

全国火力发电工人通用培训教材



锅炉设备运行

高级工

山西省电力工业局 编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是根据电力工人技术等级标准的必备知识与技能要求进行编写的。全书共分三篇十三章，介绍了现代化大型火力发电厂锅炉运行工人、电除尘器运行工人、除灰运行工人必须掌握的高级工相关的专业知识以及运行技术。

本书可供具有初中以上文化程度的运行高级工工人培训使用，也可供有关专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉设备运行：高级工/山西省电力工业局编．-北京：中国电力出版社，1997

全国火力发电工人通用培训教材

ISBN 7-80125-225-X

I. 锅… II. 山… III. 火电厂-锅炉-运行-技术培训-教材 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 25214 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)

北京市地矿局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 3 月第一版 1997 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 10.75 印张 233 千字

印数 0001—5130 册 定价 13.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前 言

由原水利电力部组织、山西省电力工业局编写、原水利电力出版社出版的《火电生产类学徒工初级工培训教材》和《火电生产类中级工培训教材》，发行、使用已历时 10 余年。其间，《学徒工初级工》各分册分别重印 5 至 9 次，《中级工》各分册分别重印 4 至 7 次，发行量很大，深受全国电力系统广大读者的欢迎，基本上满足了电力行业火力发电工人培训、考核、提高技术水平的要求，取得了显著的社会效益。为此，这两套培训丛书在全国电力普及读物评优中，荣获了“普及电力科学技术知识特别奖”。

10 余年来，由于改革开放的不断深入发展，我国的电力工业有了很大的发展，现已普遍进入大机组、大电网、高参数、超高参数、高电压、超高电压和高度自动化的发展阶段，对电业生产人员的素质提出了更高的要求。继 1991 年 12 月原能源部颁发的《电力工人技术等级标准》之后，1995 年 9 月电力工业部、劳动部又颁发了《中华人民共和国工人技术等级标准·电力工业·火力发电部分》。因此有必要根据电力生产的新情况和电力工人技术等级标准的新要求，对上述两套培训教材进行修订并增补高级工培训教材。经山西省电力工业局和中国电力出版社通力合作，并在全国电力工人技术教育研究所的支持下，现编写、出版了这套《全国火力发电工人通用培训教材》。本套丛书的内容覆盖了火力发电 16 个专业对初、中、高级工的技术要求，每个专业分初级工、中级工、高级工三个分册出版，共计 48 个分册；每一分册中又

以各专业的不同岗位工种设“篇”，共覆盖了40余个工种。

在编写本套丛书的过程中，首先根据工人技术等级标准中对每一工种的定义、工作内容、技术等级、适用范围等的规定，紧扣标准提出的知识要求和技能要求，从火电生产实际需要出发拟出初步的编写提纲；经数月重点调查研究、广泛征求意见、认真修订后形成正式的编写提纲；之后，又历时半年余，始成初稿。初稿形成后，在局系统内进行了专家评审稿和主编者的修改、统稿工作。因此，定稿后的火力发电工人培训教材，深信是紧扣新的工人技术等级标准的实用性教材。

火力发电工人培训教材，体现了工人技术培训的特点以及理论联系实际的原则，尽量反映了新技术、新设备、新工艺、新材料、新经验和新方法；教材以300MW机组及其辅机为主，兼顾600MW和200MW机组及其辅机的内容，因而有相当的先进性和普遍适用性，适应于“九五”期间主要机型的技术要求。与每一专业对应的初、中、高级工三个分册，自成一个小的系列，呈阶梯式递进，内容上互不重复。每一分册的具体内容又分为核心内容和复习题两大部分。核心内容主要讲解必备知识以及与技能要求对应的一些专业知识。复习题的形式多种多样，解答习题的目的在于巩固和深化所学知识。有些习题，如操作题、读绘图题、设计试验题等，主要用以培养和巩固必备的技能。鉴于全国电力系统各基层单位、部门培训力量和师资水平并不平衡，学员水平也参差不齐，所以有必要为每一分册编写相应的《教材使用说明和习题解答》，这将在本套丛书出版后陆续推出。

本分册是《锅炉设备运行》高级工培训教材，全书分成三篇，共十二章。书中第一章、第二章由山西电力试验研究

所续爱世编写；第三章由太原第二热电厂陆述超编写；第四章、第五章由山西省电力局米建华编写；第六章由华北电力大学（北京）吕邦泰编写；第七章由神头第二发电厂赵立奇编写；第八章、第九章由山西电力试验研究所杨同魁编写；第十章、第十一章、第十二章由太原第二热电厂吴晋刚编写。本书由续爱世任主编，山西省电力试验研究所王绍武任主审。

在中电联教培部组织的审定会上，本书由长春第二热电厂张清波、陈玉田、李振东三位高级工程师审定，并被推荐为全国火力发电工人通用培训教材。

在编写这套《全国火力发电工人通用培训教材》的过程中，得到了电力工业部领导的关怀以及中电联教培部和各有关司局的关心、支持，同时也取得了全国电力系统各有关单位和人员的关注、支持和帮助，他们为本书进行了审定，提供了咨询、技术资料以及许多宝贵的建议，在此一并表示衷心的感谢。

各单位和广大读者在使用本套教材过程中，如发现有不妥之处或需修改的意见，敬请随时函告，以便再版时修改。

山西省电力工业局 中国电力出版社

1996年11月

目 录

序 前 言

第一篇 锅炉运行技术

第一章 燃烧计算与燃烧器运行	1
第一节 固体燃料燃烧计算	1
第二节 旋流燃烧器的燃烧特性	11
第三节 直流燃烧器的燃烧特性	19
第四节 新型稳燃设备简介	29
复习题	38
第二章 锅炉效率与经济运行	41
第一节 锅炉正平衡热效率	41
第二节 锅炉反平衡热效率	45
第三节 提高锅炉热效率的途径	53
第四节 燃烧调整与经济运行	60
复习题	69
第三章 锅炉水动力故障与防止措施	73
第一节 自然循环锅炉的水循环故障	73
第二节 直流锅炉水动力	81
第三节 辅助循环锅炉水动力	92
第四节 沸腾换热恶化	99
复习题	102

第四章 锅炉高温金属工况	104
第一节 锅炉受热面用钢	104
第二节 金属在高温下长期运行中的变化	111
第三节 受热面的超温运行问题	118
第四节 承压部件强度计算	124
复习题	134
第五章 受热面的结渣积灰、磨损和腐蚀	136
第一节 受热面的结渣积灰	136
第二节 受热面的磨损	146
第三节 受热面的腐蚀	150
复习题	154
第六章 锅炉寿命管理	156
第一节 基本概念	156
第二节 锅炉寿命与强度	159
第三节 调峰及变负荷运行对寿命的影响	162
第四节 高温部件的寿命损耗	165
第五节 锅炉寿命管理的方法	166
复习题	173
第七章 机炉协调控制	175
第一节 概述	175
第二节 机炉控制方式分析	178
第三节 单元机组的运行控制方式	182
第四节 单元机组协调控制方式的选择和投运	184
复习题	187
第八章 新机组试运行	189
第一节 试运前的准备	189
第二节 锅炉冷态调试工作	190

第三节	锅炉热态调试工作	204
第四节	新机组试生产阶段的工作	218
复习题		219
第九章	锅炉热力试验	223
第一节	试验分类及准备	223
第二节	空气动力场试验	226
第三节	锅炉热效率试验	230
第四节	制粉系统的试验	236
第五节	风机试验	246
复习题		254

第二篇 电 除 尘 器

第十章	电除尘器的设计、安装、验收及试投运	257
第一节	电除尘器的设计选型	257
第二节	电除尘器的安装、检查、验收	265
第三节	新安装电除尘器的调整试投运	269
复习题		274
第十一章	电除尘器试验	276
第一节	概述	276
第二节	粉尘理化特性测定	278
第三节	烟气流量及有关参数的测定	284
第四节	粉尘采样	292
第五节	电除尘器性能试验	303
复习题		313

第三篇 锅 炉 除 灰

第十二章	除灰系统设备选择及问题研究	316
-------------	----------------------------	------------

第一节 除灰方式与除灰设备的选择	316
第二节 除灰设备问题研究与灰渣开发利用	320
复习题	323
参考文献	325

第一篇 锅炉运行技术

第一章 燃烧计算与燃烧器运行

第一节 固体燃料燃烧计算

锅炉燃料的燃烧计算包括空气量、烟气量、烟气焓以及过量空气系数的计算等，本节主要介绍燃料燃烧所需的空气量及燃料燃烧生成的烟气量的计算。

计算燃料燃烧所需的空气量和生成的烟气量是把空气和烟气当作理想气体看待的。当燃料完全燃烧时，所需的空气量称为理论燃烧空气量。在实际运行中，燃料和空气的混合并不十分理想，实际送入的空气量要比理论空气量稍多一些。实际送入的空气量称为实际燃烧空气量。燃烧计算的各参数，对分析锅炉运行工况起着较大的作用。现以燃煤为主介绍燃烧计算。

一、燃煤成分、基准及其换算

进入电厂锅炉燃烧用煤的成分一般包括有碳 (C)、氢 (H)、氧 (O)、氮 (N)、硫 (S)、灰分 (A) 和水分 (M)。其含量一般以质量百分数表示。由于煤中的水分和灰分随外界条件而变，其他成分的百分量也随之改变，因此，在说明煤中各种成分的百分含量时，必须同时注明百分数的基准。电厂燃料常用以下几种基准。

(1) 收到基 以进入锅炉实际收到的炉前煤的成分之和作为 100%，表示为：

$$C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + M_{ar} + A_{ar} = 100\% \quad (1-1)$$

(2) 空气干燥基 在实验室经过自然干燥，去掉外在水分^①的煤的成分之和作为100%，表示为：

$$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + M_{ad} + A_{ad} = 100\% \quad (1-2)$$

(3) 干燥基 表示去掉全部水分的煤的成分之和作为100%，表示为：

$$C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100\% \quad (1-3)$$

(4) 干燥无灰基 表示去掉全部水分和灰分的煤的成分之和作为100%，表示为：

$$C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100\% \quad (1-4)$$

燃料的基准之间存在着一一定的关系，可以互相进行换算，各种基准的换算公式见表1-1。

表 1-1 燃料各种基准的换算系数

已 知 燃料基	欲 求 燃 料 基			
	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100-M_{ad}}{100-M_{ar}}$	$\frac{100}{100-M_{ar}}$	$\frac{100}{100-M_{ar}-A_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100-M_{ar}}{100-M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100-M_{ad}}$	$\frac{100}{100-M_{ad}-A_{ad}}$
干燥基	$\frac{100-M_{ar}}{100}$	$\frac{100-M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100-A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100-M_{ar}-A_{ar}}{100}$	$\frac{100-M_{ad}-A_{ad}}{100}$	$\frac{100-A_d}{100}$	1

① 本书初级工本讲过，煤的水分有内在水分和外在水分之分。

二、燃烧所需的空气量

1. 理论空气量 V^0

一千克收到基燃料完全燃烧时所需要的空气量称为理论空气量。

如上所述，每千克燃料中碳完全燃烧所需氧气量为：

$$\frac{22.4}{12} \cdot \frac{C_{ar}}{100} = 1.866 \frac{C_{ar}}{100} \quad m_n^3 \quad (1-5)$$

每千克燃料氢完全燃烧时所需氧气量为：

$$\frac{22.4}{4 \times 1.008} \cdot \frac{H_{ar}}{100} = 5.55 \frac{H_{ar}}{100} \quad m_n^3 \quad (1-6)$$

每千克燃料硫完全燃烧时所需的氧气量为：

$$\frac{22.4}{32} \cdot \frac{S_{ar}}{100} = 0.7 \frac{S_{ar}}{100} \quad m_n^3 \quad (1-7)$$

每千克燃料中的氧量为：

$$\frac{22.4}{32} \cdot \frac{O_{ar}}{100} = 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \quad m_n^3 \quad (1-8)$$

每千克燃料完全燃烧时，所需的理论氧气量为：

$$1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 5.55 \frac{H_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \quad m_n^3 \quad (1-9)$$

故理论燃烧空气量为：

$$\begin{aligned} V^0 &= \frac{1}{0.21} \left(1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 5.55 \frac{H_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \right) \\ &= 0.889 C_{ar} + 0.265 H_{ar} + 0.0333 S_{ar} \\ &\quad - 0.0333 O_{ar} \quad m_n^3 / kg \end{aligned} \quad (1-10)$$

2. 过量空气系数

锅炉运行中，影响燃料完全燃烧的因素很多，为了减少不完全燃烧，使燃料与空气能够充分混合，实际送入炉内的

空气量总是要比理论燃烧空气量多一些。实际供给的空气量与理论燃烧空气量的比值称为过量空气系数 α ，其表示式为：

$$\alpha = \frac{V_k}{V^0} \quad (1-11)$$

式中 V_k ——实际空气量， m_n^3/kg 。

最佳炉膛出口过量空气系数 α'' 与锅炉型式、燃烧方式、燃料种类、燃烧设备的结构等因素有关，设计推荐值见表 1-2。

表 1-2 炉膛出口过量空气系数的推荐值

燃料及燃烧 设备型式	层 燃 炉		固态排渣炉	
	无烟煤、贫煤	烟煤、褐煤	无烟煤、贫煤、 劣质烟煤	烟煤、褐煤
α''	1.4~1.5	1.3~1.4	1.20~1.25	1.15~1.20
燃料及燃烧 设备型式	液态排渣炉		燃油、燃气炉	
	无烟煤、贫煤	烟煤、褐煤	平衡通风	微正压
α''	1.20~1.25	1.15~1.20	1.08~1.10	1.05~1.07

三、燃料燃烧生成的烟气量

1. 理论烟气量

当 $\alpha=1$ 时，燃料完全燃烧所生成的烟气量称为理论烟气量。完全燃烧时的烟气量是以一千克燃料为基础的燃烧反应进行计算的，对于固体或液体燃料为：

$$V_y^0 = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 \quad m_n^3/kg \quad (1-12)$$

式中 V_y^0 ——理论烟气量， m_n^3/kg ；

V_{CO_2} 、 V_{SO_2} ——分别为烟气中二氧化碳、二氧化硫分容积， m_n^3/kg ；

$V_{N_2}^0$ 、 $V_{H_2O}^0$ ——分别为理论氮容积、理论水蒸气容积， m_n^3/kg 。

式中的 V_{CO_2} 与 V_{SO_2} 之和可用三原子气体容积 V_{RO_2} 表示，故上式可以写成

$$V_y^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 \quad m_n^3/kg \quad (1-13)$$

上式中各项分别进行计算：

(1) 三原子气体容积 V_{RO_2} 的计算

燃料中元素 C 和 S 完全燃烧时生成 V_{RO_2} 的容积为：

$$\begin{aligned} V_{RO_2} &= V_{CO_2} + V_{SO_2} \\ &= 1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} \\ &= 1.866 \left(\frac{C_{ar} + 0.375 S_{ar}}{100} \right) \quad m_n^3/kg \quad (1-14) \end{aligned}$$

(2) 氮气容积 V_{N_2} 的计算

烟气中的氮来源于：①燃料本身所含的氮，其容积为 $\frac{22.4}{28} \times \frac{N_{ar}}{100} = 0.8 \frac{N_{ar}}{100} m_n^3/kg$ ；②理论空气中所含的氮，因空气中氮的容积为 79%，则空气带入的氮为 $0.79V^0 m_n^3/kg$ ，这样可得到氮气容积为：

$$V_{N_2}^0 = 0.79V^0 + 0.8 \frac{N_{ar}}{100} \quad m_n^3/kg \quad (1-15)$$

(3) 理论水蒸气容积 $V_{H_2O}^0$ 的计算

理论水蒸气容积由三部分组成，即：

1) 燃料中氢完全燃烧生成的水蒸气：

$$11.1 \times \frac{H_{ar}}{100} = 0.111 H_{ar} \quad m_n^3/kg$$

2) 燃料中的水分形成的水蒸气：

$$\frac{22.4}{18} \times \frac{M_{ar}}{100} = 0.0124M_{ar} \quad m_n^3/kg$$

3) 理论空气量带入的水蒸气:

一千克干空气带入的水蒸气一般为 10g, 每标准立方米干空气带入的水蒸气容积为:

$$1.293 \times \frac{10}{1000} \times \frac{22.4}{18} = 0.0161 \quad m_n^3/m_n^3 \text{ 干空气}$$

入炉理论空气量带入的水蒸气容积为 $0.0161V^0 \quad m_n^3/kg$
理论水蒸气容积为

$$V_{H_2O}^0 = 0.111H_{ar} + 0.0124M_{ar} + 0.0161V^0 \quad m_n^3/kg \quad (1-16)$$

另外, 当燃油锅炉采用蒸汽雾化重油时, 还应增加雾化重油带入的水蒸气容积 $1.24G_{wh} \quad m_n^3/kg$ 这一项。

2. 实际烟气量

锅炉实际的燃烧过程中, 为了有利于完全燃烧, 送入炉内的空气量大于理论需要量: 即 $\alpha > 1$, 这部分过剩的空气量, 不参与燃烧化学反应直接进入烟气当中, 并带有一部分水蒸气。这样实际烟气量即为理论烟气量、过剩空气量和过剩空气量所带入的水蒸气量之和, 用下式表示:

$$\begin{aligned} V_y &= V_y^0 + (\alpha - 1)V^0 + 0.0161(\alpha - 1)V^0 \\ &= V_y^0 + 1.0161(\alpha - 1)V^0 \quad m_n^3/kg \end{aligned} \quad (1-17)$$

四、根据烟气分析确定过量空气系数、漏风量及烟气量

锅炉在运行时往往需要了解其用风的合理性、漏风状况及生成的烟气量, 而运行锅炉产生的烟气成分是可以实际测量的。下面介绍用烟气分析结果确定过量空气系数、漏风量、烟气量的方法。

1. 烟气中一氧化碳与三原子气体 RO_2 最大值的确定

锅炉运行中，燃料不完全燃烧时，如果不考虑烟气中含
量极微的氢及碳氢化合物，不完全燃烧的烟气成分中还需要
知道一氧化碳的含量。若应用气体分析仪测得 RO_2 和 O_2 的
含量时，可用下式计算一氧化碳含量：

$$CO = \frac{(21 - O_2) - (1 + \beta)RO_2}{0.605 + \beta} \% \quad (1-18)$$

式中 β ——燃料特性系数，可用下式计算

$$\beta = 2.35 \frac{H_{ar} - 0.126O_{ar} + 0.038N_{ar}}{C_{ar} + 0.375S_{ar}}$$

当 $\alpha=1$ 并且燃料完全燃烧时， $CO=0$ ， $O_2=0$ ，生成的
 RO_2 为最大值，式 (1-18) 可写成

$$RO_2^{\max} = \frac{21}{1 + \beta} \% \quad (1-19)$$

常用燃料的 β 和 $RO_2^{\max}$ 值见表 1-3。

表 1-3 常用燃料的 β 和 $RO_2^{\max}$ 值

燃 料	β	$RO_2^{\max}$	燃 料	β	$RO_2^{\max}$
无烟煤	0.05~0.1	19~20	褐 煤	0.055~0.125	18.5~20
贫 煤	0.1~0.135	18.5~19	重 油	0.30	16.1
烟 煤	0.09~0.15	18~19.5	天然气	0.78	11.8

2. 用烟气分析确定过量空气系数

锅炉运行中，通过分析锅炉的烟气成分，可以确定过量
空气系数。当前投运的大容量锅炉的燃烧工况都比较好，燃
尽程度很高，运行正常时，烟气中的一氧化碳含量极少，可
按完全燃烧考虑，此时可分析推导出过量空气系数的计算
公式

$$\alpha = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2} \quad (1-20)$$

或

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

3. 漏风系数和漏风量计算

当前运行的锅炉，一般都采用负压燃烧方式，在锅炉炉膛和烟道的不严密处可以漏入外界的冷空气，使烟气量沿着烟气的流程不断增大（在空气预热器内是由空气侧漏入烟气侧）。

烟道各段内漏入的冷空气量 ΔV_k 与理论燃烧空气量 V^0 之比，称为该段烟道的漏风系数，用 $\Delta\alpha$ 表示，即

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta V_k}{V^0} \quad (1-22)$$

一般锅炉设计的烟道各部漏风系数见表 1-4。

表 1-4 锅炉各部分烟道的漏风系数 $\Delta\alpha$

烟道名称 漏风系数	炉 膛		对 流 受 热 面				
	光管式 水冷壁	膜 式 水冷壁	凝渣管 式过热器 层燃 炉锅 炉管 束	第一级 过热器 再热器 直流炉 过渡区	每级或 每 段 省煤器	空气预热器	
						每 级 或每段 管 式	回 转 式
$\Delta\alpha$	0.1	0.05	0	0.03	0.02	0.03	0.1~ 0.2

锅炉烟道漏风系数可用直接测取烟道各段出、入口的烟气含 O_2 量或 RO_2 量的方法，用下式进行计算：

$$\Delta\alpha = 21 \left(\frac{1}{21 - O_2'} - \frac{1}{21 - O_2} \right) \quad (1-23)$$