



工业锅炉设备

Copyright © 2013 DGUT. Permission required for reproduction or display.

任课教师：张彦佐

Email: zhangyz@dgut.edu.cn

化学工程与能源技术学院
School of Chemical and Engineering and Energy Technology
东莞理工学院
DongGuan University of Technology



2014年3月



作业：

1. 画出各种基之间的关系图；
2. 简述燃料的元素成分为何要分成几种基准？



- 各种基之间的关系见图2-1

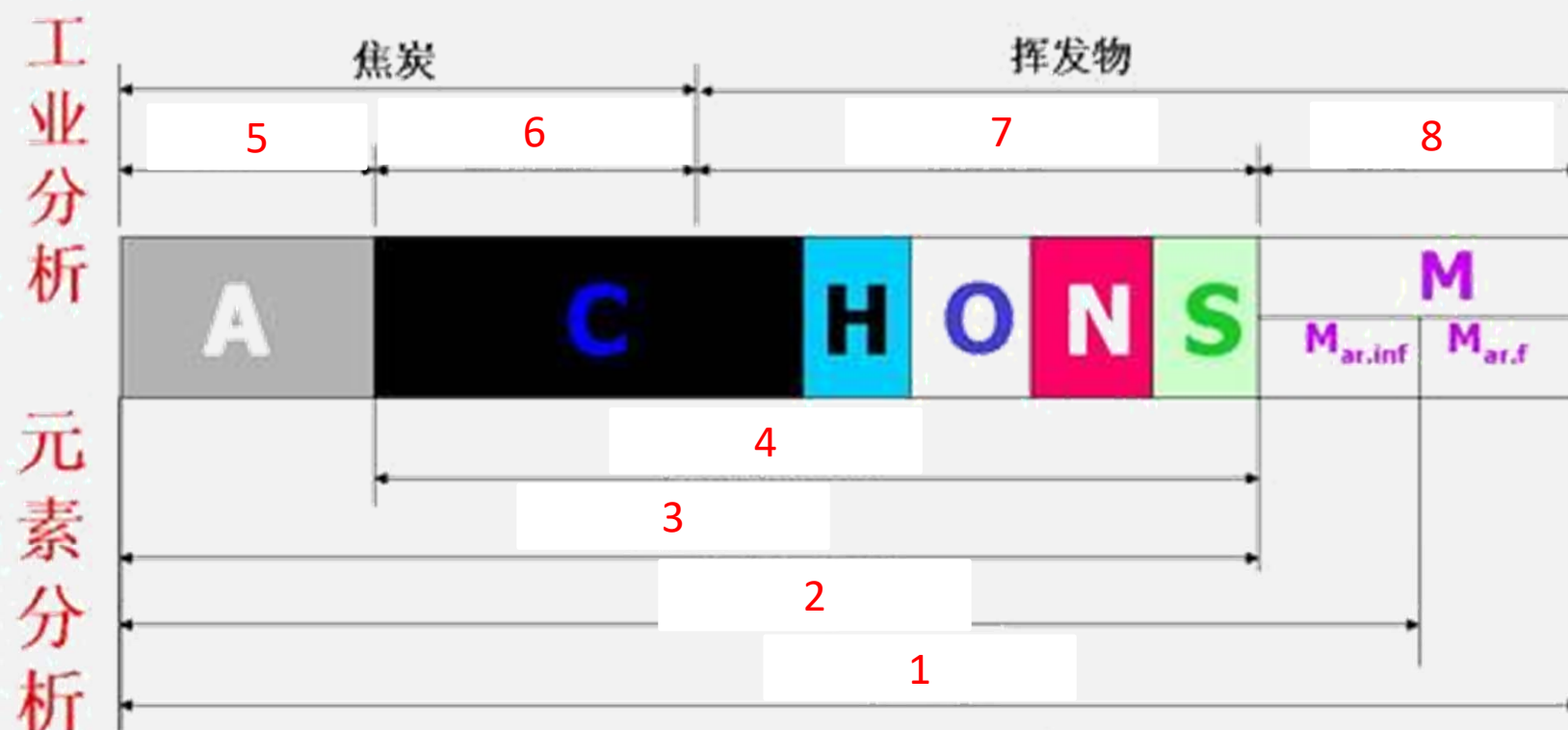


图2-1 燃料的各种分析基准的关系



第三章 工业锅炉热工计算

- 3.1 煤和燃料油的燃烧计算及燃烧工况检测
- 3.2 气体燃料的燃烧计算及燃烧工况检测
- 3.3 烟气焓的计算
- 3.4 锅炉机组的热平衡
- 3.5 锅炉热工计算示例



1. 燃料的燃烧？

燃料中的可燃元素和氧在高温条件下发生剧烈的氧化反应，同时放出大量热量的过程。

2. 燃料的燃烧产物？



3. 锅炉热工计算（燃烧计算）的任务：

- 确定燃料燃烧时，需要的空气量？
- 生成的烟气量？
- 空气焓、烟气焓？



4. 计算基准

- 固体燃料和液体燃料：以**1kg**质量燃料为基准；
- 气体燃料：以标准状态下**1m³**体积燃料为基准。

5. 几个假定

- 空气、烟气所含有的各组成气体及水蒸气，均为理想气体，在标准状态下，**1kmol**气体的体积为**22.4m³**。
- 空气只是氧和氮的混合气体，其体积比为：**21:79**。



燃料的燃烧工况

● **理论工况** 燃料在没有过剩空气的情况下完全燃烧燃烧产物（烟气）组成成分 CO_2 、 SO_2 、 N_2 和 H_2O

理论烟气量 V_y^0

● **设计工况** 实际送入的空气量大于理论空气量，以保证燃料完全燃烧燃烧产物（烟气）组成成分 CO_2 、 SO_2 、 N_2 、 H_2O 和剩余 O_2

实际烟气量 V_y

● **实际工况** 实际送入的空气量大于理论空气量，但为不完全燃烧燃烧产物（烟气）组成成分 CO_2 、 SO_2 、 N_2 、 H_2O 、剩余 O_2 和未完全燃烧气体 CO

实际烟气量 V_y



第一节燃烧过程的化学反应

第二节燃烧所需的空气量

第三节燃烧产生的烟气量

第四节烟气分析

第五节燃烧方程式

第六节运行中过量空气系数的确定

第七节空气和烟气的焓

第八节锅炉机组的热平衡

第九节锅炉机组的热平衡试验



第一节 燃烧过程的化学反应

1. 化学反应式

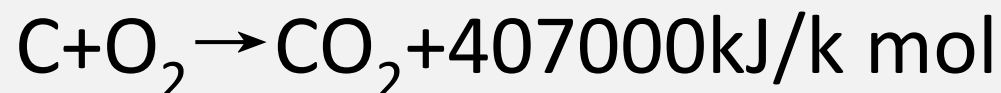




第一节 燃烧过程的化学反应

碳的燃烧

- 碳燃烧消耗的氧气量（完全燃烧）



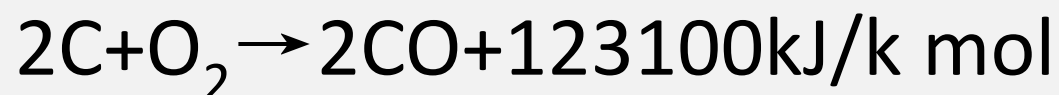
可得： $12.1 \text{ kg C} + 22.41 \text{ m}^3 \text{O}_2 \rightarrow 22.41 \text{ m}^3 \text{CO}_2$

即 $1 \text{ kg C} + 1.866 \text{ m}^3 \text{O}_2 \rightarrow 1.866 \text{ m}^3 \text{CO}_2$

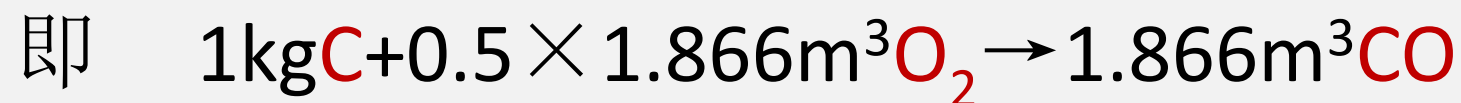
上式说明，每1kgC完全燃烧需要1.866m³的O₂并产生1.866m³的CO₂。



- 碳燃烧消耗的氧气量（不完全燃烧）



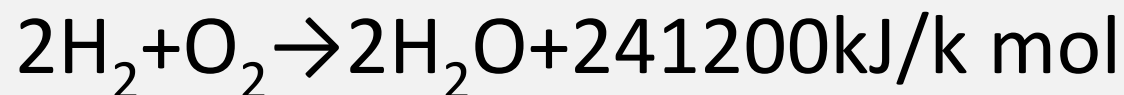
可得：



也即每1kgC不完全燃烧需要 $0.5 \times 1.866 \text{ m}^3$ 的 O_2 并产生 1.866 m^3 的CO。



氢的燃烧



可得：



即



即：每1kgH燃烧需要5.56m³的O₂并产生11.1m³的H₂O。



硫的燃烧



可得: $32\text{kgS} + 22.41\text{m}^3\text{O}_2 \rightarrow 22.41\text{m}^3\text{SO}_2$

即 $1\text{kgS} + 0.7\text{m}^3\text{O}_2 \rightarrow 0.7\text{m}^3\text{SO}_2$

即每1kgS燃烧需要0.7m³的O₂并产生0.7m³的SO₂。



第二节 燃烧所需的空气量

一. 理论空气量

- 1kg（或1m³）燃料完全燃烧时所需的最低限度的空气量（空气中的氧无剩余）称为理论空气量。

以容积表示时，其代表符号为 V^0



- 1kg燃料完全燃烧需要的理论氧气总量为:

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

- 燃料本身的氧量:

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



- 1kg燃料完全燃烧真正需由空气提供的理论氧量为:

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

- 1kg燃料燃烧所需的理论空气量 V^0 为:

$$V^0 = \frac{1}{0.21} V_{O_2}^0 = 0.0889 C_{ar} + 0.265 H_{ar} + 0.0333 (S_{ar} - O_{ar}) \quad \text{m}^3$$

(3-1)



二. 实际空气量和过量空气系数

- 在锅炉的实际运行中，为使燃料燃尽，实际供给的空气量总是要大于理论空气量，超过的部分称为过量空气量。
- 实际空气量 V_k 与理论空 V_k^0 之比称为过量空气系数（ α 用于烟气量计算， β 用于空气量计算）。

$$\alpha = \frac{V_k}{V_k^0} \quad (3-6)$$



- 实际空气量: $V_k = \alpha V_k^0$
- 锅炉燃烧在炉膛出口结束。该处过量空气系数对燃烧影响较大。一般设计时取:
 - 燃用无烟煤及劣质烟煤: 1.2~1.25;
 - 燃用烟煤及褐煤: 1.15~1.20。



三. 漏风系数和空气平衡

- 对于负压运行的锅炉，外界冷空气会通过锅炉的不严密处漏入炉膛以及其后的烟道中，致使烟气中的过量空气增加。
- 相对于1kg燃料而言，漏入的空气量 ΔV_k 与理论空气量 V_k^0 之比称为漏风系数。

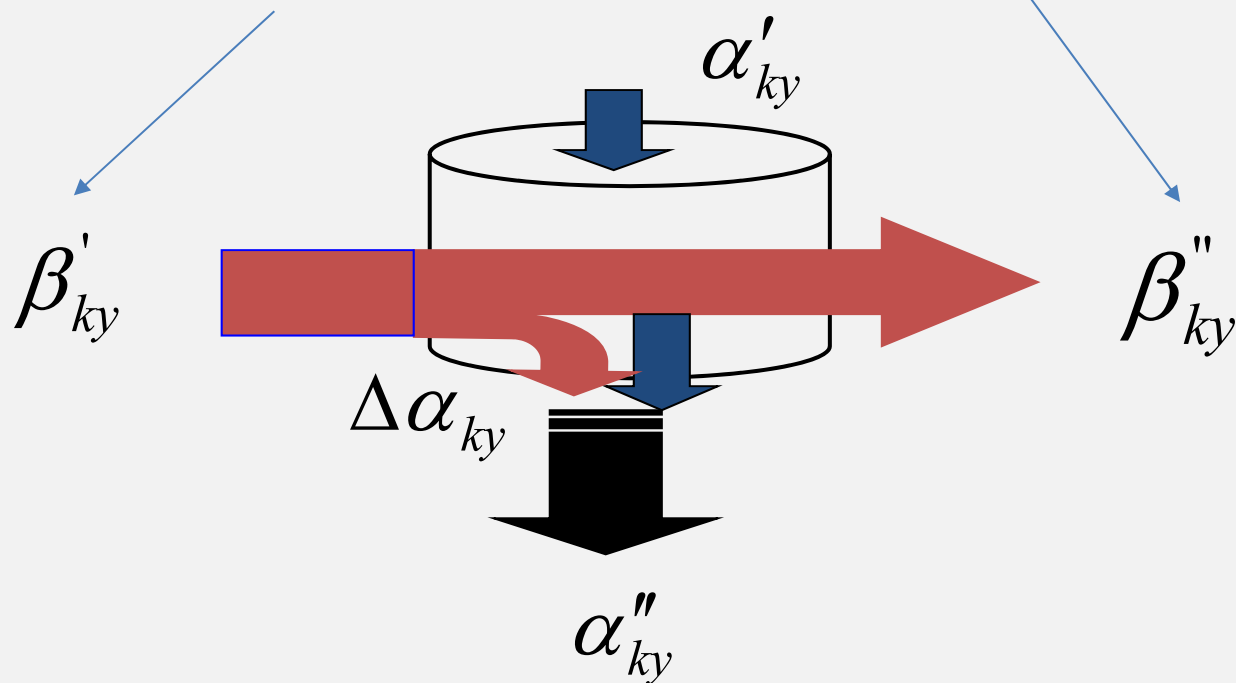
以 $\Delta \alpha$ 表示，即：

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta V_k}{V_k^0}$$



- 空气预热器中，空气侧压力比烟气侧高，所以会有部分空气漏入烟气侧，该级的漏风系数 $\Delta\alpha_{ky}$ 要高些。

离开锅炉空气预热器前的空气量与理论空气量的比值
进入锅炉空气预热器前的空气量与理论空气量的比值

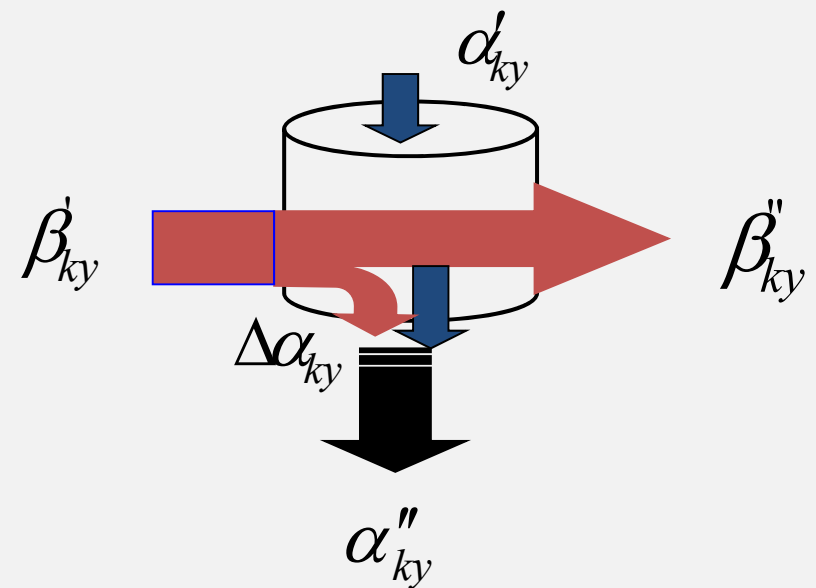




- 在空气预热器中，有：

$$\beta'_{ky} = \beta''_{ky} + \Delta\alpha_{ky}$$

$$\alpha''_{ky} = \alpha'_{ky} + \Delta\alpha_{ky}$$





第三节 燃烧产生的烟气量

一、理论烟气量

1、理论烟气的组成成分

如果实际参加燃烧的湿空气中的干空气量等于理论空气量，且使1kg的燃料完全燃烧时产生的烟气量称之为理论烟气量。

理论烟气的组成成分为：





2、理论烟气量的计算

- 因为理论烟气中的各成分均为理想气体，所以：

$$V_y^0 = \overbrace{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}}^{(3-10)} + \overbrace{V_{\text{N}_2}^0}^{(3-12)} + \overbrace{V_{\text{H}_2\text{O}}^0}^{(3-11)} \quad m^3 / kg \quad (3-7)$$

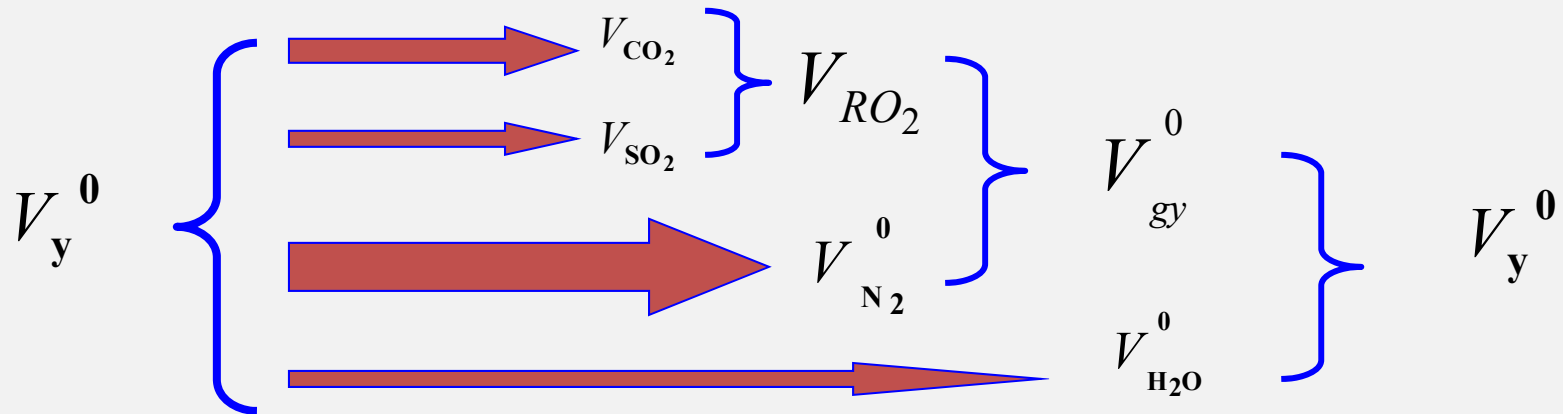
- 也可以写成干烟气与水蒸气的和：

$$V_y^0 = V_{gy}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 \quad m^3 / kg$$



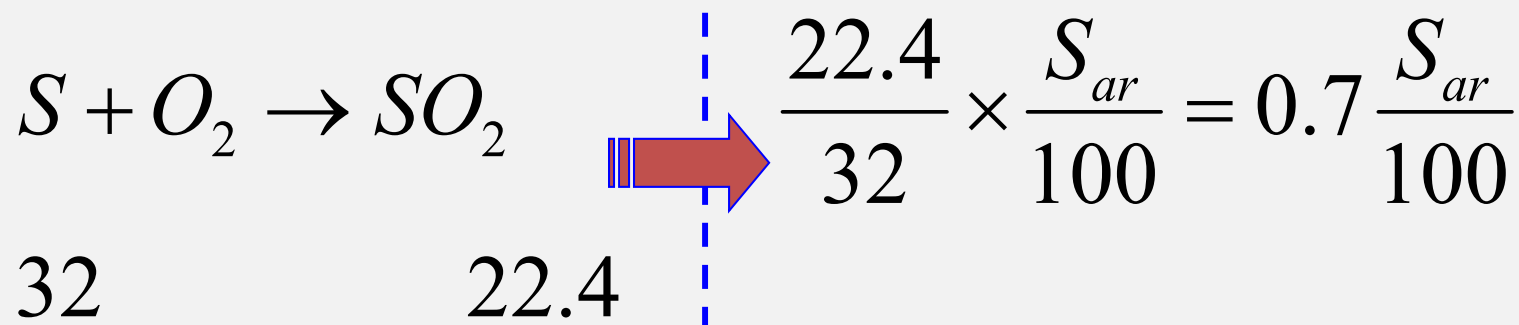
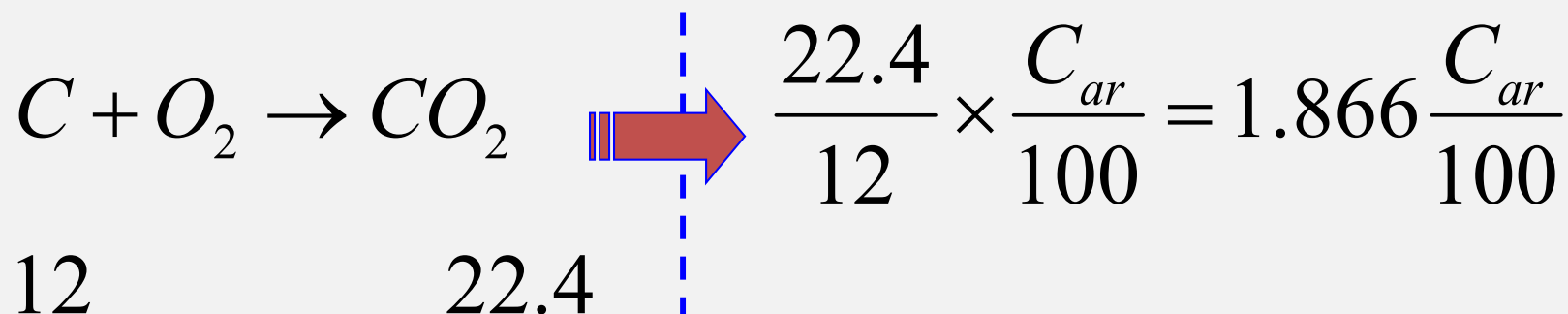
$$V_y^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 \quad m^3 / kg$$

$$V_y^0 = V_{gy}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 \quad m^3 / kg$$





二氧化碳和二氧化硫的体积



$$\xrightarrow{\quad} V_{RO_2} = 1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} \quad (3-10)$$



理论水蒸气体积

(1) 由煤中的水分: $\frac{22.4}{18} \times \frac{M_{ar}}{100} = 1.24 \frac{M_{ar}}{100}$

(2) 煤中氢元素转换的水分: $\frac{2 \times 22.4}{2 \times 2} \times \frac{H_{ar}}{100} = 11.1 \frac{H_{ar}}{100}$

(3) 由理论空气量 V^0 带入的水分, 即相对于每kg燃煤带入的水蒸汽容积:

$$1.61d_k V^0 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (d_k=0.01\text{kg/kg})$$



(4) 采用蒸汽雾化等设备带入的水蒸气体积:

$$\frac{22.4}{18} G_{wh} = 1.24 G_{wh}$$

• 可得理论烟气量:

雾化1kg重油消耗的水蒸气量

$$V_{H_2O}^0 = 0.0124 M_{ar} + 0.111 H_{ar} + 0.016 V^0 + 1.24 G_{wh}$$

(3-11)



理论氮气体积

由两部分组成：燃料中的氮所占体积和理论空气中的氮所占的体积，即：

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

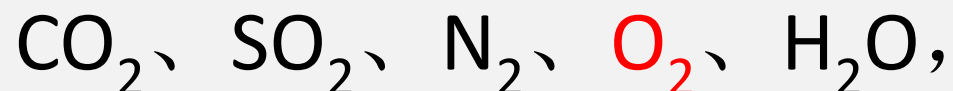
$$V_{N_2}^0 = 0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.79V^0 \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (3-12)$$



二. 完全燃烧时的实际烟气量

1、完全燃烧时实际烟气量的组成成分

如果实际参加燃烧的湿空气中的干空气量 V_k 大于理论空气量 V_k^0 （即 $\alpha > 1$ ），且使1kg的燃料完全燃烧时产生的烟气量称之为完全燃烧时的实际烟气量，完全燃烧时实际烟气的组成成分为：





2、完全燃烧时实际烟气量的计算

- 完全燃烧时烟气中的各成分均假设为理想气体，所以：

$$V_y = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O} \quad (3-20)$$

- 三原子气体烟气量 $V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} \quad (3-10)$

- 表示成干烟气： $V_y = V_{gy} + V_{H_2O} \quad m^3 / kg \quad (3-20)$



二氧化碳和二氧化硫的体积

$$\begin{array}{ccc} C + O_2 \rightarrow CO_2 & \frac{22.4}{12} \times \frac{C_{ar}}{100} = 1.866 \frac{C_{ar}}{100} & \\ 12 & 22.4 & (3-8) \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} S + O_2 \rightarrow SO_2 & \frac{22.4}{32} \times \frac{S_{ar}}{100} = 0.7 \frac{S_{ar}}{100} & \\ 32 & 22.4 & (3-9) \end{array}$$

$$V_{RO_2} = 1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (3-10)$$



氮气体积

- 两部分组成：理论氮气量和过量空气中包含的氮气量，即：

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0.79(\alpha - 1)V^0 \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

(3-18)



氧的体积

- 氧的体积也就是过量空气中包含的氧，即：

$$V_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)V^0 \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

(3-17)



水蒸气体积

- 两部分组成：理论水蒸气量和随过量空气带入的水蒸气量，即：

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0.0161(\alpha - 1)V_k^0 \quad (3-19)$$

$$V_y = V_y^0 + (\alpha - 1)V_k^0 + 0.0161(\alpha - 1)V_k^0 \quad (3-20)$$

$$V_{gy} = V_{gy}^0 + (\alpha - 1)V^0 \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (3-21)$$



三、不完全燃烧时的烟气量

- 当发生不完全燃烧时，烟气的成分除了 CO_2 、 SO_2 、 N_2 、 O_2 、 H_2O 外，还有不完全燃烧产物 CO 以及 H_2 和 C_mH_n 等。其中 H 和 C_mH_n 数量很少，一般工程计算中可忽略不计。
- 因此，当燃料不完全燃烧时，可以认为烟气中不完全燃烧产物只有 CO 。烟气量为：

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



1、二氧化碳与一氧化碳的体积

$$V_{CO} = 1.866 \frac{C_{ar,CO}}{100}$$

$$V_{CO_2} = 1.866 \frac{C_{ar,CO_2}}{100} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$V_{CO_2} + V_{CO} = 1.866 \frac{C_{ar}}{100} \quad (3-27)$$



2. 不完全燃烧时烟气中氧的体积

$$V_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)V^0 + 0.5 \times 1.866 \frac{C_{ar.CO}}{100}$$

$$V_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)V^0 + 0.5V_{CO}$$

得到:

$$V_{gy} = V_{RO_2} + V_{CO} + V_{O_2} + V_{N_2}^0 + \frac{0.79}{0.21} (V_{O_2} - 0.5V_{CO})$$

m^3/kg



第四节 烟气分析

- 烟气分析的目的
- 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？如何知道空气量是否合适？锅炉燃烧调整？

答案：通过实时、在线监测锅炉过量空气系数。

- 炉膛出口及烟道各处的过量空气系数？烟气分析测出某处的烟气成分，再由过量空气系数的计算式算出。



一、干烟气的容积成分

- 如果燃烧不完全，则干烟气的成分为：
- $\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO} = 100$
- 通过烟气分析，可测得 CO_2 、 SO_2 、 O_2 、 CO 的含量。



二、奥氏烟气分析仪



3.1.4

烟气成分分析仪

- 原理：化学吸收
- 注意：测量得到的数据为烟气成分的容积百分数



烟气分析手段:

化学方法

吸收剂吸收

燃烧吸收
色谱分析

物理方法

导热性

导磁性
导电性
光学性



三、根据烟气分析结果对干烟气体积的计算

- 奥氏分析仪的分析结果为烟气体积百分含量，则可得书式3-50
- 烟气成分分析仪得到浓度数据，ppm（百万分之一）
- 现用 mg/m^3 ，换算关系：
$$1\text{ppm} = \text{分子量}/22.4 \quad \text{mg}/\text{m}^3。$$



- 各种分析设备均已经商业化。电厂均要求上烟气在线监测系统。
- 在燃烧正常的情况下，煤粉炉炉膛出口烟气中的主要成分含量范围：

$$\text{RO}_2=14\sim16\%; \text{O}_2=2\sim5\%$$



第五节 燃烧方程式

- 原理
- 在燃料与空气完全燃烧的条件下，燃烧烟气产物中的 RO_2 和 O_2 与燃料的元素分析成分之间必然存在一定的关系。
- 完全燃烧方程反映其间内在关系。



- 推导（完全燃烧，无CO）
- 由烟气分析的结果（均为干烟气成分）

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{gy}} \times 100\%$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{gy}} \times 100\%$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{gy}} \times 100\%$$

$$RO_2 + O_2 + N_2 = 100$$



- 完全燃烧方程式:

$$21 - O_2 = (1 + \beta)RO_2 \quad (3-48)$$

- 燃料特性系数

$$\begin{aligned} \beta &= 0.21 \frac{0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.79V^0}{V_{RO_2}} - 0.79 \\ &= 2.35 \frac{H_{ar} - 0.126O_{ar} + 0.038N_{ar}}{C_{ar} + 0.375S_{ar}} \end{aligned} \quad (3-44)$$



讨论

- 烟气中三原子气体的最大百分比含量：
由完全燃烧方程得：

$$RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta} \quad (3-48)$$

当送入理论空气量，且完全燃烧时，

$$(RO_2)_{\max} = \frac{21}{1 + \beta} \quad (3-49)$$

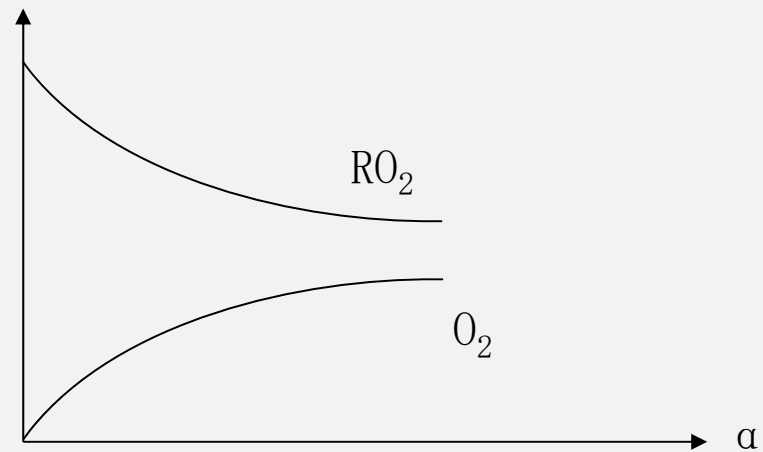


基本知识

- 在燃煤的条件下，通常，

$$RO_2 = 14 \sim 19\%$$

$$O_2 = 2 \sim 4\%$$





不完全燃烧方程

- 在不完全燃烧的条件下，且认为仅存在CO，将满足如下方程，

$$21 = RO_2 + O_2 + 0.605CO + \beta(RO_2 + CO) \quad (3-46)$$

- 由不完全燃烧方程，可以干烟气中CO的含量

$$CO = \frac{(21 - \beta RO_2) - (RO_2 + O_2)}{0.605 + \beta} \quad (3-47)$$

$$\begin{aligned} \beta &= 0.21 \frac{0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.79V^0}{V_{RO_2}} - 0.79 \\ &= 2.35 \frac{H_{ar} - 0.126O_{ar} + 0.038N_{ar}}{C_{ar} + 0.375S_{ar}} \quad (3-44) \end{aligned}$$



第六节 运行中过量空气系数的确定

- 通过烟气分析得到。推导（完全燃烧）

$$\alpha = \frac{V^k}{V^0} = \frac{V^k}{V^k - V^g} = \frac{1}{1 - \frac{V^g}{V^k}} \quad (3-50)$$

$$V^k = \frac{V_{N_2}^{air}}{0.79} = \frac{V_{N_2} - 0.8 \frac{N_{ar}}{100}}{0.79} \approx \frac{V_{N_2}}{0.79} = \frac{V_{gy} \cdot N_2}{79} \quad V^g = \frac{V_{O_2}}{0.21} = \frac{V_{gy} \cdot O_2}{21} \quad (3-52)$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{100 - (RO_2 + O_2)}} \quad (3-53)$$



- 利用完全燃烧方程式，可用 O_2 代替 RO_2 ，结果为：

$$\alpha = \frac{(RO_2)_{\max}}{RO_2} \quad (3-59)$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad (3-59)$$



测定烟气中的 O_2 ，即可计算得到过量空气系数 α

- 广泛采用：

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad (3-59)$$



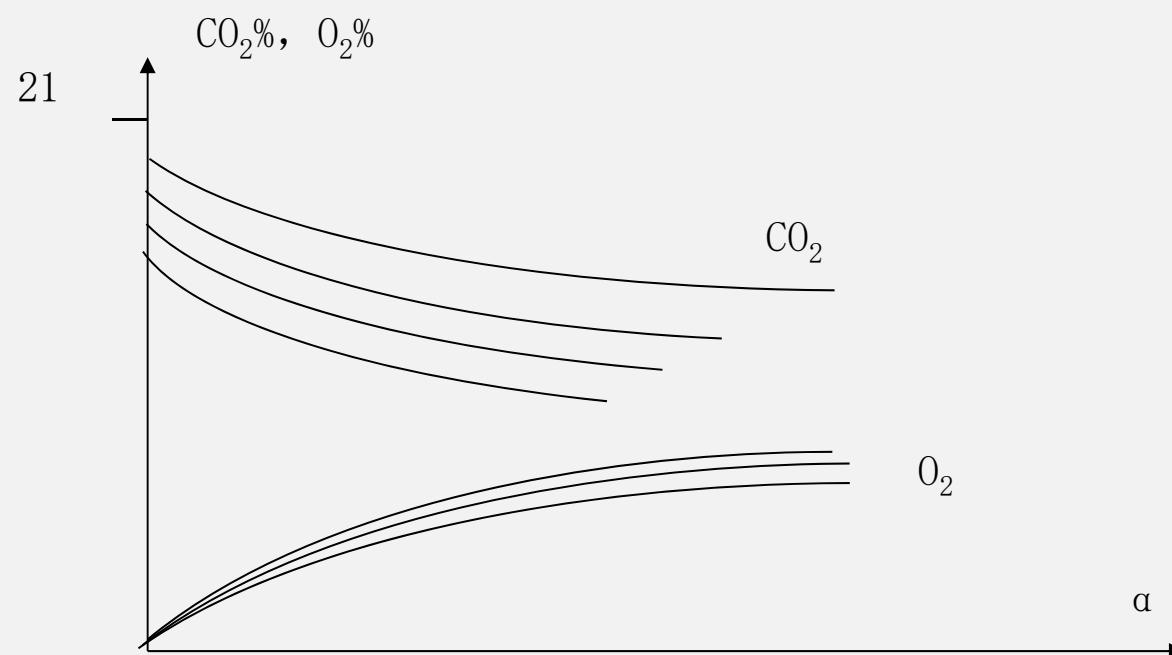
测定烟气中的 RO_2 ，也可计算得到过量空气系数 α

- 较少采用：

$$\alpha = \frac{(RO_2)_{\max}}{RO_2}$$



烟气成分随过量空气系数的变化





课堂作业:

- 1、简述 $\alpha=21/(21-O_2)$ 与 $\alpha=(RO_2)_{\max}/RO_2$ 在锅炉运行中有何实用意义?
- 2、分析空气量(V^0 , V_k , ΔV), 烟气量(V_y , V_y^0 , V_{gy})和组成气体(V_{H_2O} , $V_{H_2O}^0$, V_{RO_2} , V_{N_2} , $V_{N_2}^0$, O_2 , CO , N_2)随过量空气系数 α 的变化如何变化?
- 3、某锅炉燃煤的特性系数 $\beta=0.11$, 运行中测知省煤器前后的 RO_2 值分别为14.3%及14%, (或 O_2 值分别为4.3%及4.6%)。求该省煤器处的漏风系数 $\Delta\alpha$ 。
- 4、某无烟煤的特性如下: $C_{daf}=94\%$, $H_{daf}=1.4\%$, $O_{daf}=3.7\%$, $N_{daf}=0.6\%$, $S_{daf}=0.3\%$, $A_{ar}=24\%$, $M_{ar}=4\%$ 。燃料特性系数 $\beta=0.024$, 当过量空气系数 α 为1.1时, 求实际空气量。



1、简述 $\alpha=21/(21-O_2)$ 与 $\alpha=(RO_2)_{\max}/RO_2$ 在锅炉运行中有何实用意义？

答：在锅炉运行中，燃料燃烧所需风量的多少常用炉膛出口处的过量空气系数来表示。过量空气系数直接影响锅炉运行的经济性，准确、迅速的测定它，是监督锅炉经济运行的主要手段。由于这两个公式分别反应了过量空气系数与烟气中的氧及二氧化碳的含量的关系。如果燃料一定，根据燃烧调整实验可以确定对应于最佳过量空气系数下的 RO_2 和 O_2 的数值，运行中用氧量表或二氧化碳表测定并保持这样的数值就可以使锅炉处在经济工况下运行，从而实现对运行锅炉的过量空气系数的监督和调整。



2、分析空气量(V^0 , V_k , ΔV), 烟气量(V_y , V_y^0 , V_{gy})和组成气体(V_{H_2O} , $V_{H_2O}^0$, V_{RO_2} , V_{N_2} , $V_{N_2}^0$, O_2 , CO , N_2)随过量空气系数 α 的变化如何变化?

答: (1) 空气量中的 V^0 是理论空气量, 它决定于燃料的性质, 不随 α 的变化而变化, V_k , ΔV 都随 α 的增加而增加, 随 α 的减小而减小;

(2) 烟气量中的 V_y^0 是理论烟气量, 它也决定于燃料的性质, 不随 α 的变化而变化, 而 V_y 和 V_{gy} 都随 α 的增加而增加, 随 α 的减小而减小;

(3) 烟气组成中 $V_{H_2O}^0$ 、 V_{RO_2} 、 $V_{N_2}^0$ 不随 α 的变化而变化, V_{H_2O} 、 V_{N_2} 、 N_2 、 O_2 随 α 的增加而增加, 随 α 的减小而减小; CO 虽然也随 α 的增加而减小, 随 α 的减小而增大, 但 α 过大时, CO 反而会增大。



3、某锅炉燃煤的特性系数 $\beta=0.11$ ，运行中测知省煤器前后的 RO_2 值分别为14.3%及14%，(或 O_2 值分别为4.3%及4.6%)。求该省煤器处的漏风系数 $\Delta\alpha$ 。

解：方法1： $(RO_2)_{\max} = 21/(1+\beta) = 21/(1+0.11) = 18.92\%$ (P67, 3-49)
 $\alpha' = (RO_2)_{\max} / RO_2' = 18.92/14.3 = 1.323$ (P69, 3-60)
 $\alpha'' = (RO_2)_{\max} / RO_2'' = 18.92/14 = 1.351$
 $\Delta\alpha = \alpha'' - \alpha' = 1.351 - 1.323 = 0.028$

解：方法2： $\alpha' = 21/(21 - O_2') = 21/(21 - 4.3) = 1.257$ (P69, 3-59)
 $\alpha'' = 21/(21 - O_2'') = 21/(21 - 4.6) = 1.280$
 $\Delta\alpha = \alpha'' - \alpha' = 1.280 - 1.257 = 0.023$

答：省煤器漏风系数 $\Delta\alpha=0.023$ 或 0.028



4、某无烟煤的特性如下： $C_{daf}=94\%$ ， $H_{daf}=1.4\%$ ， $O_{daf}=3.7\%$ ， $N_{daf}=0.6\%$ ， $S_{daf}=0.3\%$ ， $A_{ar}=24\%$ ， $M_{ar}=4\%$ 。燃料特性系数 $\beta=0.024$ ，当过量空气系数 α 为1.1时，求实际空气量。

解：（1）先求收到基成分：

干燥无灰基换算到收到基的系数为：

$$(100-A_{ar}-M_{ar})/100=(100-24-4)/100=0.72$$

则收到基成分为 $C_{ar}=0.72 \times C_{daf}=0.72 \times 94=67.68\%$

$$H_{ar}=0.72 \times H_{daf}=0.72 \times 1.4=1.008\%$$

$$O_{ar}=0.72 \times O_{daf}=0.72 \times 3.7=2.664\%$$

$$N_{ar}=0.72 \times N_{daf}=0.72 \times 0.6=0.432\%$$

$$S_{ar}=0.72 \times S_{daf}=0.72 \times 0.3=0.216\%$$

（2）求理论空气量：

$$\begin{aligned} V^0 &= 0.0889(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.0333O_{ar} && (\text{P58, 3-1}) \\ &= 0.0889(67.68 + 0.375 \times 0.216) + 0.265 \times 1.008 - 0.0333 \times 2.664 \\ &= 6.202 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

（3）求实际空气量： $V_K = \alpha \times V^0 = 1.1 \times 6.202 = 6.8226 \text{ m}^3/\text{kg}$ (P59, 3-6)

答：实际空气量 $V_K = 6.8226 \text{ m}^3/\text{kg}$



作业:

1. 在 $\alpha > 1$ 的条件下，完全燃烧或不完全燃烧时烟气各由哪些成分组成？

答：完全燃烧时由二氧化碳、氧气、氮气、二氧化硫和水蒸汽组成；不完全燃烧时，烟气除上述成分外，还有一氧化碳。

2. 什么是实际空气量？为什么按实际空气量供应空气？

答：实际空气量等于理论空气量加过量空气。燃料在炉内燃烧时，可燃质空气中氧气很难达到理想的混合，如仅按理论空气量供应空气，必然有一部分可燃质得不到氧或缺氧燃烧，使不完全燃烧损失增大。因此，应按实际空气量供应空气，增加两者混合机会，减少不完全燃烧损失。



第七节 空气和烟气的焓

焓(enthalpy)的概念与计算

- 定义：指定条件下，将1kg物质从 0°C 加热到 $\theta^{\circ}\text{C}$ 时所需要的热量，单位kJ/kg。
- 描述流动介质进行能量交换的关系时，焓是最有用和有效的；
- 单位质量的物质所含的全部热能，仅与状态有关，而与途径无关；
- 实际计算中需要知道燃烧产物（常压）的温度与焓值间的关系；
- 水蒸汽则需要根据温度和压力来求得焓值；
- 前人均已经制成表格、图线或程序。



一、空气焓

理论空气焓计算：

$$h_k^0 = V^0 (c\theta)_k, \text{ kJ/kg} \quad (3-105)$$

实际空气焓：

$$h_k = \alpha h_k^0, \text{ kJ/kg}$$

式中： $(c\theta)_k$ 为 1m^3 空气连同携带的水蒸气在温度为 $\theta^\circ\text{C}$ 时的焓。表3-4 每公斤空气含有10克水。



表 3-1

1m³ 空气、烟气和 1kg 灰的焓

kJ/m³, kJ/kg

θ (°C)	$(\theta)_{CO_2}$	$(\theta)_{H_2}$	$(\theta)_{O_2}$	$(\theta)_{H_2O}$	$(\theta)_k$	$(\theta)_h$
100	170	130	132	151	132	80
200	358	260	267	305	266	168
300	559	392	407	463	403	260
400	772	527	551	626	542	357
500	994	664	699	795	684	461
600	1225	804	850	969	830	554
700	1462	948	1004	1149	978	665
800	1705	1094	1160	1334	1129	770
900	1952	1242	1318	1526	1282	812
1000	2204	1392	1478	1723	1435	1005
1100	2458	1544	1638	1925	1595	1128
1200	2717	1697	1801	2132	1753	1261
1300	2977	1853	1964	2344	1914	1426
1400	3239	2009	2128	2559	2076	1583
1500	3503	2166	2294	2779	2239	1777
1600	3769	2325	2461	3002	2403	1957
1700	4036	2484	2629	3229	2567	2206
1800	4305	2644	2797	3458	2732	2412
1900	4574	2804	2967	3690	2899	2625
2000	4844	2965	3138	3926	3066	2847
2100	5115	3128	3309	4163	3234	
2200	5387	3289	3483	4402	3402	



二、烟气焓

- 烟气的组成

$$V_y \left\{ \begin{array}{l} V_y^0 \left\{ \begin{array}{l} V_{RO2} \\ V_{N2}^0 \\ V_{H2O}^0 \end{array} \right. \\ (\alpha - 1)V^0 \text{标米干空气的湿空气/公斤} \end{array} \right.$$

飞灰



烟气焓组成

- 热力学上，混合气体的焓等于各组成气体焓的和，外加灰分的焓。

$$h_y = h_y^0 + (\alpha - 1)V^0(c\mathcal{G})_k + \frac{A_{ar}}{100}a_{fh}(c\mathcal{G})_h \quad (3-103)$$

$$h_y \left\{ \begin{array}{l} h_y^0 \left\{ \begin{array}{l} h_{RO2} = V_{RO2} \\ h_{N2}^0 = V_{N2}^0 \\ h_{H2O}^0 = V_{H2O}^0 \end{array} \right. \\ (\alpha - 1)h^0 = (\alpha - 1)V^0 \\ h_{fh} \end{array} \right.$$



1、理论烟气焓

$$h_y^0 = V_{RO2}(c\mathcal{H})_{RO2} + V_{N2}^0(c\mathcal{H})_{N2} + V_{H2O}^0(c\mathcal{H})_{H2O} \quad (3-104)$$

1m³的成分在温度 θ °C时的焓值，可查表。

$(c\mathcal{H})_i$



2、实际烟气的焓

- 理论烟气焓加飞灰焓、过量空气焓
- 飞灰热焓值 h_{fh} （只有含量高时才考虑）

$$\frac{A_{ar}}{100} a_{fh} (c_g)_h \quad \text{kJ/kg} \quad (3-106)$$



温焓表

- 通过燃烧产物的焓值的计算，列出焓值与温度对应的表格（编程计算），是锅炉热力计算的基础：即：

$$h_y = f(\alpha, \vartheta)$$



温焓表

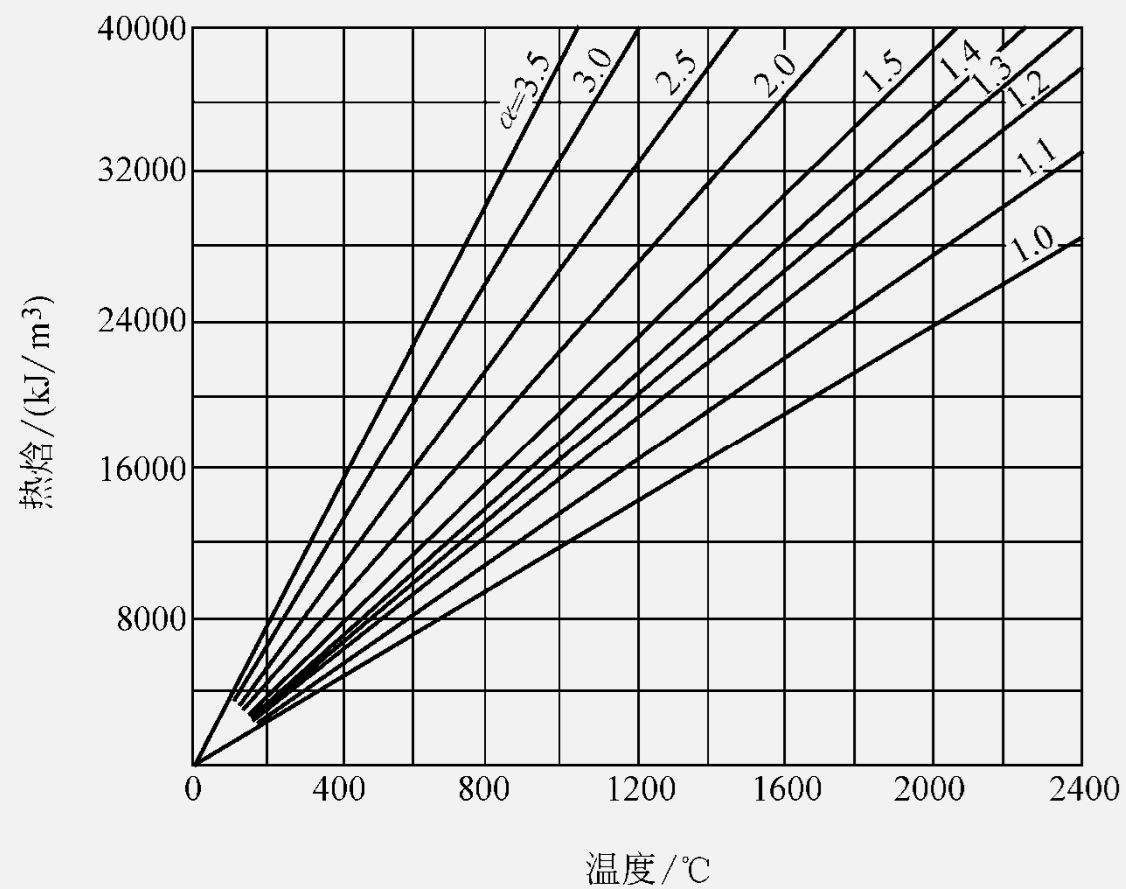


图3-1 烟气焓温图



第八节 锅炉机组的热平衡

- 燃料的化学能转变为蒸汽的热能，一定存在有效利用热和损失的热量。
- 研究热量平衡的目的：定量计算与分析各项能量的大小，找出引起热量损失的原因，提出减少损失的措施，提高锅炉效率，降低成本。



一、热平衡方程

热平衡的定义

- 送入锅炉的燃料拥有热量等于锅炉的有效输出热量加上各项热损失。
- 目的：确定锅炉有效利用热，各项热损失，锅炉热效率，燃料消耗量，运行水平，原因及改进措施，新产品的鉴定等。
- 方法：通过锅炉机组的热平衡试验。
- 现代电站锅炉的效率为90%左右，容量越大、效率越高。

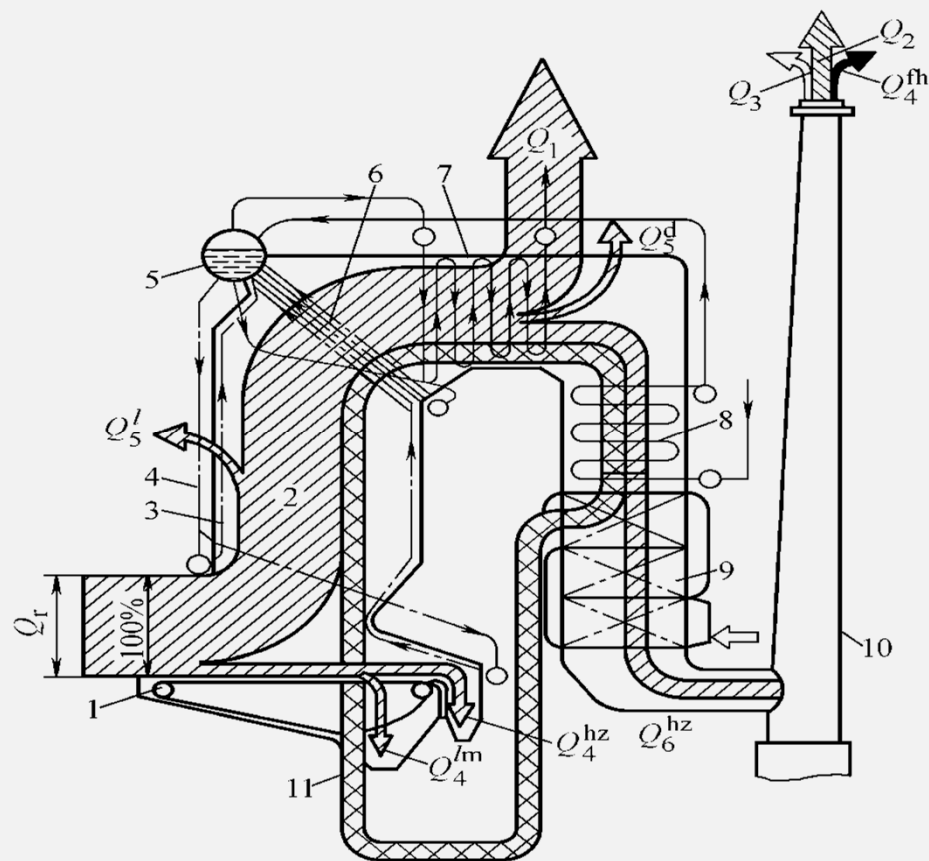


图3-2 锅炉机组热平衡示意

1-链条炉排；2-炉膛；3-水冷壁；4-下降管；5-锅筒；6-凝渣管；
7-过热器；8-省煤器；9-空气预热器；10-烟囱；11-预热空气的循环热流

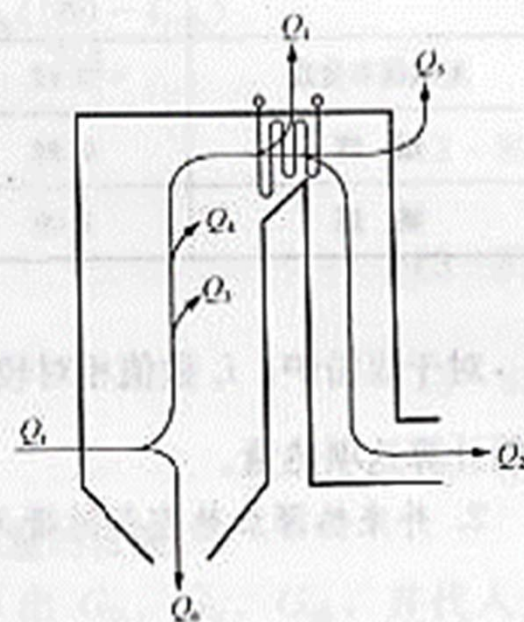


图 3-2 输入、输出
锅炉的能量

Q_1 —有效利用热； Q_2 —输入锅炉热量；
 Q_3 —排烟热损失； Q_4 —气体未完全
燃烧热损失； Q_5 —固体未完全
燃烧热损失； Q_6 —散热损失；
 Q_7 —灰渣物理热损失



热平衡方程式

锅炉热平衡的公式可写为：

$$Q_r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad \text{kJ / kg} \quad (3-109)$$

Q_r ——每公斤燃料带入锅炉的热量，kJ/kg；

Q_1 ——锅炉有效利用热量kJ/kg；

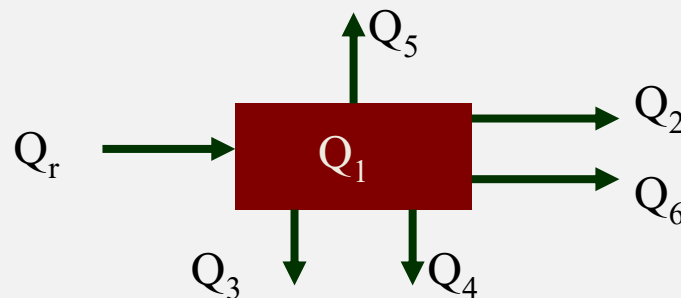
Q_2 ——排出烟气带走的热量，称为锅炉排烟热损失，kJ/kg

Q_3 ——未燃完可燃气体所带走的热量，称为气体不完全燃烧热损失（化学不完全燃烧热损失），kJ/kg；

Q_4 ——未燃完的固体燃料所带走的热量，称为固体不完全燃烧热损失（机械不完全燃烧热损失），kJ/kg；

Q_5 ——锅炉散热损失，kJ/kg；

Q_6 ——灰渣物理热损失及其他热损失，kJ/kg。





热平衡的另一种表示式

- 通常用送入热量的百分比来表示:

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

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\%, \quad \dots\dots\dots$$



- 以下将分别介绍热平衡方程中各项的计算方法、锅炉效率及锅炉的燃料消耗量B:

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



二、锅炉输入热量 Q_r

- 对应1kg燃料输入锅炉的热量为：

$$Q_r = Q_{ar,net} + h_r + Q_{wr} + Q_{wh} \quad \text{kJ/kg} \quad (3-111)$$

- 只有高水分煤、用外界热量加热油及空气时，才考虑公式后三项。



三、锅炉有效利用热能 Q_1

锅炉有效利用热量是依据锅炉容量、工质压力和温度进行计算。

$$Q_1 = \frac{Q_{gl}}{B} \quad (3-120)$$

式中

Q_1 ——锅炉有效利用热量 (kJ/kg或kJ/m³) ;

B ——每小时燃料消耗量 (kg/h或m³/h) ;

Q_{gl} ——锅炉每小时有效吸热量 (kJ/h) 。



四、排烟热损失 Q_2

- 排烟热损失是指离开锅炉末级受热面的烟气，由于其焓高于进入锅炉的空氣的焓而造成的热损失，称为排烟热损失。

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100\% \quad (3-124)$$

$$h_{py} = h_y^0 + (\alpha_{py} - 1)h_k^0 + h_{fh}$$

$$\alpha_{py} = \alpha_l'' + \sum \Delta \alpha$$



影响排烟损失的主要因素:

- 为锅炉最大项损失（约为4%~8%）

1、排烟温度

温度高，则损失大，提高 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ ，损失增加约1%；

温度低，则金属的消耗大，流动的阻力大，还可能造成受热面金属的低温腐蚀。

运行中影响排烟温度的主要因素是受热面吸热量的变化。

现代锅炉排烟温度一般为 $110\sim 160^{\circ}\text{C}$ 。

2、排烟容积

主要决定于过量空气系数的选取：

过量空气系数大，风机的消耗大，排烟损失增大；不完全燃烧损失小；

过量空气系数小，则可能不完全燃烧损失增大。

另外，燃料性质、漏风等，也使容积增加。



五、气体未完全燃烧损失 Q_3

- 气体未完全燃烧热损失是由于烟气中存在未燃尽的可燃气体 CO 、 H_2 、 CH_4 等，这部分热量未能有效利用而随烟气排入大气，造成热量损失。这部分热损失可用可燃气体的体积乘以其低位发热量来确定。
- 每公斤燃料所损失的热量为各可燃气体的容积与各自的容积发热量乘积的总和。

$$Q_3 = (V_{CO}Q_{CO} + V_{H_2}Q_{H_2} + V_{CH_4}Q_{CH_4}) \times \frac{100 - q_4}{100} \quad (3-126)$$



$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_r} \times 100 = \frac{12640V_{\text{CO}} + 10800V_{\text{H}_2} + 35820V_{\text{CH}_4}}{Q_r} \left(\frac{100 - q_4}{100} \right) \times 100 \quad (3-127)$$

$$q_3 = \frac{V_{\text{gy}}}{Q_r} (126.4\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358.2\text{CH}_4)(100 - q_4) \quad (3-126)$$

$$q_3 = \frac{V_{\text{gy}}}{Q_r} (126.4\text{CO})(100 - q_4)$$

影响化学不完全燃烧损失的主要因素

$$q_3 = 126.4 \frac{\text{CO}}{Q_r} \left(1.866 \frac{C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}}{\text{RO}_2 + \text{CO}} \right) (100 - q_4)$$

正常燃烧时 q_3 很小，进行锅炉设计时，对于煤粉炉可取 $q_3=0$

燃烧效率： $\eta_r = 100 - (q_3 + q_4)$ ，%



一般仅计入CO，其它忽略，发热量， 12600 kJ/Nm^3
(3020 kcal/m^3)

$$V_{CO} = \frac{CO}{100} \times V_{gy} \dots\dots$$

$$Q_3 = V_{gy} (12.6CO + \dots + \dots) \times \frac{100 - q_4}{100}$$

$$V_{gy} = 1.866 \frac{C_{ar} + 0.375S_{ar}}{RO_2 + CO}$$

$$q_3 = \frac{C_{ar} + 0.375S_{ar}}{Q_r} \times \frac{56.35CO}{RO_2 + CO} (100 - q_4) \dots\dots\%.$$



讨论 q_3

- 电站锅炉可燃气体很小;
- 对煤粉炉: $q_3 = 0$;
- 气体或液体燃料炉: $q_3 = 0.5$;
- 层燃炉: $q_3 = 0.5 \sim 1.0$
- 影响因素: 挥发分含量、过量空气系数、锅炉结构等。



六、固体未完全燃烧热损失 Q_4

固体未完全燃烧热损失是由于燃料的可燃固体颗粒在炉内未燃烧或未能燃尽而直接排出炉外，由此而引起的热量损失。通常情况下 由三部分组成：

- | | |
|-----------|-----------------------------|
| (1) 灰渣热损失 | 是指未燃烧或未燃尽的碳粒随灰渣排出炉外引起的热损失。 |
| (2) 飞灰热损失 | 是指未燃烧或未燃尽的碳粒随烟气排出炉外引起的热损失。 |
| (3) 漏煤热损失 | 是指未燃烧或未燃尽的碳粒经炉排缝隙漏出炉外引起的热损失 |



冷灰斗炉渣 (l_z) 和飞灰 (fh)

$$q_4^{l_z} = \frac{Q_4^{l_z}}{Q_r} \times 100 = \frac{32866 \frac{G_{l_z}}{B} \times \frac{C_{l_z}}{100}}{Q_r} \times 100 = \frac{32866 G_{l_z} C_{l_z}}{B Q_r}$$

单位时间炉渣的质量, kg/s
炉渣中碳含量, %

$$q_4^{fh} = \frac{Q_4^{fh}}{Q_r} \times 100 = \frac{32866 \frac{G_{fh}}{B} \times \frac{C_{fh}}{100}}{Q_r} \times 100 = \frac{32866 G_{fh} C_{fh}}{B Q_r}$$

$$q_4 = q_4^{l_z} + q_4^{fh} = \frac{32866}{B Q_r} (G_{l_z} C_{l_z} + G_{fh} C_{fh})$$



- 灰平衡方程

$$B \frac{A_{ar}}{100} = G_{lz} \frac{A_{lz}}{100} + G_{fh} \frac{A_{fh}}{100}$$

$$B \frac{A_{ar}}{100} = G_{lz} \left(\frac{100 - C_{lz}}{100} \right) + G_{fh} \left(\frac{100 - C_{fh}}{100} \right)$$

$$1 = \frac{G_{lz} (100 - C_{lz})}{\frac{BA_{ar}}{\alpha_{lz}}} + \frac{G_{fh} (100 - C_{fh})}{\frac{BA_{ar}}{\alpha_{fh}}} \quad G_{lz} = \frac{\alpha_{lz} BA_{ar}}{100 - C_{lz}} \quad G_{fh} = \frac{\alpha_{fh} BA_{ar}}{100 - C_{fh}}$$

$$q_4 = q_4^{lz} + q_4^{fh} = \frac{32866}{BQ_r} (G_{lz} C_{lz} + G_{fh} C_{fh})$$

固体不完全燃烧热损失 q_4 的计算公式:

$$q_4 = \frac{32866 A_{ar}}{Q_r} \left(\alpha_{lz} \frac{C_{lz}}{100 - C_{lz}} + \alpha_{fh} \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} \right)$$



固体不完全燃烧样品实例



常熟电厂冷炉斗灰——含碳量1.3%（烟煤） 齐鲁石化电厂冷炉斗灰——含碳量19%（贫煤/混煤）



常熟电厂飞灰——含碳量2.4%（烟煤）



贾旺电厂飞灰——含碳量10%（混煤）



三、固体不完全燃烧热损失 Q_4

- 计算方法:
- 原则: 灰渣及飞灰中的含碳量与碳的发热量的乘积的总和
- 定义:
灰渣中含碳的重量百分比为: $c_{lz} \%$, 灰渣量: $G_{lz} \text{ kg/h}$
飞灰中含碳的重量百分比为: $c_{fh} \%$, 飞灰量: $G_{fh} \text{ kg/h}$
沉降灰中含碳的重量百分比为: $C_{cjh} \%$, 沉降灰量:
 G_{cjh} , kg/h 。



- 每小时所损失的可燃物重量

$$G_{lz} \frac{C_{lz}}{100} + G_{fh} \frac{C_{fh}}{100} \quad \text{kg/h}$$

- 每小时损失的热量

$$7830(G_{lz} \frac{C_{lz}}{100} + G_{fh} \frac{C_{fh}}{100}) \quad \text{kcal/h}$$

- 折算到每公斤燃料所损失的热量:

$$Q_4 = \frac{78.3}{B} (G_{lz} \frac{C_{lz}}{100} + G_{fh} \frac{C_{fh}}{100}) \quad \text{kcal/kg}$$

G_{lz} 可知, C_{lz}, C_{fh} 可以取样测得, G_{fh} 最不易测得



- 进入锅炉的总灰量等于排出锅炉的灰渣、飞灰中的灰分的总和

$$B \frac{A_{ar}}{100} = G_{lz} \frac{100 - C_{lz}}{100} + G_{fh} \frac{100 - C_{fh}}{100}$$

$$1 = \frac{G_{lz} (100 - C_{lz})}{BA_{ar}} + \frac{G_{fh} (100 - C_{fh})}{BA_{ar}}$$

$$1 = a_{lz} + a_{fh} \quad \%$$

- 定义

$$a_{lz} = \frac{G_{lz} (100 - C_{lz})}{BA_{ar}}$$

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



$$Q_4 = 337.27 A_{ar} \left(a_{lz} \frac{C_{lz}}{100 - C_{lz}} + a_{fh} \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} + a_{cjh} \frac{C_{cjh}}{100 - C_{cjh}} \right) + \frac{B_{sz} Q_{ar,net}^{sz}}{B}$$

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



讨论 q_4

- 在锅炉运行中， C_{lz} , C_{fh} 可以取样测得，
- a_{lz} , a_{fh} 可以查表，或做灰平衡实验得到
- 锅炉的设计中，根据燃料的种类及燃烧方式直接选用：0.5~5%
- 大小取决于：燃料的种类（挥发份与灰分等），煤粉的细度，过量空气系数，炉膛的结构（决定了停留时间），锅炉的运行方式，炉膛的温度（负荷）等。为第二大损失。



q_4 对空气量和烟气量的影响

- 假定送入锅炉的燃煤量 B 中，有 $(\frac{q_4}{100}B)$ 的燃料根本没有燃烧，即没有产生烟气量，也不需要空气量，
- 实际上参加燃烧的不是实际送入的燃料量 B ，而是计算燃料量 B_j
- 热平衡计算用实际燃料量 B ，计算空气量和烟气量时用 B_j

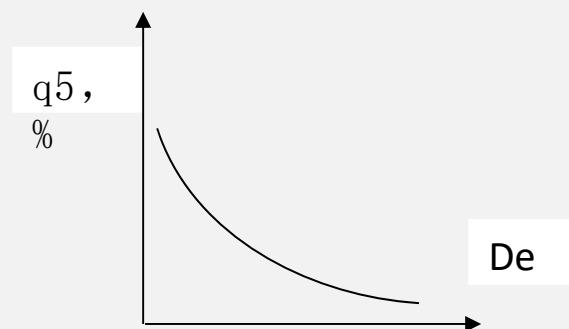
$$B_j = B - B \frac{q_4}{100} = B \frac{100 - q_4}{100} \quad (3-140)$$



六、散热损失 Q_5

- 锅炉的外表面温度高于环境的温度而向外界通过大空间自然对流和辐射换热。
- 散热损失与锅炉的容量成反比
- 散热损失与锅炉的负荷成反比

$$q_5 = q_5^e \frac{D_e}{D}$$





散热损失是指锅炉的介质（烟气）和工质（汽、水、汽水混合物、空气）的热量通过炉墙、烟风道、构架、锅筒及其附件的外表面向大气散发而造成的热量损失。

准确的计算运行锅炉的散热损失 是比较困难的，其一是由于锅炉与大气接触的表面面积难以准确测量；其二是各外表面温度各异，测量工作也是非常复杂的。



表3—9 锅炉的散热损失 q_5 (%)

锅炉布置型式	锅炉蒸发量 / (t/h)								
	1	2	4	6	10	15	20	35	65
无尾部受热面	5	3	2.1	1.5					
有尾部受热面		3.5	2.9	2.4	1.7	1.5	1.3	1.0	0.8



注：散热损失对锅炉设计的影响，除考虑其降低锅炉总的热效率外，还要考虑在各段烟道内 q_5 的份额分配问题。为简便计算，认为各段烟道内 q_5 的份额与烟气在该烟道中放出的热量成正比，也就是说，受热面内的工质所能吸收的热量，等于该烟道内烟气的放热量乘以保热系数 φ 。



保热系数 φ 的定义为：烟气通过受热面传给工质的热量占烟气放热量的份额。即烟气放出的热量中，有一部分传给了工质，另一部分则通过炉墙等散热面散失掉。保热系数可用下式计算：

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta + q_5} \quad (3-133)$$

式中

η ——锅炉热效率 (%)



七、灰渣物理热损失 Q_6

- 灰渣物理热损失是指燃烧产物——灰渣，从锅炉排出所带走的热量损失。排出的灰渣因其高温具有的热量。仅在高灰煤时考虑。

$$q_6^{lz} = \frac{A_{ar} a_{lz} (c \vartheta)_{lz}}{Q_r} 100\% \quad (3-135)$$



各项热损失均已经得到

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



八、锅炉有效利用热、热效率和燃料消耗量

- 1、锅炉有效利用热

$$Q_1 = \frac{1}{B} [D_{gr} (i''_{gr} - i_{gs}) + D_{zr} (i''_{zr} - i'_{zr}) + D_{zy} (i''_{zy} - i_{gs}) + D_{pw} (i'_{pw} - i_{gs})]$$

- 各焓值按相应的温度和压力查表



锅炉热效率 η

锅炉热效率是通过锅炉热平衡方法确定的。热平衡方法分正平衡方法和反平衡方法两种，用正平衡方法测定的锅炉效率称正平衡效率，用反平衡方法测定的锅炉效率称反平衡效率。



锅炉的热效率

- 正平衡表达式:

$$\eta_{gl} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\% = \frac{Q}{BQ_r} \quad (3-137)$$

- 反平衡表达式:

$$\eta_{gl} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad \% \quad (3-138)$$



- 燃料消耗量:

$$B = \frac{100}{\eta_{gl} Q_r} Q_{gl} \quad (3-139)$$

计算燃料消耗量 $B_j = B(1 - \frac{q_4}{100}) \quad (3-140)$



锅炉热平衡计算是热力计算的前提

- 由锅炉效率确定燃料的消耗量；
- 排烟温度需要先假定，后校核；
- 迭代计算过程；



第九节 锅炉机组的热平衡试验

一、热平衡试验的目的：

- 确定锅炉机组的效率；
- 确定各损失并分析原因，提高效率；
- 确定各参数与负荷的关系。



二、确定锅炉机组效率的方法

- 正平衡法：直接求输入热量，利用热量。

由于需要较长时间稳定负荷，另外燃料消耗不易准确确定。一般不采用

- 反平衡法：求损失项。

测量项目很多，但可得到各项损失。常采用。



三、热效率的简化计算

- 输入热量为收到基低位发热量；
- 排烟热损失忽略雾化蒸汽及氮损失；
- 过量空气系数由测 O_2 计算；
- 忽略气体未燃烧热损失；
- 忽略石子煤热损失；
- 忽略灰渣物理热损失。



四、换算到保证条件下的热效率

- 设计条件时的参数为保证条件；
- 进行输入热量、各损失及其他参数的修正；
- 得到的修正后的热效率与设计值比较。



五、锅炉机组的净效率

在锅炉效率中，再扣出锅炉自身的热耗和电耗后的效率。



其他热平衡计算方法简介：

- 美国及英国采用煤的高位发热量为计算基准。其效率低于低位发热量；
- 损失中考虑三项水分热损失：空气中水分、燃料中水分和氢燃烧水分。



具体项为：

- 干烟气热损失；空气中水分热损失；燃料中水分热损失；燃料中氢燃烧生成水分热损失；未燃尽固体热损失；未燃尽气体热损失；向周围辐射热损失；其他未计入的热损失（漏入空气、灰渣物理热、石灰石、 NO_x 、再循环等）



课堂作业:

- 1、对于固态排渣煤粉炉，分析如何提高锅炉热效率？
- 2、某厂SZP10-1.3型锅炉燃用收到基灰分为**17.74%**、低位发热量为**25539kJ/kg**的煤，每小时耗煤**1544kg**。在运行中测得灰渣和漏煤总量为**213kg/h**，其可燃物含量为**17.6%**；飞灰可燃物含量为**50.2%**，试求固体不完全燃烧热损失 **q_4** 。
- 3、某链条炉热工试验测得数据如下： **$C_{ar}=55.5\%$** ， **$H_{ar}=3.72\%$** ， **$S_{ar}=0.99\%$** ， **$O_{ar}=10.38\%$** ， **$N_{ar}=0.98\%$** ， **$A_{ar}=18.43\%$** ， **$M_{ar}=10.0\%$** ， **$Q_{net,ar}=21353\text{kJ/kg}$** ，炉膛出口的烟气成分 **$RO_2=11.4\%$** ， **$O_2=8.3\%$** 以及固体不完全燃烧热损失 **$q_4=9.78\%$** ，试求气体不完全燃烧热损失 **$q_3$** 。



课堂作业:

- 4.说明影响排烟热损失的主要因素及降低排烟热损失的措施是什么?
- 5.提高锅炉热效率时为什么不能把排烟温度降得很低?



课堂作业:

1、对于固态排渣煤粉炉，分析如何提高锅炉热效率？

答：要提高固态排渣煤粉炉热效率，首先是减少 q_2 ， q_3 和 q_4 损失，尤其是减少 q_2 和 q_4 热损失。其次是考虑减少 q_5 热损失， q_6 热损失一般不考虑，只有当 $A_{ar} > Q_{ar,net} \cdot p/418\%$ 时才考虑。

减少 q_2 热损失：（1）要保持设计排烟温度运行，受热面积灰、结渣等会使排烟温度升高，因此应定期吹灰，及时打渣，经常保持受热面清洁；（2）要减少排烟容积，消除或尽量减少炉膛及烟道漏风，漏风不仅增大排烟容积，而且还可能使排烟温度升高，故应维持最佳过量空气系数运行并减少漏风等。

减少 q_4 热损失：（1）要有合理的炉膛结构（适当的空间 and 高度）和性能良好的燃烧器及合理布置，使气粉在炉内有较好的混合条件和较长的停留时间；（2）要保证最佳煤粉细度和较大的均匀度；（3）要保持最佳过量空气系数运行；（4）要保持较高的炉温等。

减少 q_3 热损失：（1）要有合理的炉膛结构和性能良好的燃烧器及合理的布置，使炉内有良好的空气动力工况；（2）要保持最佳的过量空气系数运行；（3）要有较高的炉温等。

减少 q_5 热损失：（1）采用保温性能良好的隔热材料；（2）要有合理完善的保温结构



2、某厂SZP10-1.3型锅炉燃用收到基灰分为17.74%、低位发热量为25539kJ/kg的煤，每小时耗煤1544kg。在运行中测得灰渣和漏煤总量为213kg/h，其可燃物含量为17.6%；飞灰可燃物含量为50.2%，试求固体不完全燃烧热损失 q_4 。

3、某链条炉热工试验测得数据如下： $C_{ar}=55.5\%$ ， $H_{ar}=3.72\%$ ， $S_{ar}=0.99\%$ ， $O_{ar}=10.38\%$ ， $N_{ar}=0.98\%$ ， $A_{ar}=18.43\%$ ， $M_{ar}=10.0\%$ ， $Q_{net,ar}=21353\text{kJ/kg}$ ，炉膛出口的烟气成分 $RO_2=11.4\%$ ， $O_2=8.3\%$ 以及固体不完全燃烧热损失 $q_4=9.78\%$ ，试求气体不完全燃烧热损失 q_3 。



2、某厂SZP10-1.3型锅炉燃用收到基灰分为17.74%、低位发热量为25539kJ/kg的煤，每小时耗煤1544kg。在运行中测得灰渣和漏煤总量为213kg/h，其可燃物含量为17.6%；飞灰可燃物含量为50.2%，试求固体不完全燃烧热损失q₄。

解：

假设 i_r 、 Q_{zq} 、 Q_{wl} 均为零，则 $Q_r = Q_{net,ar}$ (P87, 3-118)

$$\alpha_{hz-lm} = G_{hz-lm} \frac{100 - C_{hz-lm}}{BA_{ar}} = 213 \times \frac{100 - 17.6}{1544 \times 17.74} = 64.08\% \quad (P91, 3-131)$$

$$\therefore \alpha_{fh} = 1 - \alpha_{hz-lm} = 35.92\%$$

$$\begin{aligned} q_4 &= \frac{32866 A_{ar}}{100 Q_r} \left(\frac{\alpha_{hz} C_{hz}}{100 - C_{hz}} + \frac{\alpha_{lm} C_{lm}}{100 - C_{hz}} + \frac{\alpha_{fh} C_{fh}}{100 - C_{hz}} \right) \times 100\% \quad (P90, 3-129) \\ &= \frac{32866 \times 17.74}{100 \times 25539} \times \left(\frac{0.6408 \times 17.6}{100 - 17.6} + \frac{0.3592 \times 50.2}{100 - 50.2} \right) = 11.39\% \end{aligned}$$



3、某链条炉热工试验测得数据如下： $C_{ar}=55.5\%$ ， $H_{ar}=3.72\%$ ， $S_{ar}=0.99\%$ ， $O_{ar}=10.38\%$ ， $N_{ar}=0.98\%$ ， $A_{ar}=18.43\%$ ， $M_{ar}=10.0\%$ ， $Q_{net,ar}=21353\text{kJ/kg}$ ，炉膛出口的烟气成分 $RO_2=11.4\%$ ， $O_2=8.3\%$ 以及固体不完全燃烧热损失 $q_4=9.78\%$ ，试求气体不完全燃烧热损失 q_3 。

解：

$$\beta = 2.35 \frac{H_{ar} - 0.126O_{ar}}{C_{ar} + 0.375S_{ar}} = 2.35 \times \frac{3.72 - 0.126 \times 10.38}{55.5 + 0.375 \times 0.99} = 0.1015 \quad (\text{P67, 3-45})$$

$$CO = \frac{(21 - \beta RO_2) - (RO_2 + O_2)}{0.605 + \beta} = \frac{(21 - 0.1015 \times 11.4) - (11.4 + 8.3)}{0.605 + 0.1015} = 0.20 \quad (\text{P67, 3-47})$$

$$\begin{aligned} q_3 &= \frac{235.9}{Q_r} \frac{C_{ar} + 0.375S_{ar}}{RO_2 + CO} (1 - q_4) CO \times 100\% \quad (\text{P89, 3-127}) \\ &= \frac{235.9}{21353} \times \frac{55.5 + 0.375 \times 0.99}{11.4 + 0.20} \times (1 - 0.0978) \times 0.20 = 0.96\% \end{aligned}$$



作业:

1. 说明影响排烟热损失的主要因素及降低排烟热损失的措施是什么？
2. 提高锅炉热效率时为什么不能把排烟温度降得很低？



作业:

【例题 3-9】 分析影响排烟温度升高的因素以及对锅炉效率的影响。

答： 影响排烟温度的因素有以下几点：

- (1) 过量空气系数。在低负荷条件下，过量空气系数越大，排烟温度越高；
- (2) 煤质参数。挥发分降低、发热量降低，必然引起过量空气系数的增加；
- (3) 漏风率。沿着烟气流程各部分烟道的漏风系数越小，排烟温度越高；
- (4) 受热面清洁程度。受热面结渣、积灰越严重，烟气侧的对流交换系数越小，烟气温度越高，累积的结果是排烟温度越高。排烟温度的升高会提高锅炉的排烟损失，降低锅炉本体效率和锅炉机组效率。



作业:

【例题 3-10】 分析影响固体不完全燃烧损失的因素以及对锅炉效率的影响。

答: 影响固体不完全燃烧损失的因素有以下几点。

(1) 过量空气系数。过量空气系数太大，炉膛温度偏低，燃烧不完全；过量空气系数太小，炉膛氧气浓度偏低，燃烧不完全。

(2) 煤的挥发分降低、发热量降低，固体不完全燃烧损失越大。

(3) 锅炉负荷率。锅炉负荷率越高，炉膛温度越高，煤的燃尽度越高。燃烧效率越高，固体不完全燃烧损失越小。

(4) 煤的灰熔点越低，煤粉燃烧中形成结渣的可能性越大。结渣中含有的固体碳元素越多，燃烧效率越低，固体不完全燃烧损失越大。

(5) 煤粉细度。煤粉平均颗粒粒径越大，燃尽所需要的时间越长，固体不完全燃烧损失越大。

(6) 排渣方式。在锅炉容量相同的条件下，固态排渣炉的固体不完全燃烧损失大于液态排渣煤粉锅炉。

(7) 燃烧方式。层燃锅炉的固体不完全燃烧损失大于循环流化床锅炉，循环流化床锅炉的固体不完全燃烧损失大于煤粉锅炉。

(8) 配风方式。分级配风可能造成不完全燃烧，增加固体不完全燃烧损失，降低锅炉效率。

(9) 煤粉分配均匀性。如果某一台旋流燃烧器或者某一个角的直流燃烧器的煤粉流量偏大，也会造成不完全燃烧，增加固体不完全燃烧损失，降低锅炉效率。



作业:

1. 说明影响排烟热损失的主要因素及降低排烟热损失的措施是什么？

答：影响 q_2 的主要因素是排烟焓的大小，而影响排烟焓的主要因素是排烟容积和排烟温度。

措施：（1）选择合理的排烟温度及合理的过量空气系数。尽量的降低排烟温度及排烟容积。（2）运行中尽量减少炉膛及烟道漏风。因为漏风不仅会增大排烟容积，还可能使排烟温度升高。（3）运行中应及时对受热面吹灰打焦，经常保持受热面的清洁。因为受热面积灰和结渣会使传热减弱，促使排烟温度升高。

2. 提高锅炉热效率时为什么不能把排烟温度降得很低？

答：降低排烟温度可以降低排烟热损失，提高锅炉热效率，节约燃料消耗量，但降低排烟温度必须增加尾部受热面，增加了锅炉的金属消耗量和烟气流道阻力。另一方面，由于烟温太低会引起尾部受热面酸性腐蚀，特别是燃用硫分较高的燃料时，这种腐蚀更为严重。因此提高锅炉效率不能把烟温降的过低。

作业

3. 某锅炉燃用煤种的收到基成分为：

$\text{Car}=59.6\%$; $\text{Har}=2.0\%$; $\text{Sar}=0.5\%$; $\text{Oar}=0.8\%$; $\text{Nar}=0.8\%$; $\text{Aar}=26.3\%$;
 $\text{Mar}=10.0\%$; $\text{Qar.net}=22186\text{kJ/kg}$

烟气中的飞灰份额 $a_{\text{fh}}=95\%$

计算：1) V^0 2) V_y^0 及 $\alpha=1.45$ 时的 V_y

3) $\alpha=1.45$, $\theta=300^\circ\text{C}$ 时的 I_y

4. 已知 $V_y=V_{\text{gy}}+V_{\text{H}_2\text{O}}$, 试推导 $V_y=V_y^0+1.0161(\alpha-1)V^0$ 。

5. 如果碳是唯一可燃元素，燃料完全燃烧，测得 $\alpha=1$ ，问烟气分析的结果是什么（干烟气中各种成分的含量）？

6. 某锅炉燃用无烟煤，计算得到完全燃烧所需理论空气量 V^0 为 $5.81\text{Nm}^3/\text{kg}$ ，实测得到炉膛出口过剩氧量 O_2 为 $4.846(\%)$ ，如果炉膛的漏风系数为 0.05 ，此时供给炉膛的实际空气量是多少？



The End