

高级工培训教材



锅炉设备运行技术

甘肃省电力工业局
河南省电力工业局 合编

内 容 提 要

本书根据部颁《电力工人技术等级标准》编写。主要内容包括：燃料燃烧计算及热平衡，燃烧原理及燃烧设备，自然循环锅炉，强制流动锅炉，锅炉运行调节，锅炉用钢金属监督及高温金属运行，锅炉结渣、腐蚀、停炉保护，锅炉验收、试验及新机组试运，锅炉事故处理，除尘器运行，大型机组控制与保护，锅炉试验。

本书为火电厂锅炉运行高级工培训教材，亦可作为锅炉运行工人自学及工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉设备运行技术/甘肃省电力工业局，河南省电力工业局合编. —北京：中国电力出版社，1995

发电厂和变电所运行高级工培训教材

ISBN 7-80125-025-7

I. 锅… I. ①甘… ②河… II. 锅炉运行-技术培训-教材 N. TK227

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 14704 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市京东印刷厂印刷

各地新华书店经售

1995 年 10 月第一版 1995 年 10 月北京第一次印刷

787×1092 毫米 32 开本 15.75 印张 348 千字

印数 00001—11190 册 定价 26.90 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

在改革开放政策的指引下，我国电力工业近年来有了长足的发展，装机容量已接近 2 亿 kW。在火力发电方面，高参数大容量机组的比重不断扩大，据不完全统计 10 万 kW 以上机组的总容量已占火电装机容量的 65% 以上，自动化程度显著提高，表征机组经济性和可靠性的指标明显改进，火力发电整体技术已达较高水平，进入更高层次。为了适应新形势的要求和满足广大火电生产运行人员学习技术与培训工作的需要，甘肃省电力工业局教育处和河南省电力工业局教育处在总结多年来组织高级技术工人培训工作经验的基础上，联合组织编写了火电厂运行高级工培训教材《锅炉设备运行技术》和《汽轮机设备运行技术》，这两本教材系根据部颁《电力工人技术等级标准》的要求编写的，编写内容尽可能结合我国现阶段技术发展的实际情况，并在结合生产实际的基础上适当加强理论论述和适当扩充知识面，力求能将锅炉、汽轮机运行高级工培训应涉及的有关内容包括进去，以切合火电运行高级工提高技术水平和知识水平的要求。

参加本书《锅炉设备运行技术》编写的有兰州电力技工学校王少峰；兰州第二热电厂张宏军、王锡智；河南电力工业学校章明富、李广谦、兰琳等同志。甘肃省电力工业局教育处蒋芳林同志在本书编写的组织、书稿的最终审核和定稿工作中做了大量的工作，特此致谢。

尽管编写本书的愿望是好的，但限于编写人员的水平，特别是编写时间仓促，难免有不少疏漏、不妥甚至错误之处，我

们恳切希望广大读者和使用本教材进行培训的同志指正，以便再版时更正。

甘肃省电力工业局教育处
河南省电力工业局教育处

1995 年 7 月

目 录

出版说明

前 言

第一章 燃料燃烧计算	1
第一节 燃烧的化学反应及空气需要量	1
第二节 烟气组成及烟气容积计算	4
第三节 锅炉热平衡方程	14
第四节 锅炉热损失	17
第五节 锅炉热效率及燃料消耗量	26
复习思考题	28
第二章 燃烧原理及燃烧设备	30
第一节 燃料燃烧基本原理	30
第二节 燃烧方式	35
第三节 煤粉的着火	40
第四节 煤粉的燃烧	42
第五节 煤粉燃烧器	45
第六节 点火装置	56
第七节 煤粉炉炉膛	60
复习思考题	64
第三章 自然循环锅炉	66
第一节 自然循环原理	66
第二节 汽水混合物的流形与传热	72
第三节 自然水循环的故障及安全性检查	76
第四节 自然循环回路的合理布置	84
第五节 蒸汽净化	88
第六节 自然循环锅炉整体布置	94
第七节 锅炉启动	105

第八节 锅炉停运	131
复习思考题	135
第四章 强制流动锅炉	137
第一节 直流锅炉	137
第二节 控制循环锅炉	158
第三节 复合循环锅炉	161
第四节 强制流动锅炉举例	165
第五节 直流锅炉的启动	177
第六节 直流锅炉的停运	204
复习思考题	209
第五章 锅炉运行调节	211
第一节 锅炉运行参数的调节	211
第二节 锅炉燃烧调整	226
第三节 制粉系统运行	232
第四节 锅炉在非设计工况下的运行	238
第五节 调峰与变压运行	247
第六节 经济性分析	257
第七节 直流锅炉参数调节	274
复习思考题	281
第六章 锅炉用钢金属监督及高温金属运行	284
第一节 金属在长期运行中的蠕变和松弛	284
第二节 金属在高温下的氧化和腐蚀	287
第三节 磨损	290
第四节 钢的缺陷及焊缝组织对运行的影响	294
第五节 锅炉用钢一般选择原则	296
第六节 锅炉设备用钢	299
第七节 过热器管监督方法和材料测定	311
第八节 延长蒸汽管道和过热器管道工作寿命的措施	314
第九节 锅炉爆管现象分析	317

复习思考题	325
第七章 锅炉结渣、腐蚀和停用保养	326
第一节 锅炉结渣	326
第二节 受热面烟气侧腐蚀	330
第三节 锅内腐蚀	339
第四节 锅炉停用保养	344
复习思考题	354
第八章 锅炉检修后的验收和新机组投运	355
第一节 锅炉检修后的验收	355
第二节 锅炉水压、风压试验	356
第三节 转机试运	367
第四节 联锁保护试验	369
第五节 安全门定铈调整试验	372
第六节 各电动门调整试验	375
第七节 锅炉的化学清洗和冲管	377
第八节 新机组试运	386
复习思考题	389
第九章 锅炉事故处理	391
第一节 锅炉水位事故	392
第二节 锅炉燃烧事故	397
第三节 锅炉爆管事故	402
第四节 厂用电中断事故	406
第五节 风机故障跳闸	408
第六节 辅机事故	411
第七节 煤粉自燃爆炸事故	412
复习思考题	414
第十章 除尘器及除尘器运行	415
第一节 除尘设备	415
第二节 电除尘工作原理	421

第三节	电除尘运行及其维护	424
复习思考题		428
第十一章	单元机组控制系统简介	430
第一节	单元机组协调控制系统	430
第二节	炉膛安全监控系统 (FSSS)	439
第三节	分散控制系统	442
复习思考题		447
第十二章	锅炉试验	449
第一节	锅炉热力试验的基本概念	449
第二节	锅炉燃烧调整试验	457
第三节	炉膛冷态空气动力场试验	474
第四节	制粉系统调整试验	476
第五节	送、吸风机试验	481
第六节	锅炉热化学试验	487
复习思考题		491

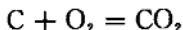
第一章 燃料燃烧计算

· 燃料燃烧过程是指燃料中的可燃成分与氧发生强烈放热并发光的化学反应过程。当燃烧产物中不存在可燃物质时称为完全燃烧, 否则称为不完全燃烧。燃烧的化学反应关系是燃烧计算的基础。燃烧计算主要是燃烧所需空气量、燃烧生成烟气体量和烟气焓等的计算。

第一节 燃烧的化学反应及空气需要量

一、碳的燃烧

完全燃烧时, 碳与氧的化学反应式为



碳的分子量是 12, 氧的分子量是 32, 二氧化碳的分子量是 $12+32=44$ 。在标准状态下, 1mol (1mol 某物质的质量, 以千克为单位, 在数值上与该物质的分子量相同) 的理想气体的体积为 22.4Nm^3 ^①。于是上式中各项间量的关系为

$$12\text{kgC} + 32\text{kgO}_2 = 44\text{kgCO}_2$$

$$\text{即} \quad 1\text{kgC} + 2.667\text{kgO}_2 = 3.667\text{kgCO}_2 \quad (1-1)$$

$$\text{或} \quad 12\text{kgC} + 22.4\text{Nm}^3\text{O}_2 = 22.4\text{Nm}^3\text{CO}_2$$

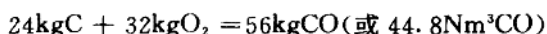
$$1\text{kgC} + 1.866\text{Nm}^3\text{O}_2 = 1.866\text{Nm}^3\text{CO}_2$$

上述关系表明, 1kg 碳完全燃烧需要 2.667kg 氧, 生成二

① 本章的 Nm^3 表示标准立方米。

氧化碳 1.866Nm^3 。

碳不完全燃烧时，其反应式为

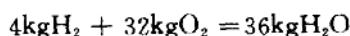


即 $1\text{kgC} + 1.333\text{kgO}_2 = 2.333\text{kgCO} (\text{或 } 1.866\text{Nm}^3)$

由式 (1-1)、式 (1-2) 可知， 1kgC 不论其完全燃烧或不完全燃烧，生成的气体容积都是 1.866Nm^3 。

二、氢的燃烧

氢完全燃烧时的化学反应式为



即 $1\text{kgH}_2 + 7.94\text{kgO}_2 = 8.94\text{kgH}_2\text{O}$

或 $1\text{Nm}^3\text{H}_2 + 0.5\text{Nm}^3\text{O}_2 = 1\text{Nm}^3\text{H}_2\text{O}$

上述关系表明， 1kg 氢完全燃烧需要氧量 7.94kg 并产生 8.94kg 的水蒸气，或 1Nm^3 氢完全燃烧需要 0.5Nm^3 氧，生成 1Nm^3 的水蒸气。

三、硫的燃烧

硫燃烧时的化学反应式为



即 $32\text{kgS} + 32\text{kgO}_2 = 64\text{kgSO}_2 (\text{或 } 22.4\text{Nm}^3\text{SO}_2)$

或 $1\text{kgS} + 1\text{kgO}_2 = 2\text{kgSO}_2 (\text{或 } 0.7\text{Nm}^3\text{SO}_2)$

四、理论空气需要量

理论空气需要量是根据燃烧反应推导出的 1kg 燃料完全燃烧时所需要的空气量，以 V^0 表示，单位为 Nm^3/kg 。

在计算空气量及烟气量时，需作如下假定：

(1) 空气、烟气的所有组成成分，包括水蒸气在内都可

以相当准确地作为理想气体进行计算，因此每摩尔气体在标准状态下的容积为 22.4Nm^3 。

(2) 所有气体和空气容积计算的单位都是 Nm^3/kg 。即以 0°C 和标准大气压 (0.1013MPa) 状态下的立方米为单位。

根据前述各式导出的燃烧反应关系可得

$$1\text{kg 燃料中含碳量} \frac{C^y}{100}\text{kg 完全燃烧所需氧量为 } 2.67 \\ \times \frac{C^y}{100}\text{kg}。$$

$$1\text{kg 燃料中含氢量} \frac{H^y}{100}\text{kg 完全燃烧所需氧量为 } 7.94 \\ \times \frac{H^y}{100}\text{kg}。$$

$$1\text{kg 燃料中含硫量} \frac{S^y}{100}\text{kg 完全燃烧所需氧量为 } 1 \\ \times \frac{S^y}{100}\text{kg}。$$

综上所述， 1kg 燃料完全燃烧时所需氧量为

$$2.67 \frac{C^y}{100} + 7.94 \frac{H^y}{100} + \frac{S^y}{100}$$

因 1kg 燃料本身含有 $\frac{O^y}{100}\text{kg}$ 氧，故 1kg 燃料完全燃烧时需从空气中取得的氧气质量为

$$G_{O_2} = 2.67 \frac{C^y}{100} + 7.94 \frac{H^y}{100} + \frac{S^y}{100} - \frac{O^y}{100} \quad (1-5)$$

又因氧气在空气中的份额为 21% ，密度为 $1.429\text{kg}/\text{Nm}^3$ ，故而由式 (1-5) 得出 1kg 燃料完全燃烧时需从空气中取得的氧气重量为

$$V^o = \frac{2.67 \frac{C^y}{100} + 7.94 \frac{H^y}{100} + \frac{S^y}{100} - \frac{O^y}{100}}{0.21 \times 1.429}$$

$$= 0.0889(C^y + 0.375S^y) + 0.265H^y - 0.033O^y \quad (1-6)$$

因为 C 和 S 的完全燃烧时的化学反应可写成通式 $R + O_2 \Rightarrow RO_2$, 其中 $R = C^y + 0.375S^y$, 相当当量碳量, 在进行烟气分析时, 它们的燃烧产物 CO_2 和 SO_2 的容积总是一起被测定的。

五、实际空气量及过剩空气系数

实际燃料在炉膛中进行燃烧时, 不可能做到燃料与空气量 (即理论的空气量) 的理想混合, 为了使燃料在炉膛内尽量燃烧完全, 减少不完全燃烧热损失, 在燃烧设备中实际送入炉膛内的空气量都大于理论空气量。实际空气量以 V^k 表示。实际空气量 V^k (Nm^3/kg) 与理论空气量 V^0 (Nm^3/kg) 的比值, 称为过剩空气系数, 即

$$\alpha = \frac{V^k}{V^0} \quad (1-7)$$

第二节 烟气组成及烟气容积计算

一、烟气组成

根据燃料成分、空气成分和燃烧反应产物可知, 烟气中至少含有 CO_2 、 H_2O 、 SO_2 、 N_2 等, 当不完全燃烧时, 还含有 CO , 当供以过剩空气时, 还含有剩余在烟气中的 O_2 。

用 V_y 表示 $1kg$ 燃料燃烧生成的烟气总容积, 用 V_{CO_2} 、 V_{H_2O} 、 V_{SO_2} 、 V_{N_2} 、 V_{O_2} 、 V_{CO} 分别表示烟气中 CO_2 、 H_2O 、 SO_2 、 N_2 、 O_2 、 CO 的分容积, 则完全燃烧时 ($\alpha > 1$)

$$V_y = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad Nm^3/kg \quad (1-8)$$

不完全燃烧时 ($\alpha < 1$)

$$V_y = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{CO}} \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \quad (1-9)$$

不计入水蒸气容积的烟气容积为干烟气容积，用 V_y 表示。用理论空气量 V^0 计算完全燃烧时的烟气容积，称为理论烟气容积，用 V_y^0 表示。

二、烟气分析

运行锅炉中，燃料燃烧生成的烟气，其容积和组成是随运行工况的变化而变化的。测定运行中烟气的成分和容积可以了解燃料燃烧的完全程度（即化学未完全燃烧热损失的大小），燃烧条件（即炉膛出口过剩空气系数的大小），以及烟道漏风等情况。这对判断炉内燃烧工况、进行燃烧调整，以及改进燃烧设备都是非常必要的。

目前广泛采用的测量方法是烟气容积分析法。它将一定容积的烟气试样顺序地和某些化学吸收剂相接触，对烟气的各组成气体逐一进行选择吸收，每次减少的容积即是被测成分在烟气中所占的容积。这种方法又叫做化学吸收法。奥氏烟气分析仪就是这类仪器中应用较多的一种，如图 1-1 所示。

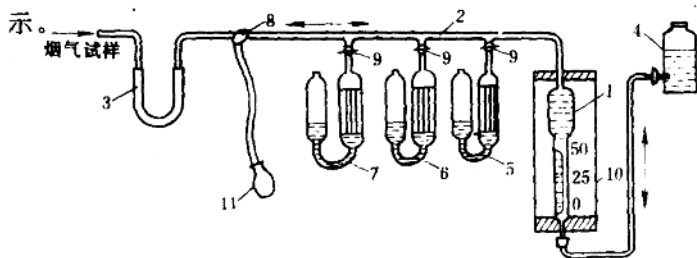


图 1-1 奥氏烟气分析仪

- 1—量筒；2—梳形连通管；3—U 形过滤器；
4—平衡瓶；5、6、7—吸收瓶；8—互通旋塞；
9—双通旋塞；10—水套；11—抽气皮囊

奥氏烟气分析仪包括一个量筒、三个吸收瓶和一个平衡瓶。测量时从烟道中用量筒抽取 100cm^3 烟气试样，然后让烟气试样依次进入三个吸收瓶。右面第一个吸收瓶 5 内装有吸收剂 KOH 或 NaOH 溶液，用来吸收烟气中的 CO_2 和 SO_2 ；第二个吸收瓶 6 内装有焦性没食子酸的碱溶液，用来吸收烟气中的氧气，也能吸收烟气中的 SO_2 和 CO_2 ；第三个吸收瓶 7 内装有氯化亚铜氨溶液，用来吸收烟气中的 CO，也能吸收 O_2 。由于某些吸收剂有双重吸收作用，测试中吸收次序不能颠倒。利用量筒可以测得每次吸收后烟气减少的容积，此减少的容积就是被吸收的气体容积，这样就可以测出各组成气体在烟气容积中的百分比。

含有水蒸气的烟气试样被吸入烟气分析仪后，一直是和水接触的，因此烟气试样内水蒸气已达饱和状态。在定温定压状态下，已饱和的烟气试样中其水蒸气的容积百分比是一定的，也就是说，试样中水蒸气和干烟气的容积比例是一定的。因此，在选择性吸收过程中，随着干烟气某一成分被吸收，水蒸气也按比例凝结，这样量筒上每次读到的读数就是干烟气各组成成分的容积百分数。若以 RO_2 、 O_2 、CO 和 N_2 来表示各组分在干烟气中所占容积百分数，则干烟气的组成可表示为

$$\text{RO}_2 + \text{O}_2 + \text{CO} + \text{N}_2 = 100\%$$

其中
$$\text{RO}_2 = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{gy}}} \times 100\%$$

$$\text{O}_2 = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{gy}}} \times 100\%$$

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

$$\text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{gy}}} \times 100\%$$

$$\text{那么, } \text{RO}_2 + \text{CO} = \frac{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{CO}}}{V_{\text{gy}}} \times 100\%$$

$$\text{可有: } V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{CO}} = 1.866 \frac{C' + 0.375S'}{100}$$

并代入上式可得干烟气容积为

$$V_{\text{gy}} = 1.866 \frac{C' + 0.375S'}{\text{RO}_2 + \text{CO}} \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (1-10)$$

三、完全燃烧方程及过剩空气系数计算

1. 完全燃烧方程

假定燃料在炉膛中完全燃烧,烟气分析所得的 RO_2 和 O_2 与燃料的元素分析之间必然存在一定的关系式,这个关系式就叫做完全燃烧方程式:

$$\text{RO}_2(1 + \beta) = 21 - \text{O}_2 \quad (1-11)$$

$$\text{其中 } \beta = 2.35 \frac{H' - 0.126O' + 0.038N'}{C' + 0.375S'} \quad (1-12)$$

称为燃料的特性系数,见表 1-1。

表 1-1 各种燃料的特性系数 β 和 RO_2^{max} 值

燃 料	β	RO_2^{max}
泥 煤	0.07~0.08	19.4~19.6
褐 煤	0.055~0.125	18.5~19.5
烟 煤	0.09~0.15	18~19.5
贫 烟	0.10~0.135	18.5~19
无 烟 煤	0.05~0.1	19~20
油 页 岩	~0.21	~17.4
重 油	~0.30	~16.1
天 然 气	~0.78	~11.8

β 的计算式可简化如下:

$$\beta = 2.35 \frac{H^y + \frac{O^y}{8}}{C^y} \quad (1-13)$$

燃料成分已定、 β 已知时, 利用完全燃烧方程式可求出烟气中的 RO_2 。

$$RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta} \quad (1-14)$$

由式 (1-14) 可知 RO_2 值是随烟中 O_2 的大小变化的, 而 O_2 又是随过剩空气量来变的。当燃料完全燃烧时, 且 $\alpha=1$, 则 $O_2=0$, 此时 RO_2 最大, 以 $RO_2^{\max}$ 来表示 (表 1-1):

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

当燃料不完全燃烧, 且烟气中可燃物只有一氧化碳时, 应满足下列方程:

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

上式不完全燃烧方程可变化为

$$CO = \frac{21 - O_2 - (1 + \beta)RO_2}{0.605 + \beta} \% \quad (1-15)$$

2. 过剩空气系数的计算

运行锅炉如已知烟道某处的烟气分析结果, 即可求出相应于该处的过剩空气系数; 烟道的漏风系数 $\Delta\alpha$; 则可由该烟道的出入口处过剩空气系数的差值得得。

(1) 不完全燃烧时

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \left[\frac{O_2 - 0.5CO}{100 - (RO_2 + O_2 + CO)} \right]} \quad (1-16)$$

(2) 完全燃烧时

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \left[\frac{O_2}{100 - (RO_2 + O_2)} \right]} \quad (1-17)$$

燃煤时 α 的近似计算如下:

若把实际送入炉内的空气量用 100 表示, 则实际送入炉内的氧气量为 21 (燃料成分中的氧量较少可不考虑), 燃料完全燃烧后, 烟气中还有过剩的氧气量 O_2 (%), 那么燃烧过程中耗去的氧气量等于 $21 - O_2$ 。因此, 过剩空气系数为

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad (1-18)$$

或
$$\alpha = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2} \quad (1-19)$$

四、烟气容积计算

1. 根据燃烧反应计算烟气容积

(1) 理论干烟气容积 $V_{\text{干}}^0$ 过剩空气系数 $\alpha=1$, 燃料完全燃烧, 不计入烟气中水蒸气时, 1kg 燃料生成的烟气容积, 称为理论干烟气容积 $V_{\text{干}}^0$, 即

$$V_{\text{干}}^0 = V_{\text{CO}_2}^0 + V_{\text{SO}_2}^0 + V_{\text{N}_2}^0 \quad \text{Nm}^3/\text{kg}$$

其中: $V_{\text{CO}_2}^0$ 和 $V_{\text{SO}_2}^0$ 是由 1kg 燃料中 C、S 的含量 $\frac{C^y}{100}$ kg 和 $\frac{S^y}{100}$ kg 燃烧形成的。

由于

$$V_{\text{CO}_2}^0 = 1.866 \frac{C^y}{100} \quad \text{Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{SO}_2}^0 = 0.7 \frac{S^y}{100} \quad \text{Nm}^3/\text{kg}$$

$V_{\text{N}_2}^0$ 称为理论氮气容积, 是由燃料本身带入的 $\frac{N^y}{100}$ kg 和理