

电厂 化学技术



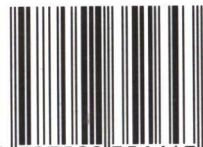
王淑勤 赵毅 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



ISBN 978-7-5083-5164-3



9 787508 351643 >

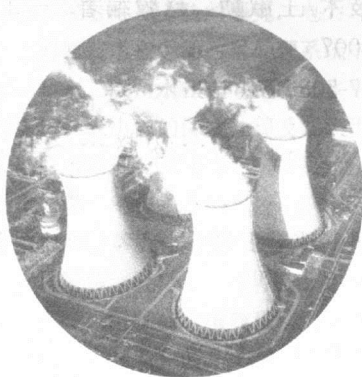
定价：25.00 元

销售分类建议：电力工程/火力发电

电厂化学技术



王淑勤 赵毅 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

我国大型火电厂的建设方兴未艾, 机组向着大容量、高参数和自动化的方向发展, 这对电厂化学监督、水处理工艺和自动控制水平提出了更高的要求。

为适应电力生产的迅速发展和科学技术的进步, 满足电厂化学运行人员、科技人员对火力发电机组的系统、运行和电厂化学监督、水处理技术和自动控制的需要, 作者根据多年来从事教学和科研的实践, 在参考大量文献的基础上, 编著了这本《电厂化学技术》, 系统和全面地论述电厂中涉及的电力燃煤、电力用油的维护、锅炉给水和电厂废水处理新技术、热力设备的防腐技术和自动控制技术等内容, 共十二章。引进了大量的新技术、新方法, 突出了亚临界、超临界参数锅炉的水处理, 增加了各类废水处理技术和在线检测、自动控制技术。

本书可作为电力高等院校相关专业的教学用书和科研参考书, 也可用作电厂化学运行人员的培训教材和从事电厂化学工作的技术人员、管理人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂化学技术/王淑勤, 赵毅编著. —北京: 中国电力出版社, 2007

ISBN 978-7-5083-5164-3

I. 电… II. ①王…②赵… III. 电厂化学
IV. TM621.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 011887 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 3 月第一版 2007 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 386 千字

印数 0001—3000 册 定价 25.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

Preface

电厂化学包括煤的燃烧、电力用油、化学水处理、热力设备的腐蚀与防护以及各种处理设备的设计、运行维护和在线监督与控制,涉及面广,综合性强。为适应电力生产的迅速发展和科学技术的进步,满足电厂化学运行人员、科技人员对火力发电机组的系统、运行和电厂化学监督、水处理技术和自动控制的需要,作者根据多年来从事教学和科研的实践,在参考大量文献的基础上,编著了这本《电厂化学技术》本书介绍了大量的新技术,并结合电厂现阶段实际情况引进应用实例,系统而全面地论述了电厂化学涵盖的主要内容。

本书共分十二章。第一章电力燃煤,讲述了煤的性质、采样、煤质分析和煤的燃烧过程等;第二章电力用油,讲述了变压器油、汽轮机油、抗燃油的作用和维护等;第三章电厂锅炉补给水处理技术,讲述了水的预处理、离子交换除盐处理的原理和系统运行知识;第四章膜技术及其在水的除盐中的应用,主要介绍了一些新技术如超滤、微滤、纳滤和电除盐等技术的特点和电厂应用现状;第五章凝结水除盐处理;第六章汽包锅炉炉内防垢处理;第七章冷却水处理技术,讲述了冷却水系统的防垢和水质稳定处理技术,另外还介绍了水内冷发电机的水处理;第八章直流锅炉水处理,针对亚临界和超临界直流锅炉的结构特点,讲述了直流锅炉对给水水质的要求、水处理的特点和直流锅炉启动时的水洗;第九章电厂空冷机组水处理技术;第十章电厂废水处理技术,分别讲述了冲灰废水、烟气脱硫废水、生活污水、化学除盐设备再生废水、锅炉化学清洗废水、工业废水、含油废水的处理技术,还讲述了电厂节水技术;第十一章热力设备和水汽系统的腐蚀与防护;第十二章化学水处理系统的在线检测和自动控制,主要介绍了化学水处理系统的在线检测仪表、自动加药系统和PLC、DCS自动控制技术。章节内容与题目更加鲜明化、条理化,便于掌握要点。

本书第一章、第二章由赵毅编写,第三章至第十二章由王淑勤编写,由赵毅统稿并修改定稿。本书部分章节得到华北电力大学留学回国基金的资助,在此表示感谢!

本书可作为电力高等院校相关专业的教学用书和科研参考书,也可用作电厂化学运行人员的培训教材和从事电厂化学工作的技术人员、管理人员的参考书。

由于编者水平所限和编写时间仓促,书中缺点和错误在所难免,敬请各位专家和广大读者批评指正。

编者

2006年9月

目录

Contents

前言

第一章 电力燃煤 1

- 第一节 煤的物理化学性质 1
- 第二节 火电厂动力煤的采样和制样 10
- 第三节 煤的组成和基准 14
- 第四节 煤质分析和煤的发热量 16
- 第五节 煤的燃烧 20

第二章 电力用油 25

- 第一节 电力用油的分类和质量标准 25
- 第二节 变压器油的作用和维护 31
- 第三节 汽轮机油的作用和维护 34
- 第四节 抗燃油的维护 36
- 第五节 油品的净化与再生 40

第三章 电厂锅炉补给水处理技术 44

- 第一节 火力发电厂用水概述 44
- 第二节 补给水的预处理 52
- 第三节 预处理系统及其运行 62
- 第四节 补给水的软化和除盐 63
- 第五节 离子交换装置及其运行管理 85

第四章 膜技术及其在水的除盐中的应用 98

- 第一节 电渗析除盐 98
- 第二节 反渗透除盐 100
- 第三节 电去离子（电除盐 EDI） 105
- 第四节 超滤技术 106
- 第五节 微滤技术 108
- 第六节 纳滤技术 109
- 第七节 膜技术在锅炉补给水处理中的应用 110

第五章 凝结水除盐处理 112

第一节	凝结水的污染	112
第二节	凝结水处理系统	113
第六章	汽包锅炉炉内防垢处理	124
第一节	水垢和水渣的性质及危害	124
第二节	炉内水质调节	127
第三节	锅炉的化学清洗	130
第四节	蒸汽的品质与污染	133
第七章	冷却水处理技术	147
第一节	冷却水处理概述	147
第二节	冷却水系统的防垢处理	150
第三节	水质稳定处理	156
第四节	微生物控制	160
第五节	水内冷发电机的水处理	164
第八章	直流锅炉水处理	167
第一节	直流锅炉水汽系统概述	167
第二节	直流锅炉对给水水质的要求	168
第三节	亚临界和超临界直流锅炉水处理的特点	172
第四节	直流锅炉启动时的水洗	173
第九章	电厂空冷机组水处理技术	176
第一节	空冷机组的特点	176
第二节	空冷机组的水处理	178
第十章	电厂废水处理技术	181
第一节	冲灰废水处理	181
第二节	烟气脱硫废水处理	183
第三节	生活污水处理	186
第四节	化学除盐设备再生废水处理	187
第五节	锅炉化学清洗废水处理	190
第六节	含油废水处理	192
第七节	电厂节水技术	194
第十一章	热力设备和水汽系统的腐蚀与防护	200
第一节	金属腐蚀概述	200
第二节	给水系统的电化腐蚀与防护	205

第三节	汽水系统金属的腐蚀与防护	215
第四节	凝汽器铜管冷却水侧的腐蚀与防护	218
第五节	锅炉停用过程的腐蚀与防护	222
第六节	汽轮机的腐蚀与防护	225
第十二章	化学水处理系统在线检测和自动控制	227
第一节	化学水处理系统在线检测仪表	227
第二节	PLC 控制技术	228
第三节	DCS 控制系统	231
第四节	自动加药系统及其控制	233
第五节	化学水处理系统控制	236
参考文献		245

电 力 燃 煤

第一节 煤的物理化学性质

一、燃煤电厂的生产过程

发电厂是把各种动力能源的能量转变成电能的工厂，根据所利用的能源形式可分为火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂、地热发电厂、风力发电厂等。

火力发电厂简称火电厂，是利用煤、石油、天然气等燃料的化学能生产电能的工厂。按其功用可分为两类，即凝汽式电厂和热电厂。前者仅向用户供应电能，后者除供给用户电量外，还向用户供应蒸汽和热水，即热电联合生产。

火电厂的容量大小各异，具体形式也不尽相同，但就其生产过程来说是相似的。图1-1是凝汽式燃煤电厂的生产过程示意图。

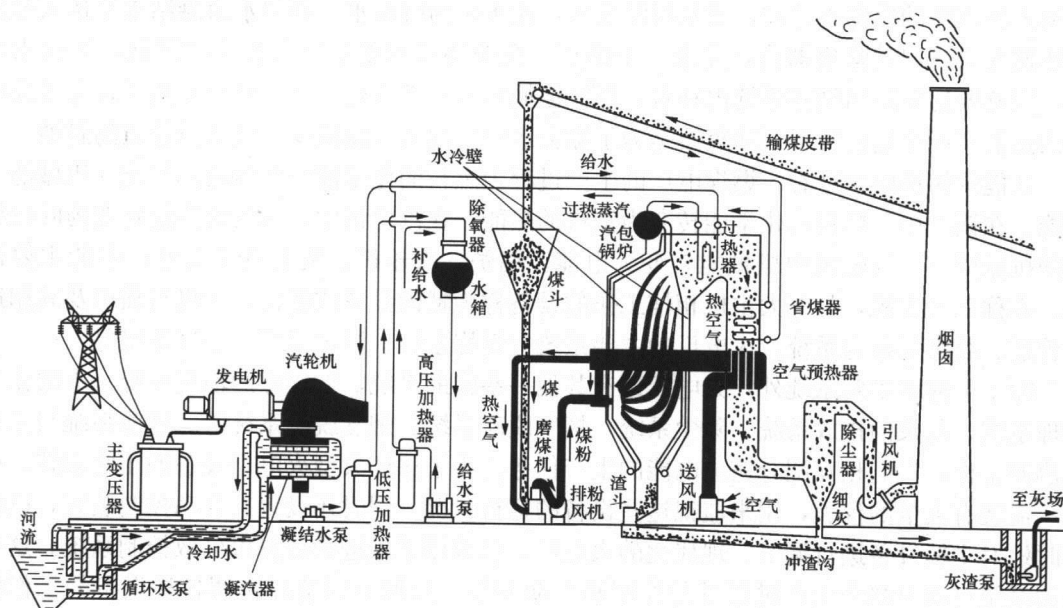


图 1-1 凝汽式燃煤电厂生产过程

燃煤用输煤皮带从煤场运至煤斗中。大型火电厂为提高燃煤效率都是燃烧煤粉，因此，煤斗中的原煤要先送至磨煤机内磨成煤粉。磨碎的煤粉由热空气携带经排粉风机送入锅炉的炉膛内燃烧。煤粉燃烧后形成的热烟气沿锅炉的水平烟道和尾部烟道流动，放出热量，最后进入除尘器，将燃烧后的煤灰分离出来。洁净的烟气在引风机的作用下通过烟囱排入大气。助燃用的空气由送风机送入装设在尾部烟道上的空气预热器内，利用热烟气加热空气。这

样，既可以提高进入锅炉的空气温度，使煤粉易于着火和燃烧，又可以降低排烟温度，提高热能的利用率。空气预热器排出的热空气分为两股：一股去磨煤机干燥和输送煤粉，另一股直接送入炉膛助燃。燃煤燃尽的灰渣落入炉膛下面的渣斗内，与从除尘器分离出的细灰一起用水冲至灰渣泵房内，再由灰渣泵送至灰场。

在除氧器水箱内的水经过给水泵升压后通过高压加热器送入省煤器。在省煤器内，水受到热烟气的加热，进入锅炉顶部的汽包内。在锅炉炉膛四周密布着水管，称为水冷壁。水冷壁水管的上下两端均通过联箱与汽包连通，汽包内的水经由水冷壁不断循环，吸收煤燃烧过程中放出的热量。部分水在水冷壁中被加热沸腾后汽化成水蒸气，这些饱和蒸汽由汽包上部流出进入过热器中。饱和蒸汽在过热器中继续吸热，成为过热蒸汽。过热蒸汽有很高的压力和温度，因此有很大的热势能。具有热势能的过热蒸汽经管道引入汽轮机后，便将热势能转变成动能。高速流动的蒸汽推动汽轮机转子转动，形成机械能。汽轮机的转子与发电机的转子通过联轴器连在一起，当汽轮机转子转动时便带动发电机转子转动。在发电机转子的另一端带着一个小发电机，叫励磁机。励磁机发出的直流电送至发电机的转子线圈中，使转子成为电磁铁，周围产生磁场。当发电机转子旋转时，磁场也是旋转的，发电机定子内的导线就会切割磁力线感应产生电流。这样，发电机便把汽轮机的机械能转变为电能。电能经变压器将电压升压后，由输电线送至电用户。

释放出热势能的蒸汽从汽轮机下部的排汽口排出，称为乏汽。乏汽在凝汽器内被循环水泵送入凝汽器的冷却水冷却，重新凝结成水，此水称为凝结水。凝结水由凝结水泵送入低压加热器并最终回到除氧器内，完成一个循环。在循环过程中难免有汽水的泄漏，即汽水损失，因此要适量地向循环系统内补水，以保证循环的正常进行。高、低压加热器是为提高循环的热效率所采用的装置，除氧器是为了除去水中含的氧气以减少对设备及管道的腐蚀。

从能量转换的角度看，燃煤电厂的生产过程为燃料的化学能→蒸汽的热势能→机械能→电能。在锅炉中，燃料的化学能转变为蒸汽的热能；在汽轮机中，蒸汽的热能转变为叶轮旋转的机械能；在发电机中机械能转变为电能。锅炉、汽轮机、发电机是火电厂中的主要设备，亦称三大主机，与三大主机相辅工作的设备称为辅助设备或辅机，主机与辅机及其相连的管道、线路等称为系统。火电厂的主要系统有燃烧系统、汽水系统、电气系统等。

除了上述的主要系统外，火电厂还有其他一些辅助系统，如燃煤的输送系统、水的化学处理系统、灰浆的排放系统、除尘系统、烟气脱硫系统、烟气脱硝系统等。这些系统与主系统协调工作，它们相互配合完成电能的生产任务。为了保证大型火电厂设备的正常运转，火电厂需装有大量的仪表，用来监视这些设备的运行状况，同时还设置有自动控制装置，以便及时地对主辅设备进行调节。现代化的火电厂，已采用了先进的计算机分散控制系统。这些控制系统可以对整个生产过程进行控制和自动调节，根据不同情况协调各种设备的工作状况，使整个电厂的自动化水平达到新的高度。自动控制装置及系统已成为火电厂中不可缺少的部分。

二、煤的分类

煤是由远古死亡植物残骸没入水中，经过生物化学作用，然后被地层覆盖并经过地质化学作用形成的有机生物岩。根据肉眼和显微镜观察，可以证明成煤的原始物料是植物。植物可分为低等植物和高等植物两大类。低等植物包括菌类和藻类，苔藓、蕨类及种子植物属于高等植物。人们在煤的勘探、开采、加工、使用过程中，通过分析、研究，逐步了解煤的种

类、基本特征及其不均一性和多样性。煤的外在特征、理化性质和工艺性质有很大差别。根据成煤物质、成煤条件不同以及工业利用的需要，人们把各种不同的煤划分成性质相类似的若干种类。

煤的种类一般按其含碳量的多少，即成煤地质年代的长短或煤化程度（成煤植物在生物、地质化学作用下达到的化学成熟程度）的深浅，可以把煤分为三大类：腐殖煤、残殖煤及腐泥煤。腐殖煤是因为植物的木质纤维组织在成煤过程中曾变成叫做腐殖酸的中间产物而得名。根据煤化程度的不同，腐殖煤可以分为泥炭、褐煤、烟煤和无烟煤四大类。泥炭和褐煤的煤化程度低，一般简称为年轻煤，无烟煤则可称为年老煤。四大类腐殖煤的特征和物质参数可参考表 1-1。

表 1-1 四大类腐殖煤的主要特征

特 征	煤 种			
	泥 炭	褐 煤	烟 煤	无烟煤
颜色	综合色为主	从褐色到黑褐色	黑色	灰褐色
光泽	无	大多数较暗	有一定光泽	有金属光泽
外部条带	有原始植物残骸	条带不明显	呈条带状	无明显条带
燃烧现象	有烟	有烟	多烟	无烟
水分	很大量	大量	不多	不多
密度	最低	较多	更多	不多
硬度	很低	有一定程度	较高	最高
化学组成	含有植物残骸、糖类、腐殖酸	不含植物残骸、糖类，含腐殖酸	腐殖质	

腐殖煤是自然界分布最广、蕴藏量最大的煤。

（一）我国煤的分类

我国煤的分类方法是采用表征煤化程度的干燥无灰基挥发分 V_{daf} 作为分类指标，并将煤分为褐煤、烟煤和无烟煤。一般 $V_{daf} \leq 10\%$ 的煤为无烟煤， $V_{daf} \geq 37\%$ 的煤为褐煤，在它们之间的煤分为贫煤和烟煤。

无烟煤可再用干燥无灰基 V_{daf} 和 H_{daf} 分为三类，划分方法见表 1-2。

表 1-2 无烟煤的分类

类 别	符 号	分 类 指 标	
		$V_{daf} (\%)$	$H_{daf} (\%)$
无烟煤 1 号	WY ₁	0~3.5	0~2.0
无烟煤 2 号	WY ₂	3.5~6.5	2.0~3.0
无烟煤 3 号	WY ₃	6.5~10.0	3.0

烟煤除用干燥无灰基挥发分划分外，还用表示工艺性能的指标参数作为划分指标，如表 1-3 所示。

表 1-3

烟 煤 分 类

类 别	符 号	分 类 指 标				
		V_{daf} (%)	黏结指数 G	胶质层最大厚度 Y (mm)	奥亚膨胀体 b (%)	透光率 P_M (%)
贫煤	PM	10.0~20.0	≤ 5			
贫瘦煤	PS	10.0~20.0	5~20			
瘦煤	SM	10.0~20.0	20~65			
焦煤	JM	20.0~28.0	50~65			
		10.0~28.0	> 65	≤ 25.0	(≤ 150)	
肥煤	FM	10.0~37.0	(> 85)	> 25.0		
1/3 焦煤	1/3JM	28.0~37.0	65	≤ 25.0	(≤ 220)	
气肥煤	QF	> 37.0	(> 85)	> 25.0	(≤ 220)	
气煤	QM	28.0~37.0	50~65			
		> 37.0	> 35	≤ 25.0	(≤ 220)	
1/2 中黏煤	1/2ZM	20.0~37.0	30~50			
弱黏煤	RN	20.0~37.0	5~30			
不黏煤	BN	20.0~37.0	≤ 5			
长焰煤	CY	> 37.0	≤ 35			> 50

褐煤除用挥发分分类外，还用透光率 P_M 和含最高内在水分的无灰高位发热量 Q'_{gr} 作为区分褐煤和烟煤的指标，如表 1-4 所示。

表 1-4

褐 煤 的 分 类

类 别	符 号	分 类 指 标	
		透光率 P_M (%)	Q'_{gr} (kJ/kg)
褐煤 1 号	HM ₁	0~30	
褐煤 2 号	HM ₂	$> 30 \sim 50$	≤ 24000

(二) 燃煤发电厂用煤质量标准

燃煤发电厂用煤质量标准是根据对锅炉设计、运行等方面有较大影响的煤质特性制定的，包括干燥无灰基挥发分 V_{daf} 、干燥基灰分 A_d 、收到基水分 M_{ar} 、灰的软化温度 ST 作为主要分类指标，如表 1-5 所示。

表 1-5

燃煤发电煤粉锅炉用煤质量标准

分类指标	煤种名称	等级	代号	主分类指标界限值	辅助分类指标界限值
挥发分 V_{daf}	(低挥发分无烟煤)		(V_0)	$V_{daf} \leq 6.5\%$	$Q_{ar,net} > 23.0 \text{ MJ/kg}^{\text{①}}$
	无烟煤	1 级	V_1	$6.5\% < V_{daf} \leq 9\%$	$Q_{ar,net} > 21.0 \text{ MJ/kg}$
	贫煤	2 级	V_2	$9\% < V_{daf} \leq 19\%$	$Q_{ar,net} > 18.5 \text{ MJ/kg}$
	中挥发分烟煤	3 级	V_3	$19\% < V_{daf} \leq 27\%$	$Q_{ar,net} > 16.5 \text{ MJ/kg}$
	中高挥发分烟煤	4 级	V_4	$27\% < V_{daf} \leq 40\%$	$Q_{ar,net} > 15.5 \text{ MJ/kg}$
	高挥发分褐煤	5 级	V_5	$V_{daf} > 40\%$	$Q_{ar,net} > 11.5 \text{ MJ/kg}$

续表

分类指标	煤种名称	等级	代号	主分类指标界限值	辅助分类指标界限值
灰分 A_d	常灰分煤	1 级	A_1	$A_d \leq 24\%$	
	中灰分煤	2 级	A_2	$24\% < A_d \leq 34\%$	
	高灰分煤 (超高灰分煤)	3 级	A_3 (A_4)	$34\% < A_d \leq 46\%$ $A_d > 46\%$	
水分 M_t	常水分煤	1 级	M_1	$M_t \leq 8\%$	$V_{daf} \leq 40\%$
	高水分煤	2 级	M_2	$8\% < M_t \leq 12\%$	
水分 M_t	常水分高挥发煤	1 级	M_1	$M_t \leq 22\%$	$V_{daf} > 40\%$
	高水分高挥发煤	2 级	M_2	$22\% < M_t \leq 40\%$	
	(超高水分褐煤)		(M_3)	$M_t > 40\%$	
硫分 $S_{t,d}$	低硫煤	1 级	S_1	$S_{t,d} \leq 1\%$	
	中高硫煤	2 级	S_2	$1\% < S_{t,d} \leq 3\%$	
	(特高硫煤)		(S_3)	$S_{t,d} > 3\%$	
灰熔融性 ST	不易结渣煤	1 级	ST_1	$ST > 1350^\circ\text{C}$	$Q_{ar,net} > 12.5\text{MJ/kg}$
				ST 不限	$Q_{ar,net} \leq 12.5\text{MJ/kg}$
	(易结渣煤)		(ST_2)		$Q_{ar,net} > 12.5\text{MJ/kg}$

① 燃煤的 $Q_{ar,net}$ 低于相应数值时, 则该煤种应归入 V_{daf} 低一级的等级内。

燃煤发电厂用煤质量标准表可用于电厂建设中根据煤的来源确定煤所在处的级区, 作为设计部门选择电厂设备和系统的依据。当某厂用煤标号为 $V_4 A_1 S_2 ST_1$ 时, 表示中高挥发分烟煤 V_4 , $V_{daf} = 27\% \sim 40\%$; $Q_{ar,net} > 15.5\text{MJ/kg}$; 常灰分煤 A_1 , $A_d \leq 24\%$; 常水分煤 M_1 , $M_t \leq 8\%$; 中高硫煤 S_2 , $S_{t,d} = 1\% \sim 3\%$; 不易结渣煤 ST_1 , $ST > 1350^\circ\text{C}$ 。

(三) 燃煤发电厂用煤的分类及燃烧特性

1. 无烟煤

无烟煤是煤化程度最深的煤, 它有明亮的黑色光泽, 硬度高, 不易研磨。它的含碳量很高, 杂质少而发热量较高, 大致为 $21000 \sim 25000\text{kJ/kg}$ 。但由于挥发分含量较低, 难以点燃, 燃烧特性差。为保证着火和稳燃, 在锅炉设计中常需要采取一些特殊措施, 对低灰熔点的无烟煤还需同时解决着火稳定性和结渣之间的矛盾。无烟煤的着火需要较高温度, 燃烧时火焰较短, 燃尽也较困难。其优点是在贮存时不易自燃。

2. 贫煤

它的挥发分含量稍高于无烟煤, 其着火、燃尽特性优于无烟煤, 但仍属于燃烧特性较差的煤种。

3. 烟煤

烟煤具有中等的煤化程度, 它的挥发分含量较高, 水分和灰分也较少, 发热量也较高。烟煤燃点低, 容易着火和燃尽, 但某些含灰量较高的劣质烟煤燃烧特性较差。对挥发分超过

25%的烟煤，贮存时应防止其自燃，制粉系统应考虑防爆措施。对劣质烟煤，还应考虑受热面积灰、结渣和磨损问题。

4. 褐煤

褐煤外观呈褐色，少数为黑褐色甚至黑色，挥发分含量较高，有利于着火。但其灰分和水分较高，发热量较低，一般小于 16750kJ/kg。含水分较高的年轻褐煤，燃烧性能较差，而且灰熔点也较低。褐煤的化学反应性强，在空气中存放极易风化成碎块，容易发生自燃。

三、煤的物理性质

煤的物理性质主要包括颜色、光泽、密度、硬度、可磨性、煤粉细度和煤灰熔融性等，它们主要受煤的成因、煤化程度以及水分、灰分和风化程度的影响。研究煤的物理性质可以帮助我们了解煤的种类，设计选用磨煤机以及保证锅炉燃烧的安全可靠等。

(1) 煤的颜色。煤的颜色是指新采出的块煤表面的天然色彩。煤在不同的光学条件下呈现不同的颜色，在阳光照射下，煤表面反射光线所显示的颜色称为表色。通常腐殖煤的表色随煤化程度的不同而变化。从褐煤、烟煤到无烟煤，其颜色也从棕褐、褐黑而变为深黑，最后变为灰黑而带有钢灰色，而在烟煤阶段，其颜色也随挥发分的不同而变化。如高挥发分的吉林营城长焰煤呈浅黑甚至褐黑色，而低挥发分的山东淄博贫煤呈深黑色，山西浑源的燥煤，挥发分高达 72%，密度小，呈灰色，还有的腐泥煤呈浅黄、棕褐色或呈灰绿色。因此，从煤的颜色可大致区别煤的种类和产地。此外，煤中的水分常能使煤的颜色加深，而矿物质却能使煤的颜色变浅。用钢针刻划煤的表面或用镜煤条带在素烧瓷板上刻划出的条痕色（亦称粉色）。煤的条痕色虽略浅于其表面，但其颜色较为固定，比表色更易区分不同产地的煤和不同煤化程度的煤。

(2) 煤的光泽。煤的光泽是指在正常光线下煤的新鲜断面对光的反射能力。煤化程度越高，煤的光泽越强。煤种的矿物质含量越高，煤的光泽越暗。煤经风化或氧化后，光泽变暗。

(3) 煤的密度。煤的质量与同温度、同体积水的质量之比称为煤的密度。理论上讲，不含内外表面空隙的煤炭质量与同体积水质量之比称为煤的真密度，所以真密度是指在 20℃ 的条件下用水（或酒精等）充分浸泡以除去煤的空隙后所测得的密度。包括存在于煤中的气孔和裂隙的煤的质量和同温度、同体积水的质量之比叫做煤的视密度（也叫视比重或容重）。

纯煤的密度随变质程度呈有规律的变化：年轻煤密度为 1.3~1.5，烟煤为 1.3~1.4，无烟煤为 1.35~1.9。从年轻煤到烟煤密度变化不很明显，烟煤的密度最低，而后随煤化程度增高而密度逐渐增大，到了无烟煤阶段，密度随煤化程度的增大而有规律地急剧增加。而且煤的真密度随矿物质含量的增高而增高。因此，煤的密度越大，灰分含量越高。

煤的视密度是计算煤炭储量的重要参数。即测出煤层单位体积的质量，可计算煤层储量。

(4) 煤的堆积密度。煤的堆积密度是指单位容积的散装煤炭的质量。该参数可用于煤仓设计、煤炭质量估计、装车质量计算等。

(5) 煤的硬度。煤能抵抗外来机械作用的能力为煤的硬度。煤的硬度与煤化程度有关，以焦炭硬度最小，无烟煤硬度最大，从焦炭到长烟煤变化时硬度增大，但到褐煤阶段硬度降低。煤经氧化、风化后硬度降低。

(6) 煤的可磨性系数。可磨性反映煤在研磨成粉时，其粒度发生改变的一种物理性质。煤被磨成一定细度的煤粉的难易程度称为煤的可磨性系数。目前采用哈氏法测定的可磨性系数，按式 (1-1) 计算，即

$$K_{\text{km}}^{\text{Ha}} = 13 + 6.93D_{74} \quad (1-1)$$

式中 D_{74} ——通过孔径为 $74\mu\text{m}$ 筛子的煤粉量。

可磨性系数高的煤，磨细容易，消耗能量少。

在燃煤发电厂中，煤粉炉被广泛使用，所以煤粉的制备成了电力生产的重要一环。煤的可磨性系数作为一项重要的指标，不仅可以用来计算磨煤时的能量消耗，而且也是煤种选择和磨煤机设计的不可缺少的数据。此外，如煤种改变，计算磨煤机在同一功率下的煤粉产量，也要用到该系数。

(7) 煤粉细度。为了提高煤的燃尽度，燃煤发电厂广泛采用粉煤的燃烧方式，因而，要求锅炉在运行中必须控制煤粉的细度和水分。所谓煤粉细度，就是煤粉颗粒的大小，煤粉颗粒的大小对磨煤过程中能量的消耗、燃烧过程中不完全燃烧的热损失都具有很大的影响。在磨煤过程中煤粉磨得越细，磨制单位质量的煤所消耗的能量越大；反之则可降低磨煤时消耗的能量，但煤粉在燃烧过程中难以燃尽。因此，确定一个能量消耗和燃烧损失都较小的煤粉细度，即经济细度，是一项重要工作。在锅炉运行中，每班要取两次煤粉样，进行细度测定，以监督磨煤设备的磨制工况。对于中间储仓式制粉系统，一般在旋风分离器和储粉仓之间的下粉管上采样。

煤粉细度的测定常用过筛的方法，即让煤粉通过一定网目的标准筛，留在筛子上的煤粉质量占煤粉质量的百分数，以 R 来表示

$$R = \frac{m_a}{m_a + m_b} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 m_a ——筛子上剩余煤粉的质量，g；

m_b ——通过筛子的煤粉质量，g。

R 值越大，表示煤粉越粗。通常用来测定煤粉细度的标准筛有两种，孔径为 90 和 $200\mu\text{m}$ ，分别用符号 R_{90} 和 R_{200} 来表示。按习惯，电厂中用筛号来表示标准筛，而不用孔径表示。越细的标准筛，筛号越大。 $90\mu\text{m}$ 的筛子为 70 号，表示为 R_{70} ， $200\mu\text{m}$ 的筛子为 R_{30} 。

煤的经济细度决定于煤的种类、磨煤机的型式、燃烧设备及其工况，对某个具体设备，要由运行过程中试验求得。对烟煤来说，经济细度可由经验公式 (1-3) 计算

$$R_{70} = 6 + 0.7A_d \quad (1-3)$$

式中 R_{70} —— 70 号标准筛的经济细度；

A_d ——煤的干燥基灰分百分含量。

煤的挥发分高，易于燃烧，煤粉细度可以粗一些，一般 $R_{70} = 40\% \sim 60\%$ 。

煤粉中水分的多少会影响煤粉在输粉管、煤粉仓和分离器中的流动性、燃烧的经济性、磨煤机效率及安全等。

锅炉在运行中，要及时掌握锅炉燃烧工况，特别要监督煤粉的燃尽度。燃煤电厂在烟道中安装仪表，连续监督煤粉的燃烧工况。运行中每班都要取灰样进行可燃物含量的测定。灰

样有两种，一种是烟气的细灰（飞灰），另一种是由炉底灰斗处排出的粗灰，即灰渣（大灰）。飞灰在高温段省煤器入口处采集，灰渣在接近灰斗出口处采集。灰渣可燃物含量的测定方法与灰分的测定方法相同，即测定未燃尽的可燃物在灰样中的质量百分数。

（8）煤灰的熔融性。煤粉在锅炉中燃烧时，生成大量灰渣，因炉膛的温度很高，灰渣可能熔化而在锅炉受热面上结渣。结渣影响锅炉的传热，破坏水循环，还可能堵塞部分烟道，妨碍通风，增加吸风机的负荷；结渣严重的情况下，可能使锅炉被迫停止运行。此外，熔化的灰渣对锅炉的耐火衬砖具有很大的侵蚀性，这是锅炉更换衬砖的主要原因。煤灰熔融温度的高低，是电厂运行中的重要性能指标。

煤灰的熔融温度，习惯上称为煤的灰熔点，这种叫法显然不科学。因为煤灰不是纯净物，没有固定的熔点。煤灰的化学成分比较复杂，其含量可按下列顺序排列： SiO_2 ， Al_2O_3 ， Fe_2O_3 ， CaO ， MgO 等。这些氧化物在纯净状态时，熔点都很高。但在高温下，各种氧化物在熔化过程中形成共熔体，使熔点温度较低。煤灰成分不同，熔融温度也不同。

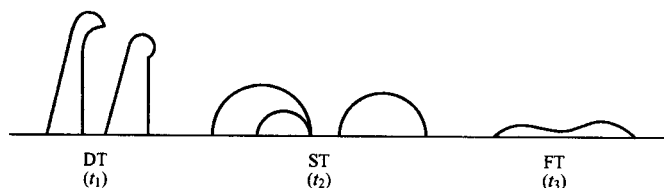


图 1-2 灰锥的变形和表示熔融性的三个特征温度

DT—变形温度，灰锥顶端开始变圆或弯曲时的温度；
ST—软化温度，锥顶变至锥底或变成球形或高度等于或小于底长时对应的温度；FT—流动温度，锥体熔化成液体或厚度在 1.5mm 以下时对应的温度

煤灰受热时由固态逐渐向液态过渡，称为煤灰的熔融性。目前世界各国表示熔融性的方法不尽相同，但都有严格规定的试验条件。我国采用的方法是国际上应用较为广泛的角锥法。将煤灰用糊精在灰锥模中制成一定尺寸的正三角形锥体（高 20mm，底边为 7mm），将灰锥置于弱还原性介质中，拨动升温开关，以一定速度升温，灰锥开始熔化时，

机械强度随之减弱，产生一定的变形。规定用变形、软化、流动三种形态变化的温度来表示煤灰的熔融性，如图 1-2 所示。

变形温度（煤的产地不同，变形不同，有的煤弯尖，有的煤圆尖）以 DT 表示；软化温度（锥尖触及托板，锥体变成球形或高度 $\leq$ 底长的半球形时的温度）以 ST 表示；流动温度也称熔化温度（灰锥完全熔化或展开成高度 $\leq 1.5\text{mm}$ 的薄层时的温度），以 FT 表示。工业上用 ST 作为煤灰的熔融性温度。我国煤灰的熔融性温度普遍较高，一般在 $1200\sim 1500^\circ\text{C}$ 之间。

DT，ST，FT 间的温度间隔是有实际意义的。如果这个温度间隔很大，意味着煤灰的固相和熔融状态的液相共存的温度区间较宽，这样的灰渣称为长渣；反之，称为短渣。一般规定 DT 和 ST 温度差为 $200\sim 400^\circ\text{C}$ 时，即为长渣；温度差为 $100\sim 200^\circ\text{C}$ 时，则为短渣。长渣难以凝结，冷却时，可以在一段较长时间内保持黏性，因而在锅炉中结渣的机会多。短渣冷却时很快凝结，故不易在锅炉中结渣。

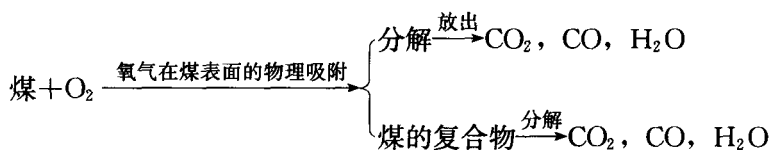
四、煤的化学性质

煤的化学性质是研究煤质和煤的利用的重要内容。不同种类的煤，化学性质不同，它们的用途也不同。

（1）煤的氧化和风化。煤在空气中缓慢地和 O_2 化合的反应称为煤的氧化，氧化后的煤

会失去光泽，块度、硬度均变小。煤在空气中长期堆放，氧化过程的热不能很快消失，煤堆温度越来越高，当达到其燃点时，煤堆会自燃。离地表近的煤层受空气和水的影响也会氧化，这种在煤层中氧化的煤叫做风化煤。

煤的氧化和风化的过程大致如下：



煤氧化后，无论物理性质还是化学性质，都会发生变化，且氧化越深，变化越大。

1) 外观色泽改变。在未氧化前，煤中的黄铁矿和白铁矿均以 FeS_2 的化学组分存在，但氧化后， FeS_2 变 FeSO_4 和 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ，最后成为红褐色的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ，并有 FeSO_4 结晶、 CaSO_4 、 CaCO_3 、页岩和黏土等矿物附着在煤的表面，成白锈色。

2) 表面性质的改变。煤氧化后，表面的一OH，—COOH 基团增加，煤的亲水性增加，但可浮性降低。因此，粉煤浮选时的回收率降低，且浮选精煤的脱水性变坏。

3) 化学性质的改变。由于亲水基团的增加，因此，煤中的结晶水增加。由于氧化过程中放出热量，所以煤氧化后，发热量一般都降低。烟煤存放一年后，发热量将降低 1%~5%；褐煤堆放一年后，会降低 20% 左右。若保存得法，发热量降低也少。S 含量一般稍有降低，但大部分是 FeS_2 氧化成 FeSO_4 ，C、H 含量减少，由于亲水基团的增加，主要是呈 —COOH、—OH 形态的氧增加。

(2) 煤的燃点。也叫着火点。测定出煤的燃点，以便确定煤是否容易自燃，同时还要判定它是否容易着火以及选择合适的着火温度。燃点还与煤化程度有关，一般煤的燃点随煤化程度的增加而升高。如褐煤的燃点多在 250~450℃，烟煤的燃点多在 400~500℃，无烟煤的燃点多在 700~800℃。

(3) 煤的磺化、卤化和氢化。煤与 H_2SO_4 (浓) 或发烟硫酸能起磺化反应，生成磺化煤。煤的磺化过程是一 SO_3H 基团引入到煤的结构中去，而且在加热的条件下， H_2SO_4 (浓) 也是氧化剂，它能把煤中芳环上的 — CH_3 、 C_2H_5 氧化成 —COOH。这些基团中的 H^+ ，都能与金属离子进行离子交换反应，所以磺化煤是阳离子交换剂，可应用于水的软化。

煤的卤化是煤的结构中引入 Cl^- 、 F^- 等离子。煤进行卤化的同时，还伴随有氧化作用，使煤分子的键链断裂变成较低分子。

煤经过氟化后得到油类物质，在电工上可作为绝缘用油。煤经氯化后，可得 CCl_4 ，它是一种溶剂。

煤的氢化是煤在 300~500℃ 下，用 20MPa 的氢气，使煤液化的过程。其实质是降低煤的 C/H 的过程，当煤的 C/H 达到和石油的 C/H 相当时，煤也就变成了人造石油了。

煤的加氢除了可以得到液体燃料外，还可得到化工产品。此外，还可用煤的加氢来改变煤的黏结性，以至原来不能单独炼焦的煤，可以炼焦，同时还能使煤减灰、脱硫。如经适度氢化处理的煤叫做溶剂精炼煤，它是一种低灰、低硫的清洁燃料。

(4) 煤的热分解。将煤隔绝空气加热，随温度的升高煤发生一系列的分解反应。现把热分解产物表示如下：