

## 第三章 燃料及燃烧计算

- § 1 燃料的成分及其主要特性
- § 2 燃料的燃烧计算
- § 3 烟气分析方法
- § 4 空气和烟气焓的计算



# §1 燃料的成分及其主要特性

- 1、煤的元素分析成分
- 2、煤的工业分析成分
- 3、煤的分析基准
- 4、各种基准的换算
- 5、煤的发热量
- 6、高、低发热量间的换算
- 7、煤的灰分特性
- 8、煤的结渣特性指标
- 9、煤的常规特性对锅炉工作的影响
- 10、煤的可磨性系数与磨损指数
- 11、煤的分类



# 煤的元素分析成分

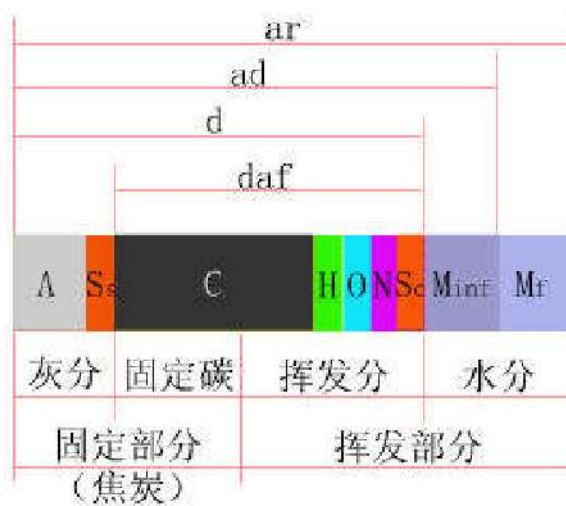
## 煤的元素分析成分

- **碳C:** 主要可燃成分, 地质年龄越长, 含碳越多, 放热量越高, 但不易着火与燃烬。
- **氢H:** 可燃成分, 放热量, 是碳的3倍, 含量低, 有利元素。
- **氧O:** 可助燃, 含量低。
- **氮N:** 不可燃, 含量低, 燃烧反应可生成 $\text{NO}_x$ , 有害成分。
- **硫S:** 可燃, 放热量低可生成 $\text{SO}_x$  有机硫、黄铁矿硫、硫酸盐硫
- **水分M:** 外部水分、内部水分。
- **灰分A:** 杂质, 污染环境, 磨损受热面。

# 煤的工业分析成分

- 水分(M)
- 灰分(A)
- 挥发分(V)
- 固定碳(FC)

燃料成分及其各种基准的关系示意图



# 煤的分析基准

- 收到基 (ar)

以入炉煤 (包括煤的全部成分) 为基准

- 空气干燥基 (ad)

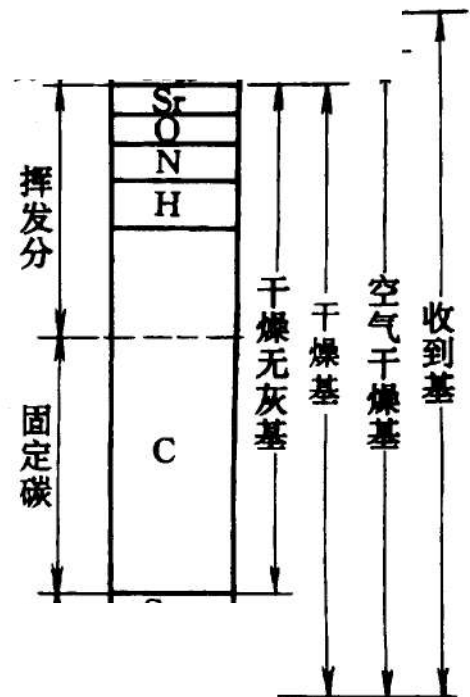
以风干状态煤 (除外部水分) 为基准

- 干燥基 (d)

以去掉全部水分煤为基准

- 干燥无灰基 (daf)

以去掉全部水分及灰分煤为基准



## 各种基准的换算

- 收到基:  $C_{ar}+H_{ar}+O_{ar}+N_{ar}+S_{ar}+A_{ar}+M_{ar} = 100$  (%)
- 空气干燥基:  $C_{ad}+H_{ad}+O_{ad}+N_{ad}+S_{ad}+A_{ad}+M_{ad} = 100$  (%)
- 干燥基:  $C_d+H_d+O_d+N_d+S_d+A_d=100$  (%)
- 干燥无灰基:  $C_{daf}+H_{daf}+O_{daf}+N_{daf}+S_{daf}=100$  (%)

不同基准之间的换算公式

$$X = K X_0 \quad \text{适用范围?}$$

$X_0$ 、 $X$  — 某成分原基准及新基准质量百分比, %

$K$  — 换算系数

例: 
$$C_{ad} = \frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}} \times C_{ar}$$

例: 
$$C_{ad} = \frac{100}{100 - M_{ar}^{face}} \times C_{ar}$$

例: 
$$C_{ad} = \frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100 - M_{ar} - A_{ar}} \times C_{ar}$$

# 煤的发热量

煤的发热量 (kJ/kg) 单位质量的煤完全燃烧时所释放的热量

● **高位发热量 ( $Q_{gr}$ )** 燃料完全燃烧, 产生的水未放出气化潜热 (以液态的形式存在), 则所得到的发热量

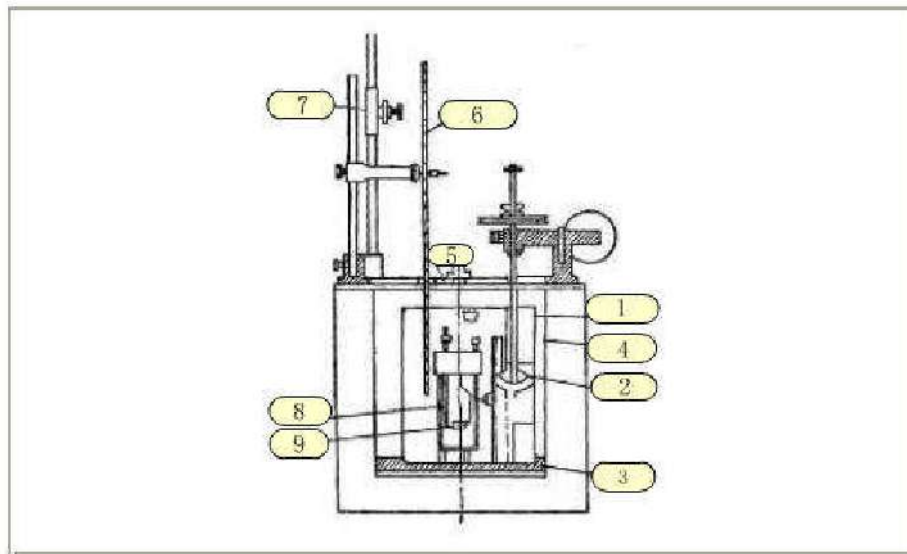
由实验测得的弹筒发热量 ( $Q_b$ ) 减去校正值确定

● **低位发热量 ( $Q_{net}$ )** 燃料完全燃烧, 产生的水释放出气化潜热 (以汽态的形式存在), 则所得到的发热量称为低位发热量。

●  $Q_b > Q_{gr} > Q_{net}$

# 发热量的测定

氧弹测热计示意图



## 发热量测定原理

把煤样在一充氧的容器（通称氧弹）中燃烧，氧弹浸没于水中，则可由水温的升高计算出煤的发热量。



## 高、低发热量间的换算

- 收到基高、低位发热量之间的换算

$$Q_{\text{ar.net}} = Q_{\text{ar.gr}} - r \left( \frac{9H_{\text{ar}}}{100} + \frac{M_{\text{ar}}}{100} \right) = Q_{\text{ar.gr}} - 226H_{\text{ar}} - 25.1M_{\text{ar}}$$

- 干燥基高、低位发热量之间的换算

$$Q_{\text{d.net}} = Q_{\text{d.gr}} - r \left( \frac{9H_{\text{d}}}{100} \right) = Q_{\text{d.gr}} - 226H_{\text{d}}$$

式中  $r$ ——水的汽化潜热，通常取  $r = 2510 \text{ kJ/kg}$

作业**2**—用**A4**纸，有条理有逻辑，公式多的一般从中间将页面分成两栏，推导过程公式要编号。不要作业本。名字写在正面上面。

理论上推导证明高位发热量间换算公式(收到基)，低位发热量间换算公式(收到基)，高低位发热量间换算公式(收到基)。

提示:运用发热量经验公式，高位发热量的定义，低位发热量的定义进行推导，

$$Q_{ar,net,p} = 339C_{ar} + 1021H_{ar} - 109(O_{ar} - S_{ar}) - 25.1M_{ar}$$

## 几个重要概念

● **标准煤**  $Q_{ar.net} = 29310 \text{ kJ/kg}$

● **劣质煤**  $Q_{ar.net} \leq 12500 \text{ kJ/kg}$

● **折算成分** 相对于每4190 kJ/kg收到基低位发热量的煤中所含的收到基水分、灰分和硫分，称为折算水分、折算灰分和折算硫分

$$M_{ar.zs} = \frac{M_{ar}}{Q_{ar.net}} \times 4190, \% .$$

$$A_{ar.zs} = \frac{A_{ar}}{Q_{ar.net}} \times 4190, \% .$$

$$S_{ar.zs} = \frac{S_{ar}}{Q_{ar.net}} \times 4190, \% .$$

# 煤的灰分特性

## ● 煤的灰分特性

用灰熔点表示，煤灰的角锥法确定

变形温度 DT

软化温度 ST

流动温度 FT

角锥法测定灰的熔融性示意图



## ● 影响灰的熔融性的主要因素

### ➤ 灰分成分的影响

煤灰中酸性氧化物使灰熔点提高；碱性氧化物使灰熔点降低

### ➤ 周围介质的影响

氧化性介质中，灰熔点较高；还原性介质中，灰熔点较低；  
弱还原性介质中，灰熔点很低。

## 煤的结渣特性指标

➤ **结渣率**: 在一定的空气流速下燃料燃烧并燃烬时, 大于6mm的渣块占灰渣总质量的百分数。

结渣率越大的煤越容易发生结渣。

煤灰中酸性氧化物使灰熔点提高; 碱性氧化物使灰熔点降低

➤ **碱酸比B/A**: 灰中碱性成分 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) 与酸性 ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) 成分含量之比。

B/A ↑ 易结渣 ↑

➤ **硅铝比**: 即  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  的比值。

硅铝比 ↑ 易结渣 ↑ ( **$\text{SiO}_2$  易与  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}_3$  生成共晶体**)

➤ **硅比**:  $\text{SiO}_2 / (\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})$

➤ **结渣指数**:  $R_s = S_d \cdot B/A$  大易结渣

## 煤的常规特性对锅炉工作的影响

### ➤ 挥发分的影响:

地质年龄↓  $V_{\text{adf}}$ ↑ 易着火↑ 易燃烬↑ 硬度↓ 但  $Q_{\text{ar.net}}$ ↓

### ➤ 水分的影响:

$M_{\text{ar}}$ ↑  $Q_{\text{ar.net}}$ ↓ 着火↓ 燃烬↓  $\theta''$ ↓  $Q_4$ ↑ 积灰↑ 腐蚀↑

### ➤ 灰分的影响:

$A_{\text{ar}}$ ↑  $Q_{\text{ar.net}}$ ↓  $Q_6$ ↑  $Q_4$ ↑  $Q_4$ ↑ 积灰↑ 磨损↑ 结渣↑

### ➤ 灰熔点的影响:

灰熔点 (DT、ST、FT) ↓ 结渣↑

### ➤ 硫分的影响:

$S_{\text{ar}}$ ↑  $t_{\text{ld}}$ ↑ 低温腐蚀↑ 污染环境↑ 煤粉仓自燃↑

### ➤ 煤的燃烧特性及其影响

## 煤的可磨性系数与磨损指数

● **磨煤能量消耗**：新增加表面积成正比（磨的粗细）。分子间结合紧密程度（好不好磨）。

● **干燥煤的能耗**：

● **煤的可磨性系数定义**：将相同质量标准煤与试验煤，由相同初始粒度磨制成相同细度的煤粉，消耗能量的比值。

● **煤的可磨性系数两种表示方法**：

国际标准：哈德格罗夫法（Hardgrove法），测定哈氏可磨性指数HGI

● **煤的磨损性指数**

表示磨损的轻重程度；旋转磨损试验仪；冲刷式磨损试验仪： $K_e = E/At$

# 煤的分类

## ●我国动力煤的分类（分类依据： $V_{\text{adf}}$ ）

$V_{\text{adf}} \leq 10\%$  无烟煤

$V_{\text{adf}} = 10 \sim 20$  贫煤

$V_{\text{adf}} = 20 \sim 40$  烟煤

$V_{\text{adf}} > 37$  褐煤

## ●发电用煤粉锅炉用煤的分类标准：

根据煤粉炉运行要求，按 $V$ ， $Q$ ， $A_{\text{zs}}$ ， $M_{\text{zs}}$ ， $S_{\text{zs}}$

- 挥发分 $V_{\text{daf}}$ （与其相对应的发热量）等级： $V1 \sim V5$
- 灰分 $A_{\text{d}}$ 等级： $A1 \sim A3$
- 水分 $M_{\text{f}}$ 等级： $M1 \sim M3$
- 硫分 $S_{\text{d}}$ 等级： $S1 \sim S3$
- 灰融特性 $ST$ ： $ST1 \sim ST2$



## 煤的类型

### ● 无烟煤

- 碳化程度高，含碳量很高，达95%，杂质很少，发热量很高，约为25000~32500 kJ/kg；
- 挥发份很少，小于10%， $V_{daf}$ 析出的温度较高（可达400℃），着火和燃尽均较困难，储存时不易自燃

### ● 褐煤

- 碳化程度低，含碳量低，约为40~50%，水分及灰分很高，发热量低，约10000~21000 kJ/kg；
- 挥发分含量高，约40~50%，甚至60%，挥发分的析出温度低（<200℃），着火及燃烧均较容易

## 煤的类型

### ● 烟煤

碳化程度次于无烟煤，含碳量较高，40~60%，杂质少，发热量较高，约为20000~30000 kJ/kg；

挥发分含量较高，约10~45%，着火及燃烧均较容易

➤ 贫煤 挥发分含量10~20%的烟煤

挥发份较少，性质介于无烟煤与烟煤之间，燃烧性能方面比较接近无烟煤；

➤ 劣质烟煤 挥发份20~30%；但水分高，灰分更高的烟煤 发热量低，为11000~12500 kJ/kg

这两种烟煤着火及燃烧均较困难

## § 2 燃料的燃烧计算

- ◆ 1、燃烧计算的物理模型
- ◆ 2、燃料的燃烧工况
- ◆ 3、煤的燃烧反应
- ◆ 4、燃烧所需要的空气量
- ◆ 5、过剩空气系数 $\alpha$ 与漏风系数 $\Delta\alpha$
- ◆ 6、过剩空气系数 $\beta$ 与漏风系数 $\Delta\alpha$
- ◆ 7、烟气容积



# 燃烧计算的物理模型

- 以1kg燃料为计算基础
- 所有气体均视为理想气体（ $22.4\text{Nm}^3/\text{kg}$ ）
- 假定完全燃烧
- 认为空气只由 $\text{N}_2$ 和 $\text{O}_2$ 组成，容积比为79:21

## 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  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$

理论烟气体积  $V_y^0$

- **实际工况** 实际送入的空气量大于理论空气量，仍为不完全燃烧

燃烧产物（烟气）组成成分  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$

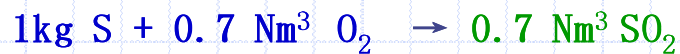
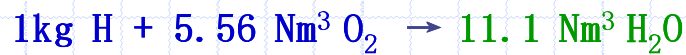
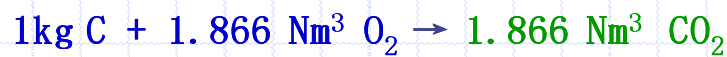
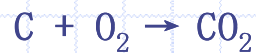
实际烟气体积  $V_y$

## 煤的燃烧反应

- 煤中可燃元素的燃烧反应是燃烧计算的基础，1kg收到基燃料包括

$$\frac{C_{ar}}{100} \text{ Kg的碳、} \frac{H_{ar}}{100} \text{ kg的氢、} \frac{S_{ar}}{100} \text{ kg的硫}$$

- 碳完全燃烧反应方程式



## 燃烧所需要的空气量

● 理论空气量  $V^0$  1kg 燃料完全燃烧时所需要的最小空气量(无剩余氧)可通过燃料中可燃元素 (C、H、S) 的燃烧化学反应方程式求得

$$V^0 = \frac{1}{0.21} \left( 1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 5.56 \frac{H_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \right)$$

$$= 0.0889(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.333O_{ar}$$

● 实际空气量  $V$

$$\alpha(\beta) = \frac{V}{V^0}$$

$$V = \alpha(\beta) \times V^0$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为烟气侧和空气侧的过剩空气系数

## 过剩空气系数 $\alpha$ 与漏风系数 $\Delta\alpha$

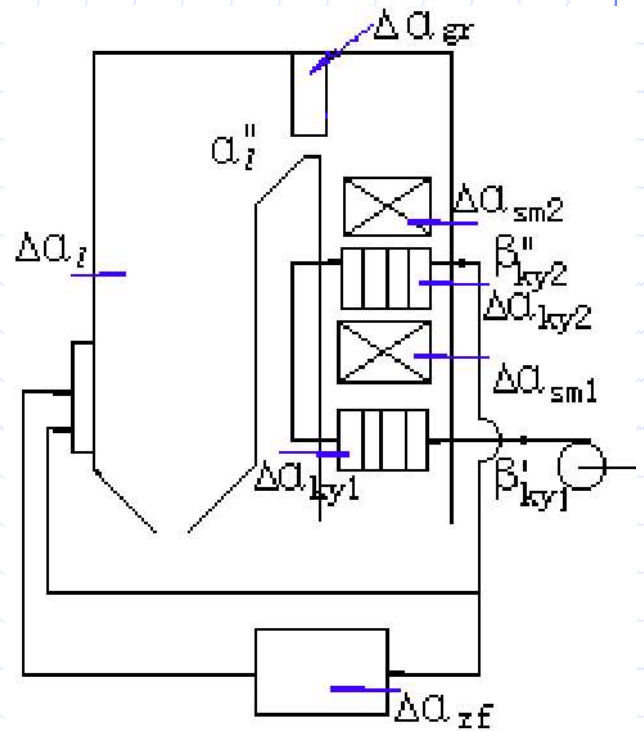
$$\Delta\alpha = \frac{\Delta V}{V^0}$$

$$\alpha'' = \alpha' + \Delta\alpha$$

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

$\Delta\alpha$  各受热面处烟气侧漏风系数,  
 $\Delta V$ 为烟道漏风量

$\alpha''$  为炉膛出口处过剩空气系数,  
表征炉内燃烧状况





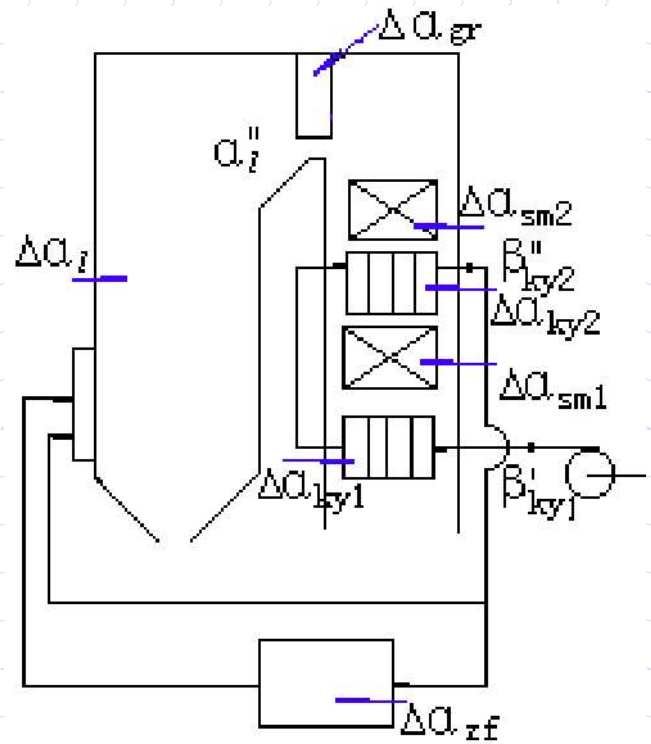
## 过剩空气系数 $\beta$ 与漏风系数 $\Delta\alpha$

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

$$\beta''_{ky} = \alpha''_l - \Delta\alpha_l - \Delta\alpha_{zf}$$

$\beta''_{ky}$ 、 $\beta'_{ky}$  为空气预热器出、进口处空气侧过剩空气系数

$\Delta\alpha_l$ 、 $\Delta\alpha_{zf}$ 、 $\Delta\alpha_{ky}$  分别为炉膛、制粉系统和空预器漏风系数



# 烟 气 容 积

- 理论烟气容积  $V_y^0$   $\alpha=1$ 、完全燃烧:  $O_2 = 0$ ;  $CO = 0$

$$\begin{aligned}
 V_y^0 &= V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 \\
 &= 1.866 \frac{(C_{ar} + 0.375S_{ar})}{100} + 0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.79V^0 \\
 &\quad + 11.1 \frac{H_{ar}}{100} + 1.24 \frac{M_{ar}}{100} + 0.0161V^0, Nm^3 / kg
 \end{aligned}$$

- 实际烟气容积  $V_y$   $\alpha > 1$ 、完全（不完全）燃烧:  $O_2 \neq 0$ ;  $CO=0$  ( $CO \neq 0$ )

$$\begin{aligned}
 V_y &= V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} = V_y^0 + (\alpha - 1)V^0 + 0.0161(\alpha - 1)V^0 \\
 &= V_y^0 + 1.0161(\alpha - 1)V^0, Nm^3 / kg
 \end{aligned}$$

## § 3 烟气分析方法

- 1、烟气分析
- 2、不完全燃烧方程式及烟气中CO含量的计算
- 3、 $RO_2$ 和 $RO_2^{\max}$ 的计算
- 4、运行中过剩空气系数及烟气容积的确定
- 5、漏风系数



# 烟气分析

## ● 烟气分析的目的:

测锅炉反平衡效率、测量过量空气系数、监督 $RO_2$   $O_2$ 的含量、检查锅炉漏风情况等。(锅炉运行监督、测试)

## ● 奥氏烟气分析仪的工作原理:利用不同的吸收剂吸收不同的气体成分

氢氧化钾溶液 (KOH)— $RO_2$

焦性没食子酸溶液  $C_6H_3(OH)_3$ — $O_2$ 、 $RO$

氯化亚铜氨溶液  $Cu(NH_3)_2Cl$ — $CO$ 、 $O_2$

## 烟气成分分析

■ **烟气分析**是以1kg燃料燃烧生成的干烟气（除去水分后的烟气）容积为基础

■ **烟气分析**可得到  $RO_2$ 、 $O_2$ 、 $CO$ 、 $N_2$ 在干烟气 $V_{gy}$ 中所占的容积百分比

$$RO_2 + O_2 + CO + N_2 = 100, \%$$

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

$$CO = \frac{V_{CO}}{V_{gy}} \times 100, \%$$

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

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

## 不完全燃烧方程式及烟气中CO含量的计算

● 不完全燃烧方程：

$$21 = RO_2 + O_2 + 0.605CO + \beta (RO_2 + CO)$$

● 烟气中CO含量的计算：

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

● 燃料特性系数  $\beta$ ：

$$\beta = 2.35 \frac{H_{ar} - \frac{O_{ar}}{8} + 0.038N_{ar}}{C_{ar} + 0.375S_{ar}}$$

## RO<sub>2</sub>和RO<sub>2</sub><sup>max</sup>的计算

● 不完全燃烧方程： $21=RO_2+O_2+0.605CO+\beta(RO_2+CO)$

当完全燃烧时,  $CO=0$ , 则得, 完全燃烧方程式:

$$21=O_2+(1+\beta)RO_2$$

$$RO_2 = \frac{21-O_2}{1+\beta}, \%$$

● 若在 $\alpha=1$ 的情况下完全燃烧, 则得 $RO_2^{\max}$ , 即:

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

# 运行中过剩空气系数及烟气容积的确定

## ● 过剩空气系数 完全燃烧

$$\alpha \approx \frac{RO_2^{\max}}{RO_2}$$

$$\alpha \approx \frac{21}{21 - O_2}$$

$RO_2$ 、 $O_2$  可由烟气分析或相关仪表测定

## ● 干烟气容积

$$RO_2 + O_2 = \frac{V_{co_2} + V_{so_2} + V_{co}}{V_{gy}} \times 100$$

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

## ● 烟气容积

$$V_y = V_{gy} + V_{H_2O}$$



## 漏风系数

$$\Delta\alpha = \frac{V''}{V^0} - \frac{V' - V'}{V^0} = \alpha'' - \alpha' \quad \text{即, } \alpha'' = \alpha' + \Delta\alpha'$$

对于空气预热器:  $\beta''_{ky} = \beta'_{ky} - \Delta\alpha_{ky}$

考虑炉膛及制粉系统的漏风,则:

$$\beta_{ky}'' = \alpha''_1 - \Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_{zf}$$

$\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_{zf}$ —炉膛及制粉系统的漏风系数。

## § 4 空气和烟气焓的计算

- 1、空气和烟气的焓
- 2、烟气的焓值
- 3、焓温表



# 空气和烟气的焓

## ● 空气的焓:

理论空气的焓:  $I_k^0 = V^0(ct)_k$ , kJ/kg

实际空气的焓:  $I_k = \alpha I_k^0 = \alpha V^0(ct)_k$ , kJ/kg

● 烟气焓  $H_y$  1kg燃料燃烧生成的烟气在定压下从0 (°C) 加热到  $\vartheta$  (°C) 时所需要的热量

## 烟气的焓值

$$H_y = H_y^0 + (\alpha - 1)H_k^0 + H_{fh}, \text{kJ/kg}$$

$$\begin{cases} H_y^0 = V_{RO_2} (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (c\vartheta)_{H_2O} \\ H_k^0 = V^0 (c\vartheta)_k \\ H_{fh} = \frac{A_{ar}}{100} a_{fh} (c\vartheta)_h \quad 4190 \frac{a_{fh} A_{ar}}{Q_{ar.net}} < 6 \text{ 时可不计算} \end{cases}$$

$H_y^0$ 、 $H_k^0$ 、 $H_{fh}$  为理想烟气焓、理想空气焓和飞灰焓  
 $(c\vartheta)_i$  为  $1\text{Nm}^3$  空气、烟气各成分和  $1\text{kg}$  灰在温度为  $\vartheta$  °C 时的焓值；  
 $a_{fh}$  为烟气携带飞灰的质量份额。对固态排渣煤粉炉， $a_{fh} = 0.9 \sim 0.95$

## 焓温表

烟气的焓值  $H_y$  取决于燃料种类、过剩空气系数及烟气温度

焓温表 对给定的燃料和各受热面前、后的过剩空气系数  $\alpha$  计算出该受热面对应烟气温度  $\vartheta$  范围内的烟气焓  $H_y$ ，制成的烟气 ( $\vartheta - H_y$ ) 表

由 ( $H_y$ 、 $\alpha$ ) 查焓温表可很快确定烟气温度  $\vartheta$ ；

由 ( $\vartheta$ 、 $\alpha$ ) 查表可很快确定烟气焓  $H_y$

# 作业与思考题

- 1、煤中所含的灰分、水分对锅炉运行有哪些不利影响？
- 2、试述 $V_{daf}$ 、 $S_{ar}$ 及灰熔点对锅炉的工作有哪些影响。
- 3、灰渣熔融特性在锅炉设计和运行中有何意义？影响灰熔点的因素有哪些？
- 4、什么是折算成分，在锅炉运行中有何意义？
- 5、推导换算系数 $K_{adf-ar}$
- 6、某种煤收到基含碳量为40%。由于受外界条件的影响，其收到基水分由15%减少到10%，收到基灰分由25%增加到35%，试求其水分和灰分变化后的收到基含碳量（要求先推导换算公式，后计算）。
- 7、已知甲种煤的 $Q_{net, ar}=29166\text{kJ/kg}$ ,  $A_{ar}=18\%$ ；乙种煤的 $Q_{net, ar}=18788\text{kJ/kg}$ ,  $A_{ar}=15\%$ 。如果锅炉效率、负荷等条件相同，试问用哪一种燃料锅炉出灰量大？



# 作业与思考题

- 8、已知某锅炉燃用煤的元素分析成分如下： $C_{ar}=58.14\%$   $H_{ar}=3.86\%$   $O_{ar}=8.09\%$   $N_{ar}=0.62\%$   $S_{ar}=0.22\%$   $A_{ar}=20.07\%$   $M_{ar}=9\%$   $M_{ad}=1\%$  试求：1、该燃料的空气干燥基和干燥基成分。2、判断属何种煤。3、按发电煤粉锅炉用煤标准划分属哪类。
- 9、试比较煤的收到基水分  $M_{ar}$  和空气干燥基水分  $M_{ad}$  的区别，并推导  $M_{ar}$ 、 $M_{ad}$ 、外在水分  $M_f$ 、内在水分  $M_{inh}$  之间的关系式。
- 10、已知煤的分析数据如下： $C_{ar}=57.87\%$   $H_{ar}=3.90\%$   $O_{ar}=5.70\%$   $N_{ar}=1.13\%$   $S_{ar}=0.72\%$   $A_{ar}=14.01\%$   $M_{ar}=16.67\%$   $V_{daf}=18.0\%$   $Q_{net, ar}=22600\text{kJ/kg}$  试计算：
  - (1) 理论空气量  $V_0$ ;
  - (2) 实际空气量  $V_k$ ; ( $\alpha=1.2$ )
  - (3) 完全燃烧时的烟气体积  $V_y$ 、 $V_{gy}$ 、 $V_{H_2O}$ ;
  - (4) 完全燃烧时形成的烟气在  $1200^\circ\text{C}$  时的焓。
- 11、某锅炉燃煤的特性系数  $\beta=0.09$ ，理论空气量  $V_0=16\text{Nm}^3/\text{kg}$ 。运行中测知省煤器前后的  $RO_2$  值分别为  $15.2\%$  及  $14.9\%$ 。求该省煤器处的漏风系数及漏风量。

# 作业与思考题

- **12、**已知：某燃料每千克完全燃烧后，形成的烟气体积  $V_y=7.5\text{Nm}^3/\text{kg}$ ，其中： $V_{\text{H}_2\text{O}}=0.6\text{Nm}^3/\text{kg}$ ， $V_{\text{RO}_2}=0.8\text{Nm}^3/\text{kg}$ ， $V_{\text{O}_2}=0.2\text{Nm}^3/\text{kg}$  求：完全燃烧时过量空气系数  $\alpha$ （不能用近似公式）及三原子气体的容积份额。
- **13、**已知锅炉每小时燃煤  $60\text{ t/h}$ ，燃料成分如下：  
 $C_{\text{ar}}=42.68\%$   $H_{\text{ar}}=2.88\%$   $O_{\text{ar}}=4.20\%$   
 $N_{\text{ar}}=0.83\%$   $S_{\text{ar}}=0.53\%$   $A_{\text{ar}}=29.84\%$   
 $M_{\text{ar}}=19.04\%$  锅炉在完全燃烧情况下，如果测得炉膛出口处  $\text{RO}_2''=16.1\%$ ，而排烟处  $\text{RO}_2\text{py}=13.1\%$ ，试求每小时漏入烟道的空气量。
- **14、**已知理论空气量  $V^\circ = 5\text{Nm}^3/\text{kg}$ ，每小时耗煤量  $40\text{ t/h}$ 。当完全燃烧时，测得省煤器前烟气中含氧量  $\text{O}_2'=6.0\%$ ，省煤器后烟气中含氧量  $\text{O}_2''=6.6\%$  求：实际漏入省煤器的空气量。