

**SY**

# 中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/ T 0535—94

---

## 火筒式加热炉热力与阻力计算方法

1997-09-08 9H

1994-12-21 发布

1995-06-01 实施

---

中国石油天然气总公司 发布

## 火筒式加热炉热力与阻力计算方法

## 1 主题内容与适用范围

本标准规定了火筒式加热炉的热力与阻力计算方法, 主要内容包括燃烧计算, 热平衡计算, 传热元件(火筒、烟管、盘管)的热力与阻力计算等。

本标准适用于油气田油气集输生产中使用液体或气体燃料的火筒式直接加热炉和以水为热媒的火筒式间接加热炉。

## 2 引用标准

GB 11062 天然气发热量、密度和相对密度的计算方法

SY 5263 火筒式加热炉设计技术规定

GB 8175 设备及管道保温设计导则

SY/ T 0540 石油工业加热炉型式与基本参数

SYJ 4 油田油气集输设计规范

## 3 一般规定

**3.1** 火筒式加热炉热力与阻力计算方法的一般步骤是: 首先收集、整理及分析原始资料, 确定基本炉型结构; 其次进行燃烧计算及热平衡计算等辅助计算; 随后进行火筒、烟管、盘管的热力计算; 最后进行流体阻力计算。

火筒式间接加热炉热力与阻力计算的基本程序及主要内容见图1。火筒式直接加热炉热力与阻力计算的基本程序及主要内容仍按图1进行, 仅略去有关盘管热力计算和流体阻力计算的程序与内容。

**3.2** 火筒式加热炉的热力计算按照给定条件和计算目的的不同, 分为设计热力计算和校核热力计算两种。

设计热力计算是在火筒式加热炉设计时所使用的计算。它的目的是: 根据给定的热功率、被加热介质的种类与参数、燃料资料和选定的炉型结构、燃烧器型式等条件, 计算确定各传热元件的面积与主要结构尺寸以及燃料消耗量、空气体积、烟气体积等数据, 设计热力计算并为流体阻力计算和强度计算等提供数据。

校核热力计算是在加热炉已经存在或主要结构尺寸已经给定的情况下所使用的计算。它的目的是: 根据已有的结构尺寸和给定的热功率、被加热介质种类与参数、燃料资料等条件, 计算确定加热炉的热效率、燃料消耗量、空气体积、烟气体积、各传热元件进出口介质的温度等数据, 以校核加热炉达到所要求热功率以及被加热介质参数的可能性、经济性及可靠性。

**3.3** 火筒式加热炉热力计算是由火筒、烟管、盘管等传热元件几个环节组成, 每一环节计算结果应作误差校核, 且计算误差不得超过相应规定。

**3.4** 火筒式加热炉的流体阻力计算一般是在热力计算及结构尺寸确定后进行, 流体阻力计算中的一些数据要从热力计算和结构数据中取得。通过流体阻力计算所得的结果, 来校核加热炉设计的合理性及选择流体动力设备。如果流体阻力计算所得流体阻力过大, 呈现明显的不合理, 则需修改设计。

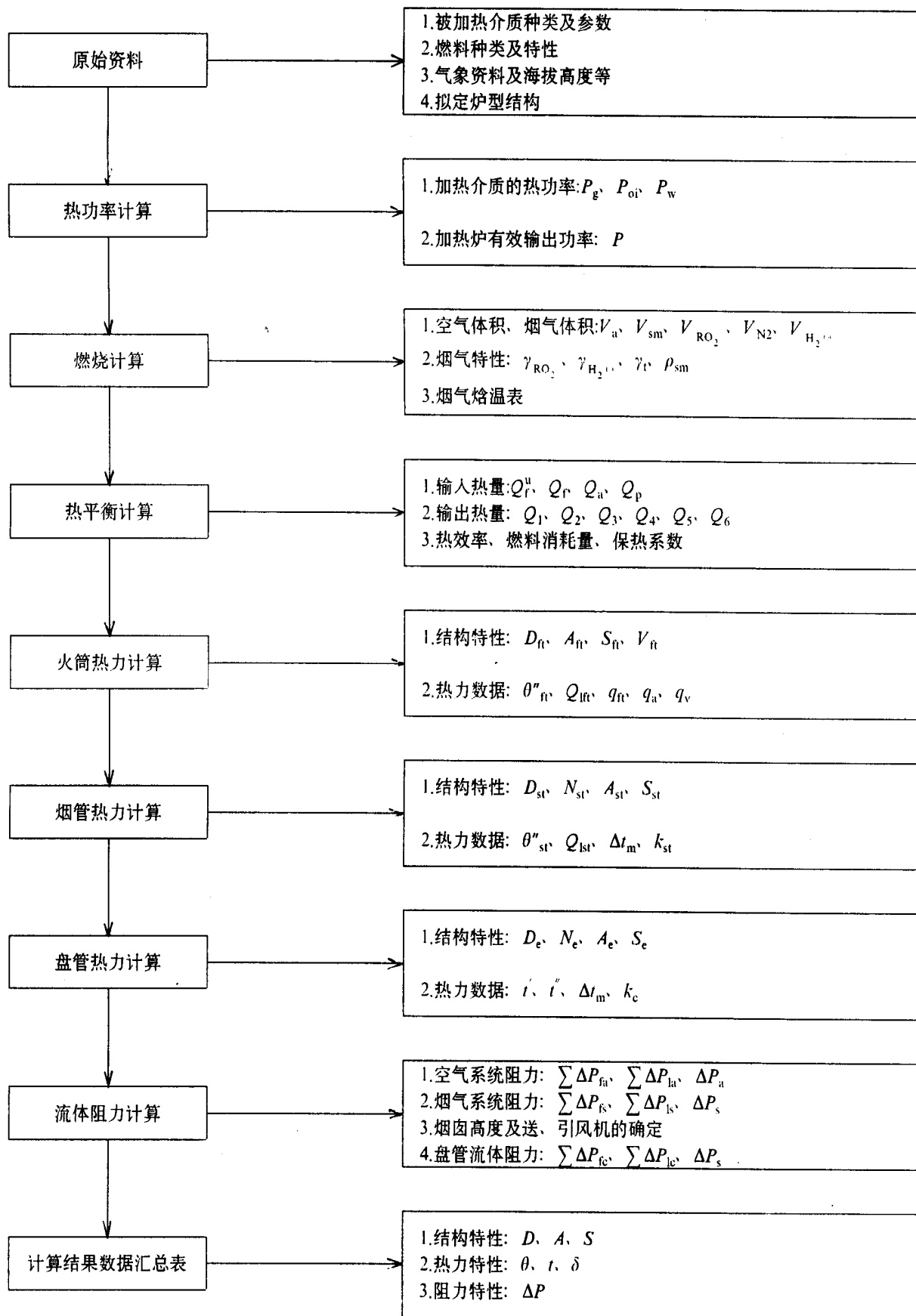


图1 计算程序方框图

注: 图中符号见以后各章符号说明。

## 4 燃烧计算

### 4.1 符号说明

$A^u$ ——燃料油应用基灰分的质量百分数, %;

$C^u$ ——燃料油应用基元素碳的质量百分数, %;

$C_m H_n$ ——燃料气干燥基碳氢化合物的体积百分数, %;

$CO$ ——燃料气干燥基一氧化碳的体积百分数, %;

$CO_2$ ——燃料气干燥基二氧化碳的体积百分数, %;

$d_a$ ——湿空气中以 1kg 干空气为基准的水蒸气含量, g/kg;

$d_{fg}^u$ ——燃料气应用基中以 1m<sup>3</sup> 干燥基为基准的水蒸气含量, g/m<sup>3</sup>;

注: 本标准中的气体体积均以 0℃ 和 101.325kPa 状态的 1m<sup>3</sup> 为单位。

$H^u$ ——燃料油应用基元素氢的质量百分数, %;

$H_a^{th}$ ——理论空气体积的焓, kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>;

$H_{sm}^{th}$ ——理论烟气体积的焓, kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>;

$H_{sm}$ ——实际烟气体积的焓, kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>;

$H_2$ ——燃料气干燥基氢气的体积百分数, %;

$H_2S$ ——燃料气干燥基硫化氢的体积百分数, %;

$h_a$ ——干空气的体积比焓, kJ/m<sup>3</sup>;

$h_{H_2O}$ ——水蒸气的体积比焓, kJ/m<sup>3</sup>;

$h_{N_2}$ ——氮气的体积比焓, kJ/m<sup>3</sup>;

$h_{RO_2}$ ——干三原子气体的体积比焓, kJ/m<sup>3</sup>;

$m$ ——碳氢化合物分子式中的碳原子数;

$m_{sm}$ ——实际烟气的质量, kg/kg; 或 kg/m<sup>3</sup>;

$N^u$ ——燃料油应用基元素氮的质量百分数, %;

$N_2$ ——燃料气干燥基氮气的体积百分数, %;

$n$ ——碳氢化合物分子式中的氢原子数;

$O^u$ ——燃料油应用基元素氧的质量百分数, %;

$O_2$ ——燃料气干燥基氧气的体积百分数, %;

$p_{H_2O}$ ——烟气中水蒸气分压力, kPa;

$p_{RO_2}$ ——烟气中干三原子气体分压力, kPa;

$p_{sm}$ ——烟气的总压力, kPa;

$p_b$ ——环境大气压力, kPa;

$p_{fg}$ ——燃料气压力, kPa;

$p_s$ ——水蒸气饱和压力, kPa;

$p_i$ ——烟气中三原子气体总分压力, kPa;

$Q_{fg}^d$ ——燃料气干燥基低位发热量, kJ/m<sup>3</sup>;

$Q_{fg}^u$ ——燃料气应用基低位发热量, kJ/m<sup>3</sup>;

$Q_{fm}^u$ ——油气混合燃料应用基低位发热量, kJ/kg;

$Q_{fo}^u$ ——燃料油应用基低位发热量, kJ/kg;

$Q_{C_m H_n}$ ——燃料气中碳氢化合物低位发热量, kJ/m<sup>3</sup>;

- $Q_{\text{CO}}$ ——燃料气中一氧化碳低位发热量,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;  
 $Q_{\text{H}_2}$ ——燃料气中氢气低位发热量,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;  
 $Q_{\text{H}_2\text{S}}$ ——燃料气中硫化氢低位发热量,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;  
 $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ ——烟气中水蒸气体积份额;  
 $\gamma_{\text{RO}_2}$ ——烟气中干三原子气体体积份额;  
 $\gamma_{\text{t}}$ ——烟气中三原子气体总体积份额;  
 $S^{\text{u}}$ ——燃料油应用基元素硫的质量百分数, %;  
 $V_{\text{a}}^{\text{th}}$ ——理论空气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$  或  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $V_{\text{a}}$ ——实际空气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$  或  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{th}}$ ——理论水蒸气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$  或  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $V_{\text{H}_2\text{O}}$ ——实际水蒸气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$  或  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $V_{\text{N}_2}^{\text{th}}$ ——理论氮气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$  或  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $V_{\text{RO}_2}$ ——干三原子气体体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$  或  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $V_{\text{sm}}^{\text{th}}$ ——理论烟气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$  或  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $V_{\text{sm}}$ ——实际烟气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$  或  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $W^{\text{u}}$ ——燃料油应用基水分的质量百分数, %;  
 $x$ ——油气混合燃料中相对 1kg 燃料油所附加的燃料气体积数,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  
 $\alpha$ ——过剩空气系数;  
 $\rho_{\text{fg}}^{\text{d}}$ ——燃料气干燥基密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $\rho_{\text{fg}}^{\text{u}}$ ——燃料气应用基密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $\rho_{\text{sm}}$ ——烟气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $\varphi_{\text{a}}$ ——空气相对湿度, %。

## 4.2 一般规定

4.2.1 火筒式加热炉的燃料一般为原油、天然气或油气混合燃料, 在燃烧计算时的空气体积、烟气体积以及焓等, 分别按下列单位燃料基准进行:

- 燃油时, 以 1kg 应用基燃料油为基准;
- 燃气时, 以  $1\text{m}^3$  干燥基燃料气为基准;
- 燃油气混合燃料时, 以 1kg 应用基燃料油及其所附加干燥基燃料气量为基准。

4.2.2 在燃烧计算中, 干空气认为仅由 21% 氧气和 79% 氮气的体积比所组成。湿空气的水蒸气含量以 1kg 干空气为基准, 且水蒸气在  $0^\circ\text{C}$  和 101.325kPa 状态下的密度为  $804\text{g}/\text{m}^3$ 。

4.2.3 燃料气的成分略去灰含量不计, 水蒸气含量按  $1\text{m}^3$  干燥基燃料气为基准。

4.2.4 燃料的燃烧反应是按完全燃烧工况条件下进行。燃烧计算中的燃料气、空气及烟气 (包括水蒸气) 均按理想气体考虑, 在  $0^\circ\text{C}$  和 101.325kPa 状态时的  $1\text{kmol}$  气体的体积为  $22.41\text{m}^3$ 。

4.2.5 空气和烟气及其各组分的焓按  $0^\circ\text{C}$  和 101.325kPa 状态下  $1\text{m}^3$  体积计量, 焓值以  $0^\circ\text{C}$  为起算点。

4.2.6 燃料油的成分按元素分析的质量百分数提供。燃料气的组分按燃料气干燥基各组分的体积百分数提供, 且至少有 98% 的组分是以单组分给出的, 对于含量不超过 2% 已烷以上重烷不明组分, 可用已烷计算。

## 4.3 燃料发热量

4.3.1 燃料油的发热量应以测热器实测的数值为准, 当缺乏实测数值时, 燃料油应用基低位发热量

可以根据元素分析成分按下式计算:

$$Q_{f_0}^u = 339C^u + 1030H^u + 109(S^u - O^u) - 25W^u \quad \dots\dots\dots(1)$$

4.3.2 燃料气的发热量可以根据燃料气的组分按下式计算:

a. 燃料气干燥基低位发热量:

$$Q_{fg}^d = 0.01[Q_{H_2} \cdot H_2 + Q_{CO} \cdot CO + Q_{H_2S} \cdot H_2S + \sum(Q_{C_mH_n} \cdot C_mH_n)] \quad \dots\dots\dots(2)$$

燃料气可燃组分在 0℃ 和 101.325kPa 状态下的低位发热量应按 GB 11062 中的规定值查得。

b. 燃料气应用基低位发热量按下式计算:

$$Q_{fg}^u = Q_{fg}^d \frac{804}{804 + d_{fg}^u} \quad \dots\dots\dots(3)$$

4.3.3 燃料气的水蒸气含量一般按燃烧器进口处相应燃料气压力和温度下的饱和水蒸气含量计算:

$$d_{fg}^u = 804 \frac{p_s}{p_{fg} - p_s} \quad \dots\dots\dots(4)$$

水蒸气的饱和压力按水蒸气温度 (即燃料气温度) 从饱和水蒸气性质表中查得。

#### 4.4 燃烧空气体积

4.4.1 燃料燃烧所需的理论空气体积按下列公式计算:

a. 燃料油:

$$V_a^{th} = 0.0889(C^u + 0.375S^u) + 0.265H^u - 0.0333O^u \quad \dots\dots\dots(5)$$

b. 燃料气:

$$V_a^{th} = 0.0476[0.5H_2 + 0.5CO + 1.5H_2S + \sum(m + n/4)C_mH_n - O_2] \quad \dots\dots\dots(6)$$

4.4.2 燃料燃烧所需的实际空气体积按下式计算:

$$V_a = \alpha V_a^{th} \quad \dots\dots\dots(7)$$

过剩空气系数一般根据通风方式和燃烧器型式按 SY 5263 中的规定选取。

#### 4.5 燃烧烟气体积

4.5.1 燃料油燃烧生成的烟气体积按下列公式计算:

a. 干三原子气体体积:

$$V_{RO_2} = 0.01866(C^u + 0.375S^u) \quad \dots\dots\dots(8)$$

b. 理论氮气体积:

$$V_{N_2}^{th} = 0.79V_a^{th} + 0.008N^u \quad \dots\dots\dots(9)$$

c. 理论水蒸气体积:

$$V_{H_2O}^{th} = 0.111H^u + 0.0124W^u + 0.00161d_a V_a^{th} \quad \dots\dots\dots(10)$$

d. 理论烟气体积:

$$V_{sm}^{th} = V_{RO_2} + V_{N_2}^{th} + V_{H_2O}^{th} \quad \dots\dots\dots(11)$$

e. 实际烟气体积:

$$V_{sm} = V_{sm}^{th} + (1 + 0.00161d_a)(\alpha - 1)V_a^{th} \quad \dots\dots\dots(12)$$

f. 实际水蒸气体积:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^{th} + 0.00161d_a(\alpha - 1)V_a^{th} \quad \dots\dots\dots(13)$$

#### 4.5.2 燃料气燃烧生成的烟气体积按下列公式计算:

a. 干三原子气体体积:

$$V_{RO_2} = 0.01(CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_mH_n) \quad \dots\dots\dots(14)$$

b. 理论氮气体积:

$$V_{N_2}^{th} = 0.79V_a^{th} + 0.01N_2 \quad \dots\dots\dots(15)$$

c. 理论水蒸气体积:

$$V_{H_2O}^{th} = 0.01(H_2 + H_2S + 0.5\sum nC_mH_n + 0.124d_{fg}^u) + 0.00161d_aV_a^{th} \quad \dots\dots\dots(16)$$

d. 理论烟气体积、实际烟气体积及实际水蒸气体积按 4.5.1 条的相应公式计算。

#### 4.5.3 空气的水蒸气含量根据相对湿度及大气压力按下式计算:

$$d_a = 622 \frac{\varphi_a p_s}{100p_b - \varphi_a p_s} \quad \dots\dots\dots(17)$$

在设计时, 大气压力、空气的相对湿度及水蒸气饱和压力均按所处环境的年平均值确定。

### 4.6 烟气特性

#### 4.6.1 烟气中三原子气体的体积份额和分压力按下列公式计算:

a. 干三原子气体的体积份额:

$$\gamma_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_{sm}} \quad \dots\dots\dots(18)$$

b. 干三原子气体的分压力:

$$p_{RO_2} = p_{sm} \cdot \gamma_{RO_2} \quad \dots\dots\dots(19)$$

c. 水蒸气的体积份额:

$$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{sm}}} \dots\dots\dots(20)$$

d. 水蒸气的分压力:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{sm}} \cdot \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \dots\dots\dots(21)$$

e. 三原子气体的总体积份额:

$$\gamma_{\text{t}} = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} + \gamma_{\text{RO}_2} \dots\dots\dots(22)$$

f. 三原子气体的总分压力:

$$p_{\text{t}} = p_{\text{sm}} \cdot \gamma_{\text{t}} \dots\dots\dots(23)$$

4.6.2 烟气的质量和密度按下列公式计算:

a. 燃料油的烟气质量:

$$m_{\text{sm}} = 1 - 0.01A^{\text{u}} + 1.293(1 + 0.001d_{\text{a}})\alpha V_{\text{a}}^{\text{th}} \dots\dots\dots(24)$$

b. 燃料气的烟气质量:

$$m_{\text{sm}} = \rho_{\text{fg}}^{\text{u}} + 0.001d_{\text{fg}}^{\text{u}} + 1.293(1 + 0.001d_{\text{a}})\alpha V_{\text{a}}^{\text{th}} \dots\dots\dots(25)$$

c. 燃料气干燥基密度:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{fg}}^{\text{d}} = & 0.01[0.0899H_2 + 1.2498N_2 + 1.4276O_2 + 1.2497CO + 1.9635CO_2 + 1.5203H_2S \\ & + \sum(0.536m + 0.045n)C_mH_n] \dots\dots\dots(26) \end{aligned}$$

d. 燃料气应用基密度:

$$\rho_{\text{fg}}^{\text{u}} = (\rho_{\text{fg}}^{\text{d}} + d_{\text{fg}}^{\text{u}}) \frac{804}{804 + d_{\text{fg}}^{\text{u}}} \dots\dots\dots(27)$$

e. 烟气密度:

$$\rho_{\text{sm}} = \frac{m_{\text{sm}}}{V_{\text{sm}}} \dots\dots\dots(28)$$

## 4.7 烟气焓

4.7.1 理论空气焓:

$$H_{\text{a}}^{\text{th}} = h_{\text{a}} \cdot V_{\text{a}}^{\text{th}} \dots\dots\dots(29)$$

4.7.2 理论烟气焓:

$$H_{\text{sm}}^{\text{th}} = h_{\text{RO}_2} \cdot V_{\text{RO}_2} + h_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2}^{\text{th}} + h_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{th}} \dots\dots\dots(30)$$



## 4.7.3 实际烟气焓:

$$H_{sm} = H_{sm}^{th} + (\alpha - 1)H_a^{th} \quad \dots\dots\dots(31)$$

空气、氮气、干三原子气体和水蒸气的体积焓均按表 1 查得。

4.7.4 根据不同的温度及过剩空气系数编制表 2 格式的焓温表, 以供加热炉热力计算之用。

## 4.8 油气混合燃料的燃烧计算

燃料油和燃料气组成的混合燃料的燃烧计算, 先按 1kg 应用基燃料油和 1m<sup>3</sup> 干燥基燃料气分别计算; 再以 1kg 应用基燃料油为计算基准将其所附加的燃料气体积数相加。

例如, 油气混合燃料应用基低位发热量按下式计算:

$$Q_{fm}^u = Q_{fo}^u + xQ_{fg}^u \quad \dots\dots\dots(32)$$

其他以此类推。

表 1 烟气成分的体积焓

kJ/m<sup>3</sup>

$\theta, ^\circ\text{C}$	$h_{\text{RO}_2}$	$h_{\text{N}_2}$	$h_{\text{H}_2\text{O}}$	$h_a$
100	170.0	129.8	150.7	132.3
200	357.6	260.0	304.4	266.3
300	558.9	391.9	462.6	402.8
400	772.0	526.7	626.3	541.8
500	996.5	664.0	791.6	684.1
600	1222.5	803.9	967.1	829.8
700	1461.2	946.2	1147.2	979.7
800	1704.0	1092.7	1335.6	1130.4
900	1951.0	1243.5	1524.0	1281.2
1000	2202.3	1394.2	1725.0	1436.1
1100	2457.6	1544.9	1925.9	1595.2
1200	2717.2	1695.6	2131.1	1754.3
1300	2976.8	1850.6	2344.6	1913.4
1400	3240.6	2009.7	2558.1	2076.6
1500	3504.3	2164.6	2780.0	2239.9
1600	3768.1	2323.7	3001.9	2403.2
1700	4036.1	2482.8	3228.0	2566.5
1800	4304.0	2641.9	3458.3	2729.8
1900	4572.0	2805.1	3688.6	2897.3
2000	4844.1	2964.2	3927.2	3064.7
2100	5116.3	3127.5	4161.7	3232.2
2200	5388.4	3290.8	4400.3	3402

表 2 烟气焓温表 (以燃料油为例)

$\theta$ °C	$V_{\text{RO}_2} = \text{m}^3 / \text{kg}$		$V_{\text{N}_2}^{\text{th}} = \text{m}^3 / \text{kg}$		$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{th}} = \text{m}^3 / \text{kg}$		$H^{\text{th}}$	$V_a^{\text{th}} = \text{m}^3 / \text{kg}$		$H = H^{\text{th}} - (x-1)H_a^{\text{th}}$	
	$h_{\text{RO}_2}$	$h_{\text{RO}_2} \cdot V_{\text{RO}_2}$	$h_{\text{N}_2}$	$h_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2}$	$h_{\text{H}_2\text{O}}$	$h_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{th}}$		$h_a$	$h_a \cdot V_a^{\text{th}}$	$H$	$x = \frac{\Delta H}{\Delta I}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
100	170.0		129.8		150.7			132.3			
200	357.6		260.0		304.4			266.3			
300	558.9		391.9		462.6			402.8			
400	772.0		526.7		626.3			541.8			
500	996.5		664.0		794.6			684.1			
600	1222.5		803.9		967.1			829.8			
700	1461.2		946.2		1147.2			979.7			
800	1704.0		1092.7		1335.6			1130.4			
900	1951.0		1243.5		1524.0			1281.2			
1000	2202.3		1394.2		1725.0			1436.1			
1100	2457.6		1544.9		1925.9			1595.2			
1200	2717.2		1695.6		2131.1			1754.3			
1300	2976.8		1850.6		2344.6			1913.4			
1400	3240.6		2009.7		2558.1			2076.6			
1500	3504.3		2164.6		2780.0			2239.9			
1600	3768.1		2323.7		3001.9			2403.2			
1700	4036.1		2482.8		3228.0			2566.5			
1800	4304.0		2641.9		3458.3			2729.8			
1900	4572.0		2805.1		3688.6			2897.3			
2000	4844.1		2964.2		3927.2			3064.7			

## 5 热平衡计算

### 5.1 符号说明

- $B$ ——实际燃料消耗量,  $\text{kg/s}$  或  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $B_c$ ——计算燃料消耗量,  $\text{kg/s}$  或  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $C'_{\text{foi}}$ ——燃料油输入体系的质量比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $C'_{\text{oi}}$ ——被加热原油输入体系时的质量比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $C''_{\text{oi}}$ ——被加热原油输出体系的质量比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $C'_{\text{fg}}$ ——燃料气输入体系时的定压体积比热容,  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $C'_g$ ——被加热天然气输入体系时的定压体积比热容,  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $C''_g$ ——被加热天然气输出体系时的定压体积比热容,  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $C'_w$ ——被加热水输入体系时的质量比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $C''_w$ ——被加热水输出体系时的质量比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $H''_{\text{sm}}$ ——烟气输出体系时的焓,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $h'_a$ ——空气输入体系时的定压体积焓,  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $P$ ——加热炉有效输出热功率,  $\text{kW}$ ;  
 $P_g$ ——加热天然气的热功率,  $\text{kW}$ ;  
 $P_{\text{oi}}$ ——加热原油的热功率,  $\text{kW}$ ;  
 $P_w$ ——加热水的热功率,  $\text{kW}$ ;  
 $p_{\text{bu}}$ ——转杯式燃烧器的风压,  $\text{kPa}$ ;  
 $p_{\text{id}}$ ——送风机的风压,  $\text{kPa}$ ;  
 $p_{\text{op}}$ ——燃料油泵的油压,  $\text{kPa}$ ;  
 $p_{\text{d}}$ ——引风机的风压,  $\text{kPa}$ ;  
 $Q_1$ ——有效利用热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_2$ ——排烟热损失,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_3$ ——可燃气体未完全燃烧热损失,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_4$ ——可燃固体未完全燃烧热损失,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_5$ ——表面散热损失,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_6$ ——辅机损失的能量所转换的热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_a$ ——空气输入体系的显热,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_i$ ——体系的输入热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_f^u$ ——燃料应用基低位发热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_f$ ——燃料输入体系的显热,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_{\text{fg}}$ ——燃料气输入体系的显热,  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_{\text{foi}}$ ——燃料油输入体系的显热  $\text{kJ/kg}$ ;  
 $Q_{\text{fm}}$ ——油气混合燃料输入体系的显热,  $\text{kJ/kg}$ ;  
 $Q_p$ ——辅机输入体系的能量所转换的热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_{\text{pbu}}$ ——转杯式燃烧器输入体系的能量所转换的热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_{\text{pid}}$ ——送风机输入体系的能量所转换的热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_{\text{pop}}$ ——燃料油泵输入体系的能量所转换的热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $Q_{\text{pid}}$ ——引风机输入体系的能量所转换的热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;  
 $q_1$ ——热量有效利用率, %;  
 $q_2$ ——排烟热损失率, %;

$q_3$ ——可燃气未完全燃烧热损失率, %;  
 $q_4$ ——可燃固体未完全燃烧热损失率, %;  
 $q_5$ ——散热损失率, %;  
 $q_6$ ——辅机损失的能量所转换的热量损失率, %;  
 $q_{pbu}$ ——转杯式燃烧器损失的能量所转换的热量损失率, %;  
 $q_{pfd}$ ——送风机损失的能量所转换的热量损失率, %;  
 $q_{pop}$ ——燃料油泵损失的能量所转换的热量损失率, %;  
 $q_{pid}$ ——引风机损失的能量所转换的热量损失率, %;  
 $q_{moi}$ ——被加热原油的质量流量, kg/s;  
 $q_{mw}$ ——被加热水的质量流量, kg/s;  
 $q_{vg}$ ——被加热天然气的体积流量, m<sup>3</sup>/s;  
 $t'_{fg}$ ——燃料气输入体系时的温度, °C;  
 $t'_{fo}$ ——燃料油输入体系时的温度, °C;  
 $t'_g$ ——被加热天然气输入体系时的温度, °C;  
 $t''_g$ ——被加热天然气输出体系时的温度, °C;  
 $t'_{oi}$ ——被加热原油输入体系时的温度, °C;  
 $t''_{oi}$ ——被加热原油输出体系时的温度, °C;  
 $t'_w$ ——被加热水输入体系时的温度, °C;  
 $t''_w$ ——被加热水输出体系时的温度, °C;  
 $\eta$ ——加热炉体系热效率, %;  
 $\eta_a$ ——送风机或引风机的全压效率, %;  
 $\eta_{bu}$ ——转杯式燃烧器的效率, %;  
 $\eta_e$ ——电动机的效率, %;  
 $\eta_{op}$ ——燃料油泵的效率, %;  
 $\eta_m$ ——机械效率, %;  
 $\varepsilon$ ——转杯式燃烧器的空气体积占燃烧空气体积的份额;  
 $\varphi$ ——保热系数;  
 $\rho_{fo}$ ——燃料油的密度, kg/m<sup>3</sup>;  
 $\theta$ ——烟气温度, °C。

其余符号同前章。

## 5.2 热平衡

**5.2.1** 火筒式加热炉的热平衡是指加热炉体系的输入热量与输出热量之间在数量上的平衡。热平衡的目的在于表明输入加热炉体系热量的利用情况, 并计算出加热炉体系的热效率和燃料消耗量。

**5.2.2** 火筒式加热炉的热平衡是在稳定的热力状态下, 以 1kg 燃料油或 1m<sup>3</sup> 燃料气为基准进行。热平衡计算基准规定如下:

- a. 温度基准为 0°C;
- b. 燃料发热量基准为应用基低位发热量。

**5.2.3** 加热炉体系由加热炉本体和辅机所组成。热平衡图如图 2 所示。

**5.2.4** 热平衡方程式如下:

$$Q_r^u + Q_r + Q_a + Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad \cdots \cdots (33)$$

$$\text{或} \quad 100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad \cdots \cdots (34)$$

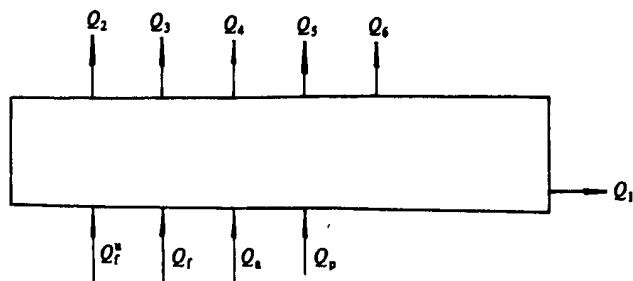


图2 火筒式加热炉体系热平衡图

### 5.3 输入热量

5.3.1 体系的输入热量按下式计算:

$$Q_i = Q_r^u + Q_r + Q_a + Q_p \quad \dots\dots\dots(35)$$

5.3.2 燃料的低位发热量应根据加热炉所用燃料的种类按 4.3 和 4.8 条分别给以确定。

5.3.3 燃料输入体系的显热应根据加热炉所用燃料的种类分别按下列各式计算:

a. 燃料油:

$$Q_{fo} = C'_{fo} t'_{fo} \quad \dots\dots\dots(36)$$

b. 燃料气:

$$Q_{fg} = C'_{fg} t'_{fg} \quad \dots\dots\dots(37)$$

c. 油气混合燃料:

$$Q_{fm} = Q_{fo} + xQ_{fg} \quad \dots\dots\dots(38)$$

当无外界热源预热时, 燃料油温度取进入加热炉体系时的温度; 当有外界热源预热时, 燃料油温度取预热器出口油温。

5.3.4 空气输入体系的显热按下式计算:

$$Q_a = h'_a V_a \quad \dots\dots\dots(39)$$

空气的体积焓按表 1 查得。

当空气利用外界热源进行预热时, 空气进入加热炉体系的温度取预热器出口温度; 当空气无外界热源预热时, 空气进入加热炉体系的温度取送风机或燃烧器进风口的环境温度。

5.3.5 辅机输入体系的能量所转换的热量包括下列各项中的一项或几项, 分别按下列各式计算:

a. 送风机:

$$Q_{\text{pfd}} = \frac{V_{\text{a}} p_{\text{fd}}}{\eta_{\text{a}} \cdot \eta_{\text{m}} \cdot \eta_{\text{e}}} \times 10^6 \quad \dots\dots\dots(40)$$

b. 引风机:

$$Q_{\text{pid}} = \frac{V_{\text{sm}} \cdot p_{\text{sm}}}{\eta_{\text{a}} \cdot \eta_{\text{m}} \cdot \eta_{\text{e}}} \times 10^6 \quad \dots\dots\dots(41)$$

引风机的风量应根据加热炉所用燃料的种类分别计算出实际烟气量, 风压可预先给定。

风机的全压效率、机械效率以及电动机效率按其产品样本数据选取。

c. 燃料油泵:

$$Q_{\text{pop}} = \frac{p_{\text{op}}}{\rho_{\text{foi}} \cdot \eta_{\text{op}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(42)$$

d. 转杯式燃烧器:

$$Q_{\text{pbu}} = \frac{\varepsilon V_{\text{a}} \cdot p_{\text{bu}}}{\eta_{\text{bu}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(43)$$

转杯式燃烧器的效率在 30%~50% 范围内选取。当采用部分风量类型的燃烧器时, 取  $\varepsilon=0.20\sim 0.40$ ; 当采用全部风量类型的燃烧器时, 取  $\varepsilon=1.10$ 。

## 5.4 热损失率

5.4.1 排烟热损失率按下式计算:

$$q_2 = \frac{H''_{\text{sm}}}{Q_{\text{i}}} (100 - q_4) \quad \dots\dots\dots(44)$$

烟气焓根据排烟温度由焓温表查得。

5.4.2 可燃气体未完全燃烧热损失率与可燃固体未完全燃烧热损失率按表 3 选取。

表 3 未完全燃烧热损失率

%

通风方式	自然通风		强制通风	
燃料种类	燃料油	燃料气	燃料油	燃料气
$q_3$	0.5~1.0	1.0~2.0	0.3	0.5~1.0
$q_4$	0~0.3	0	0	0

5.4.3 散热损失率

当加热炉设计进行热平衡计算时, 散热损失可根据经验数据确定。一般根据加热炉热功率的大小及保温防护结构情况按 0.5%~1.5% 范围选取。热功率较大及保温良好者取较小值, 反之取较大值。

在加热炉的保温防护结构设计时, 应按 GB 8175 中有关规定进行, 并对所选取的表面散热损失率进行校核。

5.4.4 辅机的能量所转换的热损失率包括下列各项中的一项或几项, 按下列公式计算:

a. 送风机:

$$q_{\text{pfd}} = \frac{Q_{\text{pfd}}(1 - \eta_a \eta_m \eta_e \times 10^{-6})}{Q_i} \times 100 \quad \dots\dots\dots(45)$$

b. 引风机:

$$q_{\text{pid}} = \frac{Q_{\text{pid}}(1 - \eta_a \eta_m \eta_e \times 10^{-6})}{Q_i} \times 100 \quad \dots\dots\dots(46)$$

c. 燃料油泵:

$$q_{\text{pop}} = \frac{Q_{\text{pop}}(100 - \eta_{\text{op}})}{Q_i} \times 100 \quad \dots\dots\dots(47)$$

d. 转杯式燃烧器:

$$q_{\text{pbu}} = \frac{Q_{\text{pbu}}(100 - \eta_{\text{bu}})}{Q_i} \times 100 \quad \dots\dots\dots(48)$$

## 5.5 热效率和燃料消耗量

5.5.1 火筒式加热炉的热效率按下列公式计算:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad \dots\dots\dots(49)$$

5.5.2 火筒式加热炉的热功率包括下列各项中的一项或几项, 按下列公式计算:

a. 加热原油时:

$$P_{\text{oi}} = q_{\text{moi}}(C''_{\text{oi}} t''_{\text{oi}} - C'_{\text{oi}} t'_{\text{oi}}) \quad \dots\dots\dots(50)$$

b. 加热天然气时:

$$P_{\text{g}} = q_{\text{vg}}(C''_{\text{pg}} t''_{\text{g}} - C'_{\text{pg}} t'_{\text{g}}) \quad \dots\dots\dots(51)$$

c. 加热水时:

$$P_{\text{w}} = q_{\text{mw}}(C''_{\text{w}} t''_{\text{w}} - C'_{\text{w}} t'_{\text{w}}) \quad \dots\dots\dots(52)$$

d. 加热炉的热功率:

$$P = P_{\text{oi}} + P_{\text{g}} + P_{\text{w}} \quad \dots\dots\dots(53)$$

根据计算所得的热功率进行修约, 确定热功率, 使之符合 SY / T 0540 中规定的系列。

5.5.3 燃料消耗量按下列各式计算:

a. 实际燃料消耗量:

$$B = \frac{P}{Q_i \eta} \times 100 \quad \dots\dots\dots(54)$$

b. 计算燃料消耗量:

$$B_c = 0.01B(100 - q_4) \quad \dots\dots\dots(55)$$

## 5.5.4 有效利用热量按下式计算:

$$Q_1 = \frac{P}{B} \dots\dots\dots(56)$$

## 5.5.5 保热系数按下式计算:

$$\varphi = 1 - \frac{q_s}{\eta + q_s} \dots\dots\dots(57)$$

## 6 火筒热力计算

## 6.1 符号说明

- $A_{ft}$ ——火筒受热面面积,  $m^2$ ;  
 $C$ ——火筒辐射系数,  $kW/(m^2 \cdot K^4)$ ;  
 $D_{ift}$ ——火筒内直径,  $m$ ;  
 $H''_{ft}$ ——火筒出口烟气焓,  $kJ/kg$  或  $kJ/m^3$ ;  
 $L_{ft}$ ——火筒轴线计算长度,  $m$ ;  
 $Q_{ift}$ ——火筒的输入热量,  $kJ/kg$  或  $kJ/m^3$ ;  
 $Q_{bft}$ ——按热平衡方程计算的烟气放热量,  $kJ/kg$  或  $kJ/m^3$ ;  
 $Q_{ift}$ ——按辐射换热方程计算的火筒传热量,  $kJ/kg$  或  $kJ/m^3$ ;  
 $Q_{lft}$ ——火筒有效输出热量,  $kJ/kg$  或  $kJ/m^3$ ;  
 $q_s$ ——火筒截面热流密度,  $kW/m^2$ ;  
 $q_{ft}$ ——火筒受热面热流密度,  $kW/m^2$ ;  
 $q_v$ ——火筒容积热流密度,  $kW/m^3$ ;  
 $S_{ft}$ ——火筒截面面积,  $m^2$ ;  
 $v_{wft}$ ——火筒烟气侧的壁面温度,  $K$ ;  
 $V_{ft}$ ——火筒容积,  $m^3$ ;  
 $\Phi_{ft}$ ——火筒热流量,  $kW$ ;  
 $T''_{ft}$ ——火筒出口烟气温度,  $K$ ;  
 $T_{wft}$ ——火筒壁面温度,  $K$ 。  
 其余符号同以前各章。

## 6.2 结构特性计算

## 6.2.1 火筒容积按燃烧器喷口至火筒出口截面之间的几何容积计算:

$$V_{ft} = \frac{\pi}{4} D_{ift}^2 L_{ft} \dots\dots\dots(58)$$

几种常用火筒结构形式的容积计算周界如图 3 所示。其中结构形式 (a) 的火筒容积按式 (58) 计算时, 需要再加上火筒封头的容积。

## 6.2.2 火筒受热面积按火筒容积周界的金属壁面面积计算:

$$A_{ft} = \pi D_{ift} L_{ft} \dots\dots\dots(59)$$

图 3 中结构形式 (a) 需要加上火筒封头内表面面积, 并减去烟管出口的面积。结构形式 (b) 的烟管管板面积不计入火筒受热面面积。

## 6.2.3 火筒截面面积按下式计算:



$$S_{\text{ft}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{ft}}^2 \quad \dots\dots\dots(60)$$

### 6.3 热力计算

6.3.1 相应于 1kg 计算燃料油消耗量或 1m<sup>3</sup> 计算燃料气消耗量输入火筒的热量按下式计算:

$$Q_{\text{ift}} = Q_{\text{f}} \frac{100 - q_3 - q_4}{100 - q_4} + Q_{\text{a}} + Q_{\text{r}} \quad \dots\dots\dots(61)$$

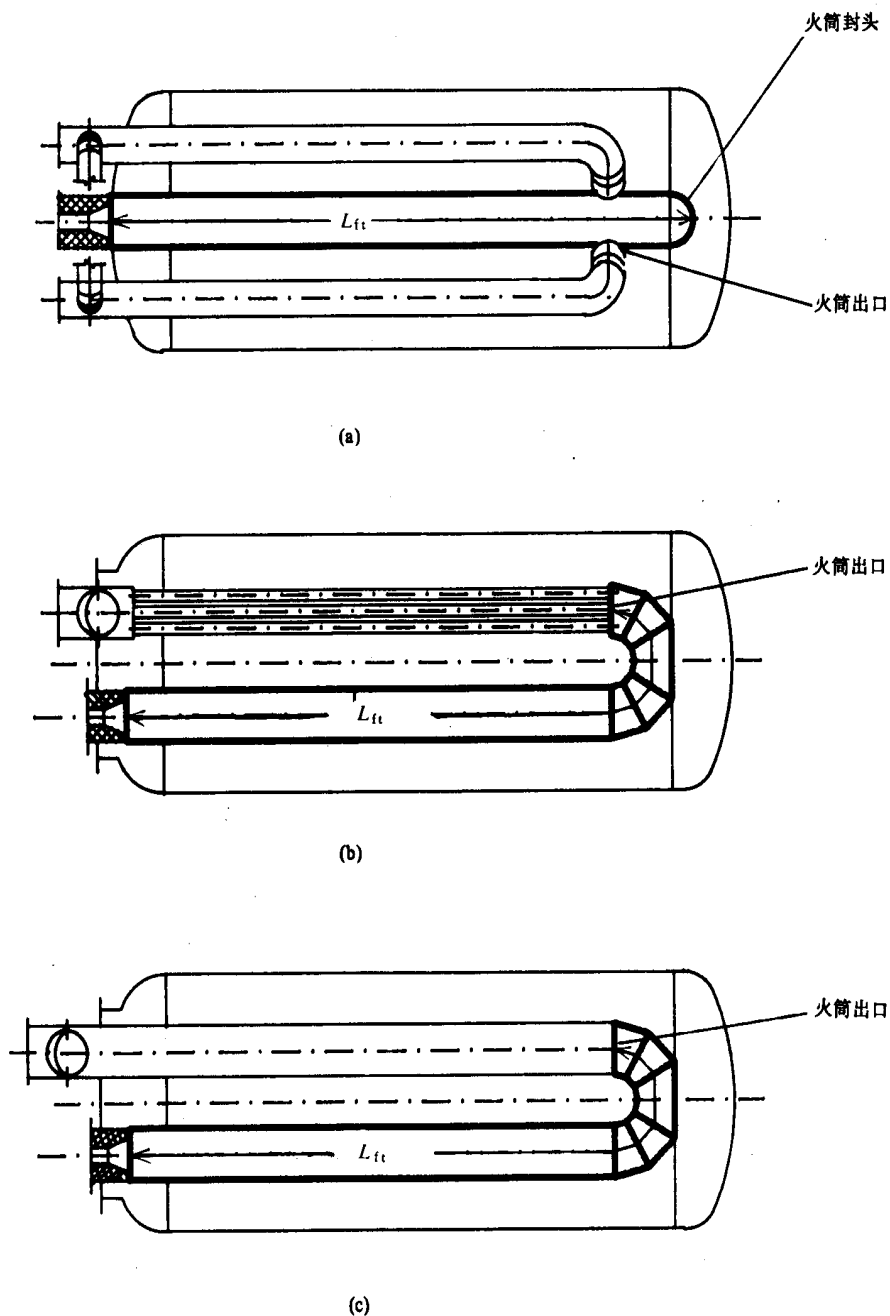


图 3 火筒结构形式简图

注: 图中粗线为火筒容积的计算周界。

**6.3.2 火筒内烟气的放热量按热平衡方程式计算:**

$$Q_{\text{bft}} = Q_{\text{ift}} - H''_{\text{ft}} \quad \dots\dots\dots(62)$$

火筒出口烟气焓按出口烟气温度及过剩空气系数由焓温表查得。

**6.3.3 火筒受热面的传热量按辐射传热方程式计算:**

$$Q_{\text{ift}} = \frac{A_{\text{ft}}}{B_{\text{c}}} C \left[ \left( \frac{T''_{\text{ft}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{wft}}}{100} \right)^4 \right] \quad \dots\dots\dots(63)$$

辐射系数一般取  $C = (4.4 \sim 4.6) \times 10^{-3} \text{ kW} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。燃油时, 取较大值; 燃气时, 取较小值。  
火筒壁面温度可取火筒外侧介质温度。

**6.4 热力特性****6.4.1 火筒热流量按下式计算:**

$$\Phi_{\text{ft}} = B_{\text{c}} Q_{\text{bft}} \quad \dots\dots\dots(64)$$

**6.4.2 火筒受热面热流密度按下式计算:**

$$q_{\text{ft}} = \frac{\Phi_{\text{ft}}}{A_{\text{ft}}} \quad \dots\dots\dots(65)$$

**6.4.3 火筒容积热流密度按下式计算:**

$$q_{\text{v}} = \frac{B Q_{\text{f}}^{\text{u}}}{V_{\text{ft}}} \quad \dots\dots\dots(66)$$

**6.4.4 火筒截面热流密度按下式计算:**

$$q_{\text{s}} = \frac{B Q_{\text{f}}^{\text{u}}}{S_{\text{ft}}} \quad \dots\dots\dots(67)$$

**6.4.5 火筒有效输出热量按下式计算:**

$$Q_{\text{ift}} = \varphi Q_{\text{bft}} \quad \dots\dots\dots(68)$$

**6.5 计算步骤要点**

火筒热力计算一般采用校核计算方法进行。步骤要点如下:

- a. 先绘制火筒式加热炉的结构简图, 计算出火筒的几何特性;
- b. 计算火筒的输入热量;
- c. 估取火筒出口烟温, 由焓温表查得火筒出口的烟气焓, 按照热平衡方程计算出烟气的放热量;
- d. 由辐射传热方程计算出受热面的传热量;
- e. 校验火筒出口烟温的估取值, 当所计算的烟气放热量与辐射传热量的误差符合式 (69) 要求时, 则可认为计算时所估取的温度是合理的。此时, 温度和传热量以按热平衡方程式的计算数据为

准, 否则, 必须重新估取火筒出口烟温再次进行计算与校核, 直至符合式 (69) 要求为止。

$$\left| \frac{Q_{\text{bft}} - Q_{\text{tft}}}{Q_{\text{bft}}} \right| \leq 0.03 \quad \dots\dots\dots (69)$$

为了避免多次重算的繁琐, 在实用上可采用图解法。可先估取三个不同的火筒出口烟温, 然后按热平衡方程和辐射传热方程分别算出这三个估取温度下的放热量和传热量, 并分别将这两个方程的解连线, 则两线交点即为所求的火筒出口烟温 (见图 4 所示)。

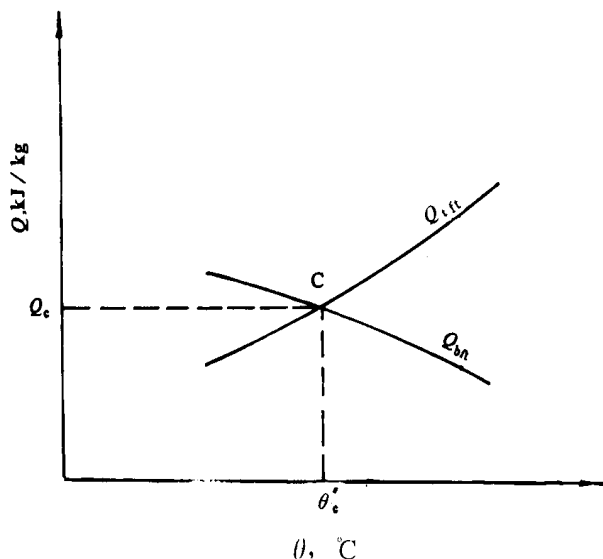


图 4 火筒出口烟温的图解法

## 7 烟管热力计算

### 7.1 符号说明

$A_{\text{st}}$ ——烟管受热面面积,  $\text{m}^2$ ;

$a_{\text{sm}}$ ——烟气黑度;

$D_{\text{ist}}$ ——烟管内直径,  $\text{m}$ ;

$D_{\text{ost}}$ ——烟管外直径,  $\text{m}$ ;

$H'_{\text{st}}$ ——烟管进口的烟气焓,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;

$H''_{\text{st}}$ ——烟管出口的烟气焓,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;

$k$ ——传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$k_g$ ——三原子气体的辐射减弱系数,  $1/(\text{m} \cdot \text{MPa})$ ;

$l$ ——烟气有效辐射层厚度,  $\text{m}$ ;

$L_{\text{st}}$ ——烟管长度,  $\text{m}$ ;

$N_{\text{st}}$ ——烟管根数;

$q_{\text{st}}$ ——烟管受热面热流密度,  $\text{kW/m}^2$ ;

$Q_{\text{bst}}$ ——按热平衡方程计算的烟管传热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;

$Q_{\text{lst}}$ ——按传热方程计算的烟气放热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;

$Q_{\text{st}}$ ——烟管的有效输出热量,  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{kJ/m}^3$ ;

$S_{\text{st}}$ ——烟管总截面面积,  $\text{m}^2$ ;

$t_{ar}$ ——被加热介质的平均温度, °C;  
 $t'_f$ ——直接加热炉中被加热介质的进口温度, °C;  
 $t''_f$ ——直接加热炉中被加热介质的出口温度, °C;  
 $t_{fd}$ ——直接加热炉中被加热介质的平均温度, °C;  
 $t_{fi}$ ——间接加热炉中热媒的平均温度, °C;  
 $t_s$ ——水蒸气饱和温度, °C;  
 $t_w, T_w$ ——烟管灰污壁面温度, °C, K;  
 $u_{st}$ ——烟气平均流速, m/s;  
 $w_{oi}$ ——含水原油中油的质量份额;  
 $\theta_{st}, T_{st}$ ——烟气平均温度, °C, K;  
 $\theta'_{st}$ ——烟管的进口烟气温度, °C;  
 $\theta''_{st}$ ——烟管的出口烟气温度, °C;  
 $\Delta t_w$ ——烟管内壁考虑污垢热阻的壁面温升, °C;  
 $\Delta t_m$ ——传热平均温差, °C;  
 $\alpha_1$ ——烟气对管壁的换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);  
 $\alpha_{1c}$ ——烟气对管壁的对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);  
 $\alpha_{1r}$ ——烟气对管壁的辐射换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);  
 $\alpha_2$ ——管壁对被加热介质的换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);  
 $\alpha_{2oi}$ ——管壁对原油的换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);  
 $\alpha_{2w}$ ——管壁对水的换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);  
 $\lambda$ ——导热系数, W/(m·°C);  
 $\zeta$ ——利用系数;  
 $Pr$ ——普朗特数;  
 $Re$ ——雷诺数;  
 $Gr$ ——格拉晓夫数。  
 其余符号同以前各章。

## 7.2 基本方程式

### 7.2.1 烟管受热面传热量按传热方程式计算:

$$Q_{tst} = \frac{k \cdot A_{st} \cdot \Delta t_m}{B_c} \times 10^3 \quad \dots\dots\dots(70)$$

### 7.2.2 烟气的放热量按热平衡方程式计算:

$$Q_{bst} = H'_{st} - H''_{st} \quad \dots\dots\dots(71)$$

## 7.3 结构特性

7.3.1 因为火筒式加热炉的烟气流动系管内纵向冲刷, 所以烟管的受热面积以烟气侧的内表面积为基准, 按下式计算:

$$A_{st} = \pi D_{ist} L_{st} N_{st} \quad \dots\dots\dots(72)$$

### 7.3.2 烟管截面积按下式计算:

$$S_{st} = \frac{\pi}{4} D_{ist}^2 N_{st} \quad \dots\dots\dots(73)$$

### 7.3.3 烟气的平均流速按下式计算:

$$u_{st} = \frac{B_c V_{sm}}{S_{st}} \times \frac{\theta_{st} + 273}{273} \quad \dots\dots\dots(74)$$

## 7.4 传热温差与平均温度

### 7.4.1 烟气与被加热介质之间的传热温差按对数平均温差计算:

$$\Delta t_m = \frac{\theta'_{st} - \theta''_{st}}{\ln \frac{\theta'_{st} - t_{ar}}{\theta''_{st} - t_{ar}}} \quad \dots\dots\dots(75)$$

### 7.4.2 烟气的平均温度按下列情况分别计算:

#### a. 当烟气温降不大于 300℃ 时:

$$\theta_{st} = 0.5(\theta'_{st} + \theta''_{st}) \quad \dots\dots\dots(76)$$

#### b. 当烟气温降大于 300℃ 时:

$$\theta_{st} = t_{ar} + \Delta t_m \quad \dots\dots\dots(77)$$

### 7.4.3 直接加热炉被加热介质的平均温度按其进、出口温度的算术平均值计算:

$$t_{ar} = 0.5(t'_f + t''_f) \quad \dots\dots\dots(78)$$

### 7.4.4 间接加热炉热媒平均温度按水的饱和温度计算:

$$t_{ar} = t_s \quad \dots\dots\dots(79)$$

## 7.5 传热系数

### 7.5.1 烟管受热面的传热系数分别按下列各式计算:

#### a. 当被加热介质为水时:

$$k = \zeta \alpha_1 \quad \dots\dots\dots(80)$$

#### b. 当被加热介质为原油时:

$$k = \zeta \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad \dots\dots\dots(81)$$

### 7.5.2 烟气对管壁的换热系数按下式计算:

$$\alpha_1 = \alpha_{lc} + \alpha_{lr} \quad \dots\dots\dots(82)$$

### 7.5.3 烟管受热面的利用系数, 根据燃料种类分别按下列情况确定:

#### a. 燃气时: $\zeta = 0.90 \sim 0.95$ ;

#### b. 燃油时: $\zeta = 0.85 \sim 0.90$ .

当烟气冲刷均匀及污垢轻微时, 取较小值; 反之, 则取较大值。

## 7.6 烟气对流换热系数

### 7.6.1 光滑烟管内的烟气对流换热系数应根据烟气的流动状态分别按下列各式计算:

#### a. 烟气在烟管内呈层流状态 ( $Re < 2300$ ) 流动时:

$$\alpha_{lc} = 1.86 \frac{\lambda}{D_{ist}} (Re Pr \frac{D_{ist}}{L_{st}})^{0.33} \dots\dots\dots(83)$$

b. 烟气在管内呈过渡状态 ( $2.3 \times 10^3 < Re < 10 \times 10^3$ ) 流动时:

$$\alpha_{lc} = 0.0214 (Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4} \left[ 1 + \left( \frac{D_{ist}}{L_{st}} \right)^{0.7} \right] \dots\dots\dots(84)$$

c. 烟气在烟管内呈紊流状态 ( $Re \geq 10 \times 10^3$ ) 流动时:

$$\alpha_{lc} = 0.0225 \frac{\lambda}{D_{ist}} Re^{0.8} Pr^{0.6} \left[ 1 + \left( \frac{D_{ist}}{L_{st}} \right)^{0.7} \right] \dots\dots\dots(85)$$

7.6.2 螺旋槽烟管内的烟气对流换热系数计算按附录 B (参考件) 进行。

## 7.7 烟气辐射换热系数

7.7.1 烟气辐射换热系数按下式计算:

$$\alpha_{lr} = \frac{5.1 \times 10^{-11} \alpha_{sm} T_{st}^3 \left[ 1 - \left( \frac{T_w}{T_{st}} \right)^{3.6} \right]}{\left( 1 - \frac{T_w}{T_{st}} \right)} \dots\dots\dots(86)$$

7.7.2 烟气黑度按下式计算:

$$\alpha_{sm} = 1 - \exp(-k_g p_t l) \dots\dots\dots(87)$$

7.7.3 烟气的辐射减弱系数按下式计算:

$$k_g = \left[ (2.49 + 5.11 r_{H_2O}) (p_t l)^{-0.5} - 1.02 \right] \cdot \left[ 1 - 0.37 \times 10^{-3} (\theta_{st} + 273) \right] r_t \dots\dots\dots(88)$$

7.7.4 烟管的有效辐射层厚度按下式计算:

$$l = 0.9 D_{ist} \dots\dots\dots(89)$$

7.7.5 烟管内灰污壁面温度按下式计算:

$$t_w = t_{gr} + \Delta t_w \dots\dots\dots(90)$$

对于燃油加热炉, 取  $\Delta t_w = 60^\circ\text{C}$ ; 对于燃气加热炉, 取  $\Delta t_w = 25^\circ\text{C}$ 。

## 7.8 烟管外壁换热系数

7.8.1 火筒式直接加热炉的烟管外壁对被加热介质的换热按大空间自然对流放热计算。根据被加热介质的流动状态按下述情况分别确定:

a. 被加热介质呈层流状态 ( $1 \times 10^3 \leq Gr Pr \leq 1 \times 10^9$ ) 时:

$$\alpha_2 = 0.53 \frac{\lambda}{D_{ost}} (Gr Pr)^{0.25} \dots\dots\dots(91)$$

b. 被加热介质呈紊流状态 ( $1 \times 10^9 < Gr Pr < 1 \times 10^{12}$ ) 时:

$$\alpha_2 = 0.13 \frac{\lambda}{D_{\text{ost}}} (GrPr)^{0.33} \dots\dots\dots(92)$$

7.8.2 火筒式直接加热炉被加热介质的定性温度取烟管壁面温度和被加热介质的平均温度的算术平均值,按下式计算:

$$t_c = 0.5(t_w + t_{\text{ar}}) \dots\dots\dots(93)$$

7.8.3 被加热介质为油水混合物的换热系数,可按油和水的质量份额分别乘其换热系数之积的和计算:

$$\alpha_2 = w_{\text{oi}} \alpha_{2\text{oi}} + (1 - w_{\text{oi}}) \alpha_{2\text{w}} \dots\dots\dots(94)$$

## 7.9 热力特性

7.9.1 烟管受热面的热流量按下式计算:

$$\Phi_{\text{st}} = B_c Q_{\text{bst}} \dots\dots\dots(95)$$

7.9.2 烟管受热面热流密度按下式计算:

$$q_{\text{st}} = \frac{\Phi_{\text{st}}}{A_{\text{st}}} \dots\dots\dots(96)$$

7.9.3 烟管有效输出热量按下式计算:

$$Q_{\text{tst}} = \varphi Q_{\text{bst}} \dots\dots\dots(97)$$

## 7.10 计算步骤要点

烟管受热面的传热计算一般采用校核算法进行,其计算步骤如下:

a. 估取烟管出口烟气温度,据此由焓温表查得出口烟气焓,按热平衡方程式(71)算出烟气放热量;

b. 根据烟气和被加热介质的进出口温度,确定传热温差、平均烟温与烟速;

c. 计算烟气对流换热系数和辐射换热系数,确定烟气侧的换热系数;当被加热介质为油水混合物时,尚需计算被加热介质侧的换热系数;

d. 选取利用系数,确定传热系数;

e. 按照传热方程式(70)求出受热面的传热量;

f. 校核出口烟气温度的估取值,当所计算的烟气放热量与受热面传热量之间误差满足式(98)要求时,则可认为计算时所估取的温度是合理的,此时,排烟温度及传热量以热平衡方程计算数据为准;否则,须重新估取出口烟气温度再次进行计算。当第二次估取温度与第一次估取温度之差小于50℃时,则传热系数可不必重新计算,只需重新计算传热温差、烟管传热量以及烟气放热量,然后再校核,直至符合式(98)要求。

$$\left| \frac{Q_{\text{bst}} - Q_{\text{tst}}}{Q_{\text{bst}}} \right| \leq 0.02 \dots\dots\dots(98)$$

在实际计算中,往往采用校核热力计算方法,并以图解法进行求解,即先估取三个不同的烟管出口烟气温度;然后按照热平衡方程和传热方程分别算出它们的放热量和传热量;最后在以烟气温度为横坐标、热量为纵坐标的图上,分别作出热平衡方程与传热方程的曲线,两条曲线的交点则为所求烟

气温度。

### 7.11 误差校核

7.11.1 当烟管热力计算结束后, 应对排烟温度进行校核。如果传热计算结果所求出的排烟温度与热平衡计算时所估取或给定的排烟温度之差不超过 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ , 则传热计算合理, 计算结束; 否则, 必须重新计算。

7.11.2 当烟管热力计算结束后, 应对烟气侧传热面热力计算的误差进行校核。当烟气侧传热面热力计算的相对误差满足式(99)时, 则可认为计算正确; 否则, 必须重新计算。

$$\frac{Q_{\text{ift}} \cdot \eta - (Q_{\text{ift}} + Q_{\text{lst}})(100 - q_4)}{Q_{\text{ift}}} < 0.50 \quad \dots\dots\dots(99)$$

## 8 盘管热力计算

### 8.1 符号说明

- $A_c$ ——盘管传热面面积,  $\text{m}^2$ ;
- $D_{\text{ic}}$ ——管子内直径,  $\text{m}$ ;
- $g$ ——重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;
- $L_c$ ——盘管通道长度,  $\text{m}$ ;
- $L_l$ ——管程的直段长度,  $\text{m}$ ;
- $N_c$ ——盘管通道的管子根数;
- $N_e$ ——管子当量排数;
- $N_l$ ——管子排数;
- $P_n$ ——额定热功率,  $\text{kW}$ ;
- $P_{\text{tc}}$ ——按传热方程计算的热功率,  $\text{kW}$ ;
- $q_{\text{ms}}$ ——水蒸气冷凝液的质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;
- $r$ ——水蒸气的汽化潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;
- $r_i$ ——管内污垢热阻,  $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;
- $r_o$ ——管外污垢热阻,  $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;
- $S_c$ ——盘管通道总截面面积,  $\text{m}^2$ ;
- $t_f, T_f$ ——被加热介质的平均温度,  $^{\circ}\text{C}, \text{K}$ ;
- $t'_f$ ——被加热介质的进口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t''_f$ ——被加热介质的出口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t_{\text{wi}}, T_{\text{wi}}$ ——管内壁面温度,  $^{\circ}\text{C}, \text{K}$ ;
- $t_{\text{wo}}, T_{\text{wo}}$ ——管外壁面温度,  $^{\circ}\text{C}, \text{K}$ ;
- $u_c$ ——被加热介质流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;
- $\lambda$ ——介质在平均温度下的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;
- $\mu$ ——介质在平均温度下的动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;
- $\mu_w$ ——介质在管壁温度下的动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;
- $\rho$ ——介质在平均温度下的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;
- $\alpha_i$ ——管内壁对被加热介质的换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;
- $\alpha_o$ ——管外蒸汽壁面凝结的换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;
- $\delta$ ——盘管壁厚,  $\text{m}$ ;
- $\delta_c$ ——盘管热力计算相对误差, %;



$Pr$ ——介质在平均温度下的普朗特数;

$P_{r_w}$ ——介质在壁面温度下的普朗特数;

$Re$ ——介质在平均温度下的雷诺数。

其余符号同以前各章。

## 8.2 基本方程式

8.2.1 盘管传递给被加热介质的热功率, 按传热方程式计算:

$$P_{tc} = k \cdot A_c \cdot \Delta t_m \times 10^3 \quad \dots\dots\dots(100)$$

8.2.2 被加热介质加热所需要热功率按热平衡方程式计算, 采用 5.5.2 条规定的公式进行。

## 8.3 传热温差和平均温度

8.3.1 盘管传热温差按对数平均温差计算:

$$\Delta t_m = \frac{t''_f - t'_f}{\ln \frac{t_s - t'_f}{t_s - t''_f}} \quad \dots\dots\dots(101)$$

8.3.2 管内被加热介质的平均温度应根据介质的种类和流动状态分别按下列各式计算:

a. 液体介质呈过渡流或紊流状态时:

$$t_f = 0.4t''_f + 0.6t'_f \quad \dots\dots\dots(102)$$

b. 气体介质或呈层流状态的液体介质:

$$t_f = 0.5(t'_f + t''_f) \quad \dots\dots\dots(103)$$

8.3.3 管外蒸汽凝结液膜的平均温度按下式计算:

$$t_f = 0.5(t_s + t_{wo}) \quad \dots\dots\dots(104)$$

8.3.4 管壁温度按下列各式计算:

a. 管内壁面温度:

$$t_{wi} = t_f + \frac{\alpha_i}{k} \Delta t_m \quad \dots\dots\dots(105)$$

b. 管外壁面温度:

$$t_{wo} = t_s - \frac{\alpha_o}{k} \Delta t_m \quad \dots\dots\dots(106)$$

在具体热力计算中, 管内、外壁温度需由试算渐进确定。

## 8.4 传热系数

8.4.1 传热系数的计算公式根据管内被加热介质的种类分别按下列各式计算:

a. 被加热介质为水时:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + r_i + \frac{\delta}{\lambda} + r_o + \frac{1}{\alpha_o}} \quad \dots\dots\dots(107)$$

b. 被加热介质为原油或天然气时:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + r_i + r_o} \quad \dots\dots\dots(108)$$

8.4.2 管内壁面对被加热介质的换热系数根据介质种类和流动状态分别按下述各式计算:

a. 管内液体或气体呈层流状态 ( $Re < 2100$ ;  $Re \cdot Pr \frac{D_{ic}}{L_t} > 12$ ;  $Pr > 0.6$ ) 时:

$$\alpha_i = 1.86 \frac{\lambda}{D_{ic}} (Re \cdot Pr \frac{D_{ic}}{L_t})^{0.33} (\frac{\mu}{\mu_w})^{0.14} \quad \dots\dots\dots(109)$$

b. 管内液体呈过渡流状态 ( $2.3 \times 10^3 < Re < 10 \times 10^3$ ;  $1.5 < Pr < 500$ ;  $0.05 < Pr / Pr_w < 20$ ) 时:

$$\alpha_i = 0.012 \frac{\lambda}{D_{ic}} (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} [1 + (\frac{D_{ic}}{L_t})^{0.67}] (\frac{Pr}{Pr_w})^{0.11} \quad \dots\dots\dots(110)$$

c. 管内气体呈过渡流状态 ( $2.3 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^6$ ;  $0.6 < Pr < 1.5$ ;  $0.5 < T_f / T_{wi} < 1.5$ ) 时:

$$\alpha_i = 0.0214 \frac{\lambda}{D_{ic}} (Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4} \left[ 1 + (\frac{D_{ic}}{L_t})^{0.67} \right] (\frac{T_f}{T_{wi}})^{0.45} \quad \dots\dots\dots(111)$$

d. 管内液体呈紊流状态 ( $Re > 10 \times 10^3$ ;  $0.7 < Pr < 16.7 \times 10^3$ ) 时:

$$\alpha_i = 0.023 \frac{\lambda}{D_{ic}} Re^{0.8} Pr^{0.33} [1 + (\frac{D_{ic}}{L_t})^{0.67}] (\frac{\mu}{\mu_w})^{0.14} \quad \dots\dots\dots(112)$$

e. 管内气体呈紊流状态 ( $Re > 10 \times 10^3$ ;  $0.6 < Pr < 1.5$ ) 时:

$$\alpha_i = 0.021 \frac{\lambda}{D_{ic}} Re^{0.8} Pr^{0.4} [1 + (\frac{D_{ic}}{L_t})^{0.67}] (\frac{T}{T_{wi}})^{0.5} \quad \dots\dots\dots(113)$$

f. 管内水呈紊流状态且  $20^\circ\text{C} \leq t_f \leq 100^\circ\text{C}$  时:

$$\alpha_i = 1433 (1 + 0.015 t_f)^{\frac{u_c^{0.8}}{D_{ic}^{0.2}}} \quad \dots\dots\dots(114)$$

8.4.3 水平布置管外水蒸气凝结液膜呈层流状态 ( $Re \leq 1800$ ) 时的放热系数按下式计算:

$$\alpha_o = 1.51 \lambda \left( Re \frac{\mu^2}{\rho^2 g} \right)^{-0.33} \dots\dots\dots(115)$$

8.4.4 水平布置管外水蒸气凝结液膜的雷诺数按下式计算:

$$Re = \frac{4q_m}{L_t \cdot N_e \cdot \mu} \dots\dots\dots(116)$$

8.4.5 水平布置光滑管外水蒸气凝结液的流量按下式计算:

$$q_m = \frac{P_{bc}}{r} \dots\dots\dots(117)$$

8.4.6 水平管束在垂直方向上的当量排数如图 5 排列方式时, 按下列公式计算:

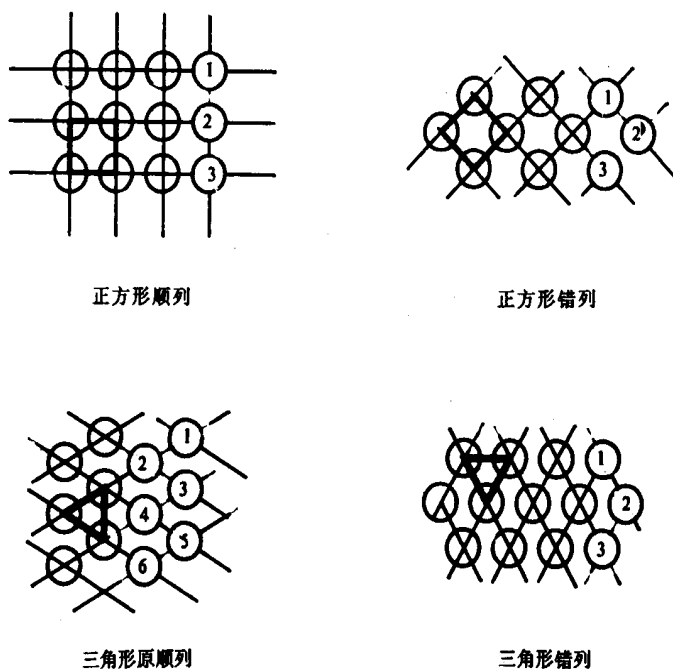


图 5 管子排列方式图

a. 正方形顺列布置时:

$$N_e = 1.288 N_t^{0.430} \dots\dots\dots(118)$$

b. 正方形错列布置时:

$$N_e = 1.370 N_t^{0.518} \dots\dots\dots(119)$$

c. 等边三角形顺列布置时:

$$N_e = 1.022 N_t^{0.519} \dots\dots\dots(120)$$

d. 等边三角形错列布置时:

$$N_e = 2.080 N_t^{0.485} \dots\dots\dots(121)$$

8.4.7 盘管内外壁面污垢热阻应从操作条件类似的实验数据中选取。当缺乏实验数据时，可以根据介质种类，流速以及温度等按表 4 选取。

表 4 污垢热阻  $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$

水	加热介质的温度, $^\circ\text{C}$	115 以下		115~200	
	被加热水的温度, $^\circ\text{C}$	50 以下		50 以上	
	水的流速, $\text{m/s}$	1.0 以下	1.0 以上	1.0 以下	1.0 以上
	蒸馏水 (凝结水)	0.00009	0.00009	0.00009	0.00009
	自来水或井水	0.00017	0.00017	0.00035	0.00035
	一般河水	0.0006	0.00035	0.00069	0.0006
	锅炉净化水	0.00017	0.00009	0.00017	0.00017
	温度, $^\circ\text{C}$	0~93		94~150	
原油	流速, $\text{m/s}$	0.6 以下	0.6 以上	0.6 以下	0.6 以上
	脱盐原油	0.0005	0.00035	0.0005	0.00035
	含盐原油	0.00055	0.00035	0.00085	0.0007
	天然气	0.00017			
其他	渣 油	0.0009			

## 8.5 结构特性

8.5.1 盘管的传热面积按下式计算:

$$A_c = \frac{P_n}{k \Delta t_m} \dots\dots\dots(122)$$

8.5.2 盘管的流通截面积按下式计算:

$$S_c = \frac{q_v}{u_c} \dots\dots\dots(123)$$

被加热介质的常用流速按表 5 选取。

表 5 常用流速范围  $\text{m/s}$

介质种类	原油	天然气	新鲜水	循环水
流速范围	0.5~1.8	10~30	0.8~1.5	1.0~2.0

8.5.3 盘管的通道长度按下式计算:

$$L_t = \frac{A_c}{\pi \cdot D_{ic} \cdot N_c} \dots\dots\dots(124)$$

## 8.6 计算步骤

8.6.1 盘管设计热力计算是在给定的热功率、加热介质与被加热介质温度及其物性参数条件下, 计算出所需的传热面积。设计热力计算方法一般是先参考类似操作条件的经验数据估取一个传热系数, 由传热方程式算出所需的传热面积, 并进行结构计算; 然后根据结构计算及工艺操作条件计算传热系数, 并进行热功率校核。设计热力计算的一般步骤如下:

- a. 按照给定的加热介质和被加热介质的温度计算出传热温差;
- b. 参考类似条件的实验数据或表 6 所列经验数据, 估取传热系数;

表 6 参考传热系数

 $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ 

加热介质	水蒸气		水			
被加热介质	原油	水	天然气			
			0.2MPa 以下	2~5MPa	5~7MPa	7MPa 以上
传热系数	100~200	1600~4000	200~225	225~285	340~400	450~570

- c. 根据上述所得的传热温差和传热系数以及给定的热功率, 按照传热方程式计算出传热面积;
- d. 根据所需传热面积并结合加热炉的结构布置进行盘管的结构设计, 确定管径、管程数等;
- e. 根据给定的被加热介质及其进、出口温度计算出平均温度及密度、粘度、比热容、导热系数等物性参数;
- f. 计算传热系数;
- g. 根据上述所得传热温差、传热面积及传热系数, 按照传热方程计算热功率, 使其满足式 (125) 的要求:

$$0.02 \leq \frac{P_{tc} - P_n}{P_n} \leq 0.10 \quad \dots\dots\dots(125)$$

8.6.2 盘管的校核热力计算是在给定盘管的具体结构和面积、被加热介质的种类以及进口温度的条件下, 计算所能传递的热功率或出口温度。校核计算一般可采用图解法进行。

- a. 假定三个出口温度, 分别算出三个传热系数;
- b. 如图 6 所示, 分别在图上作出传热方程和热平衡方程的曲线, 则两条曲线的交点所对应的温度和热功率即为所求。

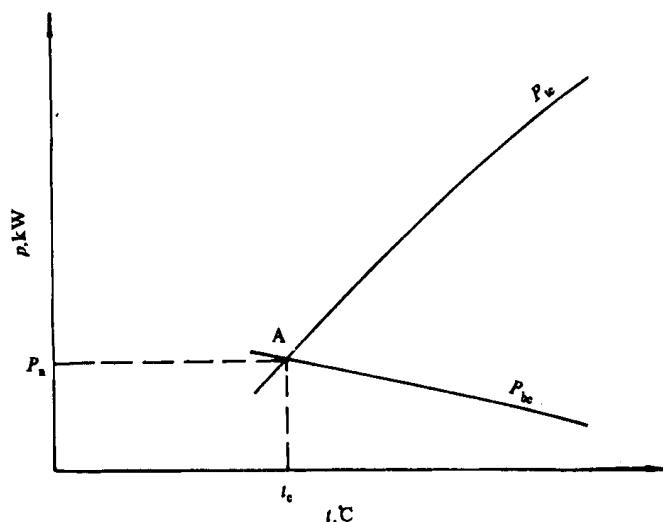


图 6 出口温度的图解法

## 9 流体阻力计算

### 9.1 符号说明

- $a$ ——矩形通道截面长边的长度, m;  
 $b$ ——矩形通道截面宽边的长度, m;  
 $D_e$ ——通道的当量直径, m;  
 $D_i$ ——圆形通道的内直径, m;  
 $D_{sd}$ ——烟囱的内直径, m;  
 $f$ ——通道的摩擦阻力系数;  
 $H_{sd}$ ——烟囱高度, m;  
 $k$ ——通道壁面的绝对粗糙度, m;  
 $L$ ——通道计算段的长度, m;  
 $P_{ac}$ ——送风机的计算功率, kW;  
 $P_{ae}$ ——送风机的电动机传动功率, kW;  
 $P_{sc}$ ——引风机的计算功率, kW;  
 $P_{se}$ ——引风机的电动机传动功率, kW;  
 $p_b$ ——环境大气压力, kPa;  
 $p_{ac}$ ——送风机的计算全压, Pa;  
 $p_{sc}$ ——引风机的计算全压, Pa;  
 $\Delta P_a$ ——空气通道的总阻力, Pa;  
 $\Delta P_f$ ——流体通过等截面通道的摩擦阻力, Pa;  
 $\Delta P_{fa}$ ——空气通道某区段的摩擦阻力, Pa;  
 $\Delta P_{fs}$ ——烟气通道某区段的摩擦阻力, Pa;  
 $\Delta P_l$ ——流体通道的局部阻力, Pa;  
 $\Delta P_{la}$ ——空气通道某区段的局部阻力, Pa;  
 $\Delta P_{ls}$ ——烟气通道某区段的局部阻力, Pa;  
 $\Delta P_n$ ——火筒负压, Pa;  
 $\Delta P_{sd}$ ——烟囱或通道自生通风压头, Pa;  
 $\Delta P_{sm}$ ——烟气通道的总阻力, Pa;  
 $S$ ——通道的截面积, m<sup>2</sup>;  
 $S_1$ ——对应于截面 1 的通道截面积, m<sup>2</sup>;  
 $S_2$ ——对应于截面 2 的通道截面积, m<sup>2</sup>;  
 $t_a$ ——使用条件下的空气温度, °C;  
 $\theta_{sm}$ ——烟气温度, °C;  
 $U$ ——流体通道截面的周边长度, m;  
 $u$ ——流体速度, m/s;  
 $u_1$ ——对应于通道截面 1 的流体速度, m/s;  
 $u_2$ ——对应于通道截面 2 的流体速度, m/s;  
 $V_{ac}$ ——送风机的计算空气流量, m<sup>3</sup>/s;  
 $V_{sc}$ ——引风机的计算烟气流量, m<sup>3</sup>/s;  
 $\rho$ ——流体在平均温度下的密度, kg/m<sup>3</sup>;  
 $\rho_a$ ——空气在环境温度下的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_{sm}$ ——烟气在平均温度下的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\zeta$ ——流体通道的局部阻力系数;

$\zeta_1$ ——对应于通道截面 1 的局部阻力系数;

$\zeta_2$ ——对应于通道截面 2 的局部阻力系数;

$\delta$ ——元件的厚度,  $\text{m}$ 。

其余符号同以前各章。

## 9.2 一般规定

9.2.1 阻力计算给出摩擦阻力和局部阻力的计算方法。

9.2.2 阻力计算的设计工况按额定热力工况进行。当进行变工况校核计算时, 则按照给定的热力工况计算。阻力计算中的介质流量及有关参数的数值, 根据热力计算结果确定。

9.2.3 摩擦阻力和局部阻力的计算均按等温流动的情况进行, 计算温度取流体的平均温度。空气的平均温度按所计算通道进出口空气温度的算术平均温度计算; 烟气的平均温度按 7.4.2 条规定计算; 被加热介质的平均温度按 8.3.2 条规定计算。

9.2.4 通道内气体压力在 99~106kPa 范围内时, 则不考虑气体压力的修正, 均按 101.325kPa 压力状况计算。

9.2.5 通道的当量直径按下列公式计算:

a. 当量直径的计算通式:

$$D_e = \frac{4S}{U} \dots\dots\dots(126)$$

b. 圆形截面通道:

$$D_e = D_i \dots\dots\dots(127)$$

c. 矩形截面通道:

$$D_e = \frac{2ab}{a+b} \dots\dots\dots(128)$$

## 9.3 摩擦阻力计算

9.3.1 流体经过等截面通道的摩擦阻力按下式计算:

$$\Delta P_f = fL \frac{u^2}{2D_e} \rho \dots\dots\dots(129)$$

9.3.2 通道的摩擦阻力系数应根据流体的流动状态以及通道壁面的粗糙度按下列公式计算:

a. 当流体呈层流状态( $Re < 2 \times 10^3$ )时:

$$f = \frac{64}{Re} \dots\dots\dots(130)$$

b. 当流体呈过渡流状态 ( $2 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^3$ ) 时:

$$f = 0.3164 Re^{-0.25} \dots\dots\dots(131)$$

c. 当流体流动处于紊流状态 ( $Re > 4 \times 10^3$ ) 时:

$$f = 0.11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{k}{D_e} \right)^{0.25} \dots\dots\dots(132)$$

通道壁面的粗糙度与制造材料及使用状况等因素有关。常用金属通道的壁面的粗糙度可按表 7 选用。

表 7 金属通道的绝对粗糙度

mm

通道类型	绝对粗糙度
用钢板制造的烟风道（考虑了焊缝）	0.4
钢管通道	0.1
铸铁通道	0.8
轻度腐蚀的钢管道	0.1
严重腐蚀的钢管道	0.7

#### 9.4 局部阻力计算

9.4.1 流体通道的局部阻力按下式计算：

$$\Delta P_1 = \zeta \frac{u^2}{2} \rho \dots\dots\dots(133)$$

9.4.2 流体通道区段的局部阻力系数都假定集中在某一给定的截面上，对应于某一给定的流速。如果需要将对应于某一截面的局部阻力系数换算到另一截面时，则按下式换算：

$$\zeta_2 = \zeta_1 \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 = \zeta_1 \left( \frac{u_1}{u_2} \right)^2 \dots\dots\dots(134)$$

9.4.3 单相流体的局部阻力系数一般根据计算区段的几何形状来确定，一些常用典型元件的局部阻力系数，按附录 A（补充件）表 A1 查得。

#### 9.5 烟风阻力计算

9.5.1 加热炉采用平衡通风方式时，要分别计算空气系统和烟气系统的阻力，以便选择送风机和引风机。

a. 空气系统的阻力为送风机进风口至燃烧器出口区段的摩擦阻力与局部阻力之和，按下式计算：

$$\Delta P_a = \sum \Delta P_{fa} + \sum \Delta P_{la} \dots\dots\dots(135)$$

b. 烟气系统的阻力为燃烧器出口至烟囱出口区段的摩擦阻力与局部阻力以及火筒负压之和再减去烟囱自生压头，按下式计算：

$$\Delta P_{sm} = \sum \Delta P_{fsm} + \sum \Delta P_{lsm} + \Delta P_n - \Delta P_{sd} \dots\dots\dots(136)$$

火筒负压一般为 30~50Pa。

9.5.2 加热炉采用正压通风或负压通风方式时，全部空气系统和烟气系统一起计算。

a. 采用正压通风方式时，空气阻力包括烟气阻力在内按下式计算：



$$\Delta P_a = \sum \Delta P_a + \sum \Delta P_{sm} \dots\dots\dots(137)$$

b. 采用负压通风方式时, 烟气阻力包括空气阻力、火筒负压及烟囱自生通风压头在内按下式计算:

$$\Delta P_{sm} = \sum \Delta P_a + \sum \Delta P_{sm} + \Delta P_n - \Delta P_{sd} \dots\dots\dots(138)$$

9.5.3 烟囱的自生通风压头按下式计算:

$$\Delta P_{sd} = H_{sd} g(\rho_a - \rho_{sm}) \dots\dots\dots(139)$$

9.5.4 送风机的型号规格应根据热力计算和阻力计算中所得的空气流量和总阻力, 并考虑流量储备系数(1.1)和压力储备系数(1.2)加以确定。

a. 送风机的流量:

$$V_{ac} = 1.1 B_c V_a \frac{273 + t_a}{273} \cdot \frac{101.325}{P_b} \dots\dots\dots(140)$$

b. 送风机的全压:

$$P_{ac} = 1.2 \Delta P_a \frac{273 + t_a}{273 + 20} \cdot \frac{101.325}{P_b} \dots\dots\dots(141)$$

c. 送风机所需的功率:

$$P_{ac} = \frac{V_{ac} \Delta P_{ac}}{\eta_a \eta_m} \dots\dots\dots(142)$$

d. 电动机的传动功率:

$$P_{ae} = 1.1 \frac{P_{ac}}{\eta_e} \dots\dots\dots(143)$$

送风机的全压效率、机械传动效率及电机效率, 根据所选送风机与电机型式及其传动联结方式从有关样本资料查得。

选择送风机时, 应使计算工况的流量和全压处于风机特性曲线的最高效率区。

9.5.5 引风机的型号规格应根据热力计算和阻力计算中所得的烟气流量和总阻力, 并考虑流量储备系数(1.1)和压力储备系数(1.2)加以确定。

a. 引风机的流量:

$$V_{sc} = 1.1 B_c V_{sm} \frac{273 + \theta_{sm}}{273} \cdot \frac{101.325}{p_b} \dots\dots\dots(144)$$

b. 引风机的全压:

$$p_{sc} = 1.2 \Delta p_{sm} \frac{273 + \theta_{sm}}{273 + 200} \cdot \frac{101.325}{p_b} \dots\dots\dots(145)$$

c. 引风机所需的功率:

$$P_{sc} = \frac{V_{sc} \Delta P_{sc}}{\eta_a \eta_m} \dots\dots\dots(146)$$

d. 电动机的传动功率:

$$P_{se} = 1.1 \frac{P_{sc}}{\eta_e} \dots\dots\dots(147)$$

引风机的全压效率, 机械传动效率及电机效率根据所选引风机与电机的型式及其传动联结方式从有关样本资料中查得。

选择引风机时, 应使计算工况的流量和全压处于风机特性曲线的最高效率区。

9.5.6 烟囱高度的计算应根据通风方式分别加以确定。

a. 采用强制通风方式时, 烟囱高度应符合有关安全及卫生标准的规定, 且比烟囱周围半径 200m 距离内的最高建筑物高出 3m 以上;

b. 采用自然通风方式时, 烟囱高度应能同时满足有关安全及卫生标准和自生通风压头的要求, 并取其较高值。

保证必需的自生通风压头的烟囱高度按下式计算:

$$H_{sd} = \frac{1.2 \Delta P_{sm}}{(\rho_a - \rho_{sm}) \frac{p_b}{101.325}} \dots\dots\dots(148)$$

计算时还应按夏季最高平均气温、最低气压及最大负荷的条件进行校核。

9.5.7 烟囱直径按下式计算:

$$D_{sd} = \sqrt{\frac{B_c V_{sm} (\theta_{sm} + 273)}{0.785 \times 273 u_s}} \dots\dots\dots(149)$$

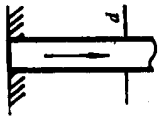
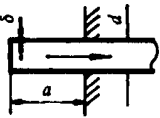
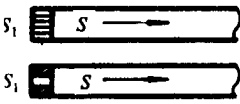
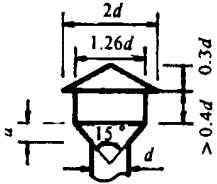

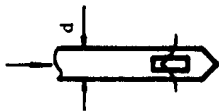
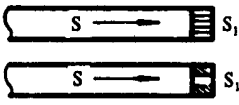
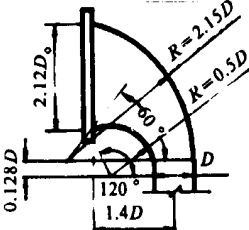
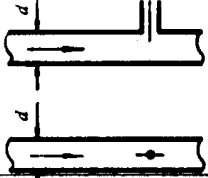
烟气流速按 SY 5263 中的规定选取。

## 9.6 油气混输及天然气的阻力计算

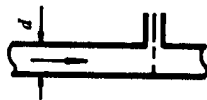
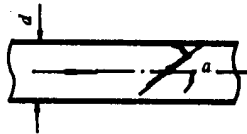
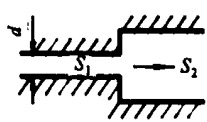
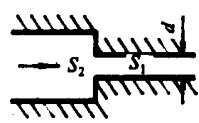
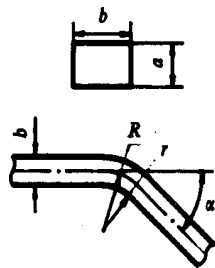
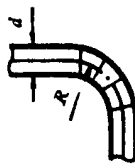
9.6.1 盘管加热油气混合物或天然气的阻力计算按 SYJ 4 中规定进行。

附录 A  
局部阻力系数  
(补充件)

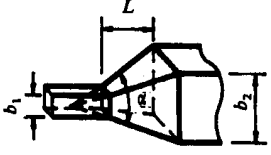
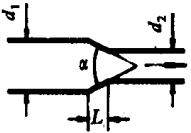
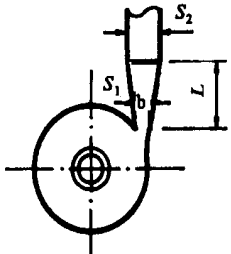
表 A1 烟风系统局部阻力系数

序号	名称	示意图	局部阻力系数	
1	管端与壁面平齐的入口		$\zeta = 0.5$	
2	管端凸出壁面的入口		$\delta/d \approx 0$ $a/d > 0.2, \quad \zeta = 1.0$ $0.05 < a/d < 0.2, \zeta = 0.85$	$\delta/d > 0.04$ $\zeta = 0.5$
3	经网格或孔板的通道入口		$\zeta = (1.707 \frac{S}{S_1} - 1)^2$ <p>式中: <math>S_1</math>——网格或孔板的有效截面;  <math>S</math>——通道有效截面</p>	
4	吸风或排风罩入口或出口		吸气时, $\zeta = 0.5$ ; 排气时, $\zeta = 0.65$	
5	管道出口		$\zeta = 1.1$	
6	单个侧孔出口		$\zeta = 2.5$	
7	经网格或孔板的通道出口		$\zeta = (\frac{S}{S_1} + 0.707 \frac{S}{S_1} \sqrt{1 - \frac{S_1}{S}})^2$ <p>式中: <math>S_1</math>——网格或孔板的有效截面;  <math>S</math>——通道有效截面</p>	
8	吸风口管接头		没有挡板时, $\zeta = 0.2$ ; 有挡板时, $\zeta = 0.3$	
9	全开状态的闸板或转动挡板		$\zeta = 0.1$	

续表 A1

序号	名称	示意图	局部阻力系数·									
10	闸板		开启程度, %	5	10	30	50	70	90	100		
			$\zeta$	1000	200	18	4	1	0.22	0.10		
11	转动挡板		$\zeta$ 值									
			$\begin{matrix} \alpha^\circ \\ n \end{matrix}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
			1	0.3	1.0	2.5	7	20	60	100	1500	8000
			2	0.4	1.0	2.5	4	8	30	50	350	6000
			3	0.2	0.7	2.0	5	10	20	40	160	6000
			4	0.25	0.8	2.0	4	8	15	30	100	6000
			5	0.2	0.6	1.8	3.5	7	13	28	80	4000
			$n$ -叶片数									
12	突然扩大		$S_1 / S_2$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0			
			$\zeta$	1.1	0.7	0.4	0.18	0.1	0			
$\zeta$ 为对应于小截面 $S_1$ 流速下的阻力系数												
13	突然缩小		$S_1 / S_2$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0			
			$\zeta$	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0			
$\zeta$ 为对应于小截面 $S_1$ 流速下的阻力系数												
14	缓弯头	 $R = r + b / 2$ 对于圆管 $b = d$ $b = a$	$\zeta = \zeta_0 K_a K_{a/b}$									
			$R / b$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0		
			$\zeta_0$	1.0	0.68	0.48	0.36	0.28	0.20	0.15		
			$\alpha^\circ$	0	30	60	90	120	150	180		
			$K_a$	0	0.45	0.75	1.0	1.9	2.6	3.0		
			$\begin{matrix} a/b \\ K_{a/b} \end{matrix}$	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	8.0	
			$R / b$									
			$< 2$	1.22	1.14	1.07	1.00	0.86	0.85	0.90	1.00	
			$> 2$	1.55	1.35	1.15	1.00	0.45	0.40	0.43	0.60	
15	焊接弯头		$\zeta = \zeta_0 K_a$									
			$R / d$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0		
			$\zeta_0$	1.0	0.87	0.80	0.74	0.70	0.34	0.23		
$K_a$ 同序号 14												

续表 A1

序号	名称	示意图	局部阻力系数																																										
16	直通道上矩形扩散管		$\zeta = \zeta_0 \varphi$ $\zeta_0$ 按序号 12 取用, $\varphi$ 按 $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{b_2 - b_1}{2L}$ 查下表:																																										
			<table><tr><td><math>\alpha^\circ</math></td><td>5</td><td>10</td><td>20</td><td>30</td><td>40</td></tr><tr><td><math>\varphi</math></td><td>0.125</td><td>0.25</td><td>0.52</td><td>0.80</td><td>1.2</td></tr></table>	$\alpha^\circ$	5	10	20	30	40	$\varphi$	0.125	0.25	0.52	0.80	1.2																														
			$\alpha^\circ$	5	10	20	30	40																																					
			$\varphi$	0.125	0.25	0.52	0.80	1.2																																					
当两个平面上的扩散角不等时, 完全撞击系数 $\varphi$ 按较大的角取值; 当扩散管为圆形变正方形 (或矩形) 或正方形 (或矩形) 变圆形时, 以矩形侧的 $2\sqrt{S/\pi}$ 值代入决定 $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ , $S$ 为矩形侧的截面积。																																													
$\zeta$ 对应于进口截面流速下的阻力系数																																													
17	直通道中收缩管		$\alpha < 20^\circ$ 时, $\zeta = 0$ ; $\alpha = 20^\circ \sim 60^\circ$ 时, $\zeta = 0.1$ ; $\alpha > 60^\circ$ 时, $\zeta$ 按序号 13 取用。																																										
			当收缩管为矩形截面及双侧收缩时, 尺寸 $d_2$ 按收缩角较大的一侧采用: $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{d_1 - d_2}{2}$																																										
18	风机出口的渐扩管道		<table><tr><td><math>\zeta</math></td><td><math>S_2/S_1</math></td><td>1.5</td><td>2.0</td><td>2.5</td><td>3.0</td><td>3.5</td></tr><tr><td><math>L/b</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>1.0</td><td>0.2</td><td>0.47</td><td>0.60</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2.0</td><td>0.04</td><td>0.22</td><td>0.40</td><td>0.54</td><td>0.70</td><td></td></tr><tr><td>3.0</td><td></td><td>0.12</td><td>0.22</td><td>0.35</td><td>0.47</td><td></td></tr><tr><td>4.0</td><td></td><td></td><td>0.15</td><td>0.24</td><td>0.34</td><td></td></tr></table>	$\zeta$	$S_2/S_1$	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	$L/b$							1.0	0.2	0.47	0.60				2.0	0.04	0.22	0.40	0.54	0.70		3.0		0.12	0.22	0.35	0.47		4.0			0.15	0.24	0.34	
			$\zeta$	$S_2/S_1$	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5																																				
			$L/b$																																										
			1.0	0.2	0.47	0.60																																							
			2.0	0.04	0.22	0.40	0.54	0.70																																					
			3.0		0.12	0.22	0.35	0.47																																					
4.0			0.15	0.24	0.34																																								
如果用截面 $S_2$ 上的速度来计算阻力, 则 $\zeta$ 值应为表内数值的 $(S_2/S_1)^2$ 倍																																													

## 附录 B

### 螺旋槽管传热与阻力计算

(参 考 件)

**B1 符号说明**

- $b$ ——螺旋槽管节距, m;  
 $D_i$ ——螺旋槽管内直径, m;  
 $D$ ——螺旋槽管外直径, m;  
 $e$ ——螺旋槽管槽深, m;  
 $L$ ——螺旋槽管长度, m;  
 $t$ ——螺旋槽管内流体的定性温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $t'$ ——螺旋槽管进口处的流体温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $t''$ ——螺旋槽管出口处的流体温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。  
 其他符号同以前各章。

**B2 结构特性**

本标准所称的螺旋槽管是指将光管用碾压方法制作的单头螺旋槽管, 其结构特性如图 B1 所示。

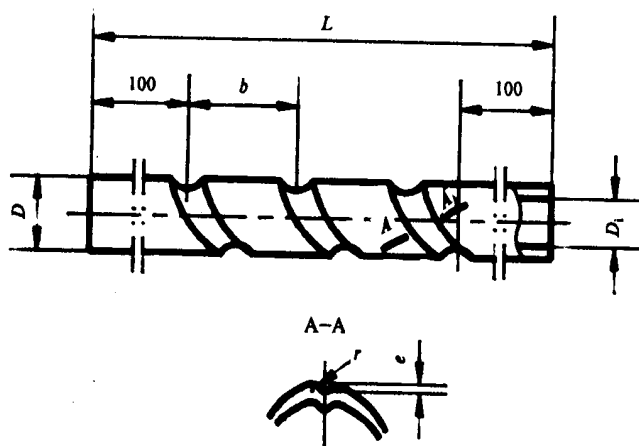


图 B1 单头螺旋槽管结构示意图

**B3 定形尺寸与定性温度**

螺旋槽管的直径按光管计算, 传热面积按下式计算:

$$A = \pi D_i L \quad \dots\dots\dots(B1)$$

螺旋槽管内流体的定性温度按下式计算:

$$t = 0.5(t' + t'') \quad \dots\dots\dots(B2)$$

**B4 螺旋槽管内的对流传热系数应根据流体的流动状态和螺旋槽管的结构特性分别按下列各式计算:**

- a. 当  $6 \times 10^3 < Re < 30 \times 10^3$ ,  $0.3778 < b/D_i < 0.9978$  以及  $0.02778 < e/D_i < 0.05566$  时:

$$\alpha_{lc} = 0.0169 \frac{\lambda}{D_i} \left(\frac{b}{D_i}\right)^{-0.08} \left(\frac{e}{D_i}\right)^{0.112} Re^{0.9206} Pr^{0.4} \quad \dots\dots\dots(B3)$$

b. 当  $30 \times 10^3 < Re < 70 \times 10^3$ ,  $0.54 < b/D_i < 1.44$  以及  $e/D_i < 0.07$  时:

$$\alpha_{ic} = 1.142 \frac{\lambda}{D_i} \left(\frac{b}{D_i}\right)^{-0.383} \left(\frac{e}{D_i}\right)^{0.478} Re^{0.606} Pr^{0.4} \dots\dots\dots(B4)$$

**B5** 螺旋槽管的摩擦阻力系数应根据流体流动状态及螺旋槽管的结构特性按下列公式计算:

a. 当  $6 \times 10^3 < Re < 30 \times 10^3$ ,  $0.5489 < b/D_i < 0.9778$ ,  $0.0444 < e/D_i < 0.0556$  以及  $5.592 < \ln(b \cdot D_i / e^2) < 5.796$  时:

$$f = \left[ \ln\left(\frac{b \cdot D_i}{e^2}\right)^2 \right]^{-5.4} \exp(8.351 Re^{-0.0122}) \dots\dots\dots(B5)$$

b. 当  $6 \times 10^3 < Re < 30 \times 10^3$ ,  $11.77 < b/e < 17.5$ ,  $0.444 < b/D_i < 0.761$  以及  $0.02778 < e/D_i < 0.0444$  时:

$$f = \frac{Re(b/e)^{-0.0427}}{2.22 \times 10^4 Re^2 + 8.72 Re + 30049} \dots\dots\dots(B6)$$

c. 当  $3 \times 10^4 < Re < 5 \times 10^4$ ,  $\frac{b}{D_i} < 1.7$ ,  $\frac{e}{D_i} \geq 0.05$  时:

$$f = 20.6 Re^{-0.078} \left(\frac{b}{D_i}\right)^{-0.85} \left(\frac{e}{D_i}\right)^{1.55} \dots\dots\dots(B7)$$

d. 当  $3 \times 10^4 < Re < 5 \times 10^4$ ,  $0.37 \leq \frac{b}{D_i} \leq 2.22$ ,  $\frac{e}{D_i} < 0.05$  时:

$$f = 23.1 Re^{-0.075} \left(\frac{b}{D_i}\right)^{-0.7} \left(\frac{e}{D_i}\right)^{1.55} \dots\dots\dots(B8)$$

e. 当  $5 \times 10^4 < Re < 8 \times 10^4$ ,  $\frac{b}{D_i} < 1.78$ ,  $\frac{e}{D_i} \geq 0.05$  时:

$$f = 20.6 Re^{-0.08} \left(\frac{b}{D_i}\right)^{-0.85} \left(\frac{e}{D_i}\right)^{1.55} \dots\dots\dots(B9)$$

f. 当  $5 \times 10^4 < Re < 8 \times 10^4$ ,  $0.37 \leq \frac{b}{D_i} \leq 2.22$ ,  $\frac{e}{D_i} < 0.05$  时:

$$f = 22 Re^{-0.08} \left(\frac{b}{D_i}\right)^{-0.7} \left(\frac{e}{D_i}\right)^{1.55} \dots\dots\dots(B10)$$

**附加说明:**

本标准由石油规划设计总院提出并归口。

本标准由江汉石油管理局勘察设计研究院负责起草。

本标准主要起草人陈积德、刘天义、张亦夫。



中华人民共和国  
石油天然气行业标准  
火筒式加热炉热力与阻力计算方法  
SY / T 0535—94

\*

石油工业出版社出版  
(北京安定门外安华里二区一号楼)  
石油工业出版社印刷厂排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

880×1230 毫米 16 开本  $2\frac{3}{4}$  印张 74 千字 印 1—2000

1996 年 1 月北京第 1 版 1996 年 1 月北京第 1 次印刷

书号: 155021·4444 定价: 8.30 元

版权专有 不得翻印