

第十章 锅炉热力计算及其设计布置

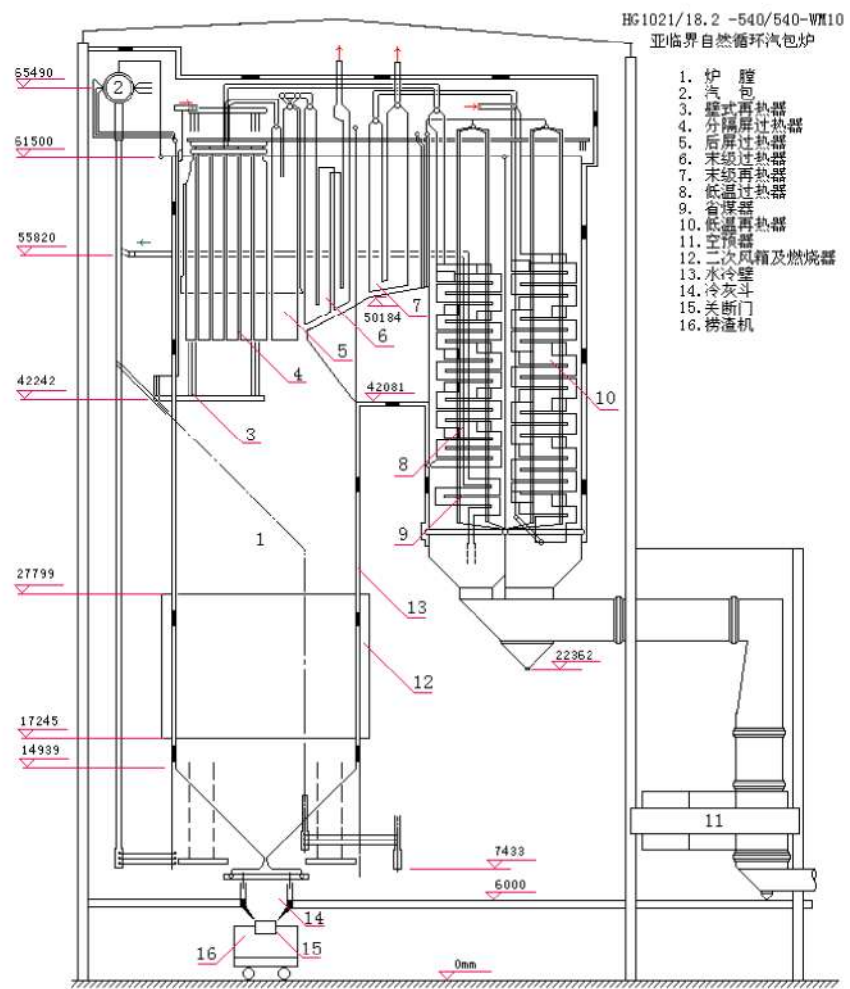
- §1、 锅炉本体的典型布置
- §2、 锅炉主要设计参数的选择
- §3、 电厂锅炉热力计算的任务及顺序
- §4、 炉膛热力计算
- §5、 对流和半辐射受热面的热力计算

§ 1 锅炉本体的典型布置

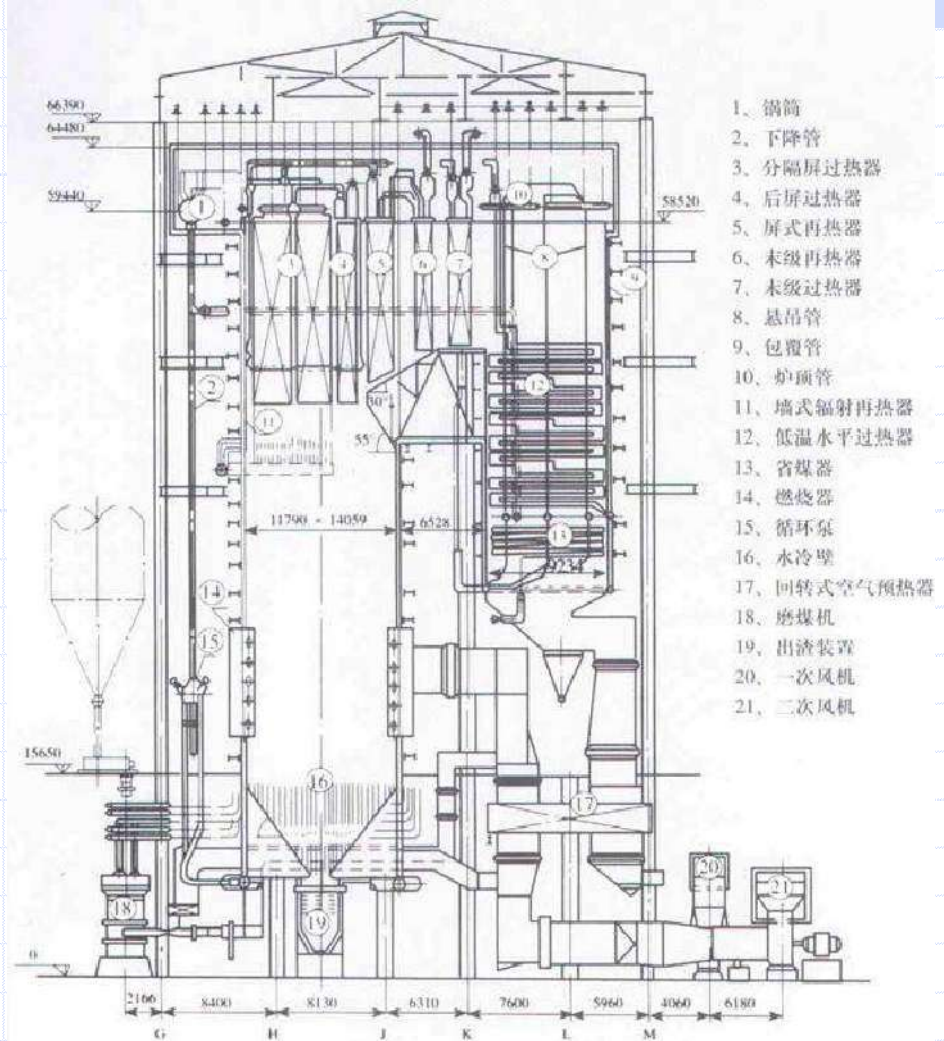
- 1、 Π 型、 Γ 型布置锅炉
- 2、塔型、半塔型布置锅炉
- 3、影响锅炉布置的因素



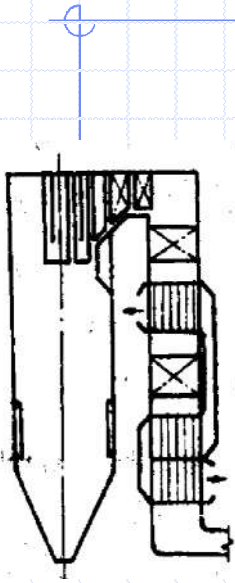
IG-亚临界自然循环汽包锅炉



强制循环锅炉纵剖面布置图



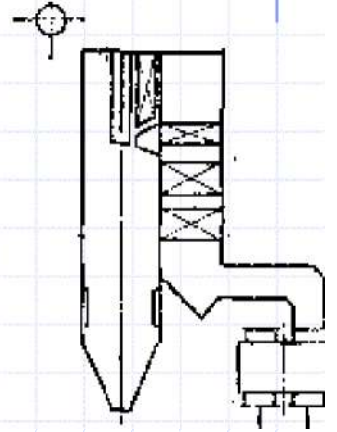
1、 Π 型布置锅炉



● Π 型布置:应用范围最广。

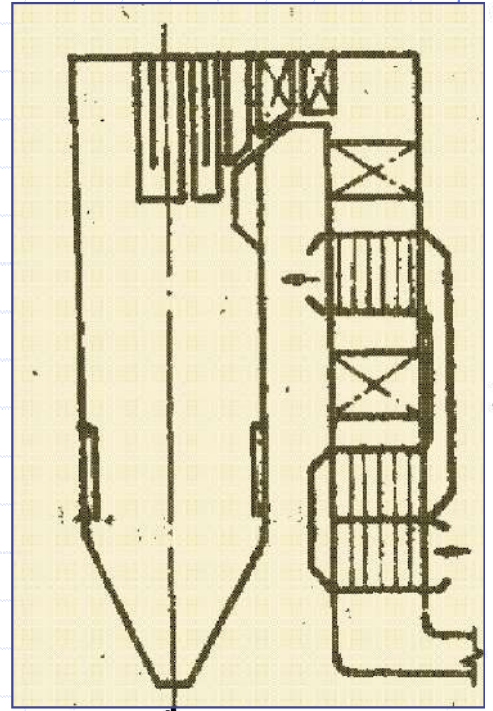
● Π 型布置: 由垂直柱体炉膛、水平烟道和下行对流烟道组成。

● Γ 型布置: (Π 型布置中取消了中间的走廊与水平烟道)紧凑省钢材,但尾部烟道检修不便。



Π型布置特点

- ◆ 高度较低，安装方便；
- ◆ 易布置成逆流传热方式；
- ◆ 燃料进给设备和排烟口都在锅炉底层，送风机、引风机、除尘器等笨重设备可布置在地面，减轻了厂房和锅炉构架的负载，可以采用简便的悬吊结构
- ◆ 占地较大；
- ◆ 烟道转弯易引起飞灰对受热面的局部磨损

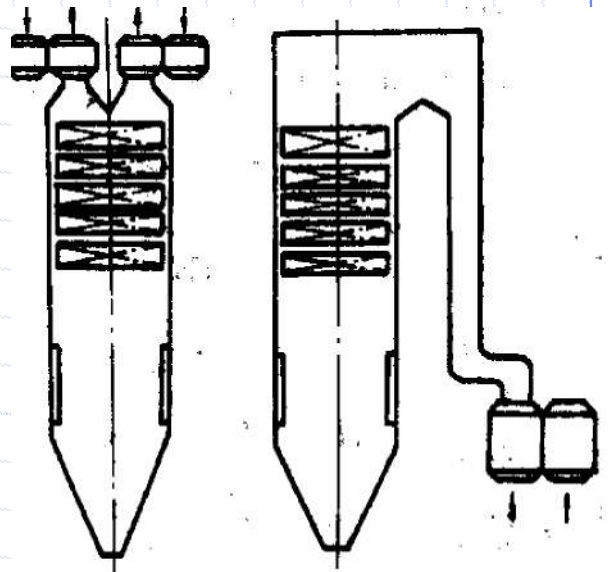


2. 塔型、半塔型布置锅炉

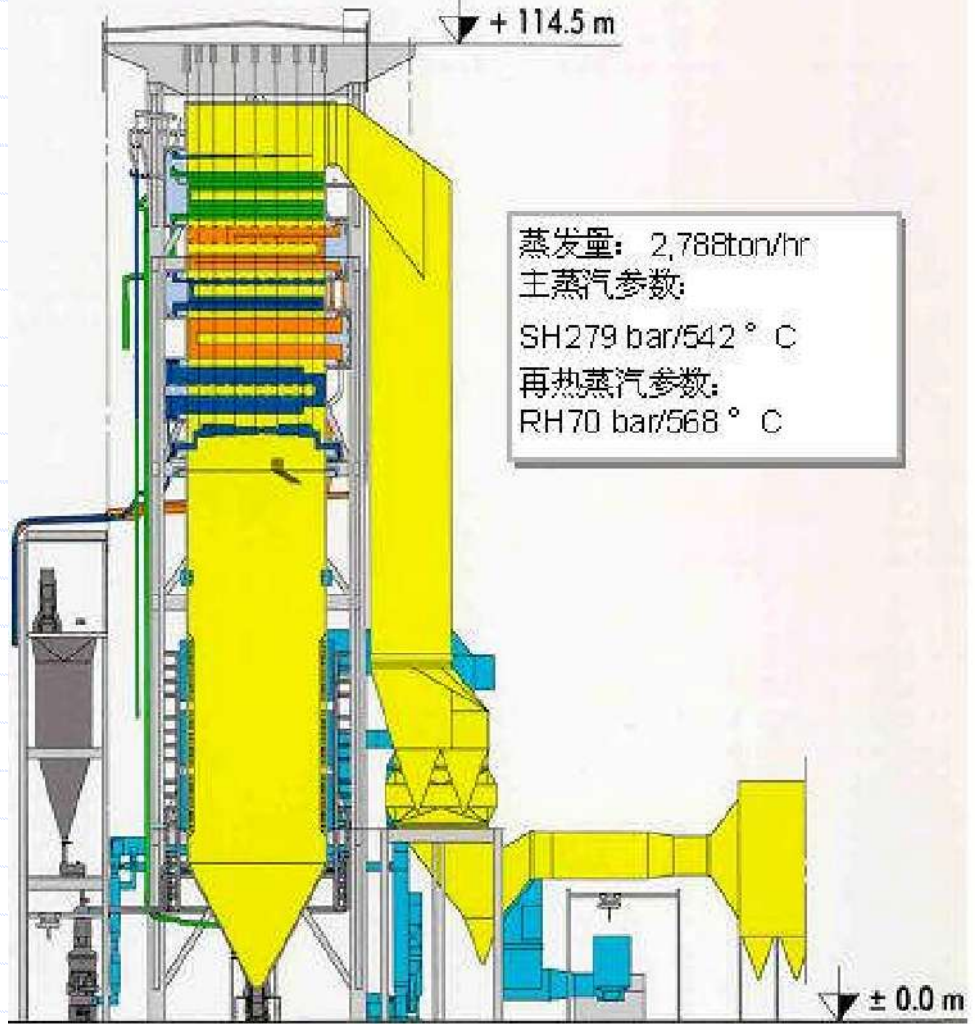
● **塔型布置锅炉：**对流烟道布置在炉膛的上方，锅炉笔直向上发展，取消了不宜布置受热面的转弯室

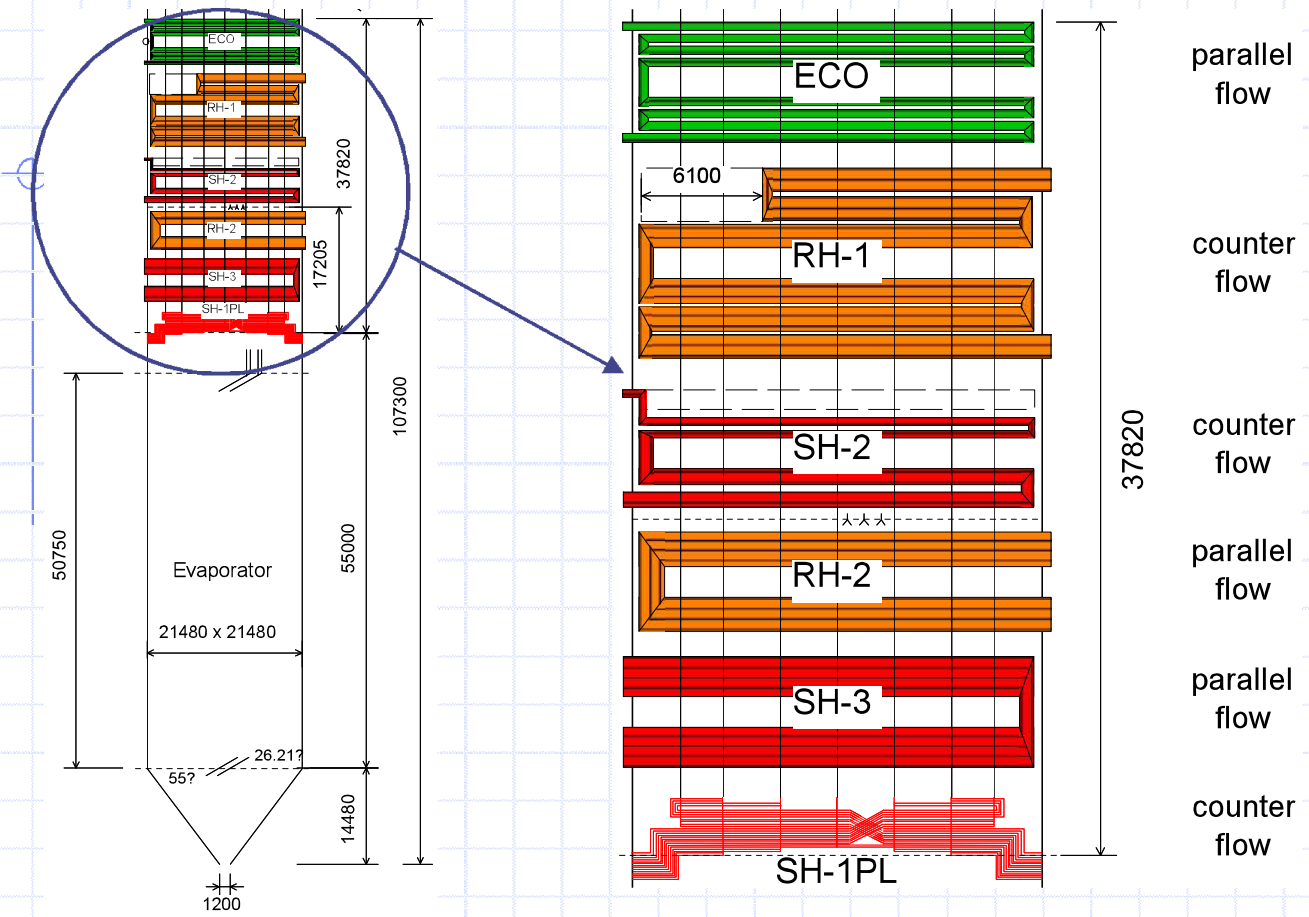
特点：占地面积小；对流烟道有自身通风作用；烟气在对流受热面中不改变流动方向，对于多灰燃料非常有利。适用于燃用烟煤以及正压燃烧的燃油、燃气锅炉。

● **半塔型布置锅炉：**空气预热器，送、引风机，除尘器等笨重设备布置在地面



上海外高桥900MW超临界煤粉锅炉





3、影响锅炉布置的因素

- ◆ 蒸汽压力的影响
- ◆ 锅炉容量的影响
- ◆ 燃料性质对锅炉布置的影响
- ◆ 热空气温度对尾部受热布置影响

蒸汽压力的影响

加热水热、蒸发热、过热热的比例发生变化

| 蒸汽压力 | 炉内有无屏 | 省煤器的情况 | 水冷壁情况 |
|------|----------|--------|-------|
| 中压 | 无 | 沸腾式 | 光管 |
| 高压 | 有半辐射屏 | 非沸腾式 | 光管 |
| 超高压 | 有半辐射屏、前屏 | 非沸腾式 | 膜式 |
| 亚临界 | 有半辐射屏、前屏 | 非沸腾式 | 膜式 |

炉膛吸热 占 锅炉总吸热量的65%

在中压机组中，蒸发吸热为66%，稍大于 炉膛吸热

在高压机组中，蒸发吸热为52%，小于 炉膛吸热

在超高压机组中，蒸发吸热为34%，大大小于炉膛吸热

在亚临界机组中，蒸发吸热为25%，大大小于炉膛吸热

锅炉容量的影响

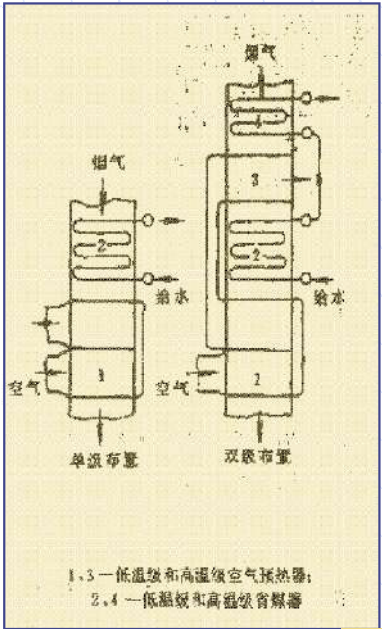
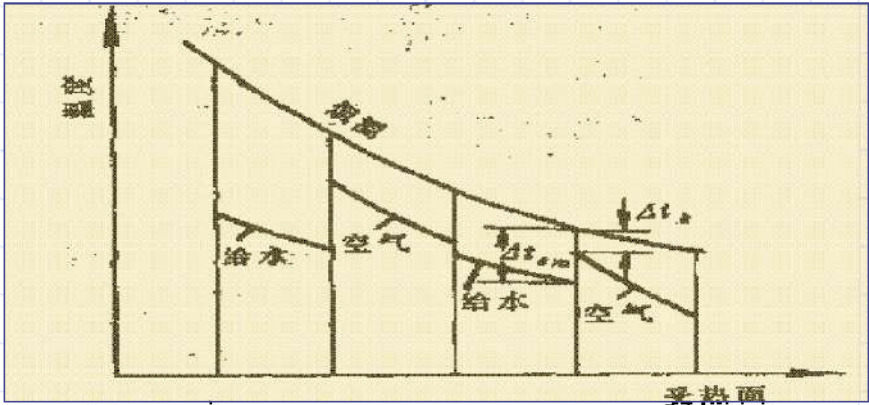
- ◆ 锅炉容量随着蒸汽压力升高而增加,有对应关系。
- ◆ 锅炉容量对锅炉布置的影响
 - 如果炉膛容积热强度不变,那么炉膛容积正比于锅炉容量。
 - 炉膛容积是长度的三次方,炉壁面积是长度的平方,炉壁面积增长的慢。
 - 大容量锅炉的单位面积的炉壁要吸收更多的热量,使用膜式水冷壁,内螺纹管的水冷壁。

燃料性质对锅炉布置的影响

- 1. **燃料的挥发分对锅炉布置的影响：**
 - 挥发分多的煤好烧。炉膛比较**胖、矮**；**热风温度**较低。
 - 挥发分少的煤。炉膛比较**细高**；**热风温度**要高。
- 2. **燃料水分的影响：**
 - 水分多**着火**困难，**热风温度**要高，断面热强度要大。
- 3. **燃料灰分的影响：**
 - 灰分多**火焰**中心上升，炉膛出口烟气温度上升，炉膛细长；**热风温度**要高。
 - **磨损**严重，要在对流烟道中的受热面上安装防磨装置。
- 4. **灰熔融特性、硫含量**

热空气温度对尾部受热布置影响

尾部受热面采用两级布置的原因，是因为烟气的流量和比热均比空气为大。



§ 2 锅炉主要设计参数的选择

- ◆ 1、炉膛热强度
- ◆ 2、炉膛出口烟气温度
- ◆ 3、排烟温度
- ◆ 4、热空气温度
- ◆ 5、工质与烟气速度



1、炉膛容积热强度 q_v

q_v 表明在炉膛单位容积内每小时燃料燃烧所释放的热量

$$q_v = \frac{BQ_{ar.net}}{V_l}, kW/m^3$$

式中 v_l — 炉膛容积, m^3

q_v 的选取与锅炉容量、燃烧方式、燃料特性等有关

● q_v 过大

- v_l 过小, 水冷壁面积过小, 锅炉达不到出力
- 炉膛及炉膛出口烟气温度 ϑ_a 、 ϑ_l'' 高, 易结渣; ϑ_{py} 偏高, q_2 增大;
- 煤粉气流在炉膛停留的时间 τ 过小, (q_3 、 q_4) 增大, 均使 η_{gl} 减小

炉膛容积热强度 q_v

● q_v 过小:

v_e 过大, g_l 偏低, 着火困难, 燃烧不稳定; 造价高

炉膛容积热强度 q_v 的大小应能保证燃料燃烧完全 (燃料在炉膛内有足够的停留时间), 并使烟气在炉膛内冷却到不使炉膛出口对流受热面结渣的程度 (炉膛内布置足够的受热面)

锅炉容量增大, 炉膛壁面面积的增加落后于容量的增加。为保证锅炉安全运行, 避免对流受热面结渣, 应以烟气的冷却条件来选取 q_v , 故大容量锅炉的 q_v 要比中、小容量锅炉选得小一些

炉膛截面热强度 q_a

q_a 表示燃烧器区域炉膛单位截面上每小时燃料的释热强度

$$q_a = \frac{BQ_{ar.net}}{A}, kW/m^2 \quad \text{或} \quad q_{ac} \approx \frac{q_a}{n}$$

式中 A 、 n - 燃烧器区域炉膛截面积及燃烧器层数

- ▶ q_a 的选取与燃料性质、燃烧方式和排渣方式等有关。
- ▶ 锅炉设计时，可根据选用的 q_v 、 q_a 确定炉膛容积和截面积，并由此决定炉膛宽度、深度及高度
- ▶ 无烟煤 q_v 值小，而 q_a 值大，炉膛呈瘦高形，保证煤粉气流及时着火，完全燃烧

燃烧器区域壁面热强度 q_r

q_r 表示燃烧器区域单位炉壁面积上燃料每小时释放的热量

$$q_r = \frac{BQ_{ar.net}}{F_r}, kw / m^2$$

$$F_r = 2(a+b)(n+1)h_j, m$$

式中 F_r — 燃烧器区域的炉壁面积, m^2

a 、 b — 炉膛宽度和深度, m

n — 燃烧器的层数

h_j — 各层燃烧器的间距, m

q_r 愈大, 火焰愈集中, 燃烧器区域的温度水平就愈高, 对燃料的稳定着火有利, 但易造成燃烧器区域的壁面结渣

2、炉膛出口烟气温度 ϑ''_{ℓ}

炉膛出口烟气温度 ϑ''_{ℓ} 凝渣管或屏式过热器前的烟温

➤ 锅炉受热面的辐射和对流传热的最佳比值（辐射受热面和对流受热面的金属耗量及总成本最小）对应的 ϑ''_{ℓ} 约为 1250°C

➤ 为保证炉膛出口处对流受热不结渣， ϑ''_{ℓ} 不应超过灰分开始变形的温度 DT 。如灰分软化温度 ST 与变形温度 DT 之差小于 100 ，则取

$$\vartheta''_{\ell} < (ST - 100)^{\circ}\text{C}$$

➤ 当炉膛出口处布置着屏式受热面时，炉膛出口烟温 ϑ''_{ℓ} 一般取 $1100 \sim 1200^{\circ}\text{C}$

对于易结渣的燃料， ϑ''_{ℓ} 应保持在 $1000 \sim 1050^{\circ}\text{C}$ 范围

3、排烟温度 θ_{py}

排烟温度 θ_{py} 燃料费用和尾部受热面金属费用总和最少时所对应温度

- 排烟温度 θ_{py} 低，排烟热损失小，锅炉热效率高，节约燃料；但由于尾部受热面传热温差降低，金属耗量增多
- 含硫量较高的燃料，排烟温度 θ_{py} 应取较高值，以避免低温腐蚀和堵灰对锅炉工作可靠性的影响

4、热空气温度 t_{rk}

热空气温度 t_{rk} 的选取主要取决于燃料的性质

着火性能好和水分低的燃料，采用较低的 t_{rk} ；着火性能差或水分较多的燃料，采用较高的 t_{rk}

热空气温度的选择还与制粉系统干燥剂种类、锅炉排渣方式等有关。

5、工质质量流速 $\rho \omega$

受热面中水和蒸汽的质量流速 对受热面运行的安全性和经济性有很大影响

- **质量流速** 太低，工质的传热能力下降，受热面管壁温度升高，影响受热面的安全运行
- **质量流速** 太高，工质的流动阻力大（一般过热器系统的总阻力应不大于过热器出口压力的10%；再热系统的总阻力应不大于再热蒸汽进口压力的10%；省煤器中水的阻力应不大于汽包压力的10%）
- 对于非沸腾式省煤器，质量流速 的下限应避免受热面内部的**氧腐蚀**；对于沸腾式省煤器，则应避免管内工质的汽水分层

6. 烟气流速 w_y

烟气流速 w_y 影响受热面运行的**安全性和经济性**

烟速 w_y 过低，受热面积灰加重，受热面面积增加或传热下降

烟速 w_y 过高，飞灰磨损加重

锅炉额定负荷下，考虑磨损后，横向冲刷受热面的极限烟速

- 对于一般的煤为9~10 m/s;
- 对于灰多和灰分磨蚀性较强的燃料为7~8 m/s;
- 对于灰少和磨蚀性较弱的煤为10~12 m/s

§ 3 锅炉热力计算的任务及顺序

- ◆ 1、 电厂锅炉热力计算的任务
- ◆ 2、 锅炉热力计算顺序
- ◆ 3、 锅炉热力计算框图



1、锅炉热力计算的任务

● 设计计算的定义：

- 根据给定的锅炉容量、参数和燃料特性去确定锅炉的尺寸。用于设计锅炉

● 校核计算的定义：

- 在给定锅炉负荷和燃料特性的前提下，按照已有的锅炉结构尺寸去确定各个受热面交界处的工质和烟气参数。

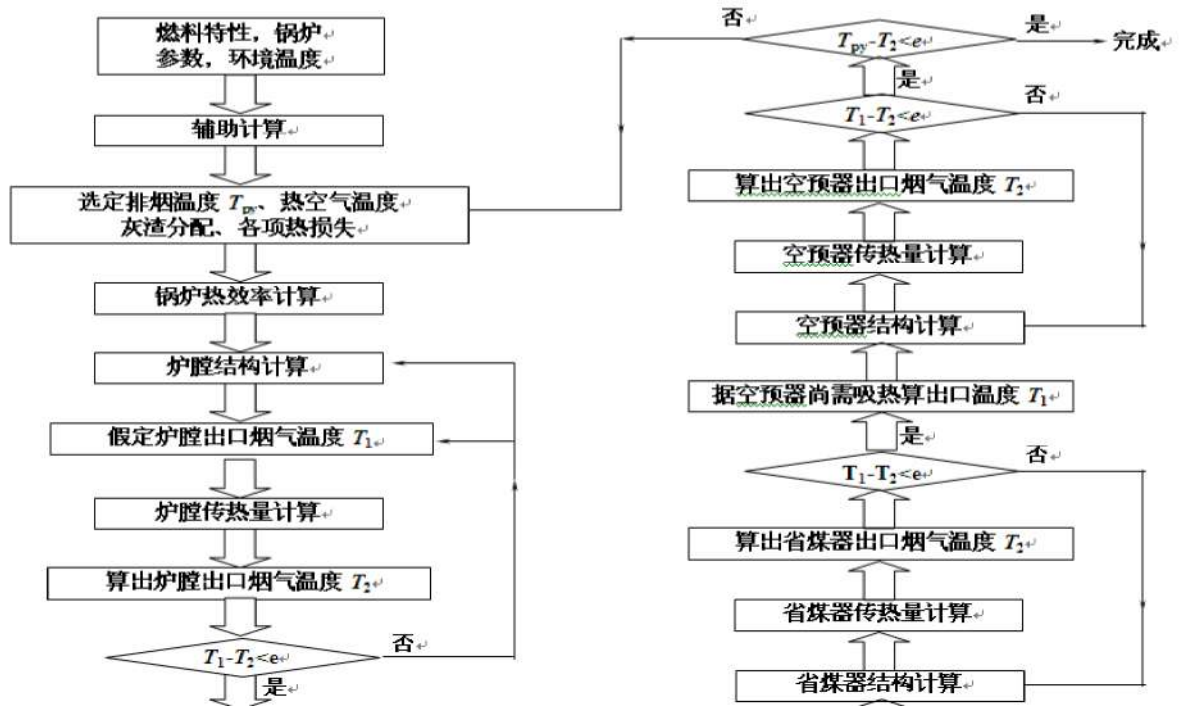
● 用途：

- 校核计算在锅炉的设计和改造过程中经常应用。

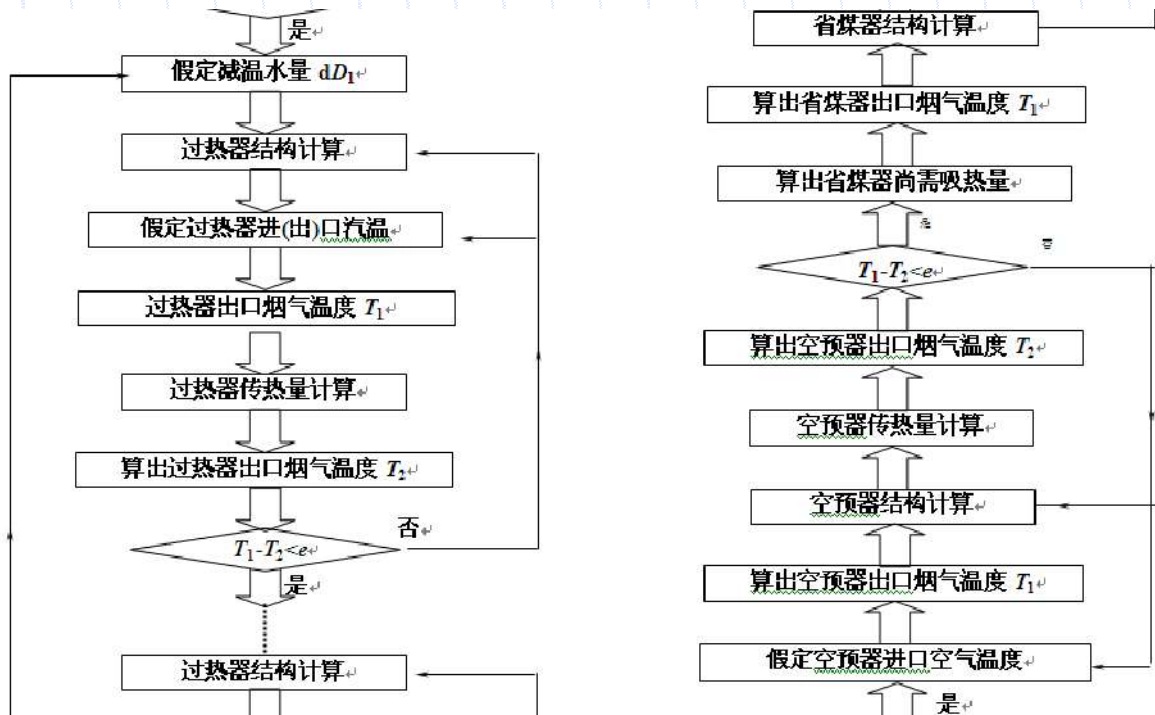
2、锅炉热力计算顺序

- ◆ 先校核原始数据、判断煤种。
- ◆ 燃烧计算。
- ◆ 热平衡计算。
- ◆ 炉膛传热计算。
- ◆ 沿烟气流程计算各部件传热(换热器)。

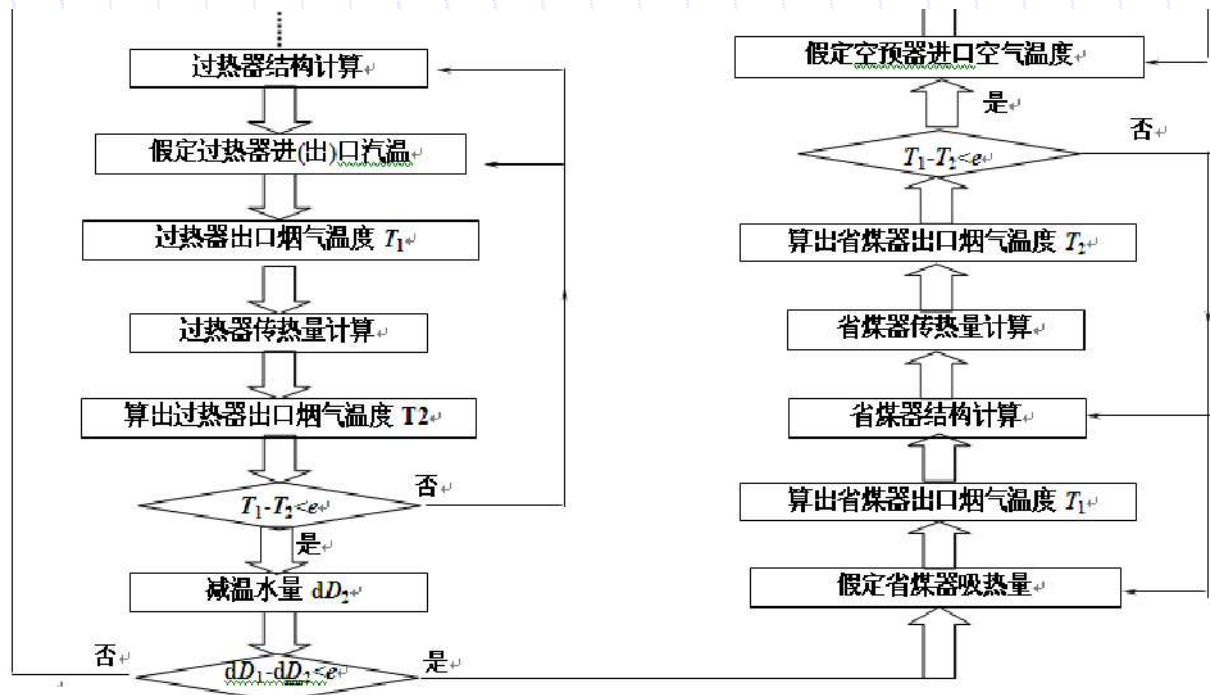
3、锅炉热力计算框图



锅炉热力计算框图



锅炉热力计算框图



§ 4 炉膛热力计算

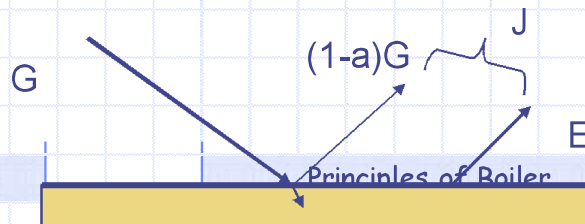
- ◆ 1、炉内辐射传热的基本概念
- ◆ 2、炉内传热计算的相似理论方法



1、炉内辐射传热的基本概念

炉膛传热95%以上是辐射方式，对流可忽略

- **本身辐射**： $E_0 = \sigma_0 * T^4$; $E = a \sigma_0 * T^4$
- **投射辐射(入射辐射)G**：半球形范围内从各方向以各波长进入物体的单位面积的能量。
- **有效辐射J**：物体的总辐射能力。 $J = E + (1-a)G$
- **辐射热传递q**：离开物体表面的净能量。 $Q = J - G \text{ kW/m}^2$
- **两个平面平行系统的黑度 a_s** ： $a_s = 1 / (1/a_1 + 1/a_2 - 1)$
- **两个平面平行系统总辐射传热量**： $a_s * \sigma_0 * (T_1^4 - T_2^4)$



火焰黑度

- a_{hy} —表示火焰的辐射能力
- 影响火焰辐射能力的主要因素

(1) 介质浓度：

- ◆ 固体燃料：三原子气体、灰粒子、焦炭粒子；
- ◆ 液体、气体燃料：三原子气体、碳黑粒子。

(2) 燃料的种类、燃烧方法及燃烧工况等。

炉膛黑度 a_l

- 炉内一个假想黑度，用以表示火焰的有效辐射 J_1 。
- $J_1 = a_l * \sigma_0 * T_1^4$

水冷壁污染系数 ζ

- 管壁灰污反方向辐射因子

$$\zeta = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^4$$

水冷壁热有效系数 ψ

◆ 受热面吸热量占投射到炉壁上的热量的比例。

◆ $q = \psi J_1 \text{ kW/m}^2$ $J_1 = a_1 * \sigma_0 * T_1^4$

$$\psi = x \cdot \zeta$$

$$\psi_l = \frac{\sum \psi_i \cdot F_{bi}}{F_{bz}} \quad X \text{—角系数}$$

2、炉内传热计算的相似理论方法

- ◆ 基本方法
- ◆ 基本方程
- ◆ 水冷壁受热面积计算

基本方法

- 1、炉膛内全部热量按照辐射的方式传递的。
- 2、定性温度：用炉膛出口烟气温度作为定性温度。
- 3、炉内有效放热量：包括修正后的1公斤燃料的有效放热量、1公斤燃烧用空气带进炉膛的热量。

$$Q_l = Q_r \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_k$$

$$Q_k = (a_l'' - \Delta a_l - \Delta a_{zf}) \cdot I_{rk}^o + (\Delta a_l + \Delta a_{zf}) \cdot I_{lk}^o$$

$$Q_{lk} = a_l'' \cdot I_{lk}^o$$

基本方法

4、理论燃烧温度

- 假定燃料燃烧时放出的热量未向外界传热而使烟气所能达到的最高温度，它与有效放热量 Q_l 相关。
- 烟气各个气体成分的比热是温度的函数，不能直接计算，只能用试算迭代法计算。

$$Q_l = \bar{V} \bar{C}_p \cdot \vartheta_a$$

基本方程

- 5、炉内传热的方程组：

$$Q_f = \sigma_o \cdot \alpha_l \cdot \psi \cdot F_l \cdot T_1^4$$

$$Q_f = \phi \cdot B_j \bar{V} \bar{C}_p (T_a - T_1'')$$

$$\theta_1 = \frac{T_1}{T_a}, \theta_L = \frac{T_L}{T_a}, Bo = \frac{\phi B_j \bar{V} \bar{C}_p}{\sigma_o \psi F T_a^3}$$

$$\frac{\alpha_l}{Bo} \theta_1^4 + \theta_L - 1 = 0 \quad \theta_1 = C_1 \theta_L^n$$

基本方程

6、校核计算公式：

$$g_l'' = \frac{T_a}{M \left(\frac{\sigma_o \alpha_l \psi_{pj} F_l T_a^3}{\phi B_j V_y C_{pj}} \right)^{0.6} + 1} - 273$$

计算过程：

- 1、假定 θ_l''
- 2、用该公式计算 θ_l''
- 3、检验假设

$$Q = \phi(Q_l - I_l'')$$

3、水冷壁受热面积

- 有效辐射受热面的面积 $H_f = \Sigma F_i \cdot x_i$
- 水冷壁面积：把与水冷壁相切的平面看作火焰的辐射表面，也是接受火焰辐射的水冷壁面积。

§ 5 对流受热面的传热计算

- ◆ 1、对流受热面传热计算的基本公式
- ◆ 2、对流传热系数K的计算
- ◆ 3、对流受热面传热计算的基本方法



对流受热面传热计算的基本公式

◆ 烟气侧热平衡方程式(kj/kg) $Q_{df} = \varphi(I_y' - I_y'' + \Delta\alpha \cdot I_{lk}^o)$

◆ 工质侧热平衡方程式: $Q_{dx} = \frac{D(i'' - i')}{B_j} - Q_{fj}$

◆ 空气预热器工质侧: $Q_{ky} = \beta_k(I_k'' - I_k') = \left(\beta_k'' + \frac{\Delta\alpha_{ky}}{2}\right)(I_k'' - I_k')$

◆ 传热方程式:

$$Q_{dc} = \frac{K \cdot F \cdot \Delta t}{B_j}$$

对流传热系数K的计算

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1h}} + \frac{\delta_h}{\lambda_h} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} + \frac{\delta_{sg}}{\lambda_{sg}} + \frac{1}{\alpha_{sg}}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1h}} + \frac{\delta_h}{\lambda_h} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

• 影响因素：烟气、积灰、管壁、结垢和工质，包括对流、辐射和传导三种基本传热方式。

- **灰污系数**：灰污引起的传热热阻的增加。
- **有效系数**：受热面有灰污与无灰污时传热系数之比
- **利用系数**：受热面实际传热系数与无灰污并冲刷完全时的传热系数之比。

对流受热面传热计算的基本方法

校核计算：

已知：进口烟气温度，一个工质温度(进口或出口)。

求：另一个烟气温度，另一个工质温度。

$$Q_{df} = \varphi (I_y' - I_y'' + \Delta\alpha \cdot I_{lk}^0)$$

$$Q_{dx} = \frac{D (i'' - i')}{B_j} - Q_{ff}$$

$$Q_{dc} = \frac{K \cdot F \cdot \Delta t}{B_j}$$

- ◆ 1、假定出口烟温，烟气侧热平衡，求Q。
- ◆ 2、工质侧热平衡，求工质另一未知温度。
- ◆ 3、假设的检验。

作业与思考题

- 1、简述对流受热面热力计算的基本方法。
- 2、试述炉膛热力计算的基本方法与基本方程的含义。
- 3、试述对流受热面热力计算三个基本方程的含义。
- 4、提高锅炉热效率时，为什么不能把排烟温度降得很低？

