

第三章 燃烧计算与热平衡计算

燃烧计算主要包括以下几个内容：

- (1) 燃烧所需的空气量计算；
- (2) 燃烧生成的烟气量计算；
- (3) 烟焓计算；
- (4) 锅炉机组热平衡计算及锅炉效率计算。

第一节 燃烧所需空气量计算

燃料燃烧:燃料中的可燃元素 (C、H、S) 与空气中的氧气 (O_2) 在高温条件下发生的发光发热的剧烈化学反应。

计算时假定:

- (1) 所需的空气为干空气;
- (2) 燃料燃烧所需的空气和生成的烟气均为理想气体。

一、理论空气量的计算

1kg (或1Nm³) 收到基燃料完全燃烧而又没有剩余氧存在时所需要的空气量称为理论 (或化学当量比状态) 空气量, 用符号V⁰表示, 其单位为Nm³/kg(或Nm³/Nm³)。

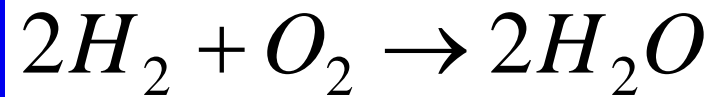
(1)以碳完全燃烧为例: $C + O_2 \rightarrow CO_2$ (3-1)

12 22.4

$1kg \frac{22.4}{12} Nm^3$

$$\frac{22.4}{12} \times \frac{C_{ar}}{100} = 1.886 \frac{C_{ar}}{100} \quad Nm^3/kg$$

(2) 1kg收到基燃料中的H完全燃烧所需的氧气量为：
为：

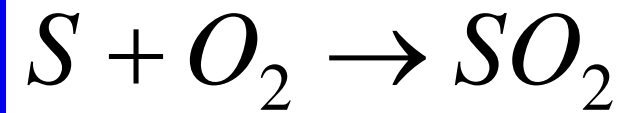


$$4 \quad 22.4$$

$$1kg \frac{22.4}{4} Nm^3$$

$$\frac{22.4}{4} \times \frac{H_{ar}}{100} = 5.56 \frac{H_{ar}}{100} Nm^3$$

(3) 1kg收到基燃料中的S完全燃烧所需的氧气量为：



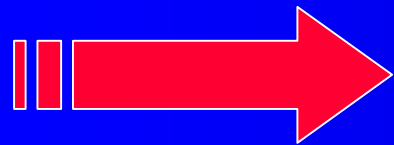
$$32 \quad 22.4$$

$$1kg \quad \frac{22.4}{32} Nm^3$$

$$\frac{22.4}{32} \times \frac{S_{ar}}{100} = 0.7 \frac{S_{ar}}{100} Nm^3$$

(4) 1kg收到基燃料中本身含有氧kg，这些氧相当于：

$$\frac{22.4}{32} \times \frac{O_{ar}}{100} = 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \text{ Nm}^3$$



燃烧1kg燃料所需的氧气量为：

$$V_{O_2}^0 = 1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 5.55 \frac{H_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \text{ Nm}^3$$

由于干空气中氧所占容积分数是21%，所以，燃烧1kg燃料所需的空气量为：

$$V^0 = \frac{1}{0.21} \left(1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 5.55 \frac{H_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \right)$$

$$= 0.0889(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.0333C_{ar}$$

$$= 0.0889R_{ar} + 0.265H_{ar} - 0.0333O_{ar}$$

Nm³/kg (3-5)

为了计算的方便，通常把 C_{ar} 和 S_{ar} 合并在一起，称为当量含碳量，用 R 来表示，

$$R_{ar} = C_{ar} + 0.375S_{ar}$$

二、实际供给空气量及过量空气系数

实际送入炉内的空气量称为实际供给空气量，用符号 V_k 表示。实际供给空气量与理论空气量之比，称为过量空气系数，用符号 α 表示（在空气量计算时用 β 表示），即：

$$\alpha(\beta) = \frac{V_k}{V^0} \quad (3-8)$$

表3-1 炉膛出口过量空气系数

燃烧型式		燃料	炉膛出口过量空气系数 α_1
煤粉炉	固态排渣	无烟煤、贫煤	1.20~1.25*
		烟煤、褐煤	1.20
	液态排渣 (开式、半开式)	无烟煤、烟煤	1.20~1.25*
		烟煤、褐煤	1.20
重油、煤气炉		重油、焦炉煤气、天然气、高炉煤气	1.10**
层燃炉	链条炉	无烟煤	1.5~1.6
		烟煤、褐煤	1.3
	播煤机 (包括播煤机—链条炉)	褐煤、烟煤	1.3~1.4
	手烧炉排	无烟煤	1.5
		烟煤、褐煤	1.4

三、锅炉漏风系数 $\Delta\alpha$

锅炉通常是负压运行，由于炉墙和穿墙管处不严密，故烟道沿程均有空气漏入，计算烟气量时要加上漏风量 ΔV ，用漏风系数 $\Delta\alpha$ 来表示。

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta V}{V^0} \quad (3-9)$$

(1)对各受热面来说，出口的过量空气系数，总是等于入口过量空气系数 α' 与漏风系数 $\Delta\alpha$ 之和，即

$$\alpha'' = \alpha' + \Delta\alpha \quad (3-10)$$

(2)烟道内的任一截面处的过量空气系数等于炉膛出口的过量空气系数与其前面各段烟道的漏风系数之和，即

$$\alpha = \alpha_1'' + \sum \Delta\alpha$$

式中 α_1'' —炉膛出口过量空气系数；

$\sum \Delta\alpha$ —炉膛出口与计算烟道截面间，各段烟道漏风系数之和。

(3)对空气预热器:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta'_{ky} = \beta''_{ky} + \Delta\alpha_{ky} \\ \beta''_{ky} = \alpha_1'' - \Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_{zf} \end{array} \right.$$

式中 $\beta'_{ky}\beta''_{ky}$ — 空预器进出口过量空气系数;

$\Delta\alpha_1$ — 炉膛漏风系数;

$\Delta\alpha_{zf}$ — 制粉系统漏风系数;

第二节 燃烧产物计算

燃烧产物：燃烧后生成的烟气及灰粒和未燃尽炭粒

烟气：燃料燃烧后生成的气体物质
烟气的组成

(1) 完全燃烧（过量空气系数大于1）：

氮气、氧气、水蒸气、二氧化碳、二氧化硫

(2) 不完全燃烧：

氮气、氧气、水蒸气、二氧化碳、二氧化硫、一氧化碳

一、理论烟气体量

理论烟气体量：1kg（或1Nm³）收到基燃料完全燃烧又没有剩余氧存在时，生成的烟气体积。

- 计算理论烟气体量中的各项气体的容积

1、三原子气体烟气体量 $V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$

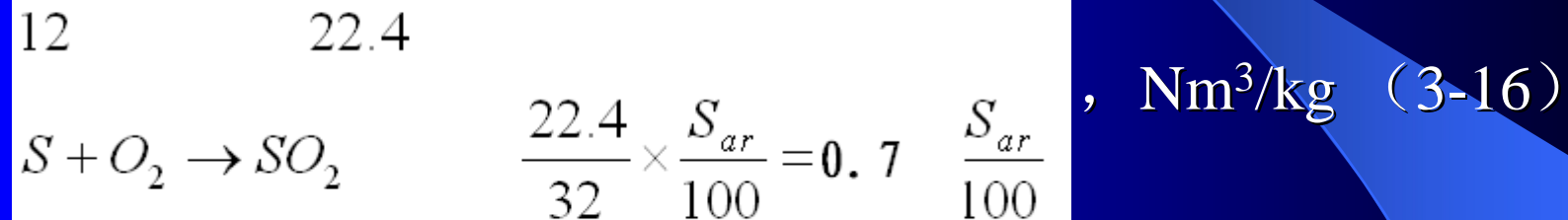
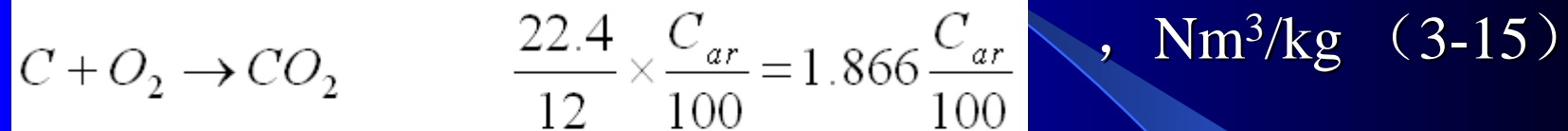
2、理论氮气体量 $V_{N_2}^0$

3、理论水蒸汽量 $V_{H_2O}^0$

$$V_y^0 = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0$$

1、理论烟气中二氧化碳和二氧化硫的体积

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$$



$$V_{RO_2} = 1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{AR}}{100}, \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3-17)$$

$$= 1.866 \left(\frac{C_{ar} + 0.375 S_{ar}}{100} \right) = 1.866 \frac{R_{ar}}{100}$$

2、理论氮气体积

在标准状态下， $V_{N_2}^0$ 由两部分组成：燃料中的氮所占体积和理论空气量中的氮所占的体积：

$$V_{N_2}^0 = \frac{22.4}{28} \times \frac{N_{ar}}{100} + 0.79V^0 = 0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.79V^0$$

Nm³/kg

3、理论水蒸气体积

$V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ 由以下四部分组成:

(1) 燃料中的氢完全燃烧生成的水蒸气体积:

$$\frac{2 \times 22.4}{2 \times 2.016} \times \frac{H_{\text{ar}}}{100} = 11.1 \frac{H_{\text{ar}}}{100}$$

Nm³/kg

(2) 标准状态下燃料中的水汽化生成的水蒸气体积:

$$\frac{22.4}{18} \times \frac{M_{\text{ar}}}{100} = 1.24 \frac{M_{\text{ar}}}{100}$$

Nm³/kg

(3) 理论干空气量带入的水蒸汽体积:

$$\frac{1}{1.293} \times \frac{d}{0.804} = 0.00161 d$$

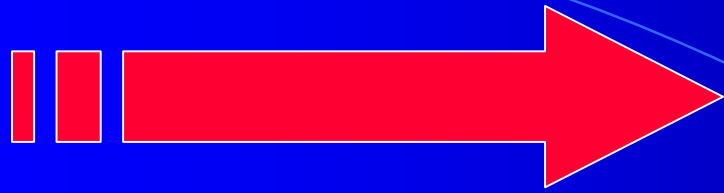
m^3/m^3

(4) 采用蒸汽雾化等设备带入的水蒸汽体积:

当采用蒸汽雾化设备时, 喷入的水蒸汽的质量为 W_{wh} , 水蒸汽的体积为:

$$\frac{22.4}{18} \times W_{\text{wh}} = 1.24 W_{\text{wh}}$$

m^3/kg



由1、2、3得：

由此可得理论烟气体积 V_y^0 为：

$$V_y^0 = 1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} + 0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.79V^0$$

$$+ 11.1 \frac{H_{ar}}{100} + 1.24 \frac{M_{ar}}{100} + 0.0161V^0 + 1.24W_{wh}, Nm^3 / kg$$

这种含有水蒸汽的烟气称为**湿烟气**，扣除水蒸汽后的烟气称为**干烟气**，理论干烟气量 V_{gy}^0 为：

$$V_{gy}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 \quad (3-22)$$

理论烟气量也可写成

$$V_y^0 = V_{gy}^0 + V_{H_2O}^0 \quad (3-23)$$

二、完全燃烧且 $\alpha > 1$ 时的燃烧产物

V_y 包括 V_y^0 与完全燃烧所剩余的干空气量及这部分干空气所携带的水蒸汽之和，即此时的烟气体积为：

$$V_y = V_y^0 + (\alpha - 1)V^0 + 0.0161(\alpha - 1)V^0 = V_y^0 + 1.061(\alpha - 1)V^0$$

$$\text{Nm}^3/\text{kg} \quad (3-24)$$

三、不完全燃烧时的燃烧产物

当供给的空气量不足 ($\alpha < 1$)，或空气量虽 $\alpha > 1$ ，但与燃料混合不好时，都会发生不完全燃烧。这时燃料中的一部分可燃物质未经燃烧而进入燃烧产物中，如CO。

假定1 kg燃料中含碳 ($C_{ar}/100$) kg, 其中有($C_{ar, CO_2}/100$)kg的碳燃烧生成 CO_2 , 有($C_{ar, CO}/100$)kg的碳燃烧生成 CO , 则标准状态下这两部分碳燃烧生成的 CO 和 CO_2 的体积 V_{CO} 、 V_{CO_2} 为:

$$V_{CO} = 1.866 \frac{C_{ar, CO}}{100}, \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3-31)$$

$$V_{CO_2} = 1.866 \frac{C_{ar, CO_2}}{100}, \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3-32)$$

RO₂和CO占干烟气的体积百分数为

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{gy}} \times 100 \% \quad (3-35)$$

$$CO = \frac{V_{CO}}{V_{gy}} \times 100 \% \quad (3-36)$$

则

$$V_{gy} = \frac{1.866(C_{ar} + 0.375S_{ar})}{RO_2 + CO}, \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3-38)$$

四、三原子气体的容积份额

- 在辐射换热计算中，三原子气体 RO_2 ， H_2O 均参与辐射换热。
- 三原子气体的容积份额

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_y} = p_{RO_2}$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_y} = p_{H_2O}$$

$$p_i V_m = p_m V_i$$

五、烟气中的飞灰浓度

- 对辐射换热有较大的作用，即每kg烟气中飞灰的质量。
- a_{fh} —烟气携带出炉膛的飞灰占总灰量的份额（0.85~0.95）。

$$\mu = \frac{A_{ar} \alpha_{fh}}{100m_y}$$

第三节 锅炉运行中烟气分析及其应用

一、烟气分析的目的及方法

烟气分析的目的：

如何知道空气量是否合适？

炉膛出口及烟道各处的过量空气系数如何计算？

对于一台正在运行中的锅炉，如何知道实际送入锅炉的空气量？

用化学吸收法，对烟气进行成分分析。

烟气分析的方法：

化学吸收法

电气测量法

红外吸收法

色谱分析法



KM9106英国凯恩综合烟气分析仪



控制机

- 适合不同要求的灵活系统
- 同时测量一点及多点的功能
- 可选择配置测量其它参数的部份,如 C, mA/mV 等
- 长期测量以分析不同的过程/步骤

分析盒

- 燃气参数 O₂, CO, NO_x, SO₂, H₂S, HC
- 压差,流速测量 (配皮托管)

德图testo350EPA 烟气分析仪





GA-21plus 便携式烟气分析仪



手持式烟气分析仪

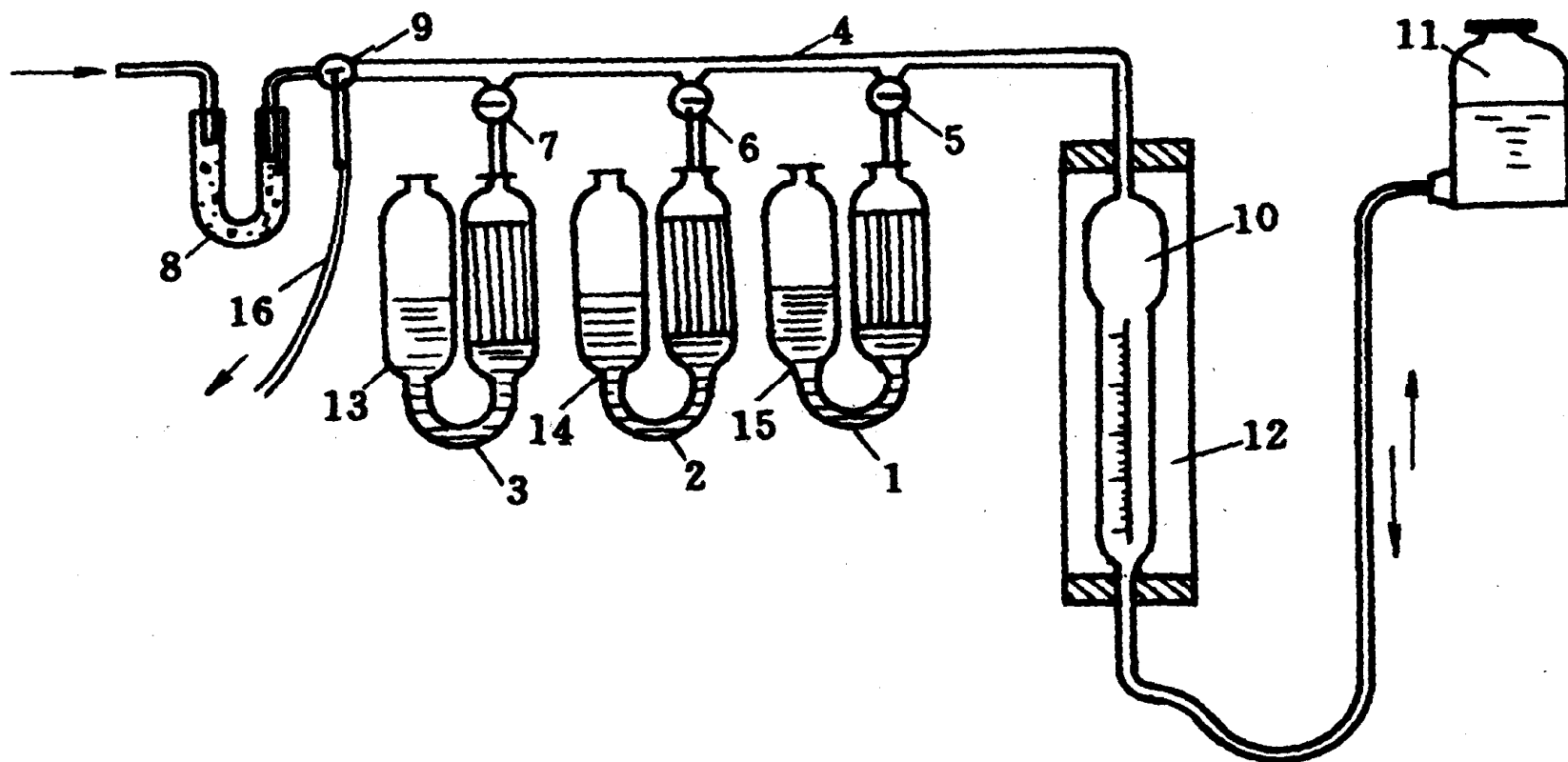
红外原理测量

二、奥氏烟气分析仪

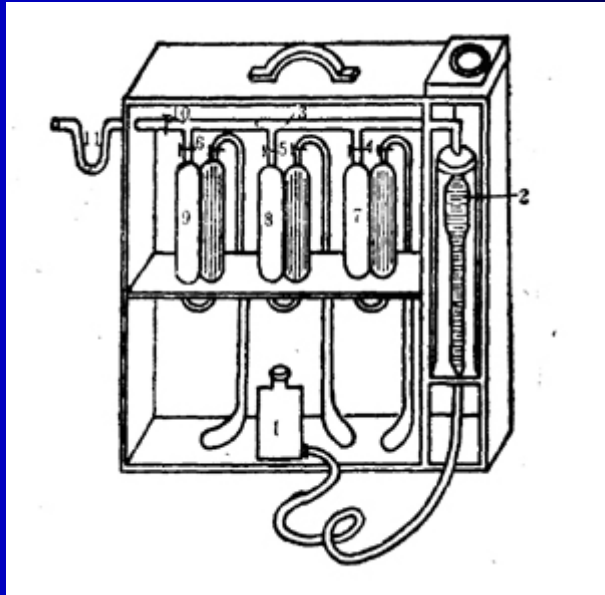
三个吸收瓶中依次放入不同的吸收剂：

- 第一个瓶放氢氧化钾（KOH）溶液，吸收 RO_2 ；
- 第二个瓶放焦性没食子酸 $\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_3$ 的碱性溶液，吸收 O_2 （同时也吸收 RO_2 ）；
- 第三个瓶放氯化亚铜的氨溶液 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}$ ，吸收 CO （同时也吸收 O_2 ）。通过在等温等压条件下，对送入一定量烟气（100ml）在逐个瓶中吸收减量的测定，来得到该气体的体积百分数。

$$\text{RO}_2 + \text{O}_2 + \text{CO} + \text{N}_2 = 100 \quad (3-43)$$



1、2、3—吸收瓶； 4—梳形管； 5、6、7—旋塞； 8—过滤器；
 9—三通旋塞； 10—量筒； 11—平衡瓶（水准瓶）； 12—水套管；
 13、14、15—缓冲瓶； 16—抽气



三、烟气全分析

燃烧法+化学吸收法  RGH-1型烟气分析仪

四、烟气中CO含量的计算

如不计固体未完全燃烧损失，不完全燃烧方程式为：

$$21 = RO_2 + O_2 + 0.605CO + \beta(RO_2 + CO) \quad (3-48)$$

五、 RO_2 和 RO_2^{\max} 的计算

当完全燃烧时， $CO=0$ ，完全燃烧方程式为：

$$21 - O_2 = (1 + \beta)RO_2 \quad (3-49)$$

$$RO_2^{\max} = \frac{21}{1 + \beta}, \%$$

六、过量空气系数 α 的确定

完全燃烧时，

$$\alpha = \frac{V^k}{V^0} = \frac{V^k}{V^k - V^g} = \frac{1}{1 - \frac{V^g}{V^k}}$$

$$V^k = \frac{V_{N_2}^{air}}{0.79} = \frac{V_{N_2} - 0.8 \frac{N_{ar}}{100}}{0.79} \approx \frac{V_{N_2}}{0.79} = \frac{V_{gy} \cdot N_2}{79}$$

$$V^g = \frac{V_{O_2}}{0.21} = \frac{V_{gy} \cdot O_2}{21}$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{100 - (RO_2 + O_2)}} \quad (3-52)$$

可以用下式估算：

$$\alpha \approx \frac{21}{21 - O_2} \quad (3-55)$$

不完全燃烧时

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0.5(CO + H_2) - 2CH_4}{100 - (RO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4)}} \quad (3-53)$$

第四节 空气、烟气焓的计算及温焓表

空气或烟气的焓都是指在等压条件下，将1kg燃料燃烧所需的空气量或所产生的烟气量从0°C加热到 t °C（空气）或 θ °C（烟气）时所需的热量，焓以符号H表示，单位为 kJ/kg。

一、空气焓的计算

1. 理论空气焓的计算： $H_k^0 = V^0 (ct)_k$

式中 V^0 —理论空气量， Nm^3/kg ;

$(ct)_k$ — 1Nm^3 湿空气在温度 $\theta^\circ\text{C}$ 时的容积比焓，
可查表3-5。

2. 实际空气的焓 H_k 的计算：

$$H_k = \beta H_k^0 = \beta V^0 (ct)_k$$

式中 β —过量空气系数。

二、烟气焓

1.设计时:

实际烟气焓等于理论烟气焓、过量空气焓和飞灰焓三部分，即：

$$H_y = H_y^0 + (\alpha - 1)H_k^0 + H_{fh} \quad (3-58)$$

$$H_y^0 = V_{RO_2} (c\theta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (c\theta)_{H_2O} \quad (3-59)$$

式中 $(c\theta)_{RO_2}$ 、 $(c\theta)_{N_2}$ 及 $(c\theta)_{H_2O}$ 一各成分在
温度 $\theta^\circ\text{C}$ 时的焓值。

烟气中飞灰的焓为

$$H_{\text{fh}} = \frac{A_{\text{ar}}}{100} \alpha_{\text{fh}} (c\theta)_{\text{h}}$$

$(c\theta)_{\text{h}}$ —1kg灰在 $\theta^{\circ}\text{C}$ 时的焓值，查表3-5；

$\frac{A_{\text{ar}}}{100} \alpha_{\text{fh}}$ —1kg燃料中的飞灰质量，单位为kg/kg。

表3-6 烟气携带飞灰的质量份额 α_{fh}

炉子型式	α_{fh}	炉子型式	α_{fh}
固态排渣煤粉炉	0.9~0.95	链条炉	0.1~0.2
液态排渣煤粉炉	0.7~0.85	抛煤机炉	0.25~0.4
卧式旋风炉	0.1~0.15	振动炉排炉	0.15~0.25
立式前置炉	0.2~0.4	往复炉排炉	0.1~0.2
鼓泡流化床炉	0.5~0.6	手烧炉	0.2~0.3

2. 锅炉运行时:

$$H_y = (V_{gy}c_{gy} + V_{H_2O}c_{H_2O}) + H_{fh}$$

3. 有烟气再循环时:

设烟气再循环率 r : $r = \frac{V_z}{V_c}$

再循环烟气容积 V_z

抽取点后烟气容积 V_c

有再循环的烟气焓:

$$H_{yz} = H_y + rH_c$$

混合后的烟气温度 ϑ_{yz} :

$$\vartheta_{yz} = \frac{H_{yz}}{(Vc)_{yz}}$$

三、烟气焓—温表及焓—温图

烟气焓—温表的编制步骤如下：

1. 计算出烟道各处的过量空气系数。
2. 对应于每一个 α'' 值，根据该段管道的温度范围假定几个烟气温度，分别求得假定温度下的焓。
3. 根据各个过量空气系数下的烟气温度和焓，绘制成焓—温表，将焓—温表中的温焓关系画成曲线则成为焓温图，如图3-3所示。

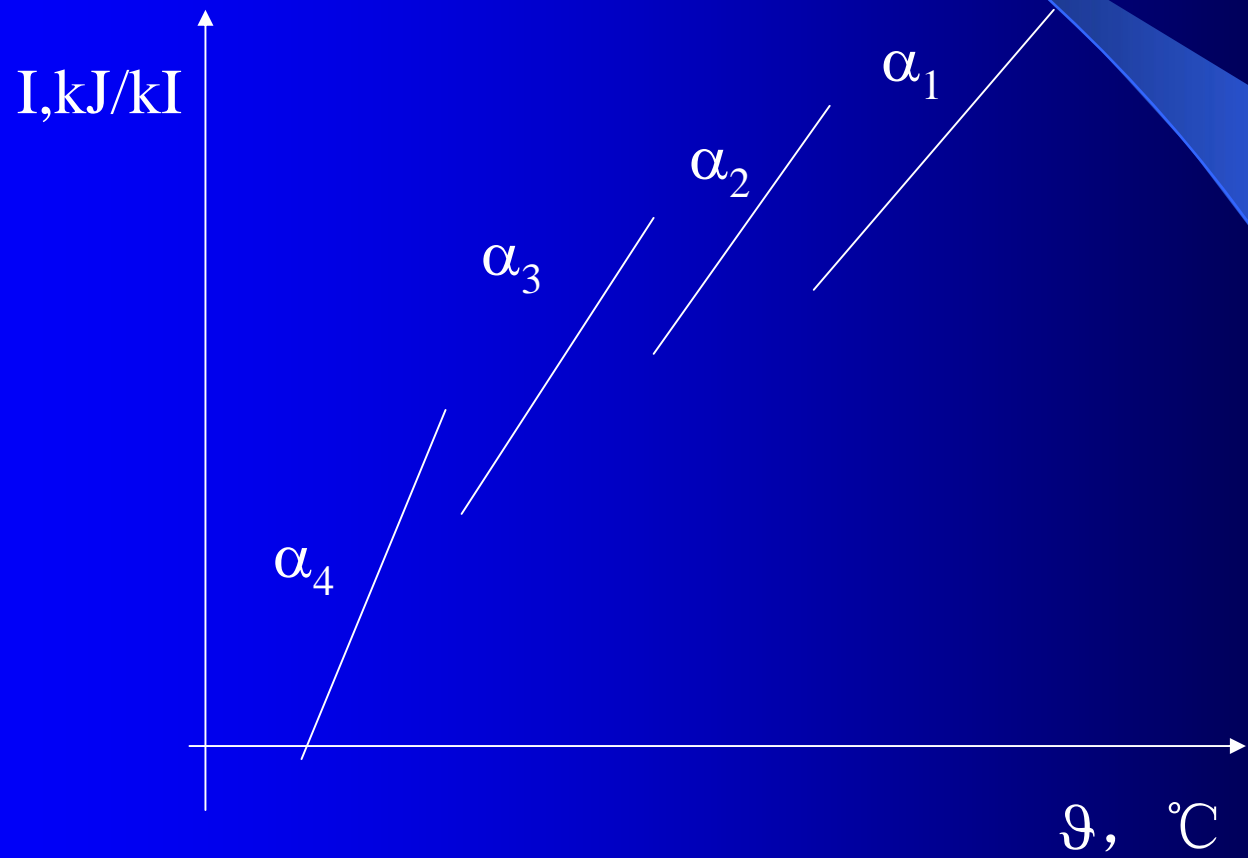


图3-3 焓—温图

第五节 锅炉热平衡

锅炉热平衡是指在稳定运行状态下，锅炉输入热量与输出热量及各项热损失之和的热量平衡。

计算基准：热平衡是以1 kg固体或液体燃料，或0℃、0.1MPa的1m³气体燃料为基础进行计算的。

一、热平衡方程式

对整个锅炉机组而言，输入锅炉的热量应等于输出锅炉的热量，写成数学表达式如下

$$Q_r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \text{ kJ/kg} \quad (3-68)$$

式中 Q_r —锅炉输入热量，kJ/kg；

Q_1 —锅炉有效利用的热量，kJ/kg；

Q_2 —排烟热损失，kJ/kg；

Q_3 —气体不完全燃烧热损失，kJ/kg；

Q_4 —固体不完全燃烧热损失，kJ/kg；

Q_5 —锅炉散热损失，kJ/kg；

Q_6 —其它热损失，kJ/kg。

将上式用方程右侧各项热量占输入热量的比值百分数来表示，则为

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6, \% \quad (3-69)$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100$$

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

.....

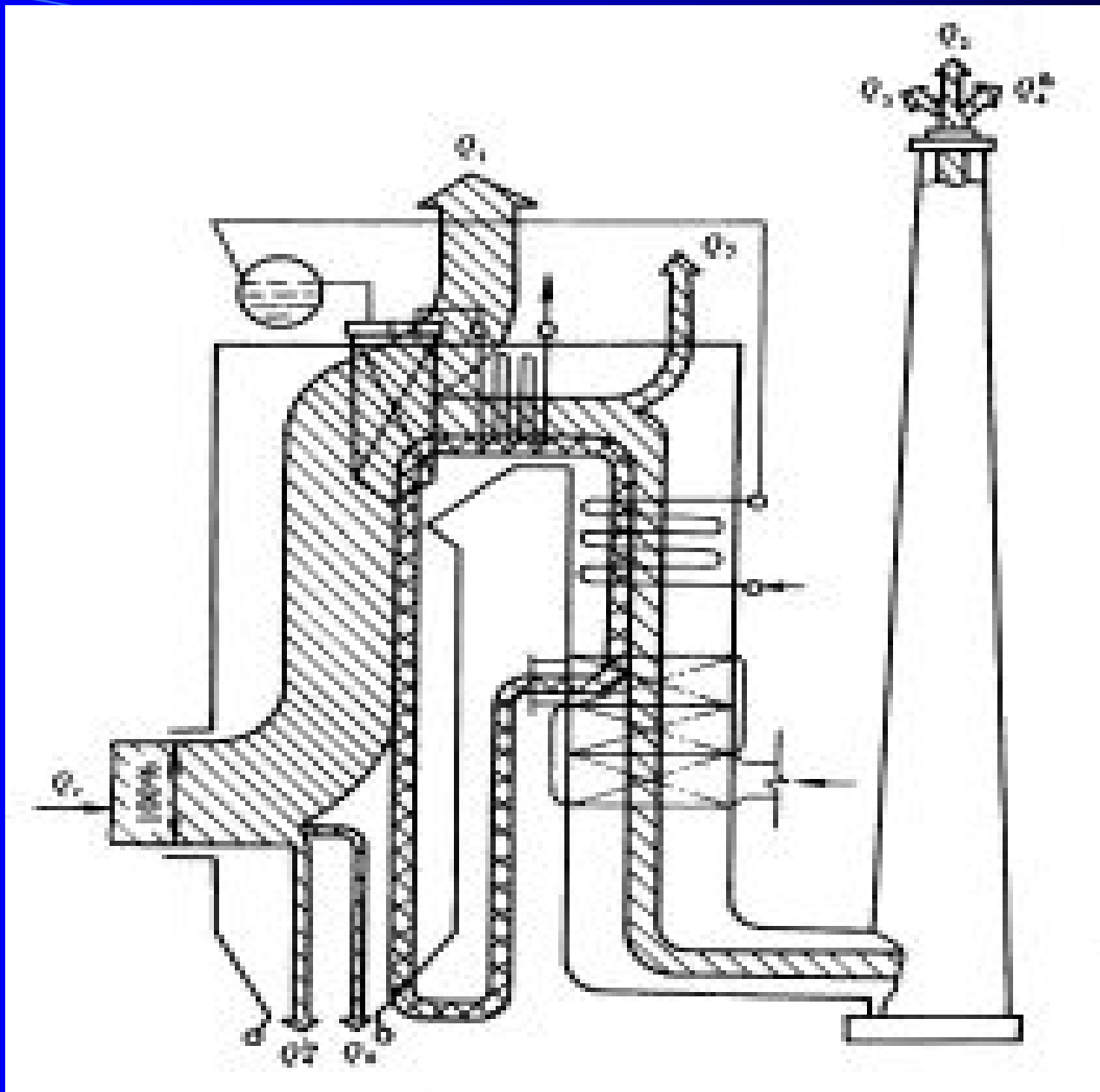


图3-4 锅炉热平衡示意图

二、输入锅炉热量

锅炉输入热量 Q_r 是由锅炉范围以外输入的热量，不包括锅炉范围内循环的热量，通常有如下几项：

$$Q_r = Q_{ar,net} + i_r + Q_{wr} + Q_{wh}, \text{ kJ/kg} \quad (3-70)$$

式中 $Q_{ar,net}$ —燃料的收到基低位发热量，kJ/kg；

i_r —燃料的物理显热，kJ/kg；

Q_{wr} —外热源加热空气时带入的热量，kJ/kg；

Q_{wh} —雾化燃油所用蒸汽带入的热量，kJ/kg。

1. 收到基低位发热量 $Q_{ar, net}$

2. 物理显热 i_r

$$i_r = c_{p, ar} t_r$$

对固体燃料

$$c_{ar} = c_d \frac{100 - M_{ar}}{100} + 4.187 \frac{M_{ar}}{100} \text{ kJ / (kg} \cdot \text{°C)}$$

对液体燃料：重油

$$c_{ar, ho} = 1.738 + 0.0025 t_{ho} \approx 2.09 \text{ kJ / (kg} \cdot \text{°C)}$$

3. 外热源带入的发热量

$$Q_{wr} = \beta (H_k^0 - H_{lk}^0)$$

4. 雾化燃油所用蒸汽带入的发热量

$$Q_{wh} = G_{wh} (h_{wh} - 2510) \text{kJ} / \text{kg}$$

三、锅炉有效利用热

锅炉有效利用热为：

$$Q=[D_{gr}(i_{gr}-i_{gs})+D_{zr}(i''_{zr}-i'_{zr})+D_{zy}(i_{zy}-i_{gs})+D_{pw}(i'-i_{gs})] \quad (3-77)$$

式中 D_{gr} 、 D_{zr} 、 D_{zy} 、 D_{pw} — 过热蒸汽量、再热蒸汽量、自用蒸汽量和排污量，kg/s；

i''_{gr} 、 i'_{gr} 、 i''_{zr} 、 i'_{zr} 、 i' 、 i_{gs} 、 i_{zy} — 分别为过热蒸汽出口焓、入口焓、再热蒸汽出口焓、入口焓、饱和水焓、给水焓和自用蒸汽焓，kJ/kg；

四、各项热损失

$q_4 \longrightarrow q_3 \longrightarrow q_2 \longrightarrow q_5 \longrightarrow q_6$

1. 固体不完全(机械未完全)燃烧热损失 q_4

(1)原因：燃料中未燃烧或未燃尽碳造成的热损失，这些碳残留在灰渣中。

(2) 计算:

对于煤粉炉:

$$q_4 = \left(a_{lz} \frac{C_{lz}}{100 - C_{lh}} + a_{fh} \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} \right) \frac{32700 A_{ar}}{Q_r} \% \quad (3-79)$$

灰平衡方程: $a_{lz} + a_{fh} = 1$ (3-80)

对于流化床锅炉:

$$q_4 = \left(a_{yl} \frac{C_{yl}}{100 - C_{yl}} + a_{lz} \frac{C_{lz}}{100 - C_{lz}} + a_{fh} \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} \right) \frac{32700 A_{ar}}{Q_r}$$

灰平衡方程: $a_{yl} + a_{lz} + a_{fh} = 1$

a_{lz} 、 a_{lm} 、 a_{yh} 、 a_{fh} 、 a_{yl} 、 a_{lh} 分别为炉渣、漏煤、烟道灰、飞灰、溢流灰、冷灰或冷炉斗灰渣中的灰量占入炉燃料总灰分的质量份额；

C_{lz} 、 C_{lm} 、 C_{yh} 、 C_{fh} 、 C_{yl} 、 C_{lh} 分别为炉渣、漏煤、烟道灰、飞灰、溢流灰、冷灰或冷炉斗灰渣中可燃物含量的质量百分数，32700为每kg纯碳的发热量，单位为kJ/kg。

注意：在设计锅炉中， q_4 按燃烧方式和燃料种类选择，如图3-10所示

表3-10 电厂锅炉 q_4 的一般数据

锅炉型式	煤种	$q_4(\%)$	备注	锅炉型式	煤种	$q_4(\%)$	备注
固态排渣煤粉炉	无烟煤	4~6	挥发分 高取小 值	固态排渣煤粉炉	无烟煤	3~4	挥发分 高取小 值
	贫煤	2			贫煤	1~1.5	挥发分 高取小 值
	烟煤	1~1.5	挥发分 高取小 值		烟煤	0.5	挥发分 高取小 值
	褐煤	0.5~1	挥发分 高取小 值		褐煤	0.5	

(3) 影响因素

燃料性质、燃烧方式、炉膛型式和结构、燃烧器设计和布置、炉膛温度、锅炉负荷、运行水平、燃料在炉内的停留时间和与空气的混合情况等。

2. 气体（化学）不完全燃烧热损失 q_3

(1) 原因：由于CO、H₂、CH₄等可燃气体未燃烧放热就随烟气离开锅炉排入大气而造成的热损失。

(2) 计算：当燃用固体燃料时，烟气中的H₂、CH₄等可燃气体的含量很少，为了简化计算，可认为烟气中的可燃气体只有CO。

$$q_3 = 236 \frac{C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}}{Q_{\text{r}}} \times \frac{\text{CO}}{\text{RO}_2 + \text{CO}} \times \frac{100 - q_4}{100} \times 100$$

(3-86)

注意：在进行锅炉设计时， q_3 值可按燃料种类和燃烧方式选取；煤粉炉 $q_3 = 0$ ，燃油和燃气炉 $q_3 = 0.5\%$ ，火床炉 $q_3 = (0.5\% \sim 1\%)$ 。

(3) 影响因素：

燃料的挥发分、炉膛过量空气系数、燃烧器结构和布置、炉膛温度和炉内空气动力工况等。

3. 排烟热损失 q_2

(1) 原因：由于排出锅炉时的烟气焓高于进入锅炉时的空气焓而造成的热损失，也是煤粉炉中热损失中最主要的一项，对大中型锅炉，约为4~8%。

(2) 计算

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100 = \frac{(H_{py} - \alpha_{py} H_{lk}^0)(100 - q_4)}{Q_r}$$

式中 H_{py} — 排烟焓, kJ/kg;

H_{lk}^0 — 进入锅炉的冷空气焓, 按冷空气温度计算, kJ/kg;

α_{py} — 排烟处的过量空气系数,

(3) 影响因素:

排烟温度和烟气容积。排烟温度越高, 则 q_2 越大; 烟气容积增大, q_2 也越大。

4. 散热损失 q_5

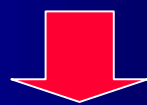
(1) 原因：由于锅炉炉墙、锅筒、集箱、汽水管道、烟风管道的温度高于环境温度而散失的热量。

(2) 散热损失的计算

查图3-5

按公式计算

$$q_{5,ed} = 5.82(D_{ed})^{-0.38}$$


$$q_5 = q_{5,ed} \frac{D_{ed}}{D}$$

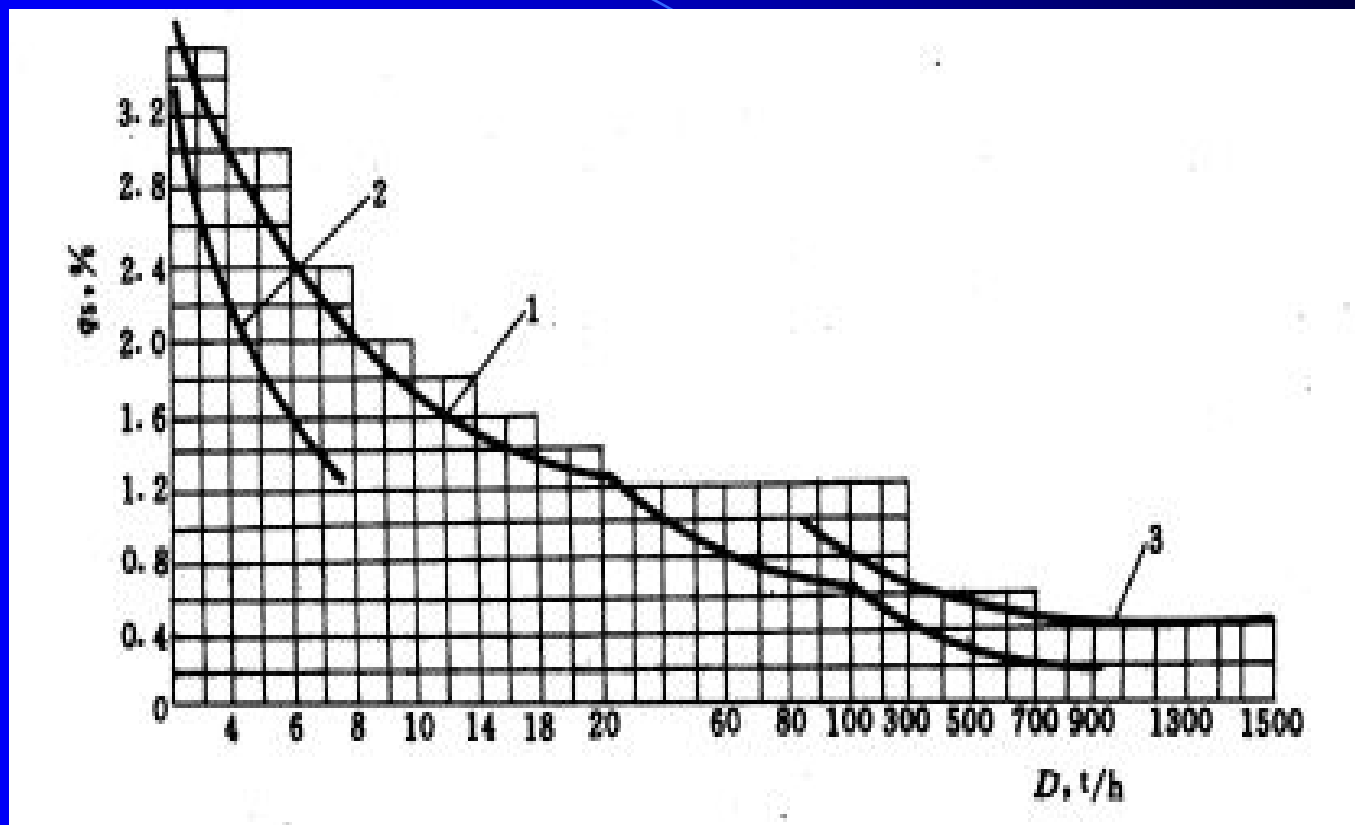


图3—5 锅炉额定蒸发量下的散热损失

1—锅炉整体(连同尾部受热面)；2—锅炉本身（无尾部受热面）；

3—我国电站锅炉性能验收规程中的曲线（连同尾部受热面）

(3) 保热系数

通常烟气放出的热量被受热面吸收的程度用保热系数 φ 来考虑。即

为了简化计算

$$\varphi = \frac{\text{受热面中工质吸收的热量}}{\text{烟气放出的热量}}$$

$$\varphi = \frac{Q_1 + Q_{ky}}{Q_1 + Q_{ky} + Q_5} \quad (3-90)$$

式中 Q_1 —锅炉有效利用热量, kJ/kg;

Q_{ky} —空气预热器总吸热量, kJ/kg;

Q_5 —散热损失的热量, kJ/kg。

当空气预热器的吸热量相对于锅炉有效利用热量很小时，保热系数可简化为：

$$1 - \varphi = \frac{q_5}{\eta + q_5} \quad (3-92)$$

(1- φ) 称为散热系数，它表示受热面所在烟道的散热程度。

(4) 影响因素：

锅炉外表面积的大小、外表面温度、炉墙结构、保温隔热性能及环境温度。

5. 其它热损失 q_6

$$q_6^{\text{hz}} = \frac{A_{\text{ar}} a_{\text{hz}} (c\theta)_{\text{hz}}}{Q_{\text{r}}}, \% \quad (3-93)$$

式中： $(c\theta)_{\text{hz}}$ — 1kg灰渣在温度为 θ 时的质量比焓，kJ/kg，可查表3-5；

a_{hz} — 排灰渣量占入炉燃料总灰分的质量份额。

灰渣温度：对固态排渣炉和火床炉，取 600°C ；液态排渣炉， $\theta_{\text{hz}} = t_3 + 100^\circ\text{C}$ ；流化床锅炉溢流灰温度等于床温，冷渣管排出冷灰温度比床温低 50°C 。

五、锅炉效率 η

锅炉效率即为锅炉的有效利用热与锅炉送入热量之比，即：

(1) 正平衡法：

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100 \quad , \% \quad (3-94)$$

(2) 反平衡法

在锅炉设计或热效率试验时常用，用下式求得 η ：

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) , \% \quad (3-95)$$

再按下式计算出锅炉每小时的实际燃料消耗量 B ，其单位为kg/h：

$$B = \frac{100 Q}{\eta Q_r} , \text{ kg/s} \quad (3-96)$$

式中 Q —工质（水，蒸汽）的总有效利用热，kJ/s。

扣除 q_4 造成的影响，实际参加燃烧的燃料量为 B_j （计算燃料消耗量）

$$B_j = B \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \quad (3-97)$$

小结:

燃料燃烧放出热量逸离锅炉造成的损失

$$q_2 \quad q_5 \quad q_6$$

未燃烧带出热量造成的损失

$$q_3 \quad q_4$$

$$\eta_r = 100 - (q_3 + q_4), \%$$

第六节 锅炉热平衡试验方法

一、热平衡试验的目的

- (1) 确定锅炉效率；
- (2) 确定锅炉的各项热损失；
- (3) 确定不同运行工况下的各项经济指标，制定合理的运行操作守则。

二、热平衡试验的要求

- (一) 试验负荷的选择
- (二) 煤质与主要参数的允许波动范围
- (三) 试验前的稳定阶段与试验持续时间

三、热平衡试验测定内容

热平衡试验测定内容，应根据试验要求而定，一般进行热平衡试验（反平衡）的主要测定项目如下。

- （一）入炉原煤的采样
- （二）飞灰取样及可燃物含量测定
- （三）炉渣取样及可燃物含量测定
- （四）烟气成分分析

五、试验报告

锅炉热平衡试验技术报告内容与所做的工作的特点和内容有关。其编写程序一般包括：

- (1) 试验的目的与方法；
- (2) 锅炉设备的结构特性与运行情况；
- (3) 测量方法与试验工作的特点；
- (4) 试验结果及分析；
- (5) 结论与建议；
- (6) 数据综合表及线图；
- (7) 测量技术及仪表的说明附件；
- (8) 其他附件。