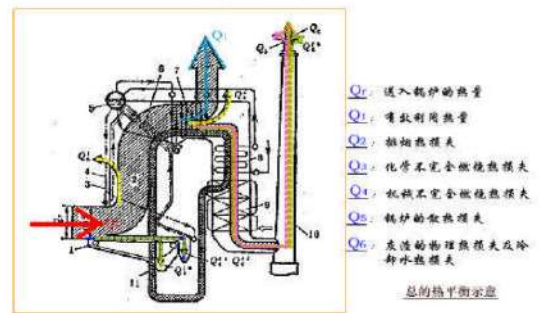


第四章 锅炉机组热平衡

- ◆ 锅炉热平衡
- ◆ 锅炉输入热量和有效利用热量
- ◆ 锅炉的各项热损失
- ◆ 锅炉效率及燃料消耗量计算

下图为锅炉机组热平衡示意图



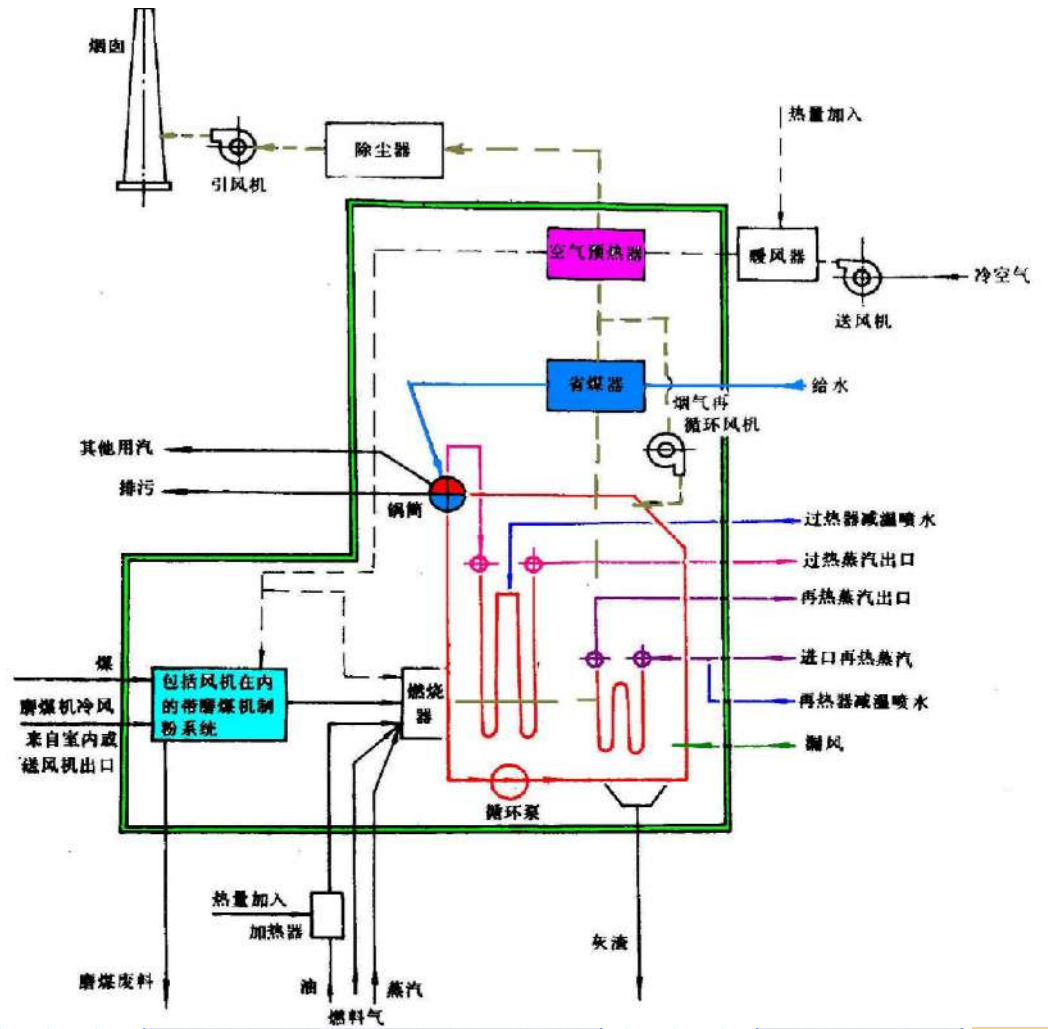
一、锅炉热平衡及锅炉热效率

◆1、热平衡概念

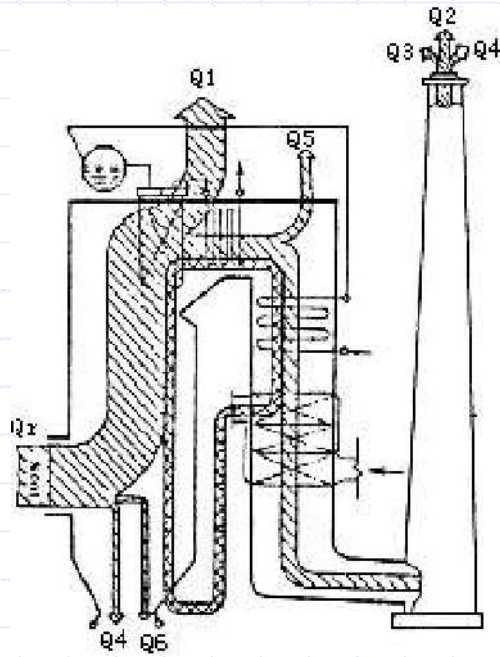
◆2、热平衡方程式



热平衡范围



热平衡示意图



1、热平衡概念

◆ 锅炉热平衡研究

燃料的热量在锅炉中利用的情况:

有多少被有效利用,
有多少变成了热量损失, 表现在哪些方面, 产生的原因。

研究的目的是为了有效地提高锅炉热效率

◆ 锅炉热平衡

以1kg固体燃料或液体燃料(气体燃料以1Nm³)为单位组成热量平衡。

1kg燃料带入炉内的热量及锅炉有效利用热量和损失热量之间的关系。

2、锅炉热平衡方程式

$$Q_r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$$

$$q_i = Q_i / Q_r \times 100$$

式中 Q_r 输入热量

Q_1 有效利用热

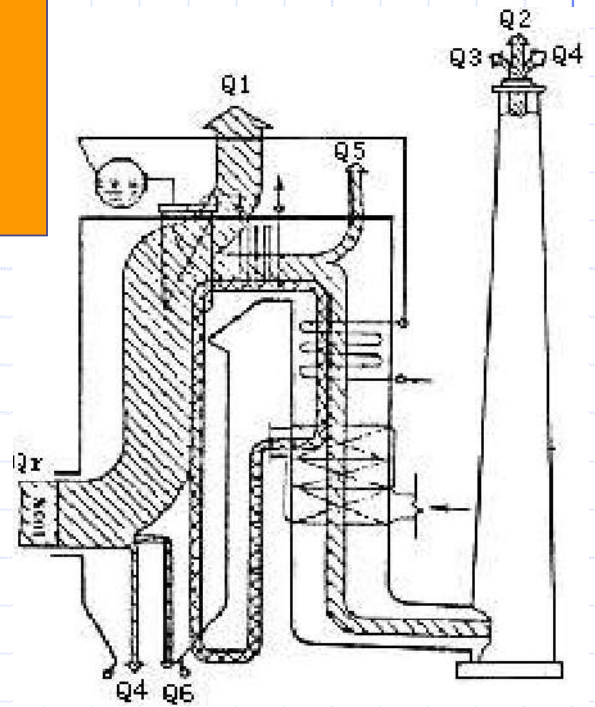
Q_2 排烟损失

Q_3 化学不完全燃烧热损失

Q_4 机械不完全燃烧热损失

Q_5 散热损失

Q_6 其他热损失



二、锅炉输入热量和有效利用热量

- ◆1、锅炉输入热量
- ◆2、锅炉有效利用热量



1. 锅炉输入热量 Q_r

$$Q_r = Q_{ar.net} + h_r + Q_{wr} + Q_{wh}, kJ/kg$$

h_r — 燃料的物理显热；

Q_{wr} — 外来热源加热空气时带入的热量；

Q_{wh} — 雾化燃油所用蒸汽带入的热量

对于燃煤锅炉：

若燃料和空气没有利用外界热量进行预热

且燃煤水分满足 $M_{ar} < Q_{ar.net} / 630$

则 $Q_r = Q_{ar.net}$

锅炉输入热量 Q_r

$$Q_r = Q_{net,v,ar} + i_r + Q_{zq} + Q_{wl}$$

燃料的物理显热 i_r :

$$i_r = C_{ar} t_r$$

固体燃料收到基比热:

$$C_{ar} = 4.187 \frac{M_{ar}}{100} + \frac{100 - M_{ar}}{100} C_d \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

液体燃料收到基比热:

$$C_{ar} = 1.738 + 0.0025 t_r \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

蒸汽带入热 Q_{zq} :

$$Q_{zq} = G_{zq} (i_{zq} - 2500)$$

当用蒸汽雾化重油或喷入锅炉蒸汽时考虑。

2500—排烟中蒸汽焓近似值，kJ/kg

外来热量 Q_{wl} :

$$Q_{wl} = \beta' (I_{rk}^0 - I_{lk}^0)$$

用锅炉范围以外的废气、废热等来预热空气时

2、锅炉有效利用热 Q_1

$$Q_1 = \frac{1}{B} [D_{gr} (h''_{gr} - h_{gs}) + D_{zr} (h''_{zr} - h'_{zr}) + D_{pw} (h_{bs} - h_{gs})]$$

$$= \frac{Q}{B}, \text{kJ/kg}$$

式中： Q 工质总吸热量，kJ/s

B 燃料消耗量，kg/s

D_{gr} 、 D_{zr} 、 D_{pw} 过热蒸汽量、再热蒸汽量和排污量，kg/s

h''_{gr} 、 h_{bs} 、 h_{gs} 过热蒸汽焓、饱和蒸汽焓和给水焓，kJ/kg

h''_{zr} 、 h'_{zr} 再热蒸汽出口和进口焓，kJ/kg

空气在空气预热器中吸收的热量又返回炉膛，属锅炉内部热量循环，锅炉热平衡中不予考虑。

三、锅炉的各项热损失

- ◆机械未完全燃烧热损失
- ◆化学(气体)未完全燃烧热损失
- ◆排烟热损失
- ◆散热热损失
- ◆其它热损失



机械未完全燃烧热损失 q_4

未完全燃烧热损失包括 q_4 、 q_3

●机械(固体)未完全燃烧热损失 q_4

锅炉主要热损之一，取失决于燃料种类、燃烧方式、炉膛型式与结构、燃烧器设计与布置、锅炉运行工况

- V_{daf} 小； $(M_{ar}、A_{ar})$ 大， q_4 大；
- R_{90} 大， q_4 大；
- α'' 过大或过小， q_4 大
- 煤粉在炉膛停留时间 τ 过小， q_4 大

设计时， q_4 、按推荐数据选取（表）

对固态排渣煤粉炉取 $q_4 = 0.5 \sim 5\%$

机械未完全燃烧热损失 q_4

形成:

灰渣损失 Q_4^{hz} : 未参与燃烧或未燃尽的碳粒与灰渣一同落入灰斗所造成的损失。

漏煤损失 Q_4^{lm} : 部分燃料经炉排落入灰坑造成的损失。对于煤粉炉, 则 $Q_4^{lm} = 0$

飞灰损失 Q_4^{fh} : 未燃尽的碳粒随烟气带走所造成的损失。

机械未完全燃烧热损失 q_4

• 燃料特性对 q_4 的影响

- 灰分含量高和灰分熔点低的煤，固态可燃物被灰包裹，难以燃尽，灰渣损失大。
- 层燃时燃用挥发物低而焦结性强的煤：燃烧过程主要集中在炉排上，燃烧层温度高，较易形成熔渣，阻碍通风，增加灰渣损失。
- 层燃时燃用水分低，焦结性弱而细末又多的煤时：特别是在提高燃烧强度而增强通风的情况下，飞灰损失就增加。

机械未完全燃烧热损失 q_4

2. 燃烧方式对 q_4 的影响:

- 煤粉炉没有漏煤损失，但飞灰损失比层燃炉大
- 沸腾炉在燃用石煤或煤矸石时，飞灰损失大

3. 炉子结构对 q_4 的影响

- 煤粉炉炉膛的高低
- 燃烧器布置的位置

机械未完全燃烧热损失 q_4

4. 锅炉运行工况对 q_4 的影响

- 负荷增加，炉膛的气流速度增加， q_4 加大。
- 煤粉细度及配风。
- 过量空气系数：如太低， q_4 会增加。

机械未完全燃烧热损失 q_4

固体不完全燃烧热损失的测定和计算

1. 测定数据

在锅炉正常运行工况下，定时收集： G_{hz} 、 G_{fh} (kg/h)

取样分析：(1) 可燃物百分数： C_{hz} 、 C_{fh} (%)；

(2) 可燃物的发热量： $Q_{hz} = Q_{fh} = 32700$ (kJ/kg)

2. 计算公式

$$Q_4^{hz} = Q_{hz} \frac{C_{hz} G_{hz}}{100B} \quad (\text{kJ/kg})$$

$$Q_4^{fh} = Q_{fh} \frac{C_{fh} G_{fh}}{100B} \quad (\text{kJ/kg})$$

$$Q_4 = Q_4^{hz} + Q_4^{fh} = \frac{32700}{100B} (C_{hz} G_{hz} + C_{fh} G_{fh}) \quad (\text{kJ/kg})$$

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_r} \times 100 = q_4^{hz} + q_4^{lm} + q_4^{fh} \quad \%$$

机械未完全燃烧热损失 q_4

灰平衡

热平衡试验中，飞灰量很难准确测定，一般通过灰平衡方法解决

灰平衡方程：进入炉内燃料的总灰量应等于灰渣、漏煤及飞灰之和

$$\frac{BA^{ar}}{100} = G_{hz} \frac{100 - C_{hz}}{100} + G_{fh} \frac{100 - C_{fh}}{100}$$

上式两边分别乘以 $\frac{100}{BA^y}$

$$1 = \frac{G_{hz}(100 - C_{hz})}{BA^y} + \frac{G_{fh}(100 - C_{fh})}{BA^y}$$

令：

$$a_{hz} = \frac{G_{hz}(100 - C_{hz})}{BA^{ar}}$$

$$a_{fh} = \frac{G_{fh}(100 - C_{fh})}{BA^{ar}}$$

则：灰平衡方程为

$$a_{hz} + a_{lm} + a_{fh} = 1 \quad a_{fh} = 1 - a_{hz} - a_{lm}$$

机械未完全燃烧热损失 q_4

$$G_{fh} = \frac{a_{fh} BA^y}{100 - C_{fh}}$$

$$G_{hz} = \frac{a_{hz} BA^y}{100 - C_{hz}}$$

$$Q_4 = \frac{32700 A^y}{100} \left(\frac{a_{hz} C_{hz}}{100 - C_{hz}} + \frac{a_{fh} C_{fh}}{100 - C_{fh}} \right)$$

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_r} \times 100 \quad \%$$

气体不完全燃烧热损失 q_3

形成： q_3 是由于部分CO、H₂、CH₄等可燃气体未燃烧放热就随烟气排出所造成的。

影响因素

1. 炉子结构的影响

炉膛高度不够或炉膛体积太小。

当炉内水冷壁布置过多时，会使炉膛温度过低。

2. 燃料特性的影响

挥发份高的燃料，在其它条件相同时， q_3 相对要大一些。

3. 燃烧方式的影响

炉膛过量空气系数（过小或过大）；配风

炉内气流的混合与扰动等。

气体不完全燃烧热损失 q_3

气体不完全燃烧热损失的测定及计算

1. 测定

用烟气分析方法测出 V_{CO} 、 V_{H_2} 、 V_{CH_4} (Nm³/kg燃料)

2. 计算公式 $Q_3 = 12640V_{CO} + 10800V_{H_2} + 35820V_{CH_4} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$

$$= V_{gy} (126.4CO + 108H_2 + 358.2CH_4) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$$
$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_r} \times 100 \%$$

式中： $V_{gy} = \frac{1.866(C^y + 0.375S^y)}{RO_2 + CO}$, Nm³/kg燃料

$\left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$ 是考虑固体不完全燃烧的修正；实际燃烧的燃料量

CO_2 、 H_2 、 CH_4 ：干烟气中 CO 、 H_2 、 CH_4 的容积百分数，由热平衡试验通过验器分析仪测得。由于实际运行中，烟气中 H_2 、 CH_4 的含量极少，可忽略不计，计算简化。

气体不完全燃烧热损失 q_3

$$Q_3 = 126.4COV_{gy} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) = 235.9 \frac{C^y + 0.375S^y}{RO_2 + CO} \cdot CO \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$$

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_r} \times 100\% = \frac{235.9 C^y + 0.375S^y}{RO_2 + CO} \cdot CO \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \times 100$$

3. 缺少元素成分资料时

$$q_3 = 3.2\alpha \cdot CO \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$$

排烟热损失 q_2

排烟热损失：是指由排烟所带走的热量损失，烟气离开锅炉排入大气时，其温度比进入锅炉的空气温度高很多。

● 排烟热损失 q_2 计算

$$q_2 = (H_{py} - \alpha_{py} H_{lk}^0) \frac{100 - q_4}{Q_r}, \%$$

式中 H_{py} -- 排烟焓，取决于 ϑ_{py} 与 α_{py} ，kJ/kg

H_{lk}^0 -- 进入锅炉的冷空气焓，kJ/kg

α_{py} -- 排烟处过剩空气系数

➤ ϑ_{py} 由 q_2 、受热面低温腐蚀及金属耗量综合确定。

电站锅炉 ϑ_{py} 约在 110~160℃ 之间。

➤ α_{py} 取决于 α''_l 及烟道漏风 $\Delta\alpha$ ，后者同时影响 ϑ_{py}

对大中型锅炉 q_2 约为 4~8%

排烟热损失 q_2

影响因素：影响排烟热损失的主要因素是排烟温度和排烟容积

1. 排烟温度

➤ 排烟温度越高，排烟热损失越大。排烟温度每提高 $12\sim 15^{\circ}\text{C}$ ， q_2 将提高1%。

➤ 排烟温度过低经济上不合理，甚至技术上不允许。

(1) 烟气与工质的传热温差小，换热所需金属受热面就大大增加。

(2) 为了避免尾部受热面的腐蚀，排烟温度也不宜过低。

因此必须根据燃料与金属耗量进行技术经济比较来合理确定排烟温度。供热锅炉的排烟温度在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围内。

排烟热损失 q_2

排烟容积

影响排烟容积大小的因素有：

炉膛出口过量空气系数，
烟道各处漏风量
及燃料所含水分。

锅炉最佳过量空气系数的确定

使 q_2 、 q_3 、 q_4 三项热损失的总和最小，
所对应的炉膛出口过量空气系数

排烟热损失 q_2

计算公式:

$$Q_2 = (I_{py} - \alpha_{py} I_k^0) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) = [I_{py} - \alpha_{py} V_k^0 (ct)_{lk}] \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$$

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100 \quad \%$$

经验公式:
$$q_2 = (m + n\alpha_{py}) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \frac{g_{py} - t_{lk}}{100}$$

散热热损失 q_5

● 散热损失 q_5

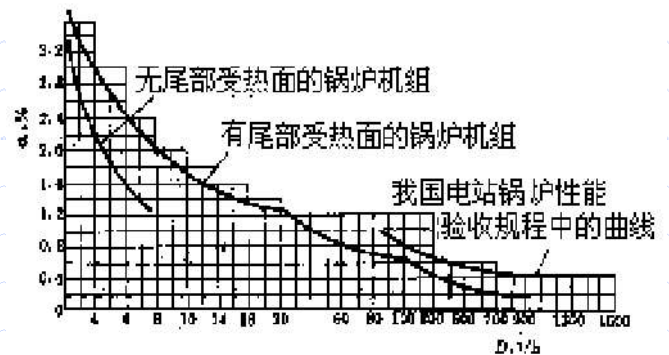
外表温度高于环境温度通过对流与辐射散失热量造成的损失。
可根据锅炉尾部受热面的布置查图确定

q_5 与锅炉运行负荷近似成反比变化

$$q'_5 = q_5 \frac{D}{D'}$$

q_5 、 q'_5 — 锅炉额定容量、运行容量下的散热损失

D 、 D' — 锅炉额定容量、运行容量



额定容量下锅炉的散热损失

散热损失 q_5

保温系数

保温系数：表示烟气在烟道中的放热量有多少被烟道中的受热面所吸收。

烟气在烟道中的放热量 \times 保温系数 = 烟道受热面的吸热量。

$$\varphi = \frac{\text{烟道中受热面吸热量}}{\text{烟气在烟道中放热量}} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_5} = 1 - \frac{q_5}{\eta + q_5}$$

其它热损失 q_6

- 灰渣物理热损失

固态排渣煤粉锅炉只在高灰分煤时才考虑
计算方法很简单

- 其它一些散热损失等

§ 4、锅炉效率及燃料消耗量计算

- ◆ 1、热效率及计算
- ◆ 2、燃料消耗量计算



热效率 η_{gr}

● 热效率

➤ 正平衡 $\eta_{gl} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100, \%$

➤ 反平衡 $\eta_{gl} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \%$

锅炉正平衡热效率

$$\eta_{gl} = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\%$$

1) 锅炉有效利用热量 Q_1 $Q_1 = \frac{Q_{gl}}{B}$ kJ/kg

2) 锅炉每小时有效利用热量 Q_{gl}

$$Q_{gl} = D \times 10^3 (i_q - i_{gs}) + D_{ps} \times 10^3 (i_{ps} - i_{gs}) \text{ kJ/h}$$

饱和蒸汽焓: $i_q = i'' - \frac{rW}{100}$ $\left\{ \begin{array}{l} r \text{--汽化潜热, kJ/kg} \\ W \text{--蒸汽湿度} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{工业锅炉} 1 \sim 5\% \\ \text{电站锅炉} < 1\% \end{array} \right.$

i_{gs} , i_{ps} —— 锅炉给水和排污水焓, kJ/kg;

i'' —— 干饱和蒸汽的焓, kJ/kg

$$\eta_{gl} = \frac{D \times 10^3 (i_q - i_{gs}) + D_{ps} \times 10^3 (i_{ps} - i_{gs})}{B Q_{dw}^y}$$

锅炉反平衡热效率

$$\eta_{gl} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad \%$$

正反平衡热效率比较

- 锅炉正平衡只能求得锅炉的热效率，不能据此研究和分析影响锅炉热效率的种种因素，以寻求提高热效率的途径。
- 反平衡则是依据对各种热损失的测定来计算其锅炉热效率。
- 对小型锅炉而言，一般以正平衡为主，反平衡为辅。
- 对于大型锅炉，由于不易准确测定燃料消耗量，其锅炉热平衡主要靠反平衡求得。

燃料消耗量 B

● 燃料消耗量 $B = \frac{Q}{Q_1} = \frac{100Q}{\eta_{gl}Q_r}, kg/s$

● 计算燃料消耗量 $B_j = B(1 - \frac{q_4}{100}), kg/s$

作业与思考题

- 1、什么是 q_4 ，影响 q_4 的因素有哪些？计算它至少需要测试哪些项目？在运行中可以采取哪些措施减小它？
- 2、什么是 q_2 ，影响 q_2 的因素有哪些？计算它至少需要测试哪些项目？在运行中可以采取哪些措施减小它？
- 3、分别论述在炉膛、烟道前部、烟道尾部、及制粉系统中，漏风对锅炉运行有哪些影响？
- 4、锅炉燃料消耗量和计算燃料消耗量有何不同？各在什么情况下使用？



作业与思考题

- 5、已知某台锅炉每小时的实际燃煤量为600 t/h，其发热量 $Q_{\text{net, ar}} = 15535 \text{ kJ/kg}$ ，试求该台锅炉每小时标准燃煤量。
- 6、已知：某锅炉额定蒸发量 $D=420\text{t/h}$ ，过热蒸汽的出口焓 $hgq'' = 3500\text{kJ/kg}$ ，进入锅炉的给水焓 $hgs=900\text{kJ/kg}$ ，锅炉排污率为3%，汽包内炉水焓 $h1s=1350\text{kJ/kg}$ ，各项热损失之和 $\Sigma q=10.1\%$ ，其中 $q4=2.5\%$ ，燃料低位发热量 $Q_{\text{net, ar}}=22000\text{kJ/kg}$ ，试求该锅炉的计算燃煤量和标准燃煤量。
- 7、已知：某锅炉运行时测得如下数据： $q2=6\%$ $q3=0.4\%$ $q4=2\%$ $q5=0.6\%$ $q6=0$ $hgq'' = 3500\text{kJ/kg}$ $hgs=890\text{kJ/kg}$ $B=40\text{t/h}$ 燃料低位发热量 $Q_{\text{net, ar}} = 17000\text{kJ/kg}$ 。试求该锅炉的蒸汽量。
- 8、大型电站锅炉常用什么方法求热效率，为什么？