

文章编号: 1002-5855(2015) 01-0021-04

高压大口径球阀整体焊接阀体免焊后热处理工艺

童俊^{1,2}, 曾和友², 许世法³, 孙晓霞⁴

(1. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050; 2. 成都成高阀门有限公司, 四川 成都 611330;

3. 四川大学, 四川 成都 610065; 4. 四川省阀门行业协会, 四川 成都 611330)

摘要 介绍了整体焊接阀体的技术方案, 开展了窄间隙焊缝、非热时效的豪克能技术消除残余应力、裂纹尖端张开位移法评定免焊后热处理焊缝的材料韧性和运用应力分类理论评价大口径环向承压焊缝安全性的研究, 验证了窄间隙焊缝免焊后热处理技术的可行性。

关键词 球阀; 整体焊接阀体; 窄间隙焊缝; 豪克能技术; 裂纹尖端张开位移法; 应力分类

中图分类号: TG44

文献标志码: A

High Pressure Large Diameter Ball Valve Integrally Welded Body From Heat Treatment After Welding

TONG Jun^{1,2}, ZENG He-you², XU Shi-fa³, SUN Xiao-xia⁴

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Chengdu Chenggao Valve Co., LTD, Chengdu 611330, China;

3. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 4. Valve Industry Association of Sichuan, Chengdu 611330, China;)

Abstract: Introduces the overall welding body of technical plan, carry out the narrow gap welding, the heat ageing haoke technology can to eliminate residual stress, the crack tip opening displacement method to assess the weld heat treatment after welding material toughness and by using the theory of stress classification evaluation of large diameter circular pressure weld safety research, verified the feasibility of narrow gap welding seam from heat treatment after welding technology.

Key words: ball valve; integrally welded body; narrow welding seam; hauck technology; CTOD method; stress classification

1 概述

天然气长输管道工程干线长, 沿途地理环境和地质条件复杂, 同时要承受低温、高温及不可预测的地质沉降和地震影响, 管道系统必须能够在恶劣的地质、气候条件和内外复杂载荷作用下长期稳定、安全运行。长输管道工程用高压大口径全焊接球阀因结构简单, 全通径流道, 流阻小, 阀体采用焊接结构, 承载能力强, 能避免外漏而得到了越来越广泛的应用。本文主要研究整体式焊接阀体焊后免热处理工艺。

2 整体对接焊接阀体

高压大口径球阀 (Class900 - NPS48) 阀体由左阀体、右阀体、中阀体和颈部组焊而成 (图 1)。颈部和中阀体无交叉焊缝, 降低了焊接缺陷, 具有更好的

承载能力。整体式焊接阀体 (IWB) 焊缝内径超过 1 600mm, 属于大口径环形承压焊缝。

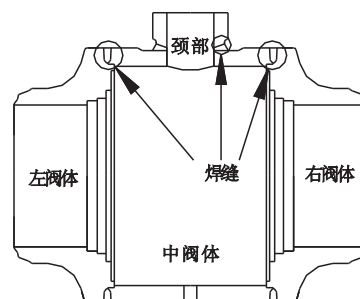


图 1 组焊阀体

焊接时先组焊中阀体和颈部及左阀体 (右阀体), 再装配阀腔内件及焊接右阀体 (左阀体)。焊接过程无法逆转, 即不能通过拆卸焊缝的方式对封

作者简介: 童俊 (1983 -), 男, 工程师, 主要从事球阀设计及分析工作。

装在阀腔内的密封件和零部件进行调整。焊接时会引起阀体温度升高,如果靠近软密封件部位温度超过 200℃,会导致密封件失效。焊接热变形容易引起阀体横向收缩,会影响阀体内部零部件的装配位置,导致阀门不能正常运行。焊接完成后不能通过焊后热处理方式消除焊接残余应力,否则会导致已经装入阀腔内的密封件和零部件失效。

分析焊接特点,选择窄间隙焊缝结构焊接阀体,坡口底层间隙 8~35mm,坡口角度 1°~7°,单层 1~3 道焊缝(图 2)。采用小电流、高焊速和多道焊的单丝自动埋弧焊技术,以线能量输入方式控制焊接温度场和焊接变形。

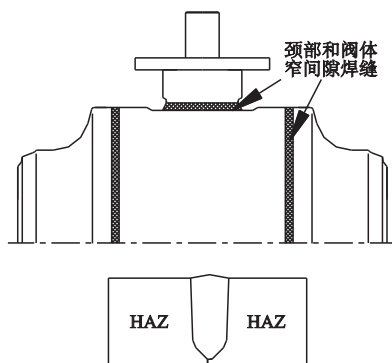


图2 窄间隙焊缝结构

3 免焊后热处理技术

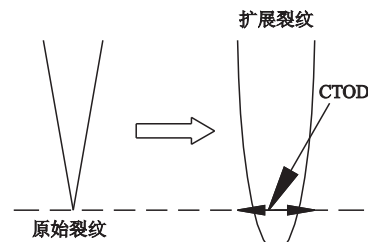
采用免焊后热处理技术(A-PWHT)设计阀体焊缝必须能承受内外载荷作用而不发生破坏,因此整体焊接阀体研制的关键在于大口径环向焊缝的焊接工艺可行性和承压焊缝安全评定。研制技术路线为窄间隙焊缝工艺制定→非热时效方式消除应力→焊缝韧性评定→焊接残余应力测定→承压焊缝安全评定→工业化试验。

整体焊接阀体最大焊缝厚度超过 130mm,根据 ASME BPVC 和 API 6D 规定,该焊缝必须进行热处理以消除焊接应力。但整体焊接阀体因内部橡胶及塑料等密封材料的限制,不能进行焊后热处理,因此必须采用非热时效的应力消除方式和有效的评定准则保证焊缝的可靠性和安全性。

3.1 焊缝缺陷评定准则

由于焊缝存在缺陷,弹性力学的连续性、均匀性和各向同性的理论已经不适用于焊缝的评定。因此采用断裂力学理论评定焊缝性能,在缺陷存在的情况下,只要材料有足够的韧性,焊缝有足够的止裂性,则仍然能保证材料在工作期间有足够的强度和

塑性而不发生破坏(图 3)。



外载作用下,裂纹尖端材料发生塑性变形,当裂纹尖端张开位移(CTOD) δ 大于临界值 δ_c 时,裂纹开始开裂,尖端裂纹安全评定准则^[5]为 $\delta \leq \delta_c$ 。

$$\text{当 } \sigma \leq \sigma_y \text{ 时 } \delta = \frac{8\sigma_y \alpha}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \right)。$$

$$\text{当 } \sigma > \sigma_y \text{ 时 } \delta = 2\pi a \varepsilon。$$

$$\text{临界张开位移 } \delta_c = \frac{8\sigma_y \alpha}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi \sigma_c}{2\sigma_y} \right)$$

$$\text{临界裂纹 } a_c = \frac{1}{2\pi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} - 0.25 \right)} \times \frac{\delta_c}{\varepsilon_y}$$

式中 a ——裂纹尺寸, mm

a_c ——临界裂纹尺寸, mm

δ ——张开位移, mm

δ_c ——临界张开位移, mm

σ ——应力, MPa

σ_y ——屈服应力, MPa

ε ——应变

ε_y ——屈服应变

E ——弹性模量, MPa

整体焊接阀体焊缝裂纹主要有张开型、滑开型和撕开型 3 种。张开型裂纹(图 4)在垂直于裂纹面力 F 作用下,裂纹尖端张开扩张,容易产生低应力断裂。采用断裂力学评估裂纹强度时,主要考虑张开型裂纹失效影响。

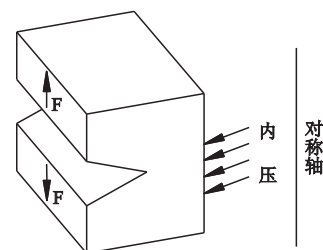


图4 焊缝张开型裂纹

整体焊接阀体焊缝区未经焊后热处理,因此存

在较大的焊接残余应力,假设焊接残余应力超过材料的屈服强度 σ_y ,则焊缝区域总应变 ε_t 为

$$\varepsilon_t = \varepsilon_w + \varepsilon_p$$

当 $\varepsilon_w = \varepsilon_y$, $\varepsilon_p = 0.63\varepsilon_y$ 时 $\varepsilon_t = 1.63\varepsilon_y$ 。设计时取 $\varepsilon_t = 2\varepsilon_y$,则最大允许裂纹临界值 a_{\max} 为

$$a_{\max} = 0.09(\delta_c / \varepsilon_y)$$

式中 ε_w ——焊接应力产生的应变

ε_p ——设计载荷产生的应变

3.2 焊缝韧性评估

采用 BS 7448-2 标准测定焊缝 CTOD 值,根据 API 1104 和 DNV-OS-C401 标准评价焊缝材质韧性。从整体焊接阀体焊缝区全厚度方向截取标准试样,厚度 B ,宽度 $W=36$,长度 $L=4W+20$ 。预制裂纹长度 $a \approx (0.04 \sim 0.05)W$ (图 5、图 6)。从检测的阀体焊缝和焊缝热影响区(HAZ)的 δ_c 值(表 1)分析,焊缝和 HAZ 的 δ_c 值大于标准规定。在不进行热处理的情况下,根据窄间隙焊接工艺设计的焊缝满足标准规定,具有足够的韧性。

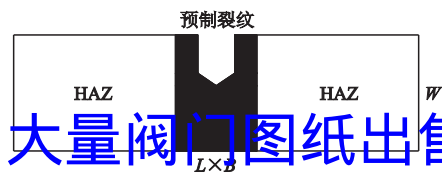


图 5 预制裂纹尺寸和测试样件加工

表 1 焊缝和 HAZ 测定值 δ_c 及判定

区域	δ_c /mm	DNV-OS-C401 合格值/mm	API 1104 合格值/mm	判定
焊缝	0.215	>0.15	>0.127	合格
HAZ	0.198			合格

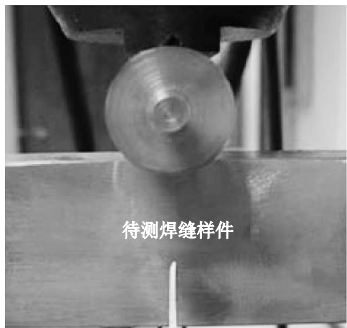


图 6 CTOD 加载测试

3.3 豪克能技术消除焊接残余应力

豪克能技术是采用频率达到 20kHz 以上具有大能量的振动设备,冲击金属物体表面,能使焊缝金属残余应力获得释放,改变焊缝的应力分布。大口径整体焊接阀体的窄间隙焊缝厚度超过 130mm,焊

接过程中由于焊缝的热胀冷缩,在轴向和环向存在较大的焊接应力。由于采用小电流、多道焊工艺,厚度方向受约束较小、热量易于释放,应力相对较小。采用豪克能应力消除设备垂直冲击环向焊缝表面,通过盲孔法测定焊接残余应力表明,豪克能技术可以消除掉 80% 以上的焊接残余应力(表 2)。

表 2 豪克能处理前后平均应力对比

区域	轴向应力 σ_x /MPa	环向应力 σ_y /MPa	应力消除率 %
焊缝	225/34.5	102.9/11.7	84~88.6
HAZ	114.3/15.4	89.4/6.9	86~92.3

4 安全评定

阀体窄间隙焊缝经过豪克能处理后,仍然存在一定量的剩余残余应力,这些应力对焊缝韧性影响较小,但是这些应力和内压共同作用下产生的应力叠加,将会导致焊缝处于复杂的三维应力状态。整体焊接阀体属于异形承压容器,工作状态下承受介质内压、主管道拉力(或压力)、自身重力、管道弯矩和温差应力等载荷(图 7)。承压焊缝受力状态复杂,无法用解析方法分析焊缝应力状态,更不能用统一的标准评价各种应力的破坏程度。

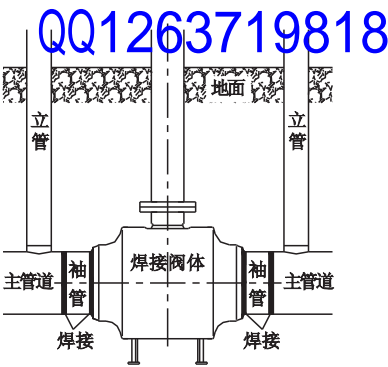


图 7 埋地安装整体式焊接球阀

4.1 评定理论

基于板壳理论,分析焊缝区域的应力组成,并根据产生的原因以及对失效的影响程度进行分类。沿焊缝截面计算合成应力,按静力等效的原理对合成应力进行当量分解,合成应力线性化处理后等效应力包括均匀分布的与合力等效的薄膜应力 P_m 和与弯矩等效的线性分布的弯曲应力 P_L (图 8)。

4.2 评判标准

焊缝材料设计强度 $S_m^I = \min(R_{el}/1.5, R_m/2.4)$, R_{el} 、 R_m 为试块的实测平均值,按 ASME BPVC 另一建造规则评定焊缝强度,其合格标准为总体薄膜应力 $P_m: S_I \leq S_m^I$,局部薄膜应力 $P_L: S_{II} \leq 1.5S_m^I$,

局部薄膜加局部弯曲应力 $P_m + P_L: S_{III} \leq 3S_m^I$ 。

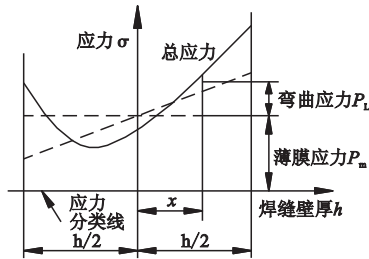


图 8 应力线性化等效原理

4.3 应力评定

残余应力是由于焊缝热变形受到周围约束而产生的拉(压)应力,基于热弹塑理论,采用 ANSYS 软件分析焊缝的温度场,通过耦合方法,计算温差应力和载荷应力的叠加,沿焊缝壁厚方向建立应力分类线,进行应力线性化等效处理(表 3)。按 ASME BPVC 建造规则评定焊缝强度,其完全合格。

表 3 焊缝厚度方向应力分量 MPa

S_m^I	$1.5S_m^I$	$3S_m^I$	S_I	S_{II}	S_{III}
184.2	276.3	552.6	123	132	188.5

5 试验

为了验证整体焊接阀体的可靠性和安全性,进行了强度试验、泄放试验、管路注脂试验、注脂密封试验、防静电试验、传动机构强度试验、扭矩试验、疲劳寿命试验、防火试验、材质化学成分检验、力学性能检验、硫化氢应力腐蚀开裂试验、氢质开裂试验、外观检测、标志检测和无损检测。

阀体必须有足够的强度和密封性能,确保在工作条件下不发生强度破坏和密封泄漏。强度和密封试验是各种试验中最关键的试验,按 API 6D 规定分别进行 1.5PN (PN—公称压力) 壳体强度试验、1.1PN 阀座密封试验、1.1PN 阀座高压气密封试验、0.6 MPa 低压气密封试验。为了确保试验的可靠

性,模拟了阀门带压工作状态并进行实时影像监测。在试验期间未发生可见泄漏,焊缝强度满足试验要求,各项性能达到工业应用考核指标要求。

6 结语

高压大口径球阀筒形整体式焊接阀体采用窄间隙焊缝焊接工艺和豪克能高频振动时效方式消除焊接残余应力的方法,使阀体焊缝具有足够的韧性和安全性,可以免除焊后热处理工艺。NPS48 - Class900 全焊接球阀已经成功应用在管道输送系统中,从工程实践上进一步证实了免焊后热处理技术的可行性。

参 考 文 献

- [1] 罗东晓,赵勤.西气东输二线工程简介[J].煤气与热力,2007,27(11):61-63.
- [2] 陶国庆,宋忠荣,张继伟,等.长输管线用全焊接球阀焊接工艺[J].阀门,2009(5):14-16.
- [3] ASME-2007,Boiler and Pressure Vessel Code[S].
- [4] API 6D-2008,Petroleum and natural gas industries-Pipeline transportation systems-Pipeline valves[S].
- [5] 王心明.工程压力容器设计与计算[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [6] BS 7448-1987,Traction mechanics toughness tests. PART2. Method for determination of C/C critical C/COD and critical J value of welds in metallic material[S].
- [7] API 1104-2008,Welding of Pipeline and related Facilities[S].
- [8] DNV-OS-C401-2010,Fabrication and testing of offshore structure[S].
- [9] Crack Tip Opening Displacement CTOD: A Fracture Mechanics Test Offered by Element Materials Technology [EB/OL]. http://www.azom.com/article.aspx.
- [10] 赵显华,傅世嘉,李钊.豪克能消除焊接应力设备的研究与应用[J].钢结构,2009,24(9):71-73.
- [11] 叶夏妮,刘福江,陆明万.应力等效线性化处理中的若干问题[J].压力容器,2011(2):54-58.

(收稿日期:2014.05.21)

(上接第 12 页)

动区域,随着开度的增加,最大速度在逐渐的减少,当开度在 60° 以上时,流动趋于平稳状态。由于在小开度下,密封副要承受高速冲刷导致寿命降低,故应使用硬度较高的材料。

(3) 阀门开度为 30° 以下时会有涡流出现,开度越小,现象越明显。当开度在 45° 和 60° 前后时,由于存在较大的扰动,压力损失严重。因此,蝶阀不宜在开度 ≤ 45° 的范围内工作。

参 考 文 献

- [1] 张玉龙.催化裂化烟机发电的探索与实践[J].企业导报,2013(18):182-184.
- [2] 吴志远.进口双偏心蝶阀的分析[J].化工设备与管道,2000,37(3):16-19.
- [3] 崔宝玲,尚照辉,石柯,等.基于 CFD 的蝶阀结构改进设计及数值分析[J].排灌机械工程学报,2013,31(6):523-527.
- [4] 董成彪.蝶阀的优化设计和流场研究[D].湖南大学,2010.
- [5] 韩占忠,王敬,兰小平.Fluent 流体工程仿真计算实例与应用[M].北京理工大学出版社,2004.

(收稿日期:2014.06.24)