}$ 代替 $m_{d,c}$ 代入上面式组,  $\theta=80^\circ, 90^\circ, 100^\circ, \dots, 180^\circ$ , 即节距 $10^\circ$ , 按上列式计算, 结果亦列入表16-19, 点绘出 $Y_2$ 轴一边的图形, 另半边对称确定(图16-27)。

表 16-19

相贯线 $d'c'$ 、 $c'a$ 展开坐标 $x_1$ 、 $y_1$ 值

单位: mm

$x_1$	2100	2032	1963	1895	1823	1749	1669	1585	1502	1457	1189	967	783	627	494	377	273	177	87	43	0
$y_1$	1507	1382	1255	1127	996	863	727	588	461	501	649	775	882	969	1040	1096	1138	1167	1185	1189	1190

#### (四) 出口端相贯线展开计算

本管节出口端与邻接的管节间, 相贯线呈直线且垂直于管轴, 所以展开曲线计算按式(16-26)、式(16-27)进行。 $\theta=0^\circ$ 至 $180^\circ$ , 取节距 $10^\circ$ ;

$$x_1 = \frac{736.4}{\sin 7^\circ} \sin[\sin 7^\circ (180^\circ - \theta)]$$

$$y_1 = \frac{736.4}{\sin 7^\circ} \{1 - \cos[\sin 7^\circ (180^\circ - \theta)]\} + \frac{1112.3 - 736.4}{\sin 7^\circ}$$

计算结果列入表16-20中, 并点绘在图16-27中。

表 16-20

$x_1$	1087	1050	1008	963	914	861	805	747	686	623	558	491	423	354	284	214	143	71	0
$y_1$	2056	1982	1931	1874	1819	1767	1720	1676	1636	1590	1567	1539	1515	1494	1477	1464	1455	1449	1447

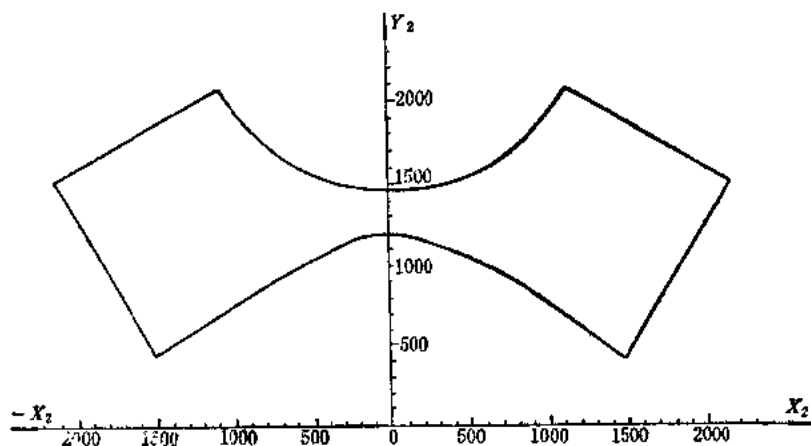


图 16-27 三倒锥岔管的管节XJ展开图形

## 第九节 检修进入孔管节

图16-28为钢管检修进入孔管节的正、侧视图。

管体由主管、颈管、盖板、颈管法蓝组成，法蓝与盖板用螺栓连接。颈管插入主管内，但以不露出管壁厚度范围以外为度，以避免影响水流。

颈管截面圆心角 $\alpha$ ，随相贯线计算点位置而变。主管与此计算点对应位置的正截面圆心角为 $\beta$ 。 $\alpha$ 与 $\beta$ 有下列关系：

$$R_2 \sin \alpha = R_1 \sin \beta \quad (16-118)$$

可写成：

$$\beta = \sin^{-1} \left[ \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \sin \alpha \right] \quad (16-119)$$

式中  $R_1$ ——主管计算半径；

$R_2$ ——颈管计算半径。

### 一、颈管展开

颈管展开按下列公式：

$$x = \pi R_2 \frac{\alpha}{180^\circ} \quad (16-120)$$

$$y = L_0 + \frac{\delta_1}{2} + R_1 (1 - \cos \beta) \quad (16-121)$$

式中  $L_0$ ——颈管最短母线长；

$\delta_1$ ——主管管壁厚度；

$\beta$ ——即式(16-119)所示。

计算时，以颈管圆心角 $\alpha$ 为变量，自 $0^\circ$ 至 $180^\circ$ ，节距 $10^\circ$ 或 $15^\circ$ ，代入式(16-120)、式(16-121)中，可计算出颈管的半边展开图形中各点位置，另半边由对称关系求出。

### 二、主管展开

主管管身展开为矩形，本节仅说明插入颈管的孔口展开尺寸。计算时，以孔口中心轴作展开图的坐标原点，以X轴为对称轴。孔口曲线上各点坐标值，以颈管截面圆心角为变量，代入下面两式计算：

$$x = (R_2 + \delta_2) \cos \alpha \quad (16-122)$$

$$y = \frac{\pi R_1 \beta}{180} \quad (16-123)$$

式中各符号意义同前（见图16-28）。

圆心角 $\alpha$ 从 $0^\circ$ 变到 $180^\circ$ ，节距 $10^\circ$ ，代入式(16-122)、式(16-123)中，即可计算出相贯线展开图上各点坐标值。

主管管节轴线长度由设计的管节长度决定，一般为钢板出厂宽度，管节展开宽度为半径 $R_1$ 与壁厚半值之和所决定的圆周长。

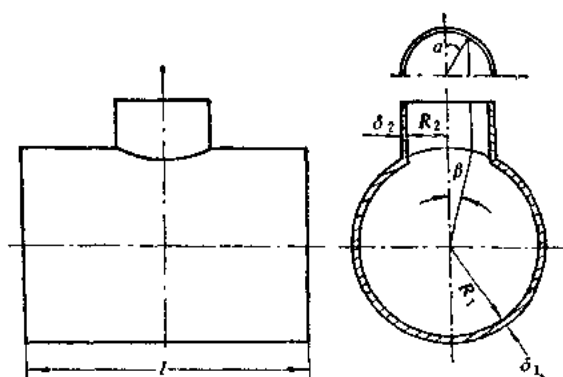


图 16-28 进入孔管节几何特征

展开图的坐标场原点与展开孔口的中心重合。颈管及主管展开图式如图16-29、图16-30所示。

主管孔口应该设置补强圈，补强圈的宽度由补强要求决定。补强圈的展开图可根据上述展开孔口的外围划出圈的宽度割取，应注意到孔口展开曲线不是椭圆曲线这情况，补强圈内、外轮廓不能用椭圆方程计算。

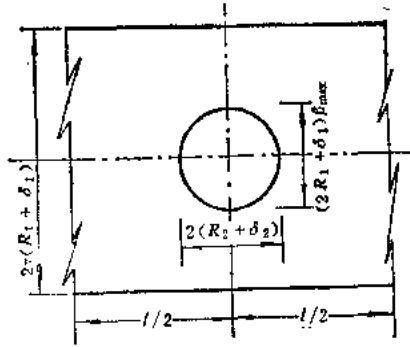


图 16-29 进入孔主管节展开图形

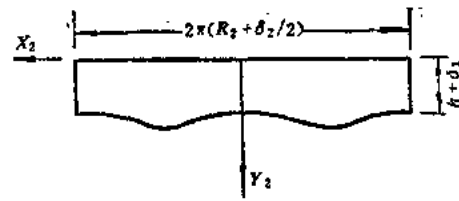


图 16-30 进入孔管节颈管展开图形

# 第十七章 钢管的监测维护

## 第一节 运行监测

### 一、监测项目

压力钢管设计时，应为钢管运行观测和检修维护提供必要的观测设施，以便监视，分析钢管运行状况。而对于设置在软基上或局部在软基上的管道，监测是十分重要的。监测项目主要包括：

（1）钢管入口处（进水口）拦污栅工作情况，阻塞物组成成分，栅前后的水头损失，水流流态。钢管入口处事故闸门的备用状态，渠道前池泥砂含量，粒径及硬度。

（2）钢管中的过流静压力和脉动压力。

（3）正常工作条件下管轴线及镇墩、支墩位移情况，即镇墩、支墩在水平方向异常变化，移动错位等情况和垂直方向的不均匀沉陷；非常工作条件下（如地震等）它们的变位情况。

（4）大气温度，上、下游水温，空气湿度变化。

（5）钢管及其附件上的防锈漆膜的完好程度，剥落，老化部位以及管内壁的锈蚀深度，分布，泥砂对管壁的磨损等。

（6）钢管支承结构的工作情况。对滑动型支承结构，检查内容包括管壁与垫板间接触的密合程度，润滑剂（油脂）有效程度；对滚动型支承结构则包括检查滚轮轴与原安装位置偏移程度，与上、下坐板接触处滚轮锈蚀及脏污情况。

（7）伸缩节变形，漏水，止水填料油质外漏情况，调压螺栓及螺帽锈蚀，螺纹有效状况。

（8）人孔，排水孔，通气孔（真空破坏阀）工作状态，密封件的漏水情况，结构及连接螺栓的锈蚀程度和部位。

（9）钢管运行中的振动情况。有关振动的频率及振幅。振动发生时的水头、流量及出力变动数据。

（10）镇、支墩混凝土表面裂缝，缝的走向及开裂深度。

（11）管道焊缝状况。

### 二、监测措施

上述观测项目，一部分通过定期的肉眼观察，另一部分要通过仪器测定。钢管进口建筑物，钢管，镇、支墩，厂房的钢管引入段，它们的水平位移用视准线法或三角网法进行监测，垂直位移用水准测量进行监测控制，并作出可靠的记录。

#### 1. 变形测量网点布置及标记

观测点用永久标记，标记用青铜标记焊在钢管施测部位，和镇、支墩混凝土顶部的施测点上。三角网或视准线在地面上的永久基点，也应该设固定标记。设计要提供施测点位置，观测三角网边长最好控制在300m以内，三角网的任意哪一个三角形两边夹角都不要

少于 $20^\circ$ 。

图17-1(a)为布置在钢管中心轴位置的施测标记, 分别设在管壳及混凝土镇墩顶上。图17-1(b)为埋置在地上的基准点或网点的标记图样。

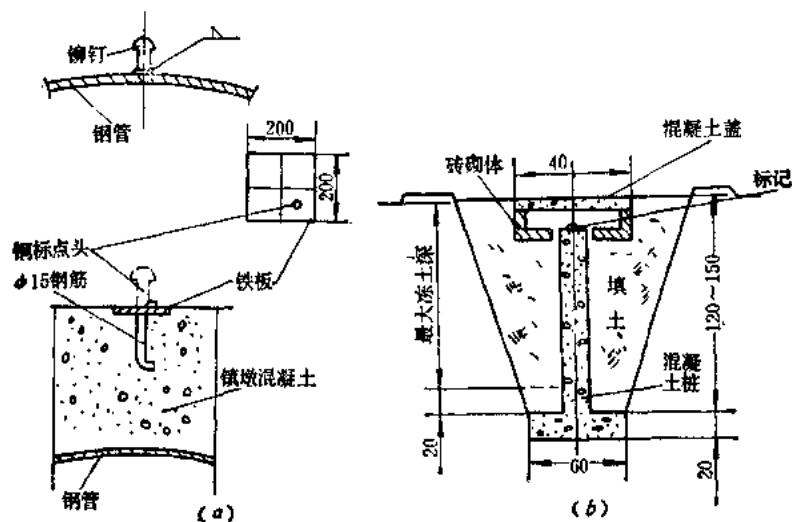


图 17-1 位于钢管镇墩上的监测标记 (单位: cm)

钢管变形监测网点应与厂房枢纽各建筑物的监测网点结合布置。镇、支墩上的测点应设在管轴线位置、支墩的两边和镇墩的4个角上。当钢管直管比较长, 超过一般经纬仪高精度视准范围情况下, 则中间部位测点应加密。图17-2为三角网点在厂区布置的示意图。图中, 管轴线两端的永久性桩点均设在小坡上, 基本三角形都避免了小于 $20^\circ$ 的锐角, 平差比较方便。

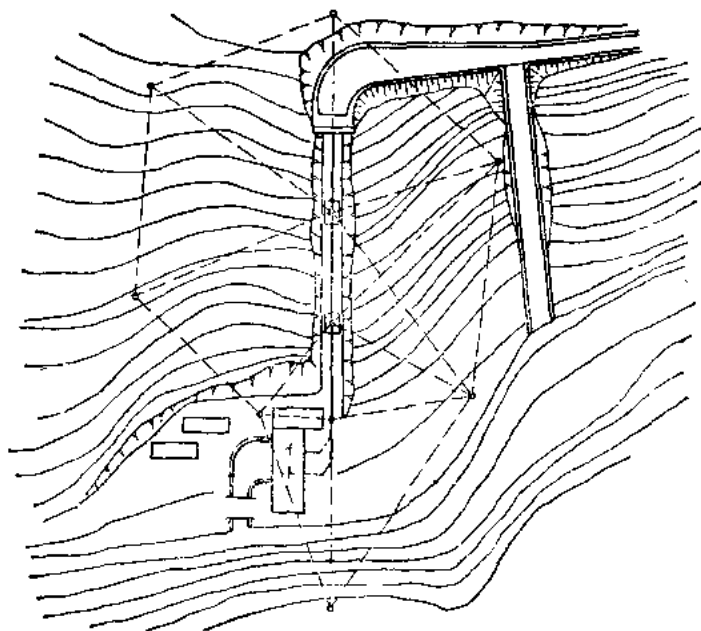


图 17-2 三角网点在厂区布置示意图

## 2. 钢管温度变形观测

温度变化数据（包括气温、水温），是压力钢管设计的重要原始资料。小水电建设中，当地温度资料一般偏不足，参证站资料与当地资料较难吻合。设计钢管温度变位值和选择压力钢管的合拢温度，其精度往往受一定限制，因此设计中宜采取措施，以便于观测、补充验证设计所采用的温度资料。

温度观测包括电站所在处的气温（进水口处、渠线高程、厂房高程）、前池水温变化，钢管放空时，日光曝晒引起的钢管温度升高，早晨空管时，钢管低温等资料。

钢管变形可通过伸缩节处专门设置的游标装置进行测定，图17-3所示结构比较简单实用。

钢管安装合拢时，一般选当时钢管温度等于或接近多年平均温度，合拢时，伸缩节内套管与外套管相对位置，以钢管处于最高温度时内、外套管不相抵紧；最低温度时，内套管不拉出止水填料盒范围为标准，按此温度安装合拢，并使游标指针指向标尺上的“零”。

游标位置宜设在管腰部位，以改善伸缩节部位钢管在自重和水重作用下产生法向变形带来的影响。

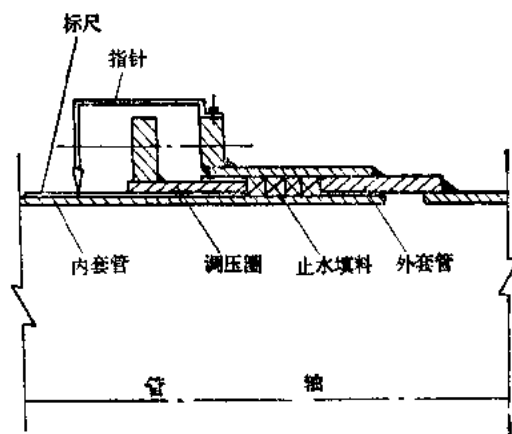


图 17-3 伸缩节处的游标装置

## 第二节 钢 管 维 护

### 一、钢管防锈和防锈方法

#### 1. 锈蚀原因

小型水电站的压力钢管，特别是对高水头水电站来说，其造价在整个电站造价中所占比重比较大。提高压力钢管的抗锈能力，延长使用寿命，有很大经济意义。

钢管及附件的锈蚀起因于钢材自身组成成分中的杂质含量和钢管的工作条件，化学和电化学反应，使裸露在空气中的钢材逐渐锈蚀。处于潮湿空气、有害气体（酸、碱度较大）中的钢管外壁锈蚀速度较快，表层钢铁成片地氧化变质、剥落，最终导致材料承载力下降，使用寿命缩短。工程中，除这种因材料厚度减少导致强度下降的情况外，还有因锈蚀点局部加深，或焊缝周围裂缝开展并且锈蚀导致至事故的例子。

管内壁不光滑处局部气蚀，泥砂对管壁的磨损也能导致钢管整体强度下降，正常使用年限减少。

#### 2. 防锈蚀方法选择

《规范》（SD144-85）规定了抗锈蚀裕量不少于2mm，因此设计钢管壁厚中包括强

度要求（或抗外压稳定要求）部分外，还有抗锈蚀裕量。此外，管的内、外壁应进行防锈保护，其中包括喷、刷防锈涂料和喷涂金属两种。喷、刷涂料是利用涂料薄膜，在钢管结构表面形成保护层，薄膜把钢的基体与空气、电解质溶液隔开，使形不成腐蚀的条件。防锈涂料的优点在于有长期使用的经验、施工工艺简单、适应性好、单价低廉、修补方便、材料充足，缺点是有效防护期寿命短、多层涂刷施工期较长。金属喷涂优点是保护期长（20~30年），微孔封闭效果比涂料好、与钢材附着力好，且能适应结构受力变形、温度变形和振动，日常维修工作量少。存在问题是工艺要求、设备复杂，单价高，对人体有一定伤害作用。

对小型水电站的压力钢管一般以防锈涂料为主，部分日常维修比较困难的部件，可选用锌、铝喷涂。

### 3. 对防锈涂料的要求和选择

根据压力钢管的工作条件，对涂料的一般要求是：

（1）抗水性能良好，即泡在水中或处于潮湿空气中时，涂料成份稳定性和不透水性良好；

（2）耐磨性能好；

（3）与钢料有良好的附着力；

（4）易于在一般工地施工，涂刷或喷涂工艺简单；

（5）底漆、面漆配套，彼此间无互溶作用，不产生“咬底”现象。

管内壁常年过水，经受泥砂冲刷，可选择下列配套底、面漆：

（1）环氧沥青漆：

底漆：云母氧化铁环氧沥青底漆，

面漆：环氧沥青清漆；

（2）聚胺脂沥青漆：

底漆：聚胺脂沥青底漆，

面漆：聚胺脂沥青清漆；

（3）带锈底漆外加环氧沥青清漆或聚胺脂沥青清漆：

底漆：铁红醇酸带锈底漆，

面漆：环氧沥青或聚胺脂沥青清漆；

（4）水泥砂浆沥青涂料：

底层涂料：普通水泥砂浆或改性水泥砂浆，

面层涂料：4号沥青的汽油溶液。

环氧沥青漆的底漆主要成份有环氧树脂、煤焦油沥青液、云母、氧化铁、铝粉浆及防锈颜料，且配以乙二胺酒精溶液为固化剂。环氧沥青清漆由环氧树脂和经过炼制的煤焦沥青合成，再配以乙二胺酒精溶液。这套防锈涂料附着力强，有良好的坚韧性、耐候性、耐水性、耐磨性和耐酸、碱性，主要原因是涂料中环氧树脂化学结构稳定，有良好的物理、机械性能，煤焦油沥青耐水、防腐作用明显。

聚胺脂沥青主要成份为聚胺树脂和煤焦油沥青。作底漆用时，取聚胺脂沥青中的醚

油预聚物38.2%及沥青色浆61.8%配合使用。作面漆时取醚油预聚物50%及沥青溶液50%配合使用。这套涂料的耐磨性、耐水性、耐化学酸、碱性优于环氧沥青漆，价格较低，厂家有底漆成品供应。

带锈底漆配合环氧沥青清漆和聚胺脂沥青清漆涂料有相当好的实际效果。带锈底漆由厂家供应成品（如C06-33稳化型铁红醇酸带锈底漆、C06-2铁红醇酸带锈底漆），涂料可以把铁锈转化为稳定的化合物，且含有不同的活性防锈颜料和填充物，它们能使底漆的防锈能力增强，它的显著优点是在锈层不超过80μm时可以直接涂刷，减轻除锈工作，方便施工，降低成本，也有利于人体健康。

水泥砂浆沥青涂料的特点是：取材方便、费用低、配制和涂刷方便。普通水泥砂浆涂料为硅酸盐水泥或矿渣水泥(500号)，配24目/英寸以下的石英砂调制，按重量配合比为：

$$\text{灰:砂:水} = 1:1:(0.3\sim0.4)$$

改性水泥砂浆按下列成份配制：

500号硅酸盐水泥	100%
“D505”聚醋酸乙烯乳剂	(2~2.5)% (固体含量约50%)
“850”水溶性有机硅	1.2% (含甲基硅烷钠盐固体30%)
(26~28)目/英寸以下石英砂	(50~100)%
水灰比	(32~38)%

水泥砂浆涂层厚3mm左右，改性水泥砂浆约厚2mm，待凝固后再涂刷沥青汽油溶液2mm左右。实践表明：这种涂料不仅耐磨，还对铁细菌的生长起一定的抑制作用。

在《水利水电工程钢闸门设计规范》(SDJ13-78)中，对处于水下的水工钢闸门，防锈漆中有下列几组适应工作条件类同钢管内壁，它们是：

(1) 沥青系船底漆：

底层涂料：L44-1 铝粉沥青船底漆，

面漆涂料：L44-2 沥青船底漆；

(2) 环氧类漆：

底层涂料：H06-10 环氧富锌底漆或X53-3红丹乙烯防锈漆，

面层涂料：H01-4 环氧沥青清漆。

上述涂类组(1)、(2)一般均在除锈、去污后，各涂2~3层，使漆膜总厚不少于0.12cm。

钢管进口水源有寄生物时，则宜于在涂料表面再涂一层防污涂料，如沥青船底防污漆(L40-4)、氯化橡胶防污水线漆等。防污涂料宜在钢管过水前涂刷。

钢管外壁视环境条件，可采用不同的配套漆组。

(1) 通风条件好，较干燥的露天环境下：

第一组：

底漆：红丹乙烯防锈漆(X53-3)，

面漆：铝粉乙烯耐水漆(X55-1)；

第二组：



底漆：云铁酚醛防锈漆（F50-10），

面漆：浅色酚醛调和漆（一般以白色、灰白色较好）；

第三组：

底漆：油性红丹防锈漆（Y53-1，Y53-2），

面漆：浅色酚醛调和漆。

（2）通风条件较差、潮湿的或时干时湿的环境下，

第一组：

底漆：铝粉沥青船底漆（L44-1），

面漆：沥青船底漆（L44-2）；

第二组：

底漆：环氧富锌底漆（H06-10），

面漆：环氧沥青清漆（H06-4）；

第三组：

底漆：红丹乙烯防锈漆（X53-3），

面漆：环氧沥青清漆（X01-4）。

钢管的附件及管支承中的钢结构，按照它们的工作条件，选择配套漆组。维护比较困难的可选用金属喷涂<sup>①</sup>。

设计中，应根据具体条件和选用的配套漆组有关产品说明书，提出对油漆涂刷工艺的要求。

## 二、钢管基础地基保护

钢管一般设在地面上开挖出的管槽中，镇、支墩地基比管槽一般要低得多。管槽中，特别是镇、支墩地基的变形，会危及钢管安全运行。地基保护主要包括槽两侧应有稳定的边坡和处理好地表水、地下逸出的水流两部分。

钢管管槽一般是覆盖层（坡积、洪积物）和强风化基岩层。当深度不大时，按覆盖层土壤类型放坡，各种土壤的稳定边坡在水工、土工文献中刊载较多，强风化基岩边坡可采用1:0.3至1:0.75。当管槽深度较大时，宜采用挡土墙结构。边坡上应清除松动块石及危岩，易风化基岩应采用混合砂浆砌块石、条石或三合土进行局部封闭或全部护砌。

管槽两侧应设排水沟，集中到厂房附近后用自流或排流方式导至下游尾水渠。地下水逸出点一般在透水和不透水层的交界处、基岩中多层结构的裂隙处。应该对地下水逸出处进行处理，集中引至排水沟。

## 三、严寒地区钢管的运行保护

严寒地区的压力钢管，正常运行要求：

（1）防止进水口被冰块、冰屑堵塞；

（2）防止钢管通气孔、伸缩节等存在静水的部位结冻；

（3）防止钢管内因机组停机、或小负荷运行时形成冰层；

---

① 《水工钢闸门防腐蚀》，江苏水利局，水利电力出版社，1979年10月版。

(4) 钢管结构不允许因低温引起韧度指标下降。

钢管设计阶段, 根据当地温度资料, 严格控制含硫、磷等杂质较多的沸腾钢的应用, 高寒地区不能使用沸腾钢。

钢管进口处(前池进水口)要求有足够水深。渠道、前池除采用窄深形式外, 在形成冰盖后仍能取得正常发电要求的水量, 冰盖及盖下预留空隙可以起隔温作用, 避免渠道、前池过流断面再产生新的冰屑。

通气孔内的水体在正常运行期处于静水状态, 低温下容易结冻而致管道事故放空时无法补充空气。因此, 通气孔应有加热设备(如利用电阻加热)。伸缩节周围宜用保温隔热材料包裹, 国内一些小电站有用当地的草料、木屑做隔热层的实例, 新型材料中的泡沫塑料效果更好, 避免草料木屑受潮腐烂锈蚀钢材。

钢管入口前, 长引水渠中的薄层冰块, 在白天阳光照射后, 导向前池并在拦污栅前积聚, 应定时加以清除, 用设在钢管进水口上部的溢冰槽(钢管对前池正向进水), 或前池末端的正向排冰堰(钢管侧向进水), 配合电站用小负荷造成壅水、或人工拉引将冰泄向溢水道。沿引水渠设置多重拦污拦冰浮漂和溢冰槽, 也有较好的效果。

钢管过水情况下, 防止管内结冰的最小流速可用Masse和Dewulf导出的公式计算:

$$v = \frac{SK}{c\omega} \lg e \frac{1}{\lg t_0 - \lg t_1} \quad (\text{m/s}) \quad (17-1)$$

式中:

$t_0 = t_2 - t$ ,  $t_1 = t_3 - t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_2$ ——钢管上游端前池水温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_3$ ——钢管下游端尾水渠首部水温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t$ ——最低计算气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$e$ ——自然对数底数,  $e = 2.71828$ ;

$S$ ——钢管在厂房外裸露表面积,  $\text{m}^2$ ;

$c$ ——水的比热,  $c = 1000$ ,  $\text{K} \cdot \text{K}/\text{m}^3$ ;

$K$ ——管壁和四周大气间的热传导系数,  $K_{\max} = \frac{35}{1000}$ ,  $K_{\min} = \frac{10}{1000}$ ,  $\text{K} \cdot \text{K}/\text{s} \cdot \text{m}^2$ ,

$\omega$ ——钢管的平均过水面积。

除上述外, 还可以利用改变一昼夜中流量变化方式, 使过冷的水形不成冻冰条件, 或利用水失温结冰有一个散热过程的原理控制停水时间, 以解决钢管必要的放空检修需要, 可参考有关资料<sup>①</sup>。

#### 四、钢管振动及减振措施

##### (一) 钢管振动概况

钢管在运行中的振动通常不可避免, 有许可振动及不许可振动两种情况, 后者指因钢管自振频率与压力引水系统中的其它振动引起“共振”现象, 而作为均质弹性体的钢管承受一般许可振动并不引起严重后果。在共振情况下, 振动可能使钢管应力恶化, 尤其是某

① JI.B.克林格尔特等著, 水电部昆明勘测设计院译, 水电站钢管道。

些部位的焊缝或局部应力较大处产生“应力疲劳”、材料硬度指标下降。

钢管振动时，共振现象并不是在所有管段都发生，而仅仅在几个特定的管段，并且因其它的振动产生原因不同而改变位置，也有许多电站的钢管没有共振现象。国、内外已有不少文献资料对此现象作了研究，有的在实践中取得了实效，但能作为钢管设计人员在钢管未运行前就可以应用的可靠数学模型，至今还不成熟。

引起钢管振动的原因主要有以下几方面：

- (1) 钢管中水流不平顺引起的压力脉动；
- (2) 钢管制作不圆度较大，在水压作用下弹性变形引起压力波动；
- (3) 因机组转子转动所产生的与转速、水涡轮叶片数、导水叶叶片数有关的强迫振动，形成脉冲型水击现象；
- (4) 尾水管内真空涡带不稳定、尾水位波动所引起的振动；
- (5) 钢管中某些管节（岔管、弯管、锥形管节）中，因水流流线与管壁不密合引起局部涡流，导致钢管振动。

其中目前可以用数学模型近似计算的是（3）、（4）项<sup>●</sup>。

作为引起共振重要条件的是压力钢管各管段的自振频率，取决于管壁振动类型（图17-4）、管截面直径、壁厚、承受的水压力以及振动约束重要条件的支墩间距。

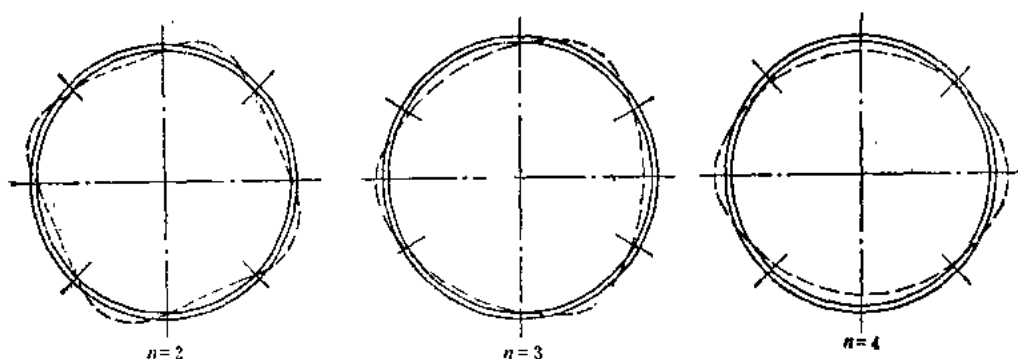


图 17-4 管壁振动类型

对钢管管段的自振频率进行计算，并且提供作为运行中解决可能发生的不许可振动的基数据，这是很必要的。许多文献指出日本的鬼头史城导出的钢管自振频率计算公式，有较好的实效。这套公式系按一跨钢管在自重和水重作用下横向（轴线的法向）自振导出，自振频率 $f_1$ 按下式求出：

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{Eg}{\gamma_s}} \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon}} \frac{1}{n\sqrt{n^2+1}} \sqrt{K^2 + \frac{n^4(n^2-1)^2}{(1-\mu^2)} \xi + (n^2+K^2)(n^2-1) \frac{\eta}{(1-\mu^2)}} \quad (17-2)$$

式中  $f_1$ ——钢管自振频率，次/s；

$R$ ——钢管平均半径，cm；

● 《水电站建筑物》，大连工学院、武汉水电学院、天津大学编，水利出版社，1982.5。

$E$ ——钢的弹模,  $E=2.058 \times 10^6 \text{ kPa}$ ;

$\mu$ ——钢的泊桑比,  $\mu = \frac{1}{3}$ ;

$g$ ——重力加速度,  $g=980 \text{ cm/s}^2$ ;

$n$ ——振动系数, 由图17-4, 结合实测振动类型定, 一般取  $n=2$ ;

$K$ ——常数,  $K = \frac{\pi R}{2l}$ ;

$l$ ——计算管段长。无刚性环时, 为两相邻支墩中心间距, 有刚性环时, 取刚性环间距,  $\text{cm}$ ;

$\eta$ ——圆周向变形,  $\eta = \frac{pR(1-\mu^2)}{E\delta}$ ;

$p$ ——振动段的平均计算水压力,  $\text{Pa}$ ;

$\delta$ ——管壁计入锈蚀裕量后的厚度,  $\text{cm}$ ;

$\xi$ ——常数,  $\xi = \frac{0.5\delta}{3R^2}$ ;

$\varepsilon$ ——系数,  $\varepsilon = \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{2R}{\delta} \alpha \frac{n^2}{n^2+1}$ ;

$\gamma_w$ ——水容重,  $\gamma_w=0.0098 \text{ N/cm}^3$ ;

$\gamma_s$ ——钢容重,  $\gamma_s=0.07693 \text{ N/cm}^3$ ;

$\alpha$ ——系数, 可取  $\alpha=1/n$ 。

当钢管振动段已经有防失稳的刚性环时, 则式(17-2)中的常数  $\varepsilon$  值应按式求出:

$$\xi = \frac{\delta_1^2}{3R^2}$$

式中  $\delta_1$ ——计入刚性环后的管壁折算厚度:

$$\delta_1 = \sqrt[3]{\delta^3 + 12\delta\Delta_1^2 + \frac{12}{l}(J'_k + A'_k\Delta_1^2)}$$

$J'_k$ ——刚性环净断面惯矩,  $\text{cm}^4$ ;

$A'_k$ ——刚性环净断面面积,  $\text{cm}^2$ ;

$\Delta_1$ ——管壁中面至刚性环计算断面形心的距离,  $\text{cm}$ ;

$\Delta_2$ ——刚性环净断面的形心至环计算断面形心的距离,  $\text{cm}$ ;

$l$ ——相邻两刚性环间距。

图17-5为上述刚性环断面特性示图。

## (二) 减振措施

现在解决钢管振动问题的途径倾向于改变钢管自振频率、避开共振的可能性, 也有通过向尾水管补气以影响真空涡带的做法, 但将导致出力下降。改变钢管自振频率的方法是: 在已有支墩间或防外压失稳用的刚性环间加设减振环。为适应运行中调整的需要, 也为了减少因焊接引起管壁的附加应力, 减振环一般采用装配结构形式(图17-6), 《水工

建筑物的破坏及其原因分析》(刘貽紂等译, 1965年版)一书中较详细地介绍了鬼头史城在这方面的论述以及减振环的设计和使用, 减振环在实践中是有效的。

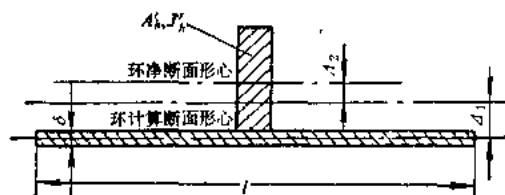


图 17-5 刚性环断面

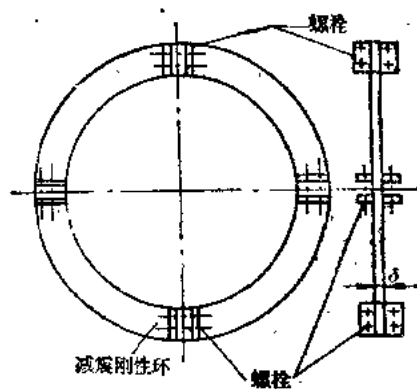


图 17-6 减振环