

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。

由于电厂化学运行专业的工种多且具有相关性，为了保证内容的系统性、完整性，尽量满足各工种的使用需要，在有些内容上没有机械地按三个等级划分，也没有简单地重复相关工种的技术内容。希望读者在学习和使用中，参考相关工种的技术内容，对这三本书的技术内容做适当的调整。

本书第一篇由太原第二热电厂康克铭编写，第二篇由山西电力试验研究所王小平、韩萍编写，第三篇由太原第二热电厂贺学鲁编写，第四篇由太原第二热电厂马金良编写，第五篇由神头第二发电厂武新兵编写。全书由太原第二热电厂左学渊主编，山西电力试验研究所徐振漳主审。

在中电联教培部为本套培训教材组织的审定会议上，本书由菏泽发电厂杨公举工程师审定，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 煤的热效率及煤场管理

第一章 煤灰成分与锅炉结焦	1
第一节 煤灰的成分	1
第二节 煤灰的熔点	3
第三节 锅炉的结焦	5
复习题	9
第二章 煤灰熔融性的测定	11
第一节 概述	11
第二节 煤灰样品的采集	13
第三节 测定方法	14
复习题	17
第三章 煤灰成分的测定	19
复习题	26
第四章 锅炉热效率的计算	28
第一节 锅炉的热平衡及热效率	28
第二节 各种热损失	30
第三节 锅炉效率的计算	32
复习题	33
第五章 煤的配比燃烧	35
第一节 概述	35

第二节	配煤方法	36
复习题	.....	37
第六章	燃煤管理	39
第一节	燃煤管理的意义和内容	39
第二节	燃煤的验收	40
第三节	燃煤的贮存与保管	44
第四节	燃煤定期盘点	47
复习题	.....	48

第二篇 热化学试验、化学静态诊断、 树脂的鉴定及直流炉水工况

第七章	热化学试验	50
第一节	汽包炉的热化学试验	50
第二节	直流炉的热化学试验	57
复习题	.....	59
第八章	机组大修期间的化学静态诊断	61
复习题	.....	71
第九章	水垢、积盐和腐蚀产物的化验分析	73
第一节	水垢、积盐、水渣和腐蚀产物	73
第二节	垢样的采集与保存	74
第三节	垢样的制备与分解	76
第四节	垢样的分析	80
复习题	.....	90
第十章	离子交换树脂的鉴定	92
第一节	离子交换树脂的预处理	92
第二节	离子交换树脂湿视密度的测定	96
第三节	离子交换树脂粒度分布测定法	98

第四节	离子交换树脂强度的测定	103
第五节	离子交换树脂交换容量的测定	110
复习题	.....	121
第十一章	直流炉的化学水工况	123
第一节	氨-联氨的碱性水工况	124
第二节	中性水加氧工况	126
第三节	联合水处理工况	131
复习题	.....	136

第三篇 六氟化硫、油的再生及油务管理

第十二章	废油的再生	138
第一节	再生的意义及再生方法的选择	138
第二节	运行中油的再生	139
第三节	非运行中油的再生	144
复习题	.....	149
第十三章	添加剂的使用	151
第一节	抗氧化剂	151
第二节	防锈剂	156
第三节	破乳化剂	160
复习题	.....	163
第十四章	六氟化硫	165
第一节	概述	165
第二节	六氟化硫的性质	166
第三节	六氟化硫的使用	171
第四节	六氟化硫气体杂质的检测	177
复习题	.....	182
第十五章	油务管理	184

第一节 电厂用油的检验	184
第二节 库存油的油质监督与维护	188
第三节 混油的规定及领退油制度	189
复习题	192

第四篇 水的预脱盐和水处理设备的 运行控制与管理

第十六章 电渗析	194
第一节 基本原理	194
第二节 电渗析器	201
第三节 电渗析脱盐工艺	203
复习题	211
第十七章 反渗透	213
第一节 反渗透原理	213
第二节 反渗透器	217
第三节 反渗透脱盐工艺	221
复习题	231
第十八章 水处理设备的运行控制与管理	233
第一节 水处理设备的自动控制	233
第二节 补给水处理设备的调试与联合启动	237
第三节 水处理设备的运行管理	244
复习题	246

第五篇 常规水质监测、烟气脱硫及 有害气体的监测

第十九章 COD 与 BOD₅ 的测定	248
---	-----

第一节 COD 的测定	248
第二节 BOD ₅ 的测定	253
复习题	259
第二十章 锅炉排烟造成的环境污染	261
第一节 烟气中的有害成分	261
第二节 空气污染物含量的表示法	262
第三节 锅炉烟尘排放标准	263
复习题	266
第二十一章 酸雨及其危害	268
第一节 概述	268
第二节 酸雨的危害	269
第三节 酸雨问题及其治理	270
复习题	273
第二十二章 烟气脱硫	274
第一节 概述	274
第二节 常用的脱硫方法	274
第三节 石灰乳湿法脱硫	278
复习题	281
第二十三章 烟气中有害气体的监测	283
第一节 二氧化硫的测定	283
第二节 氮氧化物的测定	287
第三节 其他有害气体的测定	293
复习题	293
主要参考文献	295
后记	李振生

第一篇 煤的热效率 及煤场管理

第一章 煤灰成分与锅炉结焦

第一节 煤灰的成分

一、煤灰的矿物组成

煤在空气中完全燃烧时，煤中的无机矿物质及某些含有金属的有机物便形成了残渣，这些残渣就是煤灰。

煤灰的组成是极其复杂的，煤灰中几乎包含地球上的全部元素，因此，有些矿藏很少的稀有元素（如铀、锆、钒、钍等）都可能在煤灰中富集，但主要还是由硅、铝、铁、钛、钙、镁、锰、钡、钾、钠、硫和磷等元素组成。这些元素均以氧化物的形式存在，且氧化物组成的变化范围很大。其中主要成分有二氧化硅、三氧化二铝、三氧化二铁、氧化钙、氧化镁、五氧化二磷、三氧化硫、四氧化三锰、二氧化钛、氧化钾、氧化钠等。此外，煤灰中还常含有一些其他微量稀有元素的氧化物。

二、煤中矿物质在燃烧过程中的变化

煤中的原生矿物质在缓慢加热过程中的变化大致如下：在 300~600℃ 的温度范围内，矿物质失掉结晶水；400~800℃，黄铁矿开始分解氧化，形成铁的氧化物和 SO_2 ；500℃ 氯化物开始挥发；600~1000℃，碳酸盐分解，形成游离的氧化物，如 CaO 、 MgO 、 FeO 等，同时放出 CO_2 ；900~1000℃

以上，碱金属的某些成分将挥发，硫酸盐也开始放出 SO_3 ，后者的过程到 $1300\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$ 才结束； $1200\sim 1600\text{ }^\circ\text{C}$ ，灰分开始熔融并形成结晶相的莫来石 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 及方石英，以及硅酸钙、硅酸铁等低熔点共晶体； $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 以上 SiO_2 分解出 SiO 并挥发。

在煤粉炉内，尤其是液态排渣炉内，煤粉在 $0.03\sim 0.05\text{ s}$ 内被加热到 $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 或更高的温度，其温升速度达到 $10^6\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。在这样高的温升速度下，上述过程几乎是同时进行的。在液态排渣炉内，灰渣有相当长的停留时间，因此渣内还可能有部分 SiO_2 被分解形成 SiO 蒸气挥发掉。当炉膛内具有足够的过剩空气时， SiO 蒸气又被氧化成 SiO_2 烟雾，随烟气逸出烟道。

三、煤中矿物质对煤应用的影响

煤中矿物质经燃烧而形成的灰分，会使火焰温度降低，锅炉燃烧不稳定、增加锅炉的热损失、沾污并磨损受热面等，这些在中级工教材中已有较详细的叙述。

许多研究结果表明，灰分中的碱金属氧化物 (K_2O 及 Na_2O) 和氯化物 (KCl , NaCl 等) 的含量虽少，但对于锅炉高温烟区受热面，如过热器及炉管等部位的沾污和腐蚀有很大的影响。在火焰内受热挥发的碱金属氧化物和烟气中的 SO_3 结合在一起，凝聚在冷受热面上会形成易熔的 K_2SO_4 及 Na_2SO_4 ，因而构成沾附灰垢的温床。如管壁表面金属温度高于或等于 $600\text{ }^\circ\text{C}$ ，呈熔融状态的 K_2SO_4 和 Na_2SO_4 还会侵蚀管壁而生成钾、钠和铁的复合硫酸盐，这是高温过热器及其吊杆件可能发生高温腐蚀的主要原因。氯化物也同样参与上述过程。

对高温区积灰进行研究后，也发现灰粒表面常包着一层

由碱金属硅酸盐玻璃质形成的低熔点渣膜。这种现象在氯化物和碱金属氧化物含量高的煤的燃烧过程中尤属常见。因此，即使烟气温度远低于灰的变形温度，但由于其低熔点硅酸盐覆盖层的作用，仍能引起飞灰在受热面上的粘附积结。

有试验指出，当煤灰中 Na_2O 和 K_2O 的含量大于 0.5% 时，过热器区域的沾污量就会很快地增加；而对灰中的氯元素含量，则不希望超过 0.2%~0.4%。

因此，高温受热面的沾污不仅与烟气温度及流速有关，而且与燃料及灰渣的组分和火焰的最高温度有关。

第二节 煤 灰 的 熔 点

一、熔点的概念

构成煤灰的各种无机成分在纯净状态下的熔融温度大部分是很高的，而且发生相变的熔点温度是恒定不变的。如表 1-1 所示。但实际的煤灰是以多成分的复合化合物形式、混合物形式存在的。这些复合物的熔点要比纯氧化物的低得多，如表 1-2 所示，而且多成分的混合物并没有明确的由固相转化为液相的熔点温度。从个别组分开始熔融直到全部组分完全熔融要经过一个较长的温度区域。在这个温度区域内，灰的各组分之间可能反应生成具有更低熔点的共晶体，而有些共晶体也可能进一步受热分解成更难熔化的化合物。熔化状态的低熔点共晶体有熔解煤灰中其他尚呈固态的矿物质的性能，从而使其在大大低于熔点的温度下液化。因而煤灰的实际温度总比表 1-1 所列的、具有较高熔点的纯氧化物要低得多。

表 1-1 几种氧化物的熔点

氧化物	$\text{SiO}_2 \cdot$	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO
熔点 (°C)	1713	2050	1565	1420	2570	2800

* 石英

表 1-2 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 CaO 系列的化合物的熔点

耐火硅酸铝	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	1850 °C
铝 酸 钙	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	1500 °C
硅 酸 钙	$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	1540 °C
铁橄榄石	$2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$	1065 °C
钙铁橄榄石	$\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$	1100 °C

铁的各种氧化物 (Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 FeO) 在煤灰中的比例是很不一致的。当燃烧或灰化时, 如环境气氛是氧化性的, FeO 会被氧化成较稳定的 Fe_2O_3 , 这个过程一直持续到 1200 °C 左右; 温度再升高时, Fe_2O_3 又逐步分解出 FeO 。可见铁的氧化物的平衡是与环境及灰渣温度有关的。在高温半还原状态 (即完全燃烧生成物与不完全燃烧生成物的混合物) 下, FeO 的含量会较多, 它与 SiO_2 及 CaO 等化合成低熔点的共晶体系统。因此, 在半还原气氛下的灰渣熔融温度常低于氧化性气氛下的, 而前者更接近于炉膛的实际情况。

综上所述, 煤灰无明确的熔点温度, 因而它的熔融特性常用特定的灰样在半还原气氛下按规定的加热速度升温时的开始变形温度 (DT)、软化温度 (ST) 和流动温度 (FT) 来表示。

二、熔渣的危害

煤在锅炉内燃烧时，生成大量灰渣，灰渣在高温下可能熔化而粘附在锅炉受热面上，造成结焦。熔渣在水冷壁受热面以及没有水冷壁保护的燃烧室衬砖上沉积，并影响液态排渣。结焦不仅影响锅炉的受热，消耗热量，破坏水循环，而且能将烟道部分堵塞，阻碍通风，增加引风机的负荷，从而降低了锅炉的出力。在结焦严重的情况下，可能迫使锅炉停止运行。此外熔化的灰渣对锅炉燃烧室的耐火衬砖具有很大的侵蚀作用（锅炉更换衬砖绝大部分是由此原因造成的），从而增加了检修费用。因此，掌握煤灰在高温下的熔融特性很重要，对我们进一步了解煤粉炉结焦问题是有帮助的。

第三节 锅 炉 的 结 焦

一、锅炉结焦的原因

引起锅炉结焦的因素是多方面的，而且各种因素又相互关联。一般认为引起结焦的主要原因是：

- (1) 锅炉长时间高负荷运行。
- (2) 磨煤机出力降低，煤粉变粗。
- (3) 给粉机控制不稳定。
- (4) 频繁地投入重油燃烧器助燃。
- (5) 二次风门开度不当。
- (6) 煤质特性发生变化。

燃烧器的周围、水冷壁及灰渣斗等均为锅炉中易结焦部位。大量运行实践表明：煤灰熔融性的降低、磨煤机出力下降及二次风门调节不当，往往是造成锅炉结焦的主要原因。

从燃煤特性角度来看，煤灰熔融性的高低对锅炉是否结焦及结焦的程度有最直接的影响，故应特别重视。

二、结焦程度的判断

锅炉受热面上的附着物大致可分为两大类：一类是在水冷壁、过热器等高温部位生成并堆积起来的熔渣，另一类是在省煤器、低温预热器等部位生成的积灰。

无论是结渣或是积灰都与煤灰化学成分密切相关。因此在实际工作中也可以利用煤灰的化学成分来判断锅炉结渣和积灰的程度。国内外通常用结渣与积灰指数来表示锅炉结渣与积灰的程度。锅炉结焦与积灰程度分类参见表 1-3。

表 1-3 锅炉结渣指数和积灰指数的分类

结渣分类	结渣指数 R_s	积灰分类	积灰指数 R_f
低	<0.6	低	<0.2
中	$0.6 \sim 2.0$	中	$0.2 \sim 0.5$
高	$2.0 \sim 2.6$	高	$0.5 \sim 1.0$
严重	>2.6	严重	>1.0

结渣指数 (R_s) 与积灰指数 (R_f) 分别按下式计算：

$$R_s = \frac{\text{碱性氧化物}}{\text{酸性氧化物}} \times S_{t,ad}$$

$$R_f = \frac{\text{碱性氧化物}}{\text{酸性氧化物}} \times Na_2O$$

式中 $S_{t,ad}$ ——煤中干燥基全硫含量，%；

Na_2O ——煤灰中 Na_2O 含量，%；

碱性氧化物——煤灰中 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 的含量之和，%；

酸性氧化物——煤灰中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 的含量之和，%。

由上两式可知，锅炉结渣与积灰指数的高低，主要取决于煤灰的化学组成。而通常判别锅炉结渣的主要依据——煤灰熔融性，也正是由煤灰的化学组成所决定的。一般情况是，煤灰熔融性随煤灰中碱性氧化物与酸性氧化物比值的增大而降低。此外，煤中含硫量与灰中氧化钠含量对结渣及积灰指数均有一定的影响。其含量越高，指数值越大，结渣与积灰也越严重。

三、煤灰和炉渣的熔融特性

对于煤灰在锅炉运行条件下所形成的炉渣，其组成与煤灰成分大体相似。但是在实验室中，将煤粉灼烧成灰与锅炉中煤粉燃尽后成为炉渣的历程是不相同的，从而也就决定了炉渣与煤灰在熔融特性上还是有差异的，它们的差异有助于判断与分析锅炉的运行情况。一般说，炉渣的熔点要稍低于入炉煤的煤灰熔点。二者的差值越大，则反映出锅炉结渣越严重。

在实际工作中，还应注意灰渣有长渣与短渣之分。它们的区别在于其粘度受温度变化的影响不同，受温度变化影响大的灰渣称为短渣；影响小的称为长渣。从煤灰熔融性上判别，短渣一般表现为 DT~FT 之间的温差小，如在 100℃ 以内。燃用短渣煤时，由于炉温增高，固态排渣炉可能在很短的时间内就会出现大面积的严重结渣情况；燃用长渣煤时，DT~FT 之间的温差虽超过 200℃，但固态排渣炉的结渣相对进行得较为缓慢，一旦产生问题，也常常是局部性的。

综上所述，为了避免锅炉严重结渣，对煤质与灰渣的特性要求如下：

(1) 煤中灰分含量及含硫量不宜过大，煤粉不宜过粗，否则都容易促使结渣情况发生或加剧结渣的严重程度。

(2) 煤灰应有较高的熔点，一般灰的软化温度 (ST) 值应大于 1350℃。特别要避免燃用灰熔点低的短渣煤，因为燃用这种煤，最易导致严重的结渣。

(3) 一般宜选用气氛条件对煤灰熔融性影响较小的煤种，由于其灰渣特性受运行工况的波动影响较小，因此有助于锅炉的稳定燃烧。

四、熔渣对耐火材料的侵蚀

熔渣对耐火材料的侵蚀是锅炉燃烧室耐火材料遭受破坏的最重要的因素。60% 以上更换燃烧室衬砖的原因，是由于熔渣侵蚀的破坏。熔蚀和侵蚀本身是十分复杂的物理化学过程。一般在热力设备上，特别是锅炉燃烧室中所观测到的熔渣侵蚀是由于两个过程——腐蚀和磨蚀作用的结果。腐蚀作用包括耐火材料与熔渣间的化学作用，以及前者熔解于后者的作用。磨蚀作用是熔渣作用于耐火材料而发生的机械磨损现象。以上两种作用又互相影响，促进了耐火材料的腐蚀和磨蚀。

耐火材料被熔渣侵蚀与下列因素有关：

(1) 熔渣和耐火材料的化学成分 如熔渣中的碱性氧化物与熟料耐火材料中的酸性氧化物相互作用。

(2) 耐火材料的结构 耐火材料孔隙率增加，机械强度低等都会降低耐火材料的抗渣性。

(3) 熔渣的粘度 随着熔渣粘度的降低，渗入耐火材料孔隙的深度也增加，并且使作用表面大大增加，因此，耐火材料的腐蚀也就增加了。

(4) 温度 温度提高促使熔渣粘度急剧下降，使熔渣透入深度增加，因而加剧了耐火材料的腐蚀。温度每升高 1℃，熔渣侵蚀的增加大于 1%。

复 习 题

一、名词解释

1. 煤灰的熔点
2. 结焦
3. 结渣指数
4. 积灰指数

二、填空题

1. 煤灰是由多种元素的氧化物组成的，其中主要成分有：_____、_____、_____、_____、_____、_____、_____、_____、_____等。

2. 煤灰无明确的熔点温度，其熔融特性常用特定的灰样在_____气氛下，按规定的加热速度升温时的_____ (DT)、_____ (ST) 和 _____ (FT) 来表示。

3. 锅炉受热面上的附着物，一类为水冷壁、过热器等高温部位生成并堆积起来的_____，另一类为在省煤器、低温预热器等部位生成的_____。

4. 写出下列几种氧化物的熔点：

SiO_2 _____ $^{\circ}\text{C}$ ； FeO _____ $^{\circ}\text{C}$ ； CaO _____ $^{\circ}\text{C}$ 。

三、判断题（在题末括号内作记号：“√”表示对，“×”表示错）

1. 煤中矿物质在燃烧过程中的变化是干燥→分解→燃烧→熔化。（ ）

2. 煤中矿物质经燃烧而形成的灰分，对煤的燃烧的影响除发热量降低外，还使燃烧不稳定、磨损受热面和易于结