

第三章 锅炉主要计算

本章主要内容:

§ 3-1 燃料燃烧计算

§ 3-2 锅炉热损失计算

§ 3-3 锅炉本体热力计算

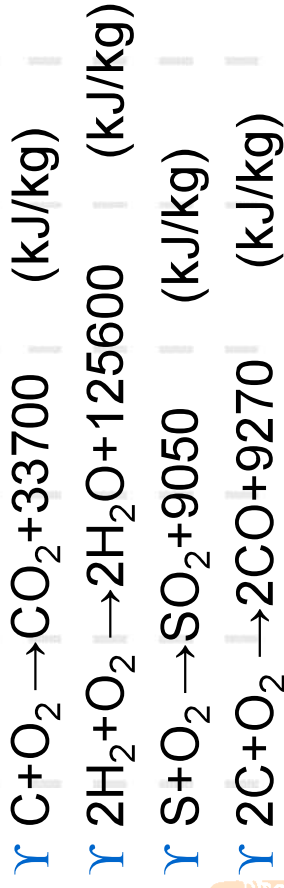
§ 3-4 锅炉房引、送风系统计算

§ 3-5 锅炉强度计算

第一节 燃料燃烧计算

1. 固体和液体燃料燃烧计算

(1) 炉内化学反应



(2) 燃烧计算方法

γ 内容：空气量（焓）、烟气量（焓）

γ 假定

- ▶ 理想气体
- ▶ 忽略空气中的惰性气体
- ▶ 1kg燃料

第一节 燃料燃烧计算

(3) 燃烧计算

γ 1kg可燃质燃烧所需的氧气的量

$$C \rightarrow \frac{22.4}{12} = 1.866 \quad \text{Nm}^3 / \text{kg}$$

$$S \rightarrow \frac{22.4}{32} = 0.7 \quad \text{Nm}^3 / \text{kg}$$

$$H \rightarrow \frac{22.4}{2} = 5.55 \quad \text{Nm}^3 / \text{kg}$$

γ 1kg氧质量换算成体积

$$O \rightarrow \frac{22.4}{32} = 0.7 \quad \text{Nm}^3 / \text{kg}$$

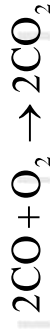
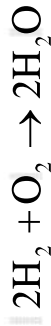
γ 1kg燃料燃烧所需的空气量

$$V_k^0 = \frac{1}{0.21 \times 100} (1.866C_{\text{ar}} + 5.55H_{\text{ar}} + 0.7S_{\text{ar}} - 0.7O_{\text{ar}})$$

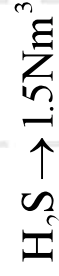
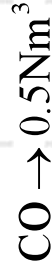
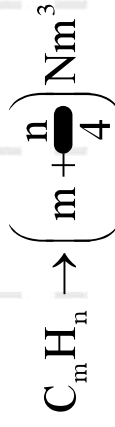
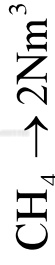
第一节 燃料燃烧计算

2. 气体燃料燃烧计算

(1) 气体燃料燃烧反应



(2) 1Nm³可燃气体燃烧所需的空气量



第一节 燃料燃烧计算

(3) 1Nm³ 气体燃料燃烧所需的空气量

$$V_k^0 = \left[\frac{1}{0.21} (0.5\text{CO} + 0.5\text{H}_2 + 1.5\text{H}_2\text{S} + \sum (m + \frac{n}{4}) \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2) \right] \text{Nm}^3 / \text{Nm}^3$$

3. 过量空气系数 α 与漏风系数 $\Delta\alpha$

(1) 过量空气系数

α 定义：实际空气量与理论空气量之比 $\alpha = \frac{V_k}{V_k^0} > 1$

α 表明燃烧设备的不完善程度

α 炉膛出口过量空气系数 α_l

▶ 锅炉燃烧工况及运行经济性的指标：(q₂+q₃+q₄) → min
▶ 设计

γ 火床炉：1.3~1.5

γ 小型煤粉炉：1.2~1.3

γ 燃油、燃气炉：1.05~1.10

▶ 运行：烟气分析

第一节 燃料燃烧计算

(2)漏风系数

γ 定义：漏入空气与理论空气量之比

γ 意义

- ▶ 表明炉墙的气密性，炉膛出口后的烟道漏风量不参与燃烧
- ▶ 降低烟气温度
- ▶ 增加烟气体积，增加电耗和 q_2

γ 平衡通风系统中在额定负荷下的推荐值



第一节 燃料燃烧计算

4. 燃烧产物烟气体量的计算

(1) 固体和液体燃料理论烟气体量的计算

$$V_y^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0$$

γ 三原子气体量

$$V_{\text{RO}_2} = 1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100} + 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100} = 1.866 \frac{K_{\text{ar}}}{100}, \quad K_{\text{ar}} = C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}$$

γ 理论水蒸气含量

- ▶ 燃料中的水分: $0.0124M_{\text{ar}}$
- ▶ 燃料中的氢: $0.11H_{\text{ar}}$
- ▶ 1Nm^3 干空气带入的水蒸汽体积: 0.0161Nm^3
- ▶ 蒸汽雾化重油: $1.24G_{\text{wh}}$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0.0124M_{\text{ar}} + 0.111H_{\text{ar}} + 0.0161V_{\text{k}}^0 + 1.24G_{\text{wh}}$$

γ 理论氮气体量

$$V_{\text{N}_2}^0 = \frac{22.4}{23} \times \frac{N_{\text{ar}}}{100} + 0.79V_{\text{k}}^0 = 0.8 \frac{N_{\text{ar}}}{100} + 0.79V_{\text{k}}^0$$

第一节 燃料燃烧计算

(2) 气体燃料理论烟气量的计算

$$V_y^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0$$

γ 三原子气体

$$V_{\text{RO}_2} = 0.01(\text{CO}_2 + \text{CO} + \sum m\text{C}_m\text{H}_n + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{S})$$

γ 理论水蒸气

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0.01(\text{H}_2 + 0.5 \sum n\text{C}_m\text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + 0.124(d_g + V_k^0))$$

γ 理论氮气

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0.79V_k^0 + 0.01N_2$$

第一节 燃料燃烧计算

(3) 实际烟气体积 V_y

理论烟气体积

过量空气中的氧气体积

$$\Delta V_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)V_k^0$$

过量空气中的氮气体积

$$\Delta V_{N_2} = 0.79(\alpha - 1)V_k^0$$

过量空气中的水蒸气的量 $\Delta V_{H_2O} = 0.0161(\alpha - 1)V_k^0$

$$V_y = V_y^0 + \Delta V_{H_2O} + \Delta V_{N_2} + \Delta V_{O_2} = V_y^0 + 1.0161(\alpha - 1)V_k^0$$

$$V_{gy} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + (\alpha - 1)V_k^0$$

5. 空气和烟气的焓值

定义：1kg (1m³) 燃料燃烧产生的烟气体积和所需的空气量从0℃加热到 θ ℃所需的热量

空气焓： $I_k = \alpha V_k^0 (c_g)_k$

烟气焓： $I_y = I_y^0 + (\alpha - 1)I_k^0 + I_{fh} = V_{RO_2} (c_g)_{CO_2} + V_{H_2O}^0 (c_g)_{H_2O} + V_{N_2}^0 (c_g)_{N_2} + (\alpha - 1)V_k^0 (c_g)_k + \frac{A_{ar} \alpha_{fh} (c_g)_{fh}}{100}$

当折算灰分 ≤ 1.44 时飞灰焓 $I_{fh} = 0$

$$V_{RO_2} = 1.866 \frac{C}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100}$$

$$V_{N_2} = \begin{cases} V_{N_2}^0 = 0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.79 V_k^0 \\ 0.79(\alpha-1) V_k^0 \end{cases}$$

$$V_{O_2} = 0.21(\alpha-1) V_k^0$$

$$V_{H_2O} = \begin{cases} 0.0161(\alpha-1) V_k^0 \\ V_{H_2O}^0 = 0.0124 M_{ar} + 0.111 H_{ar} + 0.0161 V_k^0 + 1.24 G_{wh} \end{cases}$$

第一节 燃料燃烧计算

6. 利用烟气分析结果进行的计算

- ▶ 判断燃烧工况、调整运行
- ▶ 已知：元素分析各成分 → V_k^0 、 V_{RO_2}
- ▶ 烟气分析测定容积份额：RO₂、O₂、CO、N₂
- ▶ 计算

γ 干烟气量

$$V_{gy} = \frac{V_{RO_2} + V_{CO} + V_{CH_4}}{RO_2 + CO + CH_4} = 1.866 \frac{C_{ar} + 0.375S_{ar}}{RO_2 + CO} \quad (m^3/kg)$$

▶ 固体和液体

▶ 气体

$$V_{gy} = \frac{CO_2 + CO + \sum m C_m H_n + H_2 S}{RO_2 + CO + CH_4 + \dots} \quad (m^3/m^3)$$

γ 烟气量

$$V_y = V_{gy} + V_{H_2O} = 1.866 \frac{C_{ar} + 0.375S_{ar}}{RO_2 + CO} + 0.111H_{ar} + 0.0124M_{ar} + 0.0161\alpha V_k^0 + 1.24G_{wh} \quad (m^3/kg)$$

γ CO含量

$$CO = \frac{21 - O_2 - (1 + \beta)RO_2}{0.605 + \beta} \quad (\%)$$

第一节 燃料燃烧计算

γ 燃烧特性系数
$$\beta = 2.35 \times \frac{H_{ar} - 0.126O_{ar} + 0.038N_{ar}}{C_{ar} + 0.375S_{ar}}$$

γ 完全燃烧方程式
$$RO_2 = \frac{0.21 - O_2}{1 + \beta}$$

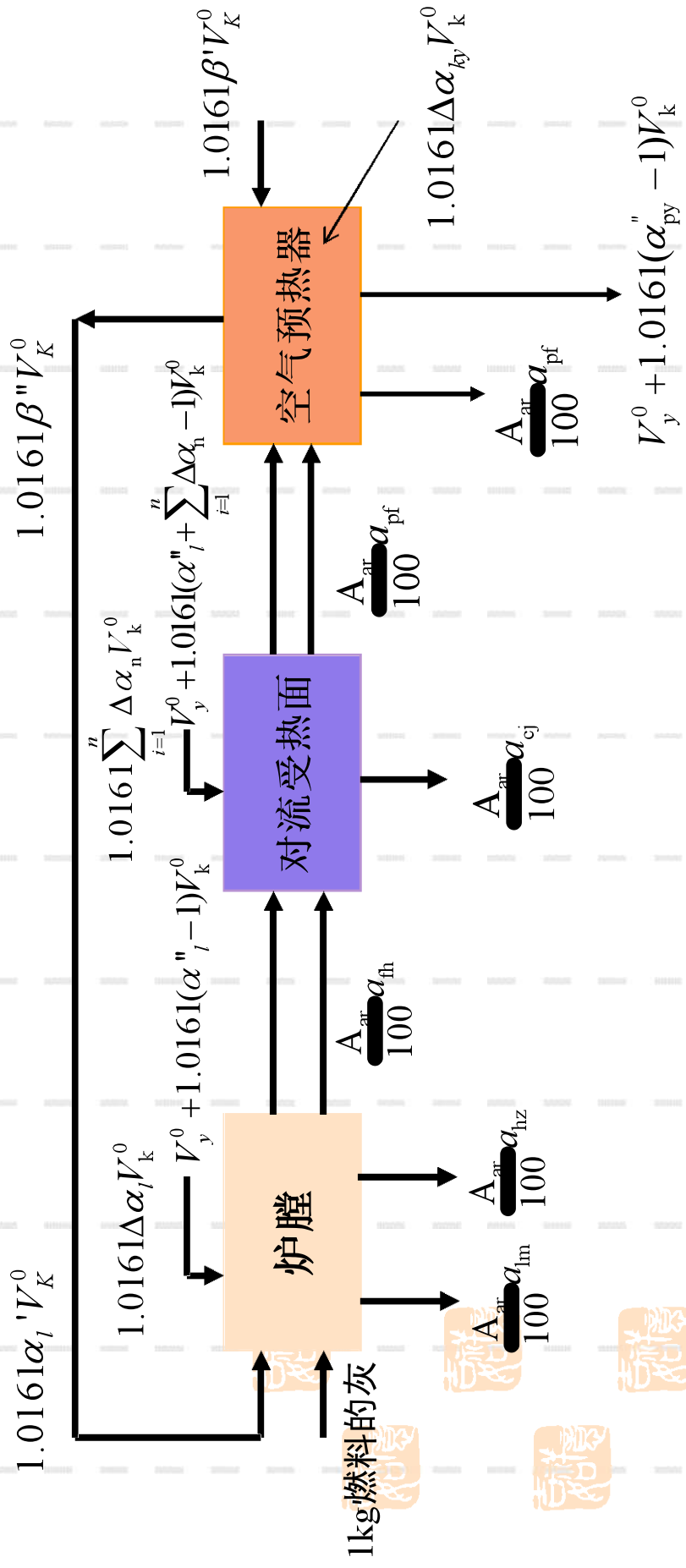
γ 烟气中最大三原子气体量
$$RO_2^{\max} = \frac{0.21}{1 + \beta}$$

γ 过量空气系数：忽略 N_{ar}

▶ 不完全燃烧
$$\alpha = \frac{1}{1 - 3.76 \times \frac{O_2 - 0.5CO}{100 - (RO_2 + O_2)}}$$

▶ 完全燃烧
$$\alpha = \frac{1}{1 - 3.76 \times \frac{O_2}{100 - (RO_2 + O_2)}} \approx \frac{21}{21 - O_2} \approx \frac{RO_2^{\max}}{RO_2}$$

煤灰风烟的物质平衡



第二节 锅炉热损失计算

1. q_4 的计算

▶ 测定量: B 、 $Q_{\text{net.v.ar}}$ 、 G_{hz} 、 G_{lm} 、 R_{hz} 、 R_{lm} 、 A_{ar}

▶ 计算

$$q_4 = \frac{32700 \times A_{\text{ar}}}{Q_{\text{net.v.ar}}} \left(\frac{a_{\text{lm}} R_{\text{lm}}}{100 - R_{\text{lm}}} + \frac{a_{\text{hz}} R_{\text{hz}}}{100 - R_{\text{hz}}} + \frac{a_{\text{fh}} R_{\text{fh}}}{100 - R_{\text{fh}}} \right)$$

2. q_3 的计算

▶ 测定量: q_4 、 C_{ar} 、 S_{ar} 、 RO_2 、 CO 、 $Q_{\text{net.v.ar}}$

▶ 计算

$$q_3 = \frac{(12640V_{\text{CO}} + 10800V_{\text{H}_2} + 35820V_{\text{CH}_4})}{Q_{\text{net.v.ar}}} \left(\frac{100 - q_4}{100} \right) \\ = \frac{235.9}{Q_{\text{net.v.ar}}} \times \frac{C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}}{RO_2 + CO} \left(\frac{100 - q_4}{100} \right) \times 100\%$$

▶ 经验公式 $q_3 = 3.2\alpha \times CO\%$

第二节 锅炉热损失计算

3. q_2 的计算

- 测定量：烟气分析、 $Q_{\text{net.v.ar}}$ 、 θ_{py}

$$q_2 = \frac{[I_{\text{py}} - \alpha_{\text{py}} V_k^0 (c\mathcal{G})_{\text{lk}}]}{Q_{\text{net.v.ar}}} \left(\frac{100 - q_4}{100} \right) \times 100\%$$

- 计算

4. q_5 的计算

- 测定量：出力 D'

$$q_5' = q_5 \frac{D}{D'}$$

- 计算

5. q_6 的计算

- 测定量：

$$q_6^{\text{hz}} = \frac{A a_{\text{ar}}^{\text{hz}}}{100 Q_{\text{net.v.ar}}} (c\mathcal{G})_{\text{hz}} \times 100\%$$

- 计算

$$q_6^{\text{lq}} = \frac{4.1868 G_{\text{lq}} (t_{\text{lq}}'' - t_{\text{lq}}')}{B Q_{\text{net.v.ar}}} \times 100\%$$

第三节 锅炉本体热力计算

1. 概述

- 设计受热面面积计算、核算烟气温度
- 水动力计算、烟风阻力计算、强度计算和工艺设计的基础
- 内容

γ 炉膛辐射受热面：斯蒂芬-波尔兹曼定律（四次方定律）

γ 对流受热面

2. 炉内辐射换热计算

- 方法：相似理论+实验研究→半经验公式
- γ 苏联：古尔维奇法（投射热和反射热）→烟煤、贫煤电站锅炉
- γ 工业部：直接算法→层燃水管锅炉

第三节 锅炉本体热力计算

➤ 传热方程

γ 火焰（烟气）放热 Q_{fr} =受热面介质吸热量 Q_{xr}

γ 热平衡方程

$$Q_{xr} = \sigma_0 a_x H_f (T_h^4 - T_b^4); q_{xr} = \frac{Q_{xr}}{H_f} = \sigma_0 a_x (T_h^4 - T_b^4) \quad (1)$$

Q_{xr} - 辐射受热面吸热量, kW

σ_0 - 绝对黑体辐射常数, $5.67 \times 10^{-11} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

q_{xr} - 热流密度, $\text{ kW}/\text{m}^2$

H_f - 有效辐射受热面积, m^2

a_x - 系统黑度

T_b - 水冷壁外表面温度, K

T_h - 火焰平均温度, K

第三节 锅炉本体热力计算

式 (1) 简化

$$q_{xr} = \frac{\sigma_0 T_h^4}{1} + \frac{m}{a_x} \quad (2)$$

综合系数m

锅炉工作压力(MPa)	0.7	1.0	1.3	1.6	2.5	3.9
m	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.21

第三节 锅炉本体热力计算

火焰（烟气）放热 Q_{fr}

$$Q_{fr} = \frac{\varphi B_j V_y \bar{C}_y (T_0 - T_1'')}{3600}; q_{fr} = \frac{\varphi B_j V_y \bar{C}_y (T_0 - T_1'')}{3600 H_f} \quad (3)$$

B_j - 计算耗煤量, kg/h

φ - 保热系数

V_y - 烟气体积, Nm^3/kg

\bar{C}_y - 烟气在 T_0 和 T_1'' 区间的平均比热, $\text{kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot \text{K})$

T_0 - 理论燃烧温度, K

T_1'' - 炉膛出口烟气温度, K

式中 $V_y \bar{C}_y = \frac{Q_1 - I_1''}{\theta_0 - \theta_1''} = \frac{Q_1 - I_1''}{T_0 - T_1''} \quad (4)$

Q_1 - 炉膛有效放热量, kJ/kg ; $Q_1 = Q_r \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_k$

I_1'' - 炉膛出口烟焓, kJ/kg

第三节 锅炉本体热力计算

合并(2)(3)式得

$$\frac{\varphi B_{l_y} \bar{C}_y}{3600 H_f \sigma_0 a_x} \left(\frac{1}{a_x} + m \right) = \frac{T_h^4}{T_0 - T_l''} \quad (5)$$

令 $B_0 = \frac{\varphi B_{l_y} \bar{C}_y}{3600 H_f \sigma_0 T_0^3} = \frac{4.9 \times 10^6 \varphi B_{l_y} \bar{C}_y}{H_f T_0^3}$ → 波尔兹曼准则数

式(5)变形为: $B_0 \left(\frac{1}{a_x} + m \right) = \frac{\Theta_h^4}{1 - \Theta_l^4} \quad (6)$

其中 $\Theta_h = T_h / T_0, \Theta_l = T_l'' / T_0$ → 无因此温度

炉膛系统黑度: $a_x = \frac{1}{\frac{1}{a_b} + x \frac{1}{1 - (1 - a_h)(1 - \rho)}} = \frac{1}{\frac{1}{a_b} + \frac{x}{1 - (1 - a_h)(1 - \rho)}}$

- a_b - 水冷壁表面黑度, 取0.8
- a_h - 火焰黑度
- x - 炉膛水冷度, 即平均角系数
- ρ - 炉排面与炉墙面积之比

第三节 锅炉本体热力计算

3. 炉膛传热计算重要参数

T_0 理论燃烧温度

▶ 炉膛有效放热量 Q_1 全部用于加热烟气使其能达到的最高温度

T_1 炉膛出口烟气温度的”

- ▶ 辐射换热热流密度=对流换热热流密度→经济性
- ▶ 燃烧工况
- ▶ 对流受热面结焦, $<t_2-100^{\circ}\text{C}$
- ▶ 过热器壁温
- ▶ 高温腐蚀
- ▶ 层燃 $1100\sim 1150^{\circ}\text{C}$; 燃油、燃气 $1200\sim 1400^{\circ}\text{C}$

第三节 锅炉本体热力计算

► 炉膛传热计算步骤

γ 炉膛几何特性计算

γ 计算 Q_p ，求得 T_0

γ 假定炉膛出口烟气温 T_1 ”，计算 $V_y C_y$

γ 计算 a_{h, a_x}

γ 计算 $B_0 \left(\frac{1}{a_x} + m \right)$

γ 查表得无因次温度 $\rightarrow T_1$ ”

γ 校验炉膛出口烟气温偏差，若 $<100^\circ\text{C}$ ，则合格

γ 核算 q_f 、 q_R 、 q_V

第三节 锅炉本体热力计算

3. 对流换热计算

➤ 传热方程

$$Q_{cr} = \frac{HK\Delta t}{B_j} \quad \text{kJ/kg};$$

$$Q_{fr} = \varphi(I' - I'' + \Delta\alpha I_K^0)$$

$$Q_{xr} = \left\{ \frac{D'(i'' - i')}{B_j} - Q_{gr}^f \right.$$

$$\left. Q_{xr} = \left(\beta_k'' + \frac{\Delta\alpha_{kv}}{2} \right) (I_k^{0''} - I_k^{0'}) \right\}$$

$$q = \frac{Q}{H} = \frac{K\Delta t}{B_j}$$

kJ/kg

kJ/kg(过热器、省煤器)

kJ/kg(空气预热器)

φ —保热系数

Q —对流受热面吸热量 kW

H —受热面积, m^2

K —总传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

Δt —烟气与受热介质之间的平均温度, $^\circ\text{C}$

q —热流密度, kW/m^2

第三节 锅炉本体热力计算

► 传热系数

忽略管壁热阻无水垢

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{1h}} + \frac{1}{\lambda_h} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \quad [\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$$

概念

灰污系数：与烟速、受热面节距、运行工况有关

$$\varepsilon = \frac{1}{K} - \frac{1}{K_0}$$

热有效系数：与积灰程度和受热面型式有关

$$\psi = \frac{K}{K_0}$$

第三节 锅炉本体热力计算

蒸汽过热器: $\psi = 0.60 \sim 0.70$

钢管省煤器、对流管束: $\psi = 0.55 \sim 0.66$

管式空气预热器: $\psi = 0.75 \sim 0.8$

对流受热面的传热系数

汽化受热面、钢管省煤器: $K = \psi\alpha_1$

蒸汽过热器: $K = \psi\alpha_1 / (1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2})$

空气预热器: $K = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\psi\alpha_1\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$

铸铁省煤器 K 直接查取

第三节 锅炉本体热力计算

对流放热系数 α

蒸汽过热器、对流管束: $\alpha_1 = \alpha_d + \alpha_f$

烟管、尾部受热面: $\alpha_1 = \alpha_d$

横向冲刷顺列管束: $\alpha_d = 0.00535 C_\omega C_s C_c \omega^{0.65} / d^{0.35}$

横向冲刷错列管束: $\alpha_d = 0.00605 C_\omega C_s C_c \omega^{0.6} / d^{0.4}$

纵向冲刷: $\alpha_d = 0.00279 C_\omega C_c \omega^{0.8} / d^{0.2}$

辐射换热: $\alpha_f = 5.1 \times 10^{-11} a_y T_y^3 (1 + \tau^2) (1 + \tau)$

流速计算

水和蒸汽的流速: $\omega = D \sqrt{v} / 3600 f$

空气流速: $\omega_k = \frac{\beta B V_k^0}{3600 F} \times \frac{T_k + 273}{273}$

烟气流速: $\omega_y = \frac{B V_y}{3600 F} \times \frac{\theta_y + 273}{273}$

第三节 锅炉本体热力计算

- ▶ 平均温差
 - γ 逆流温差、顺流温差
 - γ 混合流动温差
- ▶ 对流传热步骤
 - γ 假定受热面出口烟气温度，查取出口烟气焓值，计算 Q_{fr}
 - ▶ 过热器、省煤器、空气预热器借助吸热方程求 Δt
 - ▶ 防渣管、对流传束工质侧温度取饱和温度
 - γ 计算烟气和介质的平均温度→平均流速
 - γ 计算对流传热系数和辐射传热系数
 - γ 计算 α_1 和需要的 α_2
 - γ 计算K
 - γ 计算 Q_{cr}
 - γ 误差

第四节 锅炉房引、送风系统计算

■ 能量方程

$$\Delta H = h_{z_1} - h_{z_2} = \Delta h_{sl} + \frac{\rho(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2} - (\rho_k - \rho)g(z_2 - z_1)$$

- ▶ 水力损失 Δh_{sl} : 沿程摩擦、横向冲刷、局部
- ▶ 速度损失 Δh_{sd} : 截面变化、介质温度 ≈ 0
- ▶ 自生风 h_{zs} : 密度差、高度差

■ 降压计算的基本方法

- ▶ 水力损失 $\Delta h_{sl} = \Delta h_{mc} + \Delta h_{jb} + \Delta h_{hx}$

$$\Delta h_{mc} = \lambda \cdot \frac{l}{d_{dl}} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2}$$

$$\Delta h_{jb} = \xi_{jb} \frac{\rho \omega^2}{2}$$

$$\Delta h_{hx} = \xi_{hx} \frac{\rho \omega^2}{2}$$

第四节 锅炉房引、送风系统计算

阻力系数

➤ 沿程摩擦阻力系数 $\zeta = \lambda \frac{l}{d_{di}}$

- 局部阻力系数：截面变化、三通、弯头、管束转弯等
- 横向冲刷管束：管排数、雷诺数

γ 横向冲刷顺列（错列）

γ 斜向冲刷

γ 横向冲刷鳍片管铸铁省煤器

- 自生风力

$$h_{zs} = \pm Hg \left(1.2 - \rho_y^0 \frac{273}{273 + \theta_y} \right)$$

锅炉烟道阻力计算

- 包括本体阻力、除尘器、烟道、烟囱
- 热力计算之后、额定负荷
- 烟气平均压力 $\sum \Delta h \leq 3000\text{Pa}$, $b_y = b$; or, $b_y = \left(b - \frac{\sum \Delta h}{2} \right)$
- 烟温、烟速取各段平均值，除尘器前 θ_{py} 、 V_{py} ；之后 θ_{yf} 、 V_{yf} ；
- 线图结果需进行受热面积灰、烟气灰浓度、压力、密度修正

第四节 锅炉房引、送风系统计算

➤ 各段烟道计算注意事项

γ 炉膛：真空度20~40Pa

γ 过热器和对流管束：流道中心线；顺列、错列分界处算前面

γ 铸铁省煤器：（3-187）经验公式

γ 空气预热器：非等温流→速度损失

γ 本体后烟道 $g_{yf} = \frac{\alpha_{py} g_{pv} + \Delta\alpha t_{lk}}{\alpha_{py} + \Delta\alpha}$; $V_{yf} = B_j (V_{py} + \Delta\alpha V_k^0) \frac{g_{yf} + 273}{273}$

γ 除尘器：查取样本

γ 烟囱： $\sum \Delta h_{yc} = \Delta h_{mc} + \Delta h_{jb} + \Delta h_{ck} + \Delta h_{mc} = \lambda \frac{H \rho \omega_{pi}^2}{d_{pj}^2}$; $\Delta h_{jb} \approx \frac{\lambda \rho \omega_{pi}^2}{8i} \frac{\rho \omega_{ck}^2}{2}$; $\Delta h_{ck} = 1.1 \frac{\rho \omega_{ck}^2}{2}$

➤ 烟道全压降

$$\Delta H^y = \Delta H_{sl}^y + h_q'' - H_{zs}^y$$

$$\Delta H_{sl}^y = \left[\sum \Delta h_1 (1 + \mu) + \sum \Delta h_2 \right] \frac{\rho_y^0}{1.293} \times \frac{101325}{b_y}$$

第四节 锅炉房引、送风系统计算

4.风道阻力计算

- 内容：冷风道、热风道、空气预热器、燃烧设备及料层阻力
- 冷风量和热风量的计算

$$V_{lk} = BV_k^0 (\alpha_l'' - \Delta\alpha_l + \Delta\alpha_{ky}), V_{rk} = BV_k^0 (\alpha_l'' - \Delta\alpha_l) \frac{273+t_{rk}}{273}$$

- 冷热风道：风速 $<10\text{m/s}$, $\Delta h_{mc}=0$

空气预热器

- 燃烧设备及料层

γ 链条炉：800~1000Pa

γ 抛煤机：500~600Pa

γ 往复炉：600Pa

- 风道全压降

$$\Delta H^k = \Delta H_{sl}^k - h_l' - H_{zs}^k = \sum \Delta h \frac{101325}{b_k} - h_l'' - 0.95Hg - H_{zs}^k$$

第四节 锅炉房引、送风系统计算

5. 烟囱的计算：烟囱高度、上口直径、烟温

➤ 高度

- γ 机械通风：燃煤锅炉满足排放要求，《锅炉大气污染物排放标准》GWPB3-99，只设一个；燃气（轻柴油）满足环境影响报告，≦8m
- γ 自然通风：自生风克服阻力，满足通风要求
- 烟温：机械通风不计

➤ 上口直径

$$d_2 = \sqrt{\frac{B_i n V_v (g_2 + 273)}{3600 \times 273 \times 0.785 \times \omega_2}}$$

6. 风机的选择计算

- 风机流量的裕量系数1.10
- 风机扬程的裕量系数1.20
- 风机性能参数工作条件

γ 鼓风机：20℃空气

γ 引风机：200℃空气

γ 标况下空气密度1.293kg/m³；烟气密度1.34kg/m³

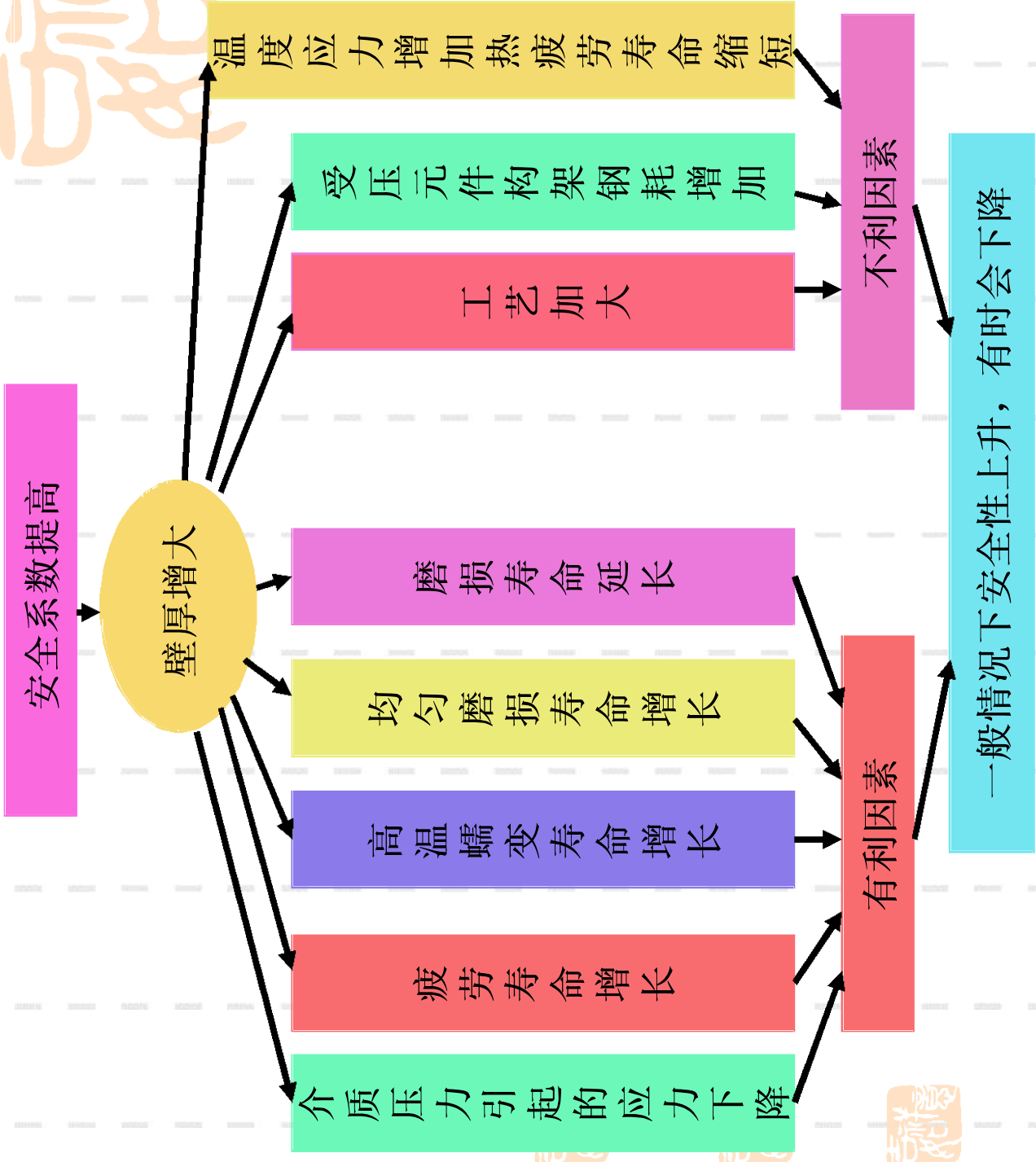
第五节 锅炉强度计算

1. 概述

- ▶ 锅炉强度计算的目的
- ▶ 锅炉受压元件的强度理论基础
- ▶ 锅炉受压元件可能的失效形式
- ▶ 本章主要学习的内容

2. 强度计算的目的

- ▶ 工作条件恶劣（腐蚀、高温、高压）
- ▶ 安全可靠、经济性
- ▶ 标准：《水管锅炉受压元件强度计算》（GB9222-88）
《锅壳锅炉受压元件强度计算》（GB/T16508-1996）



第五节 锅炉强度计算

3. 锅炉受压元件强度计算的基本概念

➤ 安全系数与许用应力

γ 要求：屈服极限（强度极限）、蠕变极限（持久极限）

γ 蠕变：高温恒压、塑变↑

γ 持久强度：在规定时间内（10⁵h）不发生蠕变破裂的最大应力

γ 我国强度指标

➤ 计算温度时的屈服限 σ'_s

➤ 常温（20℃）的抗拉强度 σ'_b

➤ 计算温度时的持久强度 σ'_D

γ 安全系数：材料本身的强度特性与实际元件真实的强度特性间的差异（裕度）， $n_s=1.5$ 、 $n_s=2.7$ 、 $n_D=1.5$

γ 基本许用应力：

$$[\sigma]_j \leq \left[\frac{\sigma'_s}{n_s}, \frac{\sigma'_b}{n_b}, \frac{\sigma'_D}{n_D} \right]_{\min}$$

γ 许用应力 $[\sigma] = \eta[\sigma]_j$ ； η —考虑元件型式和工作条件后的修正³⁵

第五节 锅炉强度计算

▶ 计算壁温

γ 确定 $[\sigma]$ 依据，取最高温处内外壁平均温度

γ $t_{bi} \leq 250^\circ\text{C}$

▶ 计算压力：表压MPa

$P = P_g + \Delta P_a$; $\Delta P_a = 0.02(P_e < 1.27\text{MPa})$ or $\Delta P_a = 0.04P_e$ ($P_e = 1.27 \sim 3.82\text{MPa}$)

$P_g = P_e + \Delta P_z + \Delta P_{sz}$

4. 强度计算公式

▶ 受力分析： σ_1 、 σ_2 、 σ_3

▶ 第三强度理论： $\tau_{\max} \leq [\tau]$; $[\tau] = \frac{[\sigma]}{2}$

▶ 未减弱圆筒形元件强度计算公式：

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \frac{[\sigma]}{2}$$

$$S_{wl} \geq \frac{PD_n}{2[\sigma] - P}; \text{ or } S_{wl} \geq \frac{PD_w}{2[\sigma] + P}$$

第五节 锅炉强度计算

γ 取用壁厚 $S \geq S_{\min} = S_{wl} + C = \frac{PD_w}{2[\sigma] + P} + C; [P] = \frac{2[\sigma]S_y}{D_w - S_y}$

γ 应用条件 $\beta = \frac{D_w}{D_n}; \beta \leq 1.2, \beta \leq 1.5, \beta \leq 2.0$

被减弱的圆筒形元件的强度计算

γ 孔桥减弱

- ▶ 无减弱判定 $t_0 = d_{pj} + 2\sqrt{(D_n + S)S}$
- ▶ 横向 φ' 、纵向 φ 、斜向 φ_d

γ 焊缝减弱 φ_h

γ 取值 $\varphi_{\min} = [\varphi, 2\varphi', \varphi_d, \varphi_h]_{\min}$

γ 强度计算公式

▶ 锅筒 $S_L = \frac{PD_n}{2\varphi_{\min}[\sigma] - P}$

▶ 管子和集箱 $S_L = \frac{PD_w}{2\varphi_{\min}[\sigma] + P}$

▶ 取用壁厚 $S \geq S_{\min} = S_L + C$

第五节 锅炉强度计算

附加壁厚 $C = C_1 + C_2$

- ▶ 腐蚀减薄 $C_1 = 0.5\text{mm}$
- ▶ 负偏差 + 工艺减薄量
- ▶ 壁厚限制 $S \geq 6\text{mm}$; 胀接 $\geq 12\text{mm}$

▶ 椭圆形封头

计算公式

$$\text{理论壁厚: } S_L = \frac{PDY}{2\phi[\sigma] - P}$$

$$\text{封头系数: } Y = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{D_n}{2h_n} \right)^2 \right]$$

$$\text{取用壁厚: } S \geq S_{\min} = S_L + C$$

$$\text{附加壁厚: } C = C_1 + C_2$$

开孔要求

第五节 锅炉强度计算

▶ 圆形平端盖

理论计算壁厚: $S_{L\min} = KD_n \sqrt{\frac{P}{[\sigma]}}$

取用壁厚: $S_1 \geq S_{L\min}$

最高计算压力: $[P] = \left(\frac{S_1}{KD_n} \right)^2 [\sigma]$

▶ 减弱处的加强

γ 未加强孔的最大开孔直径

$$[d] = 8.13 \sqrt{D_n S_y (1 - \varphi_s)} ; \varphi_s = \frac{PD_n}{(2[\sigma] - P)S_y} ; \varphi_s > 0.4 \text{加强}$$

γ 单孔的加强

▶ 等截面积加强原则 $F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \geq F$

▶ 加强所需面积的2/3布置在离孔边1/4孔径的范围内

第五节 锅炉强度计算

γ 孔桥的加强

➤ 管接头加强允许的最小孔桥减弱系数 $[\varphi] < \frac{4}{3}\varphi_w$

➤ 最大允许当量直径

纵向孔桥: $[d]_d = (1 - [\varphi])t$

横向孔桥: $[d]_d = \left(1 - \frac{[\varphi]}{2}\right)t'$

斜向孔桥: $[d]_d = \left(1 - \frac{[\varphi]}{K}\right)t''$

➤ 加强原则

$$F_1 + F_2 \geq \left(\frac{F}{S_0} - [d]_d\right) S_y$$

