

# 第十三章 锅炉热力计算和整体布置

- 第一节 炉膛传热计算
- 第二节 对流及半辐射受热面的热力计算
- 第三节 锅炉热力计算的程序及方法
- 第四节 锅炉整体布置及主要设计参数的选择

# 第一节 炉膛传热计算

# 一、炉内传热计算的相似理论方法

相似理论：忽略5%对流热；炉膛水冷壁壁面连续；用平均参数表示炉内火焰辐射特性参数；以炉膛出口烟温为定性温度；

1. 烟气  
$$Q = \varphi B_j (Q_1 - H_1'') = \varphi B_j V C_{pj} (T_{11} - T_1'') \quad (\text{kW})$$

2. 炉膛辐射  
$$Q = a_{xt} F_1 \sigma_0 (T_{hy}^4 - T_b^4) = F_1 \psi a_1 \sigma_0 T_{hy}^4 \quad (\text{kW})$$

## 3. 炉膛传热的计算

根据炉内温度场分布引入经验公式

$$T_{hy} = f(T_{11}, T_1'')$$

对以上三个公式进行整理得炉膛出口烟气温度的计算公式

$$g_1'' = T_1'' - 273 = \frac{T_{11}}{M \left( \frac{a_1 \sigma_0 \psi F_1 T_{11}^3}{\varphi B_j V C_{pj}} \right)^{0.6} + 1} - 273$$

## 二、炉内传热计算的有关参数与系数确定

### (一) 理论燃烧温度 $T_{ll}$

#### 1. 概念:

绝热情况下，每kg计算燃料量送入炉膛的有效热量 $Q_l$ 全用于加热燃料燃烧产生的烟气，所得温度理论燃烧温度。

## 2.计算

$$Q_l = Q_r \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_k - Q_{wr} \quad (\text{kJ/kg})$$

$$Q_k = (\alpha_l'' - \Delta\alpha_l - \Delta\alpha_{zf}) I_{rk}^0 + (\Delta\alpha_l + \Delta\alpha_{zf}) I_{lk}^0 \quad (\text{kJ/kg})$$

由计算所得的 $Q_l$ 查烟气温焓表得 $T_{ll}$

(二) 烟气平均热容量  $VC_{pj} = \frac{Q_l - H_l''}{T_{ll} - T_l''}$

(三) 炉膛结构特性 $V_1$ 及 $F_1$

- $V_1$ 边界规定：出口、炉顶、炉底、墙壁
- $F_1$ 为包覆炉膛有效容积的所有边界的表面积之和

## (四) 水冷壁热有效系数

1. 概念：在火焰辐射到炉壁的热量中，水冷壁最终吸收的热量所占的份额，即有

$$\psi = Q_{\text{吸}} / Q_{\text{hy}}$$

### 2. 计算

■ 水冷壁角系数  $x$  :

$$x = Q_{\text{管}} / Q_{\text{hy}}$$

■ 水冷壁污染系数  $\zeta$  :

$$\zeta = Q_{\text{吸}} / Q_{\text{管}}$$

■ 水冷壁热有效系数  $\psi$  :

$$\psi = Q_{\text{吸}} / Q_{\text{hy}} = \left( Q_{\text{管}} / Q_{\text{hy}} \right) \times \left( Q_{\text{吸}} / Q_{\text{管}} \right) = X \zeta$$

## (五) 系数 $M$

1.意义： 表征炉内温度分布特性，其数值取决于炉内最高火焰温度的相对位置  $X_{\max}$  以及燃料和燃烧方式。

2.计算

$$M = A - B(X_{\max} + \Delta x)$$

## (六) 炉膛黑度 $a_l$

1.意义： 用来表征炉内火焰辐射特性的系数，取决于火焰黑度和水冷壁的热有效系数



2.计算:

$$a_l = \frac{a_{hy}}{a_{hy} + (1 - a_{hy})\psi}$$

- 对于燃煤炉，辐射介质为：三原子气体（不发光）、焦炭（发光）、飞灰颗粒（发光）

$$a_{hy} = 1 - e^{-kps}$$

$$k = k_q r + k_h \mu_h + k_j x_1 x_2$$

$$s = 3.6 \frac{V_l}{F_{bf}}$$

- 气体或液体燃料，辐射介质为：三原子气体（不发光）、炭黑粒子（发光）

$$a_{hy} = ma_{fg} + (1 - m)a_q$$

$$a_{fg} = 1 - e^{-k_{fg}ps} = 1 - e^{-(k_q r + k_{th})ps}$$

$$a_q = 1 - e^{-k_q rps}$$

## 二、炉膛传热计算方法

### 1.分类:

- 设计计算：已知锅炉主要特性参数  $g_i''$  ，确定炉膛结构尺寸
- 校核计算：已知炉膛结构尺寸，求得锅炉特性参数  $g_i''$  ，校核设计好的炉膛能否将高温烟气冷却到选定的炉膛出口温度

### 2.方法:

利用炉膛出口烟温计算公式，采用逐次逼近法进行计算

先假设一个  $g_i''$  ，计算公式中各项，然后带入公式求得  $g_i''$  ，若求得值与假设值之差小于等于  $\pm 100^\circ\text{C}$  ，计算结束。

### 三、炉膛局部热负荷计算

1. 炉膛辐射吸热量  $Q_f = \varphi(Q_l - H_l'')$  (kJ/kg)

2. 炉内平均热负荷  $q_f = \frac{B_j Q_f}{H_l}$  (kW/m<sup>2</sup>)

3. 炉内局部热负荷  $q_{fg} = \eta_g q_f$  (kW/m<sup>2</sup>)

当炉膛出口为屏式受热面时，考虑屏间烟气向炉膛的反辐射，炉膛出口截面的热负荷应乘上修正系数  $\beta$

$$q_{fp} = \beta q_{fg} \quad (\text{kW/m}^2)$$

## 第二节 对流及半辐射受热 面的热力计算

# 一、对流传热计算的基本公式

## 1.基本公式

- 烟气放热量公式为

$$Q_{df} = \varphi(H' - H'' + \Delta\alpha H_{lk}^0) - Q_d^{fj} \quad (\text{kJ/kg})$$

- 工质吸热量公式

$$Q_{dx} = \frac{D}{B_j}(h'' - h') - Q_f \quad (\text{kJ/kg})$$

- 传热方程式

$$Q_{dc} = \frac{k\Delta t F}{B_j} \quad (\text{kJ/kg})$$

## 2.基本方法（校核计算）

- 假设烟气出口温度，查得出口烟焓，计算 $Q_{df}$
- 由 $Q_{df}=Q_{dx}$ ，计算工质进(出)口焓，查得进(出)口温度
- 由烟气、工质进出口温度计算 $\Delta t$ 、 $K$ 、 $F$ ，求得 $Q_{dc}$ ；
- 校核误差

$$\Delta = \frac{Q_d - Q_{dx}}{Q_d} \leq \pm 2\%$$

## 3.特殊情况说明

- 后屏：

$$Q_d^{fj} = \phi(H' - H'' + \Delta\alpha H_{lk}^0) \frac{F_{fj}}{F_p + F_{fj}}$$

$$Q_f = [ Q'_f - (Q''_f + Q''_p) ] \frac{F_p}{F_p + F_{fj}}$$

$$Q'_f = \frac{q_{fp} F_l''}{B_j}$$

$$Q''_f = \frac{Q'_f (1-a)x'_p}{\beta}$$

$$Q''_p = 5.67 \times 10^{-11} \frac{a F_p'' T_{pj}^4 \xi_r}{B_j}$$

■屏后过热器： $Q_d^{fj}$  的计算方法同屏， $Q_f = (Q'_f + Q''_p) \frac{F_{gr}}{F_{gr} + F_{fj}}$

■再热器及低过： $Q_d^{fj}$  的计算方法同屏， $Q_f = 0$

■省煤器：若此区域不再有包覆过热器，则  $Q_d^{fj} = 0$ ， $Q_f = 0$

■空气预热器：工质吸热方程为

$$Q_{ky} = \left( \beta_{ky}'' + \frac{\Delta \alpha_{ky}}{2} \right) \left( H_{ky}^0'' - H_{ky}^0' \right)$$

$$\beta_{ky}'' = \alpha_l'' - \Delta \alpha_l - \Delta \alpha_{zf}$$



## 二、传热系数

计算通式

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_h}{\lambda_h} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_g}{\lambda_g} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}))$$

上式中， $1/\alpha_1$ 、 $\delta_h/\lambda_h$ 、 $\delta/\lambda$ 、 $\delta_g/\lambda_g$ 、 $1/\alpha_2$  分别为烟气至管壁、烟气侧积灰层、管壁、工质侧水垢层和管壁至工质的传热热阻。 $\delta/\lambda \approx 0$   $\delta_g/\lambda_g \approx 0$

简化式：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_h}{\lambda_h} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

# 1. 污染系数、热有效系数与利用系数

(1) 污染系数  $\varepsilon$  (燃烧固体燃料、烟气横向冲刷错列管束)

➤ 定义式:  $\varepsilon = \delta_h / \lambda_h = 1/k - 1/k_0$

➤ 计算式:  $\varepsilon = C_d C_{kl} \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon$  (m<sup>2</sup>·°C) /kW

式中各项查相关图表

(2) 热有效系数  $\psi$  (固体燃料、烟气横向冲刷顺列管束; 液体、气体燃料所有受热面; 工业锅炉的锅炉管束)

➤ 定义为灰污管壁与清洁管壁传热系数的比值。

➤ 数值确定查相关图表

### (3) 利用系数:

- 考虑由于烟气对受热面的冲刷不完全而使吸热减少的修正系数。
- 对于现代锅炉横向冲刷的管束，可取  $\xi = 1$ ；对于大多数混合冲刷的管束，可取  $\xi = 0.95$ 。
- 屏式过热器的利用系数  $\xi$  是考虑烟气对屏冲刷不完全的修正系数，其值按烟气流速由图13-8查取。
- 当烟气流速  $w_y \geq 4\text{m/s}$  时，取  $\xi = 0.85$ 。管式空气预热器的  $\xi$  由表13-4查得。

引入污染系数、热有效系数和利用系数后，各受热面的传热系数可分别按照以下各式计算，量纲均为kW/(m<sup>2</sup>.°c)

## (1) 对流过热器

- 当燃用固体燃料，管束为错列布置时

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}}$$

- 当燃用固体燃料，管束为顺列布置，以及燃用气体燃料和重油（包括错列和顺列布置）时

$$K = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

## (2) 省煤器、直流炉过渡区、蒸发受热面以及超临界锅炉的对流过热器

- 当燃用固体燃料，管束为错列布置时

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \varepsilon}$$

- 当燃用固体燃料，管束为顺列布置以及燃用气体燃料和重油时

$$K = \psi \alpha_1$$

### (3) 对于屏式过热器

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \left(1 + \frac{Q_f}{Q_d}\right) \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \quad \text{kW/ (m}^2\cdot\text{°C)}$$

### (4) 对于管式空气预热器

$$K = \xi \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad \text{kW/ (m}^2\cdot\text{°C)}$$

### (5) 对于回转式空气预热器

$$K = \frac{\xi C}{\frac{1}{x_y \alpha_1} + \frac{1}{x_k \alpha_2}} \quad \text{kW/ (m}^2\cdot\text{°C)}$$

## 2. 烟气对管壁的放热系数 $\alpha_1$

$$\alpha_1 = \xi(\alpha_d + \alpha_f)$$

### ■ 对流放热系数

- (1) 横向冲刷顺列布置管束 (13-65) 式
- (2) 横向冲刷错列布置管束 (13-67) 式
- (3) 纵向冲刷 (13-68) 式
- (4) 回转式空气预热器对流放热系数 (13-69) 式

## ■ 烟气辐射放热系数

$$\alpha_f = 5.1 \times 10^{-11} a T^3 \frac{1 - (T_b / T)^n}{1 - (T_b / T)} \text{ kW/ (m}^2 \cdot \text{°C)}$$

注意：

1) 含灰气流  $n=4$ ，不含灰气流  $n=3.6$ ；烟气黑度计算中辐射介质对于含灰气流为三原子气体和灰粒，不含灰气流只有三原子气体；

2) 受热面之前或之间有空烟室存在时，辐射系数要修正



### 3.管壁对工质的对流放热系数 $a_2$

- 管内纵向冲刷时（省煤器、水冷壁、过热器、再热器）：用公式13-68计算
- 管外横向冲刷时（管式空预器）：  
若管束顺列排列，用公式13-65计算；  
若管束错列排列，用公式13-67计算。

### 三、传热温差计算

#### 1. 简单流动（纯顺流、纯逆流）：

当  $\Delta t_d / \Delta t_x < 1.7$  时，
$$\Delta t = \frac{\Delta t_d - \Delta t_x}{\ln \frac{\Delta t_d}{\Delta t_x}} \quad (^\circ\text{C})$$

当  $\Delta t_d / \Delta t_x > 1.7$  时 
$$\Delta t = \frac{\Delta t_d - \Delta t_x}{2} = \vartheta_{pj} - t_{pj} \quad (^\circ\text{C})$$

#### 2. 复杂流动（混合流）：

$$\Delta t = \psi \Delta t_{nl} \quad (^\circ\text{C})$$

当  $\Delta t_{sl} / \Delta t_{nl} > 0.92$  时 
$$\Delta t = \frac{\Delta t_{sl} + \Delta t_{nl}}{2} \quad (^\circ\text{C})$$

## 四、对流传热面积和流速的确定

### 1. 对流传热面积

- 凝渣管束、锅炉管束、省煤器、过热器、再热器，用管外壁计算面积
- 空气预热器：管子内、外表面积的算术平均值作为传热面积。
- 屏：按照平壁面积（由屏最外圈管子的外轮廓线围成的平面面积）的2倍，再乘上角系数 $x$ 进行计算。

## 2. 对流受热面流体流速的确定

### ■ 烟气流速的计算:

$$w_y = \frac{B_j V_y (\vartheta_{pj} + 273)}{273F} \quad \text{m/s}$$

### ■ 空气流速的计算:

$$w_k = \frac{B_j \beta V^0 (t_{pj} + 273)}{273F} \quad \text{m/s}$$

### ■ 水和蒸汽流速计算:

$$w_q = \frac{D\bar{v}}{F} \quad \text{m/s}$$

## 流通截面积计算:

- 当介质横向冲刷光滑管束时, 管排中心线平面上的实际流通截面积为

$$F = ab - n_1 ld \quad \mathbf{m^2}$$

- 对于管内纵向冲刷, 流通截面积为

$$F = n \frac{\pi d_n^2}{4} \quad \mathbf{m^2}$$

- 管束间纵向冲刷时, 流通截面积为

$$F = ab - n \frac{\pi d^2}{4} \quad \mathbf{m^2}$$

# 第三节 锅炉热力计算的程序和方法

热力计算的分类：

## ■ 设计计算：

**已知**锅炉额定参数和燃料特性，**确定**锅炉各个受热面的结构特性和传热面积及整体布置。

## ■ 校核计算：

**已知**锅炉结构参数、传热面积和热力系统的基础上，**确定**各个受热面交界处的特性参数，以校核锅炉在非设计工况下运行的经济指标，检验改进锅炉结构参数后的效果。

# 一、辅助计算

1. 燃料理论燃烧计算： $V^0$ 、 $V_{N_2}$ 、 $V_{CO_2}$ 、 $V_{SO_2}$ 、 $V_{H_2O}^0$

2. 烟气特性计算：各受热面的  $\alpha'$ 、 $\alpha''$ 、 $\alpha_{pj}$ 、 $V_{pj}$ 、  
 $V_{H_2O}$ 、 $V_{RO_2}$ 、 $r_{H_2O}$ 、 $r_{RO_2}$ 、 $\mu_{fh}$  等

3. 烟气温焓表：

$$H_y = H_y^0 + (\alpha'' - 1)H_k^0 + H_{fh}$$

4. 锅炉机组热平衡计算：

$Q_r$ 、 $Q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 、 $q_4$ 、 $q_5$ 、 $q_6$ 、 $\eta$ 、 $B$ 、 $B_j$  等

## 二、各受热面热力计算

- 按烟气流程进行
- 进行各受热面计算时，先进行结构计算，再进行热力计算

### (一) 炉膛

利用炉膛出口烟温计算公式进行，先假设，后校核，误差绝对值  $\Delta \theta \leq 100^\circ\text{C}$

$$g_l'' = T_l'' - 273 = \frac{T_u}{M \left( \frac{a_l \sigma_0 \psi F_l T_u^3}{\phi B_j V C_{pj}} \right)^{0.6} + 1} - 273 \quad ^\circ\text{C}$$



## (二) 过热器热力计算

1. 辐射式（合并于炉膛中进行，与水冷壁一起作为炉膛的有效辐射面积）

$$Q_{f,gr} = \frac{H_{f,gr} q_{gr}}{B_j}$$

2. 半辐射式（后屏）  $Q_d = \varphi(H' - H'') - Q_p''$

$$Q_0 = \frac{D(h'' - h')}{B_j} = Q_d + Q_f$$

误差校核

$$\Delta = \frac{Q_d - Q_{dx}}{Q_d} \leq \pm 2\%$$

### 3.对流式

- 若对流过热器在屏过之后:
- 若对流过热器与炉膛之间为凝渣管束, 则对流式过热器的辐射吸热量为

$$Q_f = (Q_f'' + Q_p'') \frac{F_{gr}}{F_{gr} + F_{fj}}$$

### 4.带有减温器的过热器的热力计算

$$D_1 + D_{jw} = D_2$$

$$D_1 h_1'' + D_{jw} h_{jw} = D_2 h_2'$$

### 5.再热器热力计算 (方法同对流过热器)

$$Q_f = \frac{(1 - x_{nz}) H_{f,nz} q_{nz}}{B_j}$$

### (三) 凝渣管束和锅炉管束的热力计算

- 由烟气侧热平衡方程式求得的管束吸热量与传热方程式求出的吸热量的相对误差，如果对凝渣管束不超过5%，对锅炉管束不超过2%，计算即告完成
- 凝渣管束管排数 $\geq 5$ 时，由炉膛辐射给管束的热量被全部吸收。管子排数 $< 5$ 时，凝渣管束吸收的炉膛辐射热由下式计算：

$$Q_f = \frac{x_{nz} H_{f,nz} q_{nz}}{B_j}$$

(四) 直流锅炉过渡区的热力计算

(五) 省煤器的热力计算

$$Q_{sm} = Q_r \eta \frac{100}{100 - q_4} - (Q_f + Q_p + Q_{gr} + Q_{gs} + Q_{zr} + Q_{gd}) \quad (\text{kJ/kg})$$

$$h''_{sm} = \frac{B_j Q_{sm}}{D_{sm}} + h'_{sm} \quad (\text{kJ/kg})$$

## (六) 空气预热器的热力计算

- 热空气温度、冷空气温度、排烟温度和漏风系数是选定的，空气预热器的入口烟温可由省煤器的热平衡计算得到
- 校核计算得到预热空气吸热量和受热面的传热量，如果二者相对误差不超过吸热量的 $\pm 2\%$ ，认为所布置的受热面满足换热要求，热力计算结束

## （七）附加受热面的热力计算

- 附加受热面不超过主受热面的5%，则不必单独计算，而把附加受热面折算在主受热面中，或者算在按工质流向与其相串联的主受热面中。
- 如果附加受热面的数量较大，则应单独进行计算。

### 三、整体校核计算程序和热平衡误差要求

#### 1.尾部受热面为单级布置

- 排烟温度误差绝对值不超过**10℃**；
- 热空气温度误差绝对值不超过**40℃**；
- 锅炉整体热平衡的误差：

$$\Delta Q = Q_r \eta - \sum Q \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

计算误差应不超过 $Q_r$ 的**0.5%**。

## 2.尾部受热面为双级布置

- 第二级出口工质的焓值

$$h''_{sm} = \frac{D}{D_{sm}} (h''_{gr} + \Delta h_{jw}) - \frac{B_j}{D_{sm}} (Q_f + Q_p + Q_{gr} + Q_{gd}) \quad (\text{kJ/kg})$$

- 两级交界处的水温、空气温度误差应 $< \pm 10^\circ\text{C}$ ;
- 热平衡计算误差应不超过 $Q_r$ 的**0.5%** ,



# 第四节 锅炉整体布置及主要设计参数的选择

## 一、锅炉整体布置的影响因素

### 1. 蒸汽参数

压力升高：饱和温度升高，预热热增加；  
汽化潜热减小，蒸发热减小；  
过热、再热， 过热热增加；

## 2. 锅炉容量

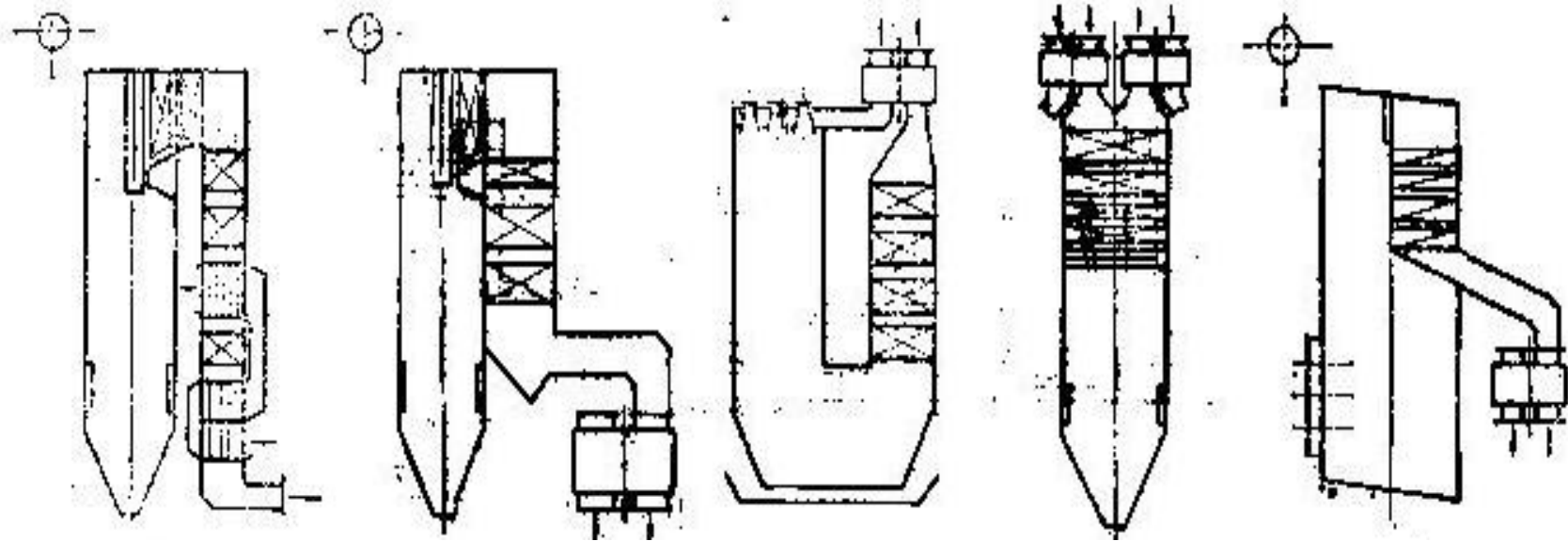
- 容量增加，炉膛容积、炉膛内表面积都增加，但容积增加速度大于面积增加速度，所以若维持截面和壁面热负荷不变，炉膛容积就要增大，容积热负荷减小；若保持容积热负荷不变，则截面和面积热负荷增大，结渣可能性增大。
- 一般随 $D$ 增大， $q_v$ 有所增大，而 $q_A$ 有所减小。
- 过热器、再热器由单管圈过渡为多管圈

### 3.燃料

- 发热量： $Q_{ar,net}$ 降低， $B$ 增大， $Q_f$ 减小 $Q_d$ 增大
- 水分：炉膛出口烟温降低，传热温差减小，但烟速增大，对流换热增强
- 灰分：磨损、积灰、结渣严重，塔式锅炉
- 挥发分：炉膛热负荷选择不同，炉膛结构不同  
高挥发分，矮胖型；低挥发分，瘦高型
- 硫分：低温腐蚀严重，排烟温度高，尾部采用防腐措施。

## 二、锅炉整体布置

典型布置： $\Pi$ 型布置、 $\Gamma$ 型布置、U型布置、塔型布置、箱型布置等



### 三、主要设计参数的选择

1. 排烟温度： $q_2$ 热损失、空预器面积、低温腐蚀
2. 热空气温度：燃料种类
3. 过量空气系数：最佳过量空气系数
4. 炉膛热负荷：煤种、锅炉容量
5. 炉膛出口烟温：不结渣，辐射对流面积最小
6. 工质质量流速：传热、压损
7. 烟气流速：积灰、磨损、对流换热