



高等学校教材

锅炉例题习题集

西安交通大学 贾鸿祥 编



内 容 提 要

本书系高等学校热能动力类专业“锅炉原理”课程的辅助教学用书。本书着重介绍燃料燃烧计算, 锅炉机组的热平衡、煤粉制备、燃烧设备和锅炉受热面的热力计算以及自然循环锅炉的水循环计算等。除习题外, 并附有各种计算示例和部分计算程序。

本书主要供高等学校热能工程等专业教学用, 亦可供热能工程的科研、设计、制造和运行部门的工程技术人员参考。

高等学校教材

锅炉例题习题集

西安交通大学 贾鸿祥 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 8印张 179千字

1990年10月第一版 1990年10月北京第一次印刷

印数0001—9620册

ISBN 7-120-01130-8/TK·177

定价1.65元

前 言

本书系根据1988年高等学校热能动力类专业教学委员会的决定,作为热能动力类专业“锅炉原理”课程的辅助教学用书。编写《锅炉例题习题集》的目的在于使学生加深对“锅炉原理”课程的理解,拓宽知识面,提高运算能力和解决实际问题的能力。

全书共分八章。着重介绍燃料燃烧计算、锅炉机组的热平衡、制粉系统和燃烧设备计算、锅炉受热面的热力计算以及自然循环锅炉的水循环计算等。主要章节中附有各种计算示例和部分实用的计算程序,对典型例题作了详细题解。每个习题后都附有参考答案。

本书由西安交通大学贾鸿祥副教授编写。在编写过程中得到山东工业大学、上海电力学院、浙江大学和东南大学等院校热能动力教研室许多同志的支持和帮助,在此表示致谢。

山东工业大学张梦珠副教授任主审,对本书稿提出了宝贵意见,编者在此表示衷心感谢。

限于编者水平,书中的差错和不当之处在所难免,请读者给予批评指正。

编者

1989年8月

目 录

前 言	
第一章 燃料燃烧计算	1
第二章 锅炉机组的热平衡	22
第三章 煤粉制备	31
第四章 燃烧理论及设备	45
第五章 对流受热面的工作	57
第六章 炉内传热计算	61
第七章 半辐射和对流受热面的传热计算	73
第八章 自然循环锅炉的水循环计算	96
附 录	114
附录 I 常用工程单位与法定计量单位换算表	114
附录 II 气体的平均定压质量比热容 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$ ($p=101325\text{Pa}$)	115
附录 III 气体的平均定压容积比热容 $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ ($p=101325\text{Pa}$)	116
附录 IV 1 kg 干空气、湿空气的焓 (kJ/kg)	117
附录 V 干煤的比热容	117
附录 VI 煤灰的平均比热容 $(0 \sim t^\circ\text{C})$	117
附录 VII 空气和平均成分烟气的物理特性	118
附录 VIII 烟气物理特性的换算修正系数	119
附录 IX 饱和线上水和水蒸气的特性	120
参考文献	123

第一章 燃料燃烧计算

【例 1-1】 煤的元素组成经常按如下方式给出, 譬如山西阳泉无烟煤: $W^y=5.00\%$, $A^y=20.00\%$, $C^y=90.80\%$, $H^y=3.80\%$, $O^y=3.10\%$, $N^y=1.30\%$, $S^y=1.00\%$ 。试计算该煤的应用基组成。

【解】 由干燥基换算到应用基的换算系数为

$$K_{g-y} = \frac{100 - W^y}{100} = \frac{100 - 5.00}{100} = 0.95$$

则煤的应用基灰分

$$A^y = A^g K_{g-y} = 20.00 \times 0.95 = 19.00\%$$

由可燃基换算到应用基的换算系数为

$$K_{r-y} = \frac{100 - W^y - A^y}{100} = \frac{100 - 5.00 - 19.00}{100} = 0.76$$

则煤的应用基组成为

$$C^y = C^r K_{r-y} = 90.80 \times 0.76 = 69.01\%$$

$$H^y = H^r K_{r-y} = 3.80 \times 0.76 = 2.89\%$$

$$O^y = O^r K_{r-y} = 3.10 \times 0.76 = 2.36\%$$

$$N^y = N^r K_{r-y} = 1.30 \times 0.76 = 0.99\%$$

$$S^y = S^r K_{r-y} = 1.00 \times 0.76 = 0.76\%$$

验算: $C^y + H^y + O^y + N^y + S^y + A^y + W^y$

$$= 69.01 + 2.89 + 2.36 + 0.99 + 0.76 + 19.00 + 5.00 = 100.01\%$$

从验算结果看, 应用基组成有0.01%的偏差, 这是由于计算时尾数四舍五入造成的。为把应用基元素组成圆整成总和为100%, 可将计算偏差放到数值最大的一项上, 最后得到 $C^y = 69.00\%$ 。另一种处理方法, 是将计算偏差计入氧含量数值。这是因为煤中氧含量一般不是直接测定的, 而是用差减法求得的。由此计算出的氧含量必然包括测定碳、氢、氮和硫时所有的误差, 准确度一般是不高的, 只能是一个近似的数值, 因此在元素组成换算最后圆整时, 可将各项四舍五入带来的偏差都计到氧含量上。上述的处理方法对锅炉的热力计算不会产生多大影响。

1-1 一台SHL10-1.3/350型(双锅筒横置式、链条炉排)锅炉所用烟煤的应用基组成为: $C^y=48.50\%$, $H^y=3.60\%$, $S^y=6.10\%$, $N^y=0.80\%$, $O^y=4.00\%$, $W^y=6.00\%$, 干燥基灰分 $A^g=33.00\%$ 。试计算该煤的可燃基组成。

(答: $C^r=76.99\%$, $H^r=5.71\%$, $S^r=9.68\%$, $N^r=1.27\%$, $O^r=6.35\%$)

1-2 淮北烟煤的干燥基组成为: $C^g=58.68\%$, $H^g=3.31\%$, $O^g=4.90\%$, $N^g=0.97\%$, $S^g=0.51\%$, $A^g=31.63\%$ 。试计算:

(1) 该煤的可燃基组成;

(2) 若该煤炉前的水分 $W' = 8.90\%$, 各成分应用基含量为多少?

(答: 可燃基组成: $C' = 85.83\%$, $H' = 4.84\%$, $O' = 7.16\%$, $N' = 1.42\%$, $S' = 0.75\%$; 应用基组成: $C'' = 53.46\%$, $H'' = 3.02\%$, $O'' = 4.47\%$, $N'' = 0.88\%$, $S'' = 0.46\%$, $A'' = 28.81\%$.)

【例 1-2】 已知某锅炉燃煤的分析基组成为: $C' = 60.50\%$, $H' = 4.20\%$, $S' = 0.80\%$, $A' = 25.50\%$, $W' = 2.10\%$ 。实验室测得该煤的外在水分 $W_{wz}' = 3.50\%$ 。试计算该煤各成分的应用基含量。

【解】 从水存在于煤中的状态来看, 煤中水分可分为内在水分和外在水分两部分。吸附或凝聚在煤颗粒内部毛细孔中的水, 称为内在水分或固有水分。附着在颗粒表面上的水称为外在水分, 它是在空气风干过程中能逸走的水分, 故又称为风干水分。

外在水分的计算基是应用基, 记为 W_{wz}'' ; 内在水分的计算基是分析基, 记为 W_{nz}' , 即 W' 。全水分 W'' 与 W_{wz}'' 和 W_{nz}' 间的关系可根据干燥基质量不变原则得到, 即

$$1 \times \left(1 - \frac{W''}{100}\right) = \left(1 - \frac{W_{wz}''}{100}\right) \left(1 - \frac{W_{nz}'}{100}\right)$$

由此可得

$$W'' = W_{wz}'' + W_{nz}' \frac{100 - W_{wz}''}{100}$$

代入数据得该煤全水分

$$W'' = 3.50 + 2.10 \frac{100 - 3.50}{100} = 5.53\%$$

从分析基换算到应用基的换算系数为

$$K_{f-y} = \frac{100 - W''}{100 - W'} = \frac{100 - 5.53}{100 - 2.10} = 0.965$$

则该煤的应用基组成为

$$C'' = C' K_{f-y} = 60.50 \times 0.965 = 58.38\%$$

$$H'' = H' K_{f-y} = 4.20 \times 0.965 = 4.05\%$$

$$S'' = S' K_{f-y} = 0.80 \times 0.965 = 0.77\%$$

$$A'' = A' K_{f-y} = 25.50 \times 0.965 = 24.61\%$$

$$W'' = 5.53\%$$

1-3 某电站锅炉燃用淮南烟煤, 其可燃基组成和干燥基灰分为: $C' = 85.00\%$, $H' = 5.60\%$, $O' = 7.30\%$, $N' = 0.80\%$, $S' = 1.30\%$, $A' = 21.50\%$ 。实验室测得该煤的外在水分 $W_{wz}' = 12.50\%$, 内在水分 $W_{nz}' = 2.40\%$ 。求此煤各成分的应用基含量。

(答: $C'' = 56.98\%$, $H'' = 3.75\%$, $O'' = 4.90\%$, $N'' = 0.54\%$, $S'' = 0.87\%$, $A'' = 18.36\%$, $W'' = 14.60\%$)

【例 1-3】 (1) 当燃料水分由 W_1' 变为 W_2' 时, 燃料应用基元素组成如何变化?

(2) 当燃料水分和灰分由 W_1^y 、 A_1^y 变为 W_2^y 、 A_2^y 时, 燃料应用基元素组成如何变化?

【解】 (1) 当燃料水分变化时, 利用干燥基组成不变的原则, 则有

$$C^y = C_1^y \frac{100}{100 - W_1^y} = C_2^y \frac{100}{100 - W_2^y}$$

其余成分类推, 由此可得

$$C_2^y = C_1^y \frac{100 - W_2^y}{100 - W_1^y}$$

$$H_2^y = H_1^y \frac{100 - W_2^y}{100 - W_1^y}$$

⋮

即燃料水分变化时, 变化前后应用基元素组成之间的换算系数为

$$K_{y, -y_2} = \frac{100 - W_2^y}{100 - W_1^y}$$

(2) 当燃料水分和灰分同时变化时, 利用可燃基组成不变的原则, 则有

$$C^y = C_1^y \frac{100}{100 - W_1^y - A_1^y} = C_2^y \frac{100}{100 - W_2^y - A_2^y}$$

其余成分类推, 由此可得

$$C_2^y = C_1^y \frac{100 - W_2^y - A_2^y}{100 - W_1^y - A_1^y}$$

$$H_2^y = H_1^y \frac{100 - W_2^y - A_2^y}{100 - W_1^y - A_1^y}$$

⋮

即燃料水分和灰分同时变化时, 变化前后应用基元素组成之间的换算系数为

$$K_{(W_1, A_1) - (W_2, A_2)} = \frac{100 - W_2^y - A_2^y}{100 - W_1^y - A_1^y}$$

1-4 写出煤的工业分析四种“基”的组成表示式。如已知分析基组成, 试导出 $C_{ad}^y = KC_{ad}^y$ 中的 K 值。

(答: $K = \frac{100 - W^y}{100 - W_1^y}$)

1-5 某种褐煤进入风扇磨煤机前的组成为: $C_1^y = 28.70\%$, $H_1^y = 2.20\%$, $S_1^y = 2.70\%$, $N_1^y = 0.60\%$, $O_1^y = 8.60\%$, $A_1^y = 25.20\%$, $W_1^y = 32.00\%$; 经磨煤机干燥后, 水分减少到 $W_2^y = 15.00\%$ 。试计算干燥后煤的应用基组成。

(答: $C_2^y = 35.88\%$, $H_2^y = 2.75\%$, $S_2^y = 3.38\%$, $N_2^y = 0.75\%$, $O_2^y = 10.74\%$, $A_2^y = 31.50\%$, $W_2^y = 15.00\%$)

1-6 某电厂锅炉燃用马头洗中煤: $C^y = 82.06\%$, $H^y = 5.55\%$, $O^y = 8.88\%$, $N^y = 1.57\%$, $S^y = 1.94\%$, $W^y = 11.30\%$, $A^y = 41.47\%$ 。

(1) 试计算该煤应用基成分;

(2) 雨季时平均水分变为 $W_2' = 16.70\%$, 试计算此时煤的应用基组成;

(3) 煤场原存煤2000t, 试问雨季时煤的质量为多少?

(答: (1) $C' = 42.61\%$, $H' = 2.88\%$, $O' = 4.60\%$, $N' = 0.82\%$, $S' = 1.01\%$,

$A' = 36.78\%$, $W' = 11.30\%$;

(2) $C_2' = 40.02\%$, $H_2' = 2.70\%$, $O_2' = 4.32\%$, $N_2' = 0.77\%$, $S_2' = 0.95\%$,

$A_2' = 34.54\%$, $W_2' = 16.70\%$;

(3) $G_2 = 2129.7t$)

1-7 某电厂锅炉燃用马头混煤, 其特性为: $A' = 28.85\%$, $W' = 6.09\%$, $V' = 40.12\%$. 在煤场储存过程中, 其水分减少到 $W_2' = 5.09\%$. 试求此时应用基工业分析组成。

(答: $C_{ad,2}' = 39.37\%$, $A_2' = 29.16\%$, $W_2' = 5.09\%$, $V_2' = 26.38\%$)

1-8 如果锅炉燃用混煤, 第一种煤的应用基组成为: C_1' , H_1' , O_1' , N_1' , S_1' , W_1' 和 A_1' , 煤耗量为 B_1 (kg/s); 第二种煤的应用基组成为: C_2' , H_2' , O_2' , N_2' , S_2' , W_2' 和 A_2' , 煤耗量为 B_2 (kg/s)。试写出混煤应用基组成的计算式。

1-9 某锅炉运行中燃用两种烟煤的混煤。第一种煤应用基组成为: $C_1' = 49.30\%$, $H_1' = 3.60\%$, $S_1' = 3.00\%$, $N_1' = 1.00\%$, $O_1' = 8.30\%$, $A_1' = 21.80\%$, $W_1' = 13.00\%$, 煤耗量为 3×10^3 kg/h; 第二种煤应用基组成为: $C_2' = 55.20\%$, $H_2' = 3.80\%$, $S_2' = 3.20\%$, $N_2' = 1.00\%$, $O_2' = 5.80\%$, $A_2' = 23.00\%$, $W_2' = 8.00\%$, 煤耗量为 4.5×10^3 kg/h。试计算混煤的应用基组成。

(答: $C' = 52.84\%$, $H' = 3.72\%$, $S' = 3.12\%$, $N' = 1.00\%$, $O' = 6.80\%$, $A' = 22.52\%$, $W' = 10.00\%$)

【例 1-4】 试推导出当煤的应用基水分由 W_1' 变为 W_2' 时, 其应用基低位发热量间的换算关系式。

【解】 第一种解法:

水分变化前后, 其应用基高位发热量间的换算关系可利用例1-3中应用基元素组成的换算关系, 即

$$Q_{d,2}' = Q_{d,1}' \frac{100 - W_2'}{100 - W_1'}$$

应用基高位和低位发热量间关系为

$$\begin{aligned} Q_{d,2}' &= Q_{d,1}' - r \left(\frac{9H_2'}{100} + \frac{W_2'}{100} \right) \\ &= Q_{d,1}' \frac{100 - W_2'}{100 - W_1'} - r \left(\frac{9H_2'}{100} + \frac{W_2'}{100} \right) \\ &= \left[Q_{d,1}' + r \left(\frac{9H_1'}{100} + \frac{W_1'}{100} \right) \right] \frac{100 - W_2'}{100 - W_1'} - r \left(\frac{9H_2'}{100} + \frac{W_2'}{100} \right) \end{aligned}$$

由此可得

$$Q_{d,1}^y = Q_{d,1}^y \frac{100 - W_2^y}{100 - W_1^y} + \frac{r}{100} \left(\frac{100 - W_2^y}{100 - W_1^y} W_1^y - W_2^y \right)$$

式中 r —— 水的汽化潜热, kJ/kg.

第二种解法:

根据水分变化时干燥基高位发热量不变的原则, 可写出如下关系:

$$Q_g^y = Q_{g,1}^y \frac{100}{100 - W_1^y} = \frac{100}{100 - W_1^y} \left[Q_{d,1}^y + r \left(\frac{9H_1^y}{100} + \frac{W_1^y}{100} \right) \right]$$

$$Q_g^y = Q_{g,2}^y \frac{100}{100 - W_2^y} = \frac{100}{100 - W_2^y} \left[Q_{d,2}^y + r \left(\frac{9H_2^y}{100} + \frac{W_2^y}{100} \right) \right]$$

由此得

$$\frac{100}{100 - W_1^y} \left[Q_{d,1}^y + r \left(\frac{9H_1^y}{100} + \frac{W_1^y}{100} \right) \right] = \frac{100}{100 - W_2^y} \left[Q_{d,2}^y + r \left(\frac{9H_2^y}{100} + \frac{W_2^y}{100} \right) \right]$$

经过简单换算后, 同样可得

$$Q_{d,2}^y = Q_{d,1}^y \frac{100 - W_2^y}{100 - W_1^y} + \frac{r}{100} \left(\frac{100 - W_2^y}{100 - W_1^y} W_1^y - W_2^y \right)$$

1-10 根据例1-4所示原则, 导出固体或液体燃料各种“基”低位发热量间的换算关系列于表1-1。试导出由分析基低位发热量 Q_d^f 计算应用基低位发热量 Q_d^y 的换算关系。

表 1-1

各种基低位发热量之间的换算关系

已知 的基	欲 求 的 基			
	应 用 基	分 析 基	干 燥 基	可 燃 基
应用基	—	$Q_d^y = \left(Q_d^f + r \frac{W^y}{100} \right)$ $\times \frac{100 - W^f}{100 - W^y} - r \frac{W^f}{100}$	$Q_d^y = \left(Q_d^f + r \frac{W^y}{100} \right)$ $\times \frac{100}{100 - W^y}$	$Q_d^y = \left(Q_d^f + r \frac{W^y}{100} \right)$ $\times \frac{100}{100 - W^y - A^y}$
分析基	—	—	$Q_d^f = \left(Q_d^y + r \frac{W^y}{100} \right)$ $\times \frac{100}{100 - W^y}$	$Q_d^f = \left(Q_d^y + r \frac{W^y}{100} \right)$ $\times \frac{100}{100 - W^y - A^y}$
干燥基	$Q_d^y = Q_d^f \frac{100 - W^y}{100}$ $- r \frac{W^y}{100}$	$Q_d^f = Q_d^y \frac{100 - W^f}{100}$ $- r \frac{W^f}{100}$	—	$Q_d^f = Q_d^y \frac{100}{100 - A^y}$
可燃基	$Q_d^y = Q_d^f \frac{100 - W^y - A^y}{100}$ $- r \frac{W^y}{100}$	$Q_d^f = Q_d^y \frac{100 - W^f - A^f}{100}$ $- r \frac{W^f}{100}$	$Q_d^y = Q_d^f \frac{100 - A^f}{100}$	—

$$\left[\text{答: } Q_d^y = \left(Q_d^f + r \frac{W^f}{100} \right) \frac{100 - W^y}{100 - W^f} - r \frac{W^y}{100} \right]$$

1-11 氧弹测热计可测得煤的分析基高位发热量 $Q_{d,ar}^*$ ，若 W^* 、 H^* 和 r 已知，试导出应用基低位发热量 $Q_{d,ar}^*$ 的计算式。

$$\left[\text{答: } Q_{d,ar}^* = Q_{d,ar}^* \frac{100 - W^*}{100 - W^*} - \frac{r}{100} (9H^* + W^*) \right]$$

1-12 用氧弹测热计测得某烟煤的弹筒发热量为 $Q_{d,et}^* = 26578 \text{ kJ/kg}$ 。同时由工业分析和元素分析测得 $W^* = 5.30\%$ ， $W_{wz}^* = 3.50\%$ ， $H^* = 2.60\%$ ， $S^* = 1.80\%$ 。试求其应用基低位发热量 $Q_{d,ar}^*$ 。

【提示】煤的分析基高位发热量 $Q_{d,ar}^*$ 与弹筒发热量之间有如下关系：

$$Q_{d,ar}^* = Q_{d,et}^* - 94.2S^* - aQ_{d,et}^*, \quad \text{kJ/kg}$$

式中 $94.2S^*$ ——硫酸的生成热，即每千克可燃硫的燃烧产物在形成硫酸时放出的热量为9420kJ；

$aQ_{d,et}^*$ ——硝酸的生成热，系数 a 对无烟煤和贫煤为0.001，其它煤种为0.0015。

(答: $Q_{d,ar}^* = 24729.4 \text{ kJ/kg}$)

【例 1-5】根据煤的元素分析，我国煤炭科学院推荐按下式计算煤的应用基低位发热量：

$$Q_{d,ar}^* = k_1 C^* + k_2 H^* + k_3 S^* - k_4 O^* - k_5 \frac{100 - W^* - A^*}{100} \left(\frac{100}{100 - W^*} A^* - 10 \right) - r \frac{W^*}{100} \quad \text{kJ/kg}$$

式中 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 ——系数，按表1-2取值；

r ——水的汽化潜热，kJ/kg。

表 1-2 系数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 及 k_5

煤 种	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
煤矸石、石煤、	335(327*)	1072(1030**)	63	63	21
褐 煤	335	105	92	109	22
无烟煤、贫煤	335	1114	92	92	33.5
烟 煤	335	1072	92	105	29

* 对 $C^* > 95\%$ 或 $H^* \leq 1.5\%$ 的煤用327，其它煤用335；

** 对 $C^* < 77\%$ 的煤用1030，其它用1072。

阳泉无烟煤的应用基元素组成见例1-1，工业分析测得其应用基低位发热量 $Q_{d,ar}^* = 26400 \text{ kJ/kg}$ 。试利用门捷列夫经验公式及煤科院公式对该煤应用基低位发热量 $Q_{d,ar}^*$ 进行校核。

【解】按门捷列夫经验公式计算：

$$\begin{aligned} Q_{d,ar}^* &= 339C^* + 1030H^* - 109(O^* - S^*) - 25W^* \\ &= 339 \times 69.00 + 1030 \times 2.89 - 109 \times (2.36 - 0.76) - 25 \times 5.00 \\ &= 26068.3(\text{kJ/kg}) \end{aligned}$$

实测值与门捷列夫经验公式计算值间的偏差

$$\Delta Q_d' = 26400 - 26068.3 = 331.7 \text{ (kJ/kg)}$$

按煤科院公式计算:

由表1-2查得 $k_1=335$, $k_2=1114$, $k_3=92$, $k_4=92$, $k_5=33.5$.

$$\begin{aligned} Q_d' &= k_1 C' + k_2 H' + k_3 S' - k_4 O' - k_5 \frac{100 - W' - A'}{100} \left(\frac{100}{100 - W'} A' - 10 \right) - 25 W' \\ &= 335 \times 69.00 + 1114 \times 2.89 + 92 \times 0.76 - 92 \times 2.36 \\ &\quad - 33.5 \frac{100 - 5.00 - 19.00}{100} \left(\frac{100}{100 - 5.00} \times 19.00 - 10 \right) - 25 \times 5.00 \\ &= 25807.7 \text{ (kJ/kg)} \end{aligned}$$

实测值与经验公式计算值间偏差

$$\Delta Q_d' = 26400 - 25807.7 = 592.3 \text{ (kJ/kg)}$$

1-13 某电厂锅炉燃用平顶山洗煤, 煤矿分析其应用基组成为: $C'_1=41.51\%$, $H'_1=3.11\%$, $O'_1=5.23\%$, $N'_1=0.75\%$, $S'_1=0.40\%$, $A'_1=31.70\%$, $W'_1=17.30\%$ 。电厂进行工业分析指出, 实际全水分为 $W'_2=14.5\%$ 。试问此时该煤应用基低位发热量为多少?

[提示] 利用门捷列夫经验公式(见例1-5)计算低位发热量。

(答: $Q_{d,2}' = 16962.3 \text{ kJ/kg}$)

1-14 已知某烟煤可燃基低位发热量 $Q_{d,1}' = 33170 \text{ kJ/kg}$, 干燥基灰分 $A' = 25.00\%$, 应用基水分 $W' = 8.00\%$ 。试计算该煤应用基和干燥基低位发热量。

(答: $Q_d' = 22687.3 \text{ kJ/kg}$, $Q_{d,1}' = 24877.5 \text{ kJ/kg}$)

1-15 已知煤的分析基特性: $C' = 68.60\%$, $H' = 3.66\%$, $S' = 4.84\%$, $O' = 3.22\%$, $N' = 0.83\%$, $A' = 17.35\%$, $W' = 1.50\%$, $V' = 8.75\%$, $Q_{d,1}' = 27528 \text{ kJ/kg}$ 及全水分 $W'' = 2.67\%$ 。试求:

(1) 煤的应用基组成;

(2) 可燃基挥发分 V' ;

(3) 应用基低位发热量 Q_d' , 并用门捷列夫经验公式(见例1-5)进行校核。

(答: (1) $C' = 67.79\%$, $H' = 3.62\%$, $S' = 4.78\%$, $O' = 3.18\%$, $N' = 0.82\%$, $A' = 17.14\%$; (2) $V' = 10.8\%$; (3) $Q_d' = 27171.3 \text{ kJ/kg}$, 门捷列夫经验公式计算 $Q_d' = 26817.1 \text{ kJ/kg}$)

1-16 河南焦作无烟煤的元素组成为: $W' = 7.00\%$, $A' = 22.00\%$, $C' = 92.20\%$, $H' = 3.10\%$, $O' = 2.80\%$, $N' = 1.40\%$, $S' = 0.50\%$; 工业分析测得应用基低位发热量 $Q_{d,1}' = 22880 \text{ kJ/kg}$ 。试利用煤科院公式(见例1-5)计算该煤应用基低位发热量, 并与测定值进行对比。

(答: 计算值 $Q_d' = 24291 \text{ kJ/kg}$, $\Delta Q_d' = 1411 \text{ kJ/kg}$)

1-17 某工业锅炉煤场贮有 $60 \times 10^3 \text{ kg}$ 褐煤, 其可燃基元素组成为: $C' = 76.00\%$, $H' = 3.80\%$, $S' = 2.50\%$, $N' = 0.40\%$, $O' = 17.30\%$; 干燥基灰分 $A' = 20.00\%$; 全水

分 $W^y=34.50\%$ 。试问这些煤相当于多少标准煤(标准煤低位发热量 $Q_{\text{d}}^y=29310\text{kJ/kg}$)?

[提示] 按门捷列夫经验公式或煤科院公式(见例1-5)计算煤的应用基低位发热量。

(答: 按门捷列夫经验公式计算应用基低位发热量时, 相当于 $29.42\times 10^3\text{kg}$ 标准煤; 按煤科院公式计算时, 相当于 $28.44\times 10^3\text{kg}$ 标准煤)

1-18 由煤矿向电厂运输 $3\times 10^6\text{kg}$ 褐煤, 其应用基水分 w^y 为32%, 低位发热量 $Q_{\text{d}}^y=10435\text{kJ/kg}$ 。途中遇雨, 应用基水分增加到35%。试计算雨前雨后相当于标准煤量的变化。

[提示] 先根据干燥基质量不变的原则, 计算出雨后煤的质量, 再计算雨后煤的应用基低位发热量。

(答: $0.0118\times 10^6\text{kg}$)

1-19 某工业锅炉煤场贮有 $50\times 10^3\text{kg}$ 贫煤, 其元素组成为: $C^y=62.70\%$, $H^y=3.10\%$, $S^y=2.80\%$, $N^y=0.90\%$, $O^y=1.70\%$, $A^y=23.80\%$, $W^y=5.00\%$; 另有 $60\times 10^3\text{kg}$ 无烟煤, 其元素组成为: $C^y=63.80\%$, $H^y=1.20\%$, $S^y=1.70\%$, $N^y=0.60\%$, $O^y=1.30\%$, $A^y=22.90\%$, $W^y=8.50\%$ 。如果已知该锅炉燃用贫煤时, 每小时耗煤量为 $2\times 10^3\text{kg}$ 标准煤; 燃用无烟煤时, 每小时耗煤量为 $2.3\times 10^3\text{kg}$ 标准煤。问存煤可供锅炉燃用多长时间?

[提示] 用门捷列夫经验公式(见例1-5)计算煤的应用基低位发热量。

(答: 41.07h)

1-20 试利用门捷列夫经验公式计算下列混煤的应用基低位发热量。第一种煤质量占30%, 其元素组成为: $C^y=85.0\%$, $H^y=4.0\%$, $N^y=3.0\%$, $S^y=2.0\%$, $O^y=6.0\%$, $A^y=16.0\%$, $W^y=30.0\%$; 第二种煤质量占70%, 其元素组成为: $C^y=29.10\%$, $H^y=2.20\%$, $S^y=2.90\%$, $N^y=0.60\%$, $O^y=8.70\%$, $W^y=33.00\%$, $A^y=23.50\%$ 。

(答: $Q_{\text{d}}^y=12978.9\text{kJ/kg}$)

1-21 北京某热电厂燃用大同烟煤, 我国自行设计制造的第一台塔式布置锅炉燃用广西合山劣质煤, 两种煤的部分元素组成为

大同烟煤: $C^y=73.34\%$, $H^y=3.74\%$, $S^y=0.57\%$, $A^y=11.05\%$, $W^y=8.82\%$, $W^f=1.87\%$, $Q_{\text{d}}^f=29567\text{kJ/kg}$;

合山煤: $C^y=30.30\%$, $H^y=1.80\%$, $S^y=4.69\%$, $A^y=48.35\%$, $W^y=10.01\%$, $Q_{\text{d}}^y=12058\text{kJ/kg}$ 。

试计算这两种煤的折算水分、折算灰分、折算硫分及热当量 E 。

[提示] 煤的热当量定义为煤的应用基低位发热量 Q_{d}^y 与标准煤发热量 29310kJ/kg 的

比值, 即 $E = \frac{Q_{\text{d}}^y}{29310}$ 。

(答: 大同煤: $W_{\text{ar}}=1.40$, $A_{\text{ar}}=1.59$, $S_{\text{ar}}=0.084$, $E=0.903$;

合山煤: $W_{\text{ar}}=3.48$, $A_{\text{ar}}=16.79$, $S_{\text{ar}}=1.63$, $E=0.41$)

1-22 某电厂1000t/h亚临界压力自然循环锅炉, 设计煤种元素组成为: $C^y=42.18\%$, $H^y=3.82\%$, $O^y=7.79\%$, $N^y=0.72\%$, $S^y=1.22\%$, $A^y=32.60\%$, $W^y=11.67\%$,

应用基低位发热量 $Q_{d,1}^* = 17229 \text{ kJ/kg}$; 实际燃用唐村原煤, 其特性为: $S_2^* = 3.85\%$, $A_2^* = 16.43\%$, $W_2^* = 9.34\%$, $Q_{d,2}^* = 24162 \text{ kJ/kg}$ 。试计算:

(1) 两种煤的折算灰分、折算水分、折算硫分及热当量 (见1-21题提示);

(2) 若燃煤量 $B_1 = 175280 \text{ kg/h}$, $B_2 = 124985 \text{ kg/h}$, 燃烧后每小时产生灰量各为多少?

(3) 灰量比、折算灰分比各为多少?

(答: (1) 设计煤: $A_{s,1} = 7.92$, $W_{s,1} = 2.84$, $S_{s,1} = 0.30$, $E_1 = 0.59$;

唐村煤: $A_{s,2} = 2.85$, $W_{s,2} = 1.62$, $S_{s,2} = 0.67$, $E_2 = 0.82$ 。

(2) $G_{h,1} = 57141.3 \text{ kg/h}$, $G_{h,2} = 20535 \text{ kg/h}$ 。

(3) $G_{h,1}/G_{h,2} = 2.78$, $A_{s,1}/A_{s,2} = 2.78$ 。)

1-23 某牌号重油应用基低位发热量 $Q_d^* = 38772 \text{ kJ/kg}$, 其特性为: $H^* = 10.40\%$, $A^* = 0.10\%$, $W^* = 3.00\%$ 。试计算该重油可燃基低位和低位发热量。

(答: $Q_d^* = 40089.7 \text{ kJ/kg}$, $Q_g^* = 42504.6 \text{ kJ/kg}$)

1-24 某地干燥天然气的容积组成为: $\text{CH}_4 = 84.5\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 3.8\%$, $\text{C}_3\text{H}_8 = 1.9\%$, $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0.9\%$, $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0.3\%$, $\text{N}_2 = 7.8\%$, $\text{CO} = 0.8\%$ 。试计算 1 Nm^3 干燥天然气的低位发热量 $Q_d^* = ?$

[提示] 干燥气体燃料发热值按下式计算:

$$Q_d^* = 103\text{H}_2 + 126\text{CO} + 234\text{H}_2\text{S} + 358\text{CH}_4 + 591\text{C}_2\text{H}_6 + 638\text{C}_3\text{H}_8 + 860\text{C}_4\text{H}_{10} + 913\text{C}_5\text{H}_{12} + 1135\text{C}_6\text{H}_{14} + 1187\text{C}_7\text{H}_{16} + 1461\text{C}_8\text{H}_{18} + 1403\text{C}_9\text{H}_{20} \quad \text{kJ/Nm}^3$$

式中 H_2 、 CO 、 H_2S ...——气体燃料各组成成分的容积百分数, %。

(答: $Q_d^* = 35916.7 \text{ kJ/Nm}^3$)

1-25 某锅炉尾部受热面采用双级布置 (如图1-1), 负压制粉系统。假定 I、II 级空气预热器、炉膛和制粉系统的漏风系数 $\Delta\alpha_{k,yI}$ 、 $\Delta\alpha_{k,yII}$ 、 $\Delta\alpha_l$ 、 $\Delta\alpha_{zr}$ 以及炉膛出口过量空气系数 α''_l 均已知。试写出第 I 级空气预热器入口处的过量空气系数 $\beta'_{k,yI} = ?$

(答: $\beta'_{k,yI} = \alpha''_l - \Delta\alpha_l - \Delta\alpha_{zr} + \Delta\alpha_{k,yI} + \Delta\alpha_{k,yII}$)

1-26 某电厂 1000 t/h 锅炉设计煤种见习题1-22, 炉膛出口过量空气系数 $\alpha''_l = 1.20$, 炉膛漏风系数 $\Delta\alpha_l = 0.05$, 燃料消耗量 $B = 174967 \text{ kg/h}$, 机械不完全燃烧热损失 $q_4 = 2\%$ 。试计算:

(1) 每小时经由燃烧器送入炉膛的空气量;

(2) 炉膛内每千克煤燃烧后产生的干烟气量 $V_{d,2}$ 及总烟气量 $V_{y,2}$;

(3) 炉内烟气中水蒸气容积份额 $r_{\text{H}_2\text{O}}$ 和三原子气体容积份额 r_{RO_2} ;

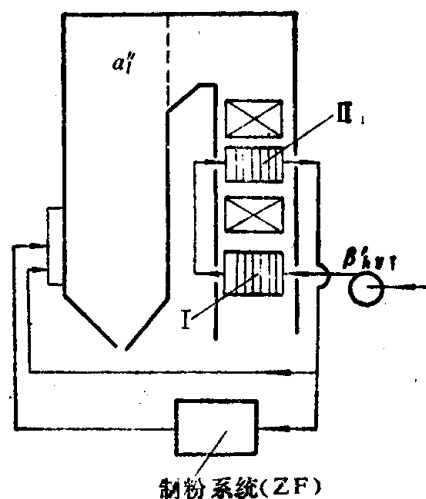


图 1-1 锅炉布置简图

(4) 炉内烟气中飞灰浓度 μ (取 $a_{fh}=0.9$)。

(答: $V_k=895903\text{Nm}^3/\text{h}$; $V_{gy}=5.2993\text{Nm}^3/\text{kg}$, $V_y=5.9558\text{Nm}^3/\text{kg}$; $r_{\text{H}_2\text{O}}=0.1102$, $r_{\text{RO}_2}=0.1336$; $\mu=0.03764\text{kg}/\text{kg}$ 或 $\mu=0.04926\text{kg}/\text{Nm}^3$ 。)

1-27 煤的应用基碳含量为 C' , 硫含量为 S' 。当完全燃烧时, 烟气中三原子气体的容积为 V_{RO_2} 。不完全燃烧、且不完全燃烧产物只有CO存在时的容积为 $V_{\text{SO}_2}+V_{\text{CO}_2}+V_{\text{CO}}$ 。试证明 $V_{\text{RO}_2}=V_{\text{SO}_2}+V_{\text{CO}_2}+V_{\text{CO}}$ 。

[提示] 当碳不完全燃烧时, 可将 C' 分为 C'_{CO_2} 和 C'_{CO} 两部分, 其中 C'_{CO_2} 为生成 CO_2 的碳含量, C'_{CO} 为生成CO的碳含量。然后根据燃烧反应方程式进行证明。

1-28 某电厂670t/h锅炉燃用山西潞安贫煤, 其组成为: $C'=59.82\%$, $H'=2.97\%$, $O'=3.05\%$, $N'=0.86\%$, $S'=0.46\%$, $A'=24.84\%$, $W'=8.00\%$ 。运行中利用奥氏烟气分析仪测得省煤器后烟气中三原子气体含量 $\text{RO}_2=14.5\%$, 试计算完全燃烧情况下, 此处过量空气系数 $\alpha=?$ CO_2 和 SO_2 在干烟气中所占百分比各为多少?

(答: $\alpha=1.31$, $\text{CO}_2=14.41\%$, $\text{SO}_2=0.042\%$)

1-29 某电厂350MW机组锅炉在进行燃烧调整试验期间燃用煤的组成为: $C'=62.61\%$, $H'=3.62\%$, $O'=7.21\%$, $N'=0.68\%$, $S'=1.08\%$, $A'=14.70\%$, $W'=10.10\%$ 。试验初期末级省煤器后烟气中 $\text{RO}_2=16.5\%$, 调试終了 $\text{RO}_2=15\%$ 。试求出在调试期间(认为是完全燃烧)该处过量空气系数的变化量?

(答: $\Delta\alpha=0.12$)

1-30 某电厂锅炉燃煤的应用基组成为: $C'=61.30\%$, $H'=3.30\%$, $O'=2.90\%$, $N'=1.00\%$, $S'=1.90\%$, $A'=19.00\%$, $W'=10.60\%$ 。锅炉性能考核试验中, 炉膛出口烟气分析结果 $\text{RO}_2=14.5\%$, $\text{O}_2=4.7\%$, $\text{CO}=0.2\%$ 。试求:

(1) 该煤的燃料特性系数 β 和 RO_2^{max} ;

(2) 分别用近似公式(假定为完全燃烧)及精确公式计算炉膛出口过量空气系数 α'_1 ;

(3) 利用不完全燃烧方程式计算CO的含量。

(答: $\beta=0.1137$, $\text{RO}_2^{\text{max}}=18.86\%$; 氧公式 $\alpha'_1=1.29$, 二氧化碳公式 $\alpha'_1=1.30$, 精确公式 $\alpha'_1=1.27$; $\text{CO}=0.211\%$)

1-31 题1-30所述运行锅炉, 试验中同时在锅炉排烟处(即空气预热器出口)测得烟气成分为 $\text{RO}_2=12.4\%$, $\text{RO}_2+\text{O}_2=19.5\%$ 。试计算排烟的过量空气系数 α_p 和对流烟道总的漏风系数。

(答: $\alpha_p=1.50$, $\Delta\alpha_2=0.23$)

【计算方法提示】空气和燃烧产物温焓表的编制

锅炉各受热面所处烟道部位的过量空气系数 α 和烟气温度 θ 都不相同。为进行锅炉各受热面的热力计算, 需要分别计算各处流过的烟气量、烟气的平均特性和烟气焓。对于每一个计算受热面来说, 计算烟气量及烟气平均特性时, 要采用该受热面部位的平均过量空气系数, 即出、入口过量空气系数的算术平均值为 $\frac{1}{2}(\alpha'+\alpha'')$; 计算烟气焓时要采用该受

表 1-3 空气、烟气计算表

θ (°C)	$V_{RO_2} =$ (Nm ³ /kg)		$V_{N_2} =$ (Nm ³ /kg)		$V_{H_2O} =$ (Nm ³ /kg)		$A' =$ $a_{fA} =$	%	h_f (kJ/kg)	$V' =$ (Nm ³ /kg)	$h_y = h_f + (\alpha - 1) h_{fg} + h_{fh}$ (kJ/kg)						
	$(c\theta)_{CO_2}$	$(c\theta)_{CO_2} V_{RO_2}$	$(c\theta)_{N_2}$	$(c\theta)_{N_2} V_{N_2}$	$(c\theta)_{H_2O}$	$(c\theta)_{H_2O} V_{H_2O}$	$(c\theta)_{fA}$				$\frac{A'}{100} a_{fA} (c\theta)_{fA}$	$\Sigma (3 + 5 + 7 + 9)$	$h_{fg} = (c\theta)_{fg} V'$	h_y	Δh_y	h_y	Δh_y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
100	169		130		151		81			132							
200	357		260		304		169			266							
300	559		392		463		264			403							
400	772		527		626		360			542							
500	996		664		794		459			684							
600	1222		804		967		560			830							
700	1461		946		1147		663			979							
800	1704		1093		1335		767			1130							
900	1951		1243		1524		874			1281							
1000	2202		1394		1725		984			1436							
1100	2457		1545		1926		1096			1595							
1200	2717		1695		2131		1206			1754							
1300	2976		1850		2344		1360			1913							
1400	3240		2009		2558		1571			2076							
1500	3504		2164		2779		1758			2239							
1600	3767		2323		3001		1830			2403							
1700	4035		2482		3227		2066			2566							
1800	4303		2642		3458		2184			2729							
1900	4571		2805		3688		2385			2897							
2000	4843		2964		3926		2512			3064							
2100	5115		3127		4161		2640			3232							
2200	5387		3290		4399		2760			3399							

热面末端的过量空气系数，即 α'' 。

计算烟气焓时，要预先估计每个受热面部位烟气的温度范围，在这个温度区间内以 100°C 的间隔计算出不同温度下的烟气焓，最后编制成温焓表。空气，烟气焓的计算格式如表1-3所示。

烟气特性和温焓表的主要计算步骤如下：

- (1) 校核燃料组成；
- (2) 确定各受热面所在烟道的漏风系数 $\Delta\alpha$ 和出口过量空气系数 α'' ；
- (3) 计算理论空气量 V^0 ，理论烟气量 V_{RO_2} 、 $V_{\text{N}_2}^0$ 及 $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ ；
- (4) 按炉膛出口过量空气系数 α'' 和各受热面烟道的平均过量空气系数 $\frac{1}{2}(\alpha' + \alpha'')$ ，

计算各受热面烟道中烟气的平均特性值： $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 V_y 、 r_{RO_2} 、 $r_{\text{H}_2\text{O}}$ 及 r_g ；

- (5) 计算各烟道中每千克燃料燃烧生成烟气的质量 G_y 和飞灰浓度 μ_h ；

(6) 以 100°C 为间隔计算各受热面部位的烟气焓，编制烟气的温焓表。烟气温度的总范围为 $100\sim 2200^{\circ}\text{C}$ ，每个受热面部位烟气的温度范围视锅炉受热面的布置情况预先估计。

【例 1-6】 某 1000t/h 电站锅炉，其受热面的布置如图1-2。该锅炉为亚临界压力中间再热自然循环汽包炉。炉膛出口处的前墙及两侧墙前半部布置有壁式再热器，炉膛上部设有大屏及后屏过热器。顺烟气流动方向依次布置中温再热器、高温再热器、高温过热器、低温过热器和省煤器受热面，尾部并列布置两台回转式空气预热器。制粉系统采用钢球

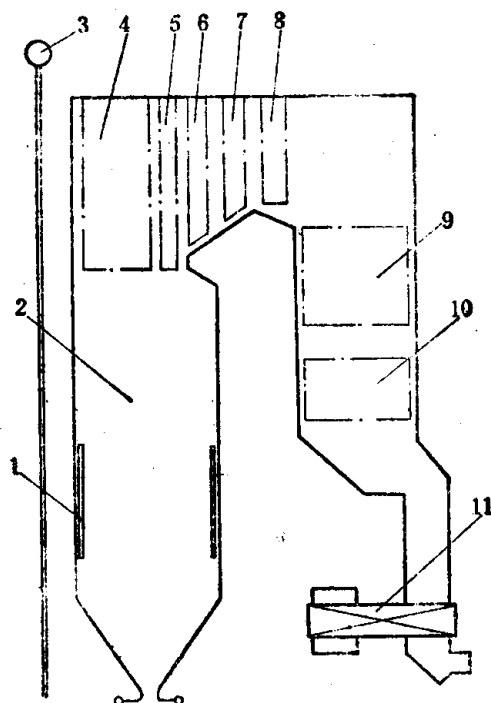


图 1-2 1000t/h 电站锅炉受热面布置简图

1—燃烧器；2—炉膛；3—汽包；4—大屏过热器；5—后屏过热器；6—中温再热器；7—高温再热器；8—高温过热器；9—低温过热器；10—省煤器；11—空气预热器

磨煤机中间储仓式、乏气送粉。直流摆动式燃烧器呈四角布置，可上下摆动 25° 。

锅炉设计煤种应用基组成为： $C^y = 42.18\%$ ， $H^y = 3.82\%$ ， $O^y = 7.79\%$ ， $N^y = 0.72\%$ ， $S^y = 1.22\%$ ， $A^y = 32.60\%$ ， $W^y = 11.67\%$ 。试计算各受热面烟道处烟气的平均特性，并编制温焓表。

【解】（1）校核燃料组成

$$\begin{aligned} & C^y + H^y + O^y + N^y + S^y + A^y + W^y \\ &= 42.18 + 3.82 + 7.79 + 0.72 + 1.22 + 32.60 + 11.67 \\ &= 100\% \end{aligned}$$

（2）各受热面所在烟道的漏风系数及出口过量空气系数选择如表1-4。

表 1-4 受热面烟道漏风系数和出口过量空气系数

受 热 面 名 称	漏 风 系 数 $\Delta\alpha$	出口过量空气系数 α''
炉膛、后屏过热器	炉膛0.05，后屏0.00	1.20
中温再热器	0.02	1.22
高温再热器至转向室	0.02	1.24
低温过热器	0.02	1.26
省煤器	0.02	1.28
空气预热器	0.12	1.40

（3）理论空气量和理论烟气量计算：

理论空气量

$$\begin{aligned} V^0 &= \frac{1}{0.21} \left(1.866 \frac{C^y}{100} + 5.56 \frac{H^y}{100} + 0.7 \frac{S^y}{100} - 0.7 \frac{O^y}{100} \right) \\ &= \frac{1}{0.21} \left(1.866 \times \frac{42.18}{100} + 5.56 \times \frac{3.82}{100} + 0.7 \times \frac{1.22}{100} \right. \\ &\quad \left. - 0.7 \times \frac{7.79}{100} \right) \\ &= 4.5404 \text{ (Nm}^3/\text{kg)} \end{aligned}$$

理论烟气量

$$\begin{aligned} V_{H_2O}^0 &= 11.1 \frac{H^y}{100} + 1.24 \frac{W^y}{100} + 0.0161 V^0 \\ &= 11.1 \times \frac{3.82}{100} + 1.24 \times \frac{11.67}{100} + 0.0161 \times 4.5404 \\ &= 0.6418 \text{ (Nm}^3/\text{kg)} \\ V_{N_2}^0 &= 0.79 V^0 + 0.8 \frac{N^y}{100} \\ &= 0.79 \times 4.5404 + 0.8 \times \frac{0.72}{100} \\ &= 3.5927 \text{ (Nm}^3/\text{kg)} \end{aligned}$$