

# 洁净煤发电技术 (第二版)

主编 阎维平 参编 周月桂 刘洪宪 邢德山 李永光

JIEJINGMEI  
FADIAN  
JISHU



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 洁净煤发电技术

UPPER MERIDIAN ENERGY SERVICES  
UPPER MERIDIAN ENERGY SERVICES

P A D I A N  
J I S H U



UPPER MERIDIAN ENERGY SERVICES

# 洁净煤发电技术 (第二版)

主编 阎维平 参编 周月桂 刘洪宪 邢德山 李永光



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书讲述了目前已经投入商业运营或处于开发阶段的主流洁净煤发电技术的基本原理,介绍了各种洁净煤发电装置的组成、系统、设计和运行等方面的特点,主要目的是帮助读者尽可能全面地了解 and 掌握当前洁净煤发电技术的基本专业知识和最新进展。

全书共分十四章,除第一章绪论外,其余十三章分别介绍了各种主流洁净煤发电技术及其相关的主要技术领域,包括动力用煤的洗选、燃煤粉锅炉低氮氧化物燃烧、烟气脱硫与脱氮、超临界参数锅炉、循环流化床燃煤锅炉、煤的转化、联合循环发电装置、整体煤气化联合循环、增压流化床联合循环、燃料电池与二氧化碳排放控制,最后分析了洁净煤发电技术的发展前景。

本书可供工作在这一领域内的工程技术人员和技术管理人员阅读参考,可作为高等学校电厂热能动力专业的教材,也可作为热能工程、工程热物理、环境工程等相关专业本科生的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

洁净煤发电技术/阎维平主编:周月桂等编. —2版. —北京:中国电力出版社,2008.11

ISBN 978-7-5083-8017-9

I. 洁… II. ①阎…②周… III. 火电厂-煤-燃烧-净化-技术  
IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 153945 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>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2002年2月第一版

2008年11月第二版 2008年11月北京第四次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17.25印张 385千字

印数 6901—9900册 定价 29.00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

## 第二版前言

2000年以来,我国国民经济对电力的需求快速增长,作为主要电源供应的燃煤发电厂装机容量迅速增加,我国电煤消耗量已接近全国原煤产量的50%,并将继续增加,因此,许多与燃煤发电有关的经济性、区域性污染与全球性气候变暖的环境问题更加突出。

我国的洁净煤发电技术正处于迅速发展阶段,其水平已经达到国际先进水平。与此同时,新的洁净煤发电技术与创新性概念不断出现,若干技术逐渐被淘汰,因此,在火力发电行业普及并不断更新洁净煤发电技术的知识,对推动我国洁净煤发电技术的发展和应用的显得尤为重要。

本书第二版是在阎维平2001年编著的《洁净煤发电技术》的基础上,紧密结合当前世界上洁净煤发电技术的最新发展,进行了比较全面的补充、更新与完善,力求尽可能全面地介绍当前国内外在洁净煤发电技术领域的开发与应用成果。

本书第二版由华北电力大学阎维平主编。

本书新增了燃煤火电厂烟气脱氮装置、超临界参数燃煤锅炉与洁净煤发电技术的发展前景分析等三章内容,删去了燃煤磁流体—蒸汽联合循环一章,较大篇幅地改写了整体煤气化联合循环。

阎维平编写第一章、第三章、第十章、第十一章与第十四章;上海交通大学周月桂修订增补了第四章、第九章与第十三章;东北电力大学刘洪宪编写了第六章;山西大学工程学院邢德山修订增补了第二章与第八章,编写了第五章;上海电力学院李永光修订增补了第七章与第十二章。上海交通大学姜秀民教授、太原理工大学金燕教授、东北电力大学吕太教授等审阅了部分章节,均提出了很多宝贵意见,在此表示深切的感谢。阎维平策划与统稿全书。

除了书末所列的参考文献外,作者在编写时还参阅了近年来我国电力等行业工程技术人员总结和撰写的论文和一些非正式出版资料,恕难一一详列,在此谨向有关专家致谢。

本书的出版得到了华北电力大学与上海交通大学的资助。

编者

2008年8月

# 第一版前言

近年来,我国国民经济增长迅速,对电力的需求增长更快,作为主要电源供应的燃煤发电厂逐年增加,我国电力工业煤炭的消耗量已经接近全国原煤产量的40%,因此,许多与燃煤有关的区域性和全球性的环境问题越来越突出。

中国的洁净煤技术是以煤炭的洗选为源头,以高效、低污染燃烧与发电为核心的技术体系,洁净煤发电技术为重中之重。

在我国,洁净煤发电技术正处于起步和迅速发展阶段,工作在这一领域的工程技术人员需要对洁净煤发电技术的深入了解,因此,在火力发电行业普及洁净煤发电技术的知识,对推动我国洁净煤发电技术的发展和應用显得尤为重要。但目前还没有比较系统和全面地介绍洁净煤发电技术的参考科技书。为此,作者在多年从事该领域的教学和科研工作的基础上,参考了大量的国内外文献和工程技术人员总结的经验资料写成了这本《洁净煤发电技术》,力求尽可能全面地介绍当前国内外在洁净煤发电技术领域的开发与应用成果。

洁净煤发电技术发展迅速且领域广阔,所涉及的内容也较为广泛,加之作者能够深入了解的领域有限,所以,难免出现错误和欠缺,敬请读者批评指正。

编者认为读者已经基本掌握了热能工程学科的基础知识和相关专业的内容,对电站锅炉的原理等基本内容有较系统的了解,也由于篇幅的限制,本书不再介绍涉及洁净煤发电的一些相关基础和专业知識,尽量减少烦琐的描述和复杂的理论推导,读者可以查阅有关的专业书籍和文献。

本书第二章与第六章由煤炭科学研究院北京煤炭化学研究所陈文敏研究员审阅,第三章由国家电力公司热工研究院毕玉森高级工程师审阅,第四章由华北电力大学李守信教授审阅,第五章由东北电力大学姜秀民教授审阅,第七、八、九与十一章由国家电力公司热工研究院许世森高级工程师审阅,第十章由清华大学姚强教授审阅。各位专家均提出了很多宝贵意见,使本书避免不少的错误和疏漏,在此表示深切的感谢。

除了书末所列的参考文献外,作者在编写时还参阅了近年来我国电力等行业工程技术人员总结和撰写的一些非正式出版资料,恕难一一详列,在此谨向有关专家致谢。

本书的出版得到了华北电力大学的资助。

编者

2001年9月

# 目 录

第二版前言

第一版前言

<b>第一章 绪 论</b> .....	1
第一节 能源供应与消耗的基本特点.....	1
第二节 燃煤发电的污染物排放与危害.....	1
第三节 洁净煤发电技术发展概况.....	5
<b>第二章 火力发电动力用煤的洗选加工</b> .....	8
第一节 我国动力用煤的原煤质量及加工概述.....	8
第二节 重介质选煤 .....	11
第三节 跳汰选煤 .....	12
第四节 浮游选煤 .....	13
第五节 空气重介质流化床干法选煤 .....	14
第六节 动力用煤的选煤流程 .....	15
第七节 煤矸石及其利用 .....	17
<b>第三章 常规燃煤粉火电厂低氮氧化物燃烧技术</b> .....	19
第一节 概 述 .....	19
第二节 煤燃烧中 $\text{NO}_x$ 生成机理和降低 $\text{NO}_x$ 的理论依据 .....	21
第三节 燃煤粉电站锅炉降低 $\text{NO}_x$ 的燃烧技术措施.....	26
第四节 常规火电厂氮氧化物排放控制技术改造存在的问题与对策 .....	35
<b>第四章 燃煤火电厂烟气脱硫技术</b> .....	36
第一节 烟气脱硫技术概述 .....	36
第二节 烟气脱硫剂的种类和特点 .....	38
第三节 电站锅炉烟气脱硫工艺的主要技术、经济和环境指标 .....	40
第四节 湿法烟气脱硫技术 .....	44
第五节 海水烟气脱硫技术 .....	55
第六节 喷雾干燥法烟气脱硫技术 .....	57
第七节 炉内喷钙尾部增湿活化烟气脱硫技术 .....	60
第八节 循环流化床烟气脱硫技术 .....	64

<b>第五章 燃煤电厂烟气脱氮装置</b> .....	67
第一节 烟气脱氮技术概述 .....	67
第二节 选择性催化还原 NO <sub>x</sub> 的基本原理 .....	69
第三节 选择性催化还原 NO <sub>x</sub> 的工艺流程 .....	73
第四节 选择性催化还原 NO <sub>x</sub> 的催化剂与还原剂 .....	75
第五节 选择性催化还原 NO <sub>x</sub> 的主要设备 .....	79
第六节 电子束辐照氨法烟气脱硫脱氮技术 .....	81
第七节 活性炭联合脱硫脱氮技术 .....	83
<b>第六章 超临界参数燃煤锅炉</b> .....	87
第一节 超临界锅炉的发展现状与趋势 .....	87
第二节 超临界锅炉的工作原理和基本形式 .....	91
第三节 超临界锅炉的启动特性和启动旁路系统 .....	94
第四节 超临界机组与亚临界机组的主要区别 .....	101
第五节 超临界汽轮机叶片、汽封及阀门技术 .....	104
<b>第七章 循环流化床燃煤锅炉</b> .....	107
第一节 循环流化床燃煤锅炉的基本原理和特点 .....	107
第二节 循环流化床锅炉的构成和类型 .....	115
第三节 循环流化床燃烧与污染控制 .....	118
第四节 循环流化床锅炉的设计特点 .....	123
第五节 循环流化床锅炉的运行控制特点 .....	131
第六节 循环流化床锅炉主要辅助系统及设备 .....	136
第七节 300MW 循环流化床锅炉的结构特点 .....	142
<b>第八章 煤的转化技术</b> .....	148
第一节 煤炭转化技术概述 .....	148
第二节 煤的气化原理 .....	150
第三节 煤气化产物的分类与特点 .....	153
第四节 衡量煤气化炉的技术经济指标 .....	154
第五节 煤的气化工艺及其设备 .....	155
第六节 煤气的净化处理 .....	159
第七节 煤的间接液化 .....	162
第八节 煤的直接液化 .....	165
<b>第九章 燃气—蒸汽联合循环</b> .....	170
第一节 燃气—蒸汽联合循环的基本原理 .....	170
第二节 燃气—蒸汽联合循环电站的类型及其特点 .....	173
第三节 燃气轮机 .....	179



第四节	余热锅炉	186
第五节	汽轮机	193
第六节	分布式能源系统	195
<b>第十章</b>	<b>整体煤气化联合循环</b>	201
第一节	概述	201
第二节	整体煤气化联合循环系统与工艺流程	202
第三节	整体煤气化联合循环的特点	203
第四节	整体煤气化联合循环系统的煤气化设备	206
第五节	整体煤气化联合循环系统的空气分离制氧系统	212
第六节	整体煤气化联合循环系统的燃气轮机、余热锅炉与蒸汽轮机	214
第七节	整体煤气化联合循环系统的启动与运行特性	218
第八节	先进整体煤气化联合循环系统	222
<b>第十一章</b>	<b>增压流化床燃煤联合循环</b>	225
第一节	增压流化床燃煤联合循环的发展与现状	225
第二节	增压流化床燃煤联合循环的原理和特点	226
第三节	增压流化床燃煤联合循环电站的组成	227
第四节	增压循环流化床燃煤联合循环电站的特点	232
第五节	捕集 CO <sub>2</sub> 的燃煤增压流化床锅炉整体化发电	234
<b>第十二章</b>	<b>燃料电池</b>	238
第一节	概述	238
第二节	燃料电池的工作原理	239
第三节	燃料电池发电系统	240
第四节	燃料电池的类型	245
第五节	燃料电池交流发电系统	248
<b>第十三章</b>	<b>二氧化碳排放与控制技术</b>	250
第一节	概述	250
第二节	烟气再循环 O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 煤粉燃烧技术	253
第三节	化学链燃烧技术	255
第四节	高温空气燃烧技术	257
<b>第十四章</b>	<b>洁净煤发电技术的发展前景分析</b>	260
	<b>参考文献</b>	265

## 第一章

## 绪论

## 第一节 能源供应与消耗的基本特点

全球煤炭能源储量丰富,按目前的煤炭开采水平,可供开采 140~150 年。目前,天然气和原油的价格已经是煤的 10 倍以上,且有继续上升的趋势。因此,从目前到 21 世纪中期,煤将是全世界最主要的提供电力的能源。

我国拥有丰富的煤炭资源,是世界上最大的煤炭生产国和消费国,也是世界上少数几个以煤为主要能源的国家之一。在我国的能源生产和消费结构中,煤炭一直占主导地位,煤炭产量占全国一次能源生产总量的 75% 左右,2007 年我国生产原煤达 25.4 亿 t。在今后相当长的时间内,煤炭的利用仍将在我国能源结构中占据十分重要的位置。

在我国,经过洗选加工的原煤仅为 30% 左右,除去炼焦、造气等用煤外,用于直接燃烧产生动力和热能的动力用煤约占原煤总产量的 4/5,而且我国原煤的产量还将大幅度增加,以适应国民经济迅速发展的需要。因此,煤炭的开发及利用对环境的压力越来越大,且与日趋严格的环保标准的矛盾也将越来越突出。

我国已经形成并将持续以煤为主的电力生产格局,火力发电的原煤消耗量占我国原煤产量的百分数在 2007 年已接近 50%,某些工业化国家的这一比例达到 85% 左右。随着我国国民经济的迅速发展与人民生活水平的提高,以及不断采用先进的能源利用技术,增大发电用煤的比例是必然的趋势,预计在 2010 年将达到 60%~70%。因此,在我国,电力工业清洁高效利用煤炭,走电力增长与环境协调发展的道路,是保证国民经济可持续发展和保护环境的最重要的课题。

## 第二节 燃煤发电的污染物排放与危害

由于矿物燃料被以燃烧的方式大量使用,已经形成公认的全球性四大公害:大气烟尘、酸雨、温室效应、臭氧层破坏,煤炭的燃烧构成其中的主要部分。燃煤火力发电装置排放的对人类生存环境及全球气候构成直接危害的主要污染物有粉尘、硫氧化物( $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )及二氧化碳( $\text{CO}_2$ )。

我国火电厂动力用煤的特点是高灰分、高硫分煤的比例较大,火电厂污染物排放的总

量大而且集中。因此,火电厂的污染物排放控制工作备受重视。

长期以来,大部分燃煤火电厂锅炉的粉尘排放控制已得到足够的重视,特别是现代化大型火力发电厂的静电除尘装备比较完善,大部分电厂的除尘效率已高达98%~99%,在控制粉尘排放方面取得了较好的成效,我国火电厂的烟气粉尘排放浓度一般均能够满足当前的国家排放标准。但是,现广泛装备的静电除尘设备均难以除去燃煤排烟中超细、超轻并易分散的粉尘( $5\mu\text{m}$ 以下),这种粉尘随风飘荡,可以长期滞留在大气中,对人体存在的潜在危害极大。近年来,还发现微小粉尘携带的痕量重金属等有害化合物(如汞、砷、氟等)对环境的影响也很大。

近年来,大部分大型火电厂发电机组均投运了或开始安装各种烟气脱硫装置,但大部分电厂均没有采取任何烟气脱除 $\text{NO}_x$ 的技术措施。目前,我国的 $\text{CO}_2$ 排放量已经紧随美国之后成为世界第二排放大国,燃煤火电厂减排 $\text{CO}_2$ 的任务也已经提到议事日程上来。因此,与燃煤有关的区域性环境污染与全球性的气候变化问题已成为我国电力工业发展的一个主要制约因素。

### 一、燃烧产生的硫氧化物的危害

燃烧排烟产物中的硫氧化物主要是 $\text{SO}_2$ 和极少量的 $\text{SO}_3$ ,在大气环境中, $\text{SO}_2$ 可以进一步转变为 $\text{SO}_3$ 并形成硫酸雾。排入大气环境中的 $\text{SO}_2$ 严重恶化了人类赖以生存的空间和环境。

$\text{SO}_2$ 对人体健康有明显的危害, $\text{SO}_2$ 对人体健康的影响是在呼吸道黏膜上形成亚硫酸和硫酸,刺激人体组织,引起分泌物增加或发生炎症。

$\text{SO}_2$ 对植物的危害表现在破坏叶皮上毛细孔, $\text{SO}_2$ 进入叶片并溶解于水,粘接在细胞壁的表面,使植物受害,叶片发黄,严重时大量叶片枯萎,导致植物死亡。

$\text{SO}_2$ 及其在大气环境中转化成的硫酸雾可被吸附在材料的表面,具有很强的腐蚀作用,会使金属设备、建筑物等遭受腐蚀,大大降低其使用寿命。

控制电站锅炉 $\text{SO}_2$ 的排放可采用多种方式,主要包括:在煤燃烧前进行洗选煤加工,脱除部分硫分;在煤的气化与液化过程中脱硫;在煤的燃烧过程中添加脱硫剂吸收 $\text{SO}_2$ ;采取烟气脱硫净化等技术。

### 二、燃烧产生的氮氧化物的危害

燃烧设备排放的氮氧化物主要是指 $\text{NO}$ 和少量的 $\text{NO}_2$ ,还包括 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2\text{O}_3$ 等,统称为 $\text{NO}_x$ 。 $\text{NO}_x$ 对人类自身及生存环境的直接和间接危害已远远超过其他污染物。除了锅炉燃烧设备以外,其他高温燃烧设备也均会产生和排放 $\text{NO}_x$ ,例如,汽车尾气排放的 $\text{NO}_x$ ,在工业发达国家要占全部燃烧设备排放量的40%左右。

排入大气的 $\text{NO}$ 会被迅速地氧化成为 $\text{NO}_2$ ,经紫外线照射并与排烟中的气态碳氢化合物接触,即可生成一种浅蓝色的有毒烟雾,称为光化学烟雾。光化学烟雾对人的眼、鼻、心、肺及造血组织等均有强烈的刺激和损害作用,氮氧化物在大气中的浓度大于 $0.05\times 10^{-6}$ 就会对人体产生危害作用。

$\text{NO}_x$ 会在地球表面的大气层中形成臭氧,臭氧进入植物叶片并溶解于水,粘接在细胞壁的表面,对植物造成严重的伤害。臭氧对人体也十分有害。

氧化二氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 虽然不是燃烧过程中的主要产物, 但它是形成温室效应的气体, 并且会破坏大气臭氧层, 造成紫外线对人体的危害。

在大气中,  $\text{NO}_x$  会形成  $\text{HNO}_3$ , 即硝酸雾, 也是形成酸雨的一个重要原因。硫氧化物和氮氧化物所造成的酸雨是世界公认的重大环境问题之一, 酸雨会破坏森林植被, 造成土壤酸化、贫瘠, 物种退化, 农业减产, 还会使水体造成污染, 鱼类死亡。近年来, 酸雨在我国呈急剧蔓延之势, 酸雨所形成的污染已经不再是局部地区的问题, 而是一个全球性的问题。

研究和实践都表明, 氮氧化物的排放量与燃烧过程的组织方式有密切关系, 因此, 氮氧化物是最有希望通过燃烧技术措施的改进而得到控制的燃烧污染物, 但是, 降低  $\text{NO}_x$  排放的原则又多与强化燃烧的传统原则相矛盾, 使传统的燃烧方式面临新的挑战。

### 三、温室气体的危害

温室气体主要是指二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ), 其他还有甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 等气体,  $\text{CO}_2$  与  $\text{NO}_x$  主要产生于矿物燃料的燃烧过程, 而这些矿物燃料构成了全球能量需求的 90% 以上, 其中煤和油都是含碳量很高的燃料, 其燃烧产物主要是  $\text{CO}_2$ 。

关于温室气体排放对全球大气环境及全球气候变暖是否存在重要影响的问题, 在十几年前还是一个争论不休的学术问题, 在今天, 已由多方面的事实和研究所证实。人类在从矿物燃料中获取能源的同时所排放的大量温室气体已构成使全球大气气候变化的最主要的因素, 其对人类生存环境的深远影响已远远超过其他限于局部的大气环境污染的影响。

具有惰性气体性质的  $\text{CO}_2$  等温室气体一经形成, 其被森林、土壤或海洋自然吸收的速率极其缓慢, 取决于不同的条件和环境,  $\text{CO}_2$  等温室气体的寿命期可长达 50~200 年, 而大自然的吸收能力终归有限。

$\text{CO}_2$  等温室气体所造成的全球温室效应已经众所周知。通过各种技术措施 (例如: 提高能量的转换效率; 采用创新性的燃烧与能量转换技术; 采取有效的节能技术措施; 从燃烧产物中分离、捕集并大量长期存储或利用  $\text{CO}_2$  等), 减缓以至最终控制能源与电力生产中的  $\text{CO}_2$  对大气的排放, 保护人类赖以生存的地球环境, 是全球能源与电力生产面临一个前所未有的挑战。

### 四、我国火电厂大气污染物排放标准

我国从 2004 年 1 月 1 日开始实施国家环境保护总局与国家质量监督检验检疫总局 2003 年 12 月 30 日颁布的 GB 13223—2003 《火电厂大气污染物排放标准》, 该标准对火力发电锅炉烟尘、二氧化硫与氮氧化物最高允许排放浓度规定了更严格、更科学合理的排放控制要求。

该标准按三个时段对不同时期的火电厂建设项目分别规定了排放控制要求:

1996 年 12 月 31 日前建成投产或通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目, 执行第 1 时段排放控制要求。

1997 年 1 月 1 日起至 GB 13223—2003 实施前通过建设项目环境影响报告书审批的新

建、扩建、改建火电厂建设项目，执行第 2 时段排放控制要求。

2004 年 1 月 1 日起，通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目，执行第 3 时段排放控制要求。

1. 烟尘最高允许排放质量浓度（以下简称浓度）和烟气黑度限值（见表 1-1）

表 1-1 火力发电锅炉烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值

时段	烟尘最高允许排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> )					烟气黑度 (林格曼黑度, 级)
	第 1 时段		第 2 时段		第 3 时段	
实施时间	2005 年 1 月 1 日	2010 年 1 月 1 日	2005 年 1 月 1 日	2010 年 1 月 1 日	2004 年 1 月 1 日	2004 年 1 月 1 日
燃煤锅炉	300 <sup>①</sup>	200	200 <sup>①</sup>	50	50	1.0
	600 <sup>②</sup>		500 <sup>②</sup>	100 <sup>③</sup>	100 <sup>③</sup>	
燃油锅炉	200	100	100	50	50	

- ① 县级及县级以上城市建成区及规划区内的火力发电厂锅炉执行该限值。
- ② 县级及县级以上城市建成区及规划区以外的火力发电厂锅炉执行该限值。
- ③ 在本标准实施前，环境影响报告书已批复的脱硫机组，以及位于西部非两控区的燃用特低硫煤（入炉燃煤收到基硫分小于 0.5%）的坑口电厂锅炉执行该限值。
- ④ 以煤矸石等为主要燃料（入炉燃料收到基低位发热量小于或等于 12550kJ/kg）的资源综合利用火力发电锅炉执行该限值。

2. 二氧化硫最高允许排放浓度限值（见表 1-2）

表 1-2 火力发电锅炉二氧化硫最高允许排放浓度限值 mg/m<sup>3</sup>

时段	第 1 时段		第 2 时段		第 3 时段
	实施时间	2005 年 1 月 1 日	2010 年 1 月 1 日	2005 年 1 月 1 日	2010 年 1 月 1 日
燃煤锅炉及 燃油锅炉	2100 <sup>①</sup>	1200 <sup>①</sup>	2100	400	400
			1200 <sup>②</sup>	1200 <sup>②</sup>	800 <sup>③</sup>
					1200 <sup>④</sup>

- ① 该限值为全厂第 1 时段火力发电锅炉平均值。
- ② 在本标准实施前，环境影响报告书已批复的脱硫机组，以及位于西部非两控区的燃用特低硫煤（入炉燃煤收到基硫分小于 0.5%）的坑口电厂锅炉执行该限值。
- ③ 以煤矸石等为主要燃料（入炉燃料收到基低位发热量小于或等于 12550kJ/kg）的资源综合利用火力发电锅炉执行该限值。
- ④ 位于西部非两控区的燃用特低硫煤（入炉燃煤收到基硫分小于 0.5%）的坑口电厂锅炉执行该限值。

该标准规定的允许排放浓度，在国际同类标准体系中处于中上等水平，世界上允许排放浓度最低的某些发达国家亦为 400mg/m<sup>3</sup>。根据我国目前的实际状况，该排放浓度限值对绝大多数火力发电厂均必须建设烟气脱硫装置。

3. 氮氧化物最高允许排放浓度限值（见表 1-3）

实测的火电厂烟尘、二氧化硫和氮氧化物排放浓度，必须按式（1-1）进行折算。燃煤锅炉按过量空气系数  $\alpha=1.4$  进行折算，燃油锅炉按过量空气系数  $\alpha=1.2$  进行折算，燃气轮机组按过量空气系数  $\alpha=3.5$  进行折算，相当于  $O_2=6\%$  时的浓度值，即

$$c = c' \times (\alpha' / \alpha) \quad (1-1)$$

式中  $c$ ——折算的烟尘、二氧化硫和氮氧化物排放浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$c'$ ——实测的烟尘、二氧化硫和氮氧化物排放浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$\alpha'$ ——实测的过量空气系数;

$\alpha$ ——规定的过量空气系数。

表 1-3 火力发电锅炉及燃气轮机组氮氧化物最高允许排放浓度限值  $\text{mg}/\text{m}^3$

时 段		第 1 时段	第 2 时段	第 3 时段
实施时间		2005 年 1 月 1 日	2005 年 1 月 1 日	2004 年 1 月 1 日
燃煤锅炉	$V_{\text{daf}} < 10\%$	1500	1300	1100
	$10\% \leq V_{\text{daf}} \leq 20\%$	1100	650	650
	$V_{\text{daf}} > 20\%$			450
燃油锅炉		650	400	200
燃气轮机组	燃 油			150
	燃 气			80

该标准的排放限额与工业发达国家的现行标准还有一定的差距。欧盟 2001 年提出的  $\text{NO}_x$  的最低排放标准为  $200\text{mg}/\text{m}^3$ , 美国的现行最低排放标准为  $350\text{mg}/\text{m}^3$ , 日本则为  $120\text{mg}/\text{m}^3$ 。没有采取任何降低  $\text{NO}_x$  排放技术措施的燃煤粉的常规电站锅炉的  $\text{NO}_x$  排放值明显高于标准中的规定值。

### 第三节 洁净煤发电技术发展概况

洁净煤利用技术包括从煤炭开发到利用的所有技术领域, 其基本领域包括煤炭加工、煤炭燃烧、煤炭转化、污染物及  $\text{CO}_2$  排放控制、固体废弃物处理和利用。

洁净煤发电技术是洁净煤利用技术中的一个最主要的内容, 旨在最大限度地发挥煤作为发电能源的潜能, 同时实现最少的污染物及  $\text{CO}_2$  排放, 达到煤的高效、清洁利用和发电的目的。提高燃煤发电的能量转换效率与环境保护已经成为全球未来电力工业发展面临的两大迫切任务。

从 20 世纪 80 年代起, 包括我国在内的许多国家从能源利用和保护环境的长远目标考虑, 相继开展了洁净煤利用技术的研究与开发工作, 创新性技术与概念不断涌现, 在洁净煤发电技术各个领域的工程应用中取得了重大进展。目前, 我国新建的大型火力发电机组所采用的洁净煤发电技术已经处于国际先进水平, 在部分领域已经接近国际领先水平。

洁净煤发电的任务主要是在发电设备中实现煤的清洁燃烧与高效利用的发电技术, 概括起来, 可划分为以下几个主要技术领域。

#### 1. 煤炭利用前的洗选处理技术

煤炭利用前的净化处理技术, 就是对原煤进行加工处理以改进煤炭的品质, 提高燃煤的效率, 减少污染物排放, 因此, 煤炭利用前的净化处理是洁净煤发电的源头技术。最主



要的技术措施为选煤,以降低原煤中的灰分与硫分等杂质的含量,提高煤质。

## 2. 煤炭燃烧过程中的洁净燃烧技术

煤炭的高效洁净燃烧是实现洁净煤发电的一个重要技术措施。在燃煤过程中排放的众多污染物中,危害很大的  $\text{NO}_x$  是唯一可以通过改进燃烧方式来降低其排放量的气体污染物,通过合理地组织煤的燃烧过程,来减少在燃料燃烧阶段  $\text{NO}_x$  的生成量,以较低的代价来较大地降低  $\text{NO}_x$  的排放,取得事半功倍的效果,因此,是比较经济、合理且易于推广的技术措施。通常,煤的洁净燃烧技术又称为低氮氧化物燃烧(或低  $\text{NO}_x$  燃烧)技术。

煤的洁净燃烧包括两个主要领域:一是采取先进的低  $\text{NO}_x$  燃烧技术改进传统的煤粉燃烧方式;二是新型的煤燃烧与发电技术,目前主要有循环流化床燃烧技术、整体煤气化联合循环发电、增压流化床联合循环发电、燃料电池技术等。其中一些技术不仅可以大幅度减少  $\text{NO}_x$  的排放,还具有易于脱除  $\text{SO}_2$  与  $\text{CO}_2$  的技术优势,同时,燃煤发电效率也得到了不同程度的提高。

## 3. 烟气净化技术

对常规燃煤粉的电站锅炉,在炉膛内的燃烧环境下,几乎煤中所有的可燃硫分均会迅速转化成为  $\text{SO}_2$ 。煤粉炉的燃烧温度很高,现在尚没有可以在炉膛内的燃烧过程中高效脱除  $\text{SO}_2$  的可行技术措施,也不可能通过改进炉内燃烧过程来抑制  $\text{SO}_2$  的生成,因此,就目前的技术水平和现实能力而言,烟气脱硫是降低电站锅炉  $\text{SO}_2$  排放量的比较有效的技术手段。通过烟气净化技术控制硫氧化物的排放已取得共识,燃煤火电厂烟气脱硫是目前世界上应用最广泛的一种控制  $\text{SO}_2$  排放的技术,因此,近年来,脱硫装置的采用和技术的发展非常迅速。

烟气脱硫通常使用石灰或石灰石等吸收剂,在干态或湿态下,与烟气接触进行脱硫反应。由于燃煤电厂所产生的烟气量巨大,一般达每小时几十万到几百万立方米,而烟气中的  $\text{SO}_2$  的浓度却十分低,通常每立方米烟气中只含有 1000mg 左右,因此,脱硫费用是很高的。另外,大部分烟气脱硫装置均会产生脱硫副产品,因此,实施烟气脱硫技术的同时还需考虑脱硫产物的有效回收与处理,以防止二次污染。

对氮氧化物来说,虽然合理有效地组织煤的燃烧过程,可以较大幅度地降低  $\text{NO}_x$  的生成量,但是,在排放限制日益严格的现状下,炉内燃烧降低  $\text{NO}_x$  的技术措施已经不能满足要求,必须采取烟气脱氮的技术措施。目前,烟气脱氮技术的成熟程度与应用规模还远不如烟气脱硫技术,而且其设备投资和运行费用也比烟气脱硫高。

世界各国烟气净化技术正朝着进一步简化烟气净化装置、减少投资、降低运行和维护费用的目标努力。实现脱硫脱氮一体化的联合烟气净化技术是目前的重要研究课题,也是未来烟气净化的发展方向。

煤中含有多种痕量重金属,以汞为主要代表,是极易挥发的元素,毒性极大。我国煤的平均汞含量为 0.22mg/kg,在炉内燃烧中大多以气相形式存在,排入大气环境。汞在自然界没有自净与生物降解能力,在大气中的停留时间为 1~2 年,排入水体后通过生物链不断富集,对动植物的生命活动造成很大的危害。燃煤烟气脱汞已经成为烟气净化的一个新内容。

#### 4. CO<sub>2</sub> 减排技术

能源资源的开发利用促进了人类的发展,同时也带来了严重的生态环境问题,化石燃料的使用是 CO<sub>2</sub> 等温室气体增加的主要来源,科学观测表明,地球大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度已从工业革命前的  $280 \times 10^{-6}$  (体积分数) 上升到目前的  $379 \times 10^{-6}$  (体积分数),全球气温也在近百年内升高了  $0.74^{\circ}\text{C}$ ,特别是近 30 年来升温明显,全球变暖已经并将持续对地球的自然生态环境和人类赖以生存的环境造成前所未有的影响,使人类社会面临着巨大的生存环境恶化的威胁。据科学预测,到 2050 年,如果还采用当今传统的燃煤技术,大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度将达到  $550 \times 10^{-6}$  (体积分数),人类将不能在地球上继续使用碳基化石燃料。

因此,在未来洁净煤发电技术的发展中,既要提高能源的转换效率,减排常规污染物,又必须整合 CO<sub>2</sub> 的减排、捕集与封存,需要考虑减排污染物、汞与 CO<sub>2</sub> 的经济性协调配合,有望形成以控制 CO<sub>2</sub> 排放为基本出发点、含 CO<sub>2</sub> 减排的一体化污染物脱除技术或近零排放的未来洁净煤发电技术。新建或在役传统燃烧煤粉电厂的改进与改造也均面临巨大的挑战。

#### 5. 煤的转化

煤炭的转化利用方式主要是煤的气化和液化,不仅可有效地提高煤炭热能的利用率,而且可以减轻直接烧煤的污染,使用也很方便,因此,是在煤炭能源利用过程中减少环境污染、节约能源的有效途径之一。目前,煤的气化技术的发展与应用已经超过煤的液化技术,但煤的液化具有比煤的气化更长远的应用前景。

煤的气化是指由煤经干馏或气化等方式而得到气体产物的工业过程,在煤气化的过程中可以有效和方便地脱除大部分有害物质,也能够以较低的成本分离并捕集 CO<sub>2</sub>,使在煤气的进一步利用中大幅度减少污染物的排放。煤气化工艺与煤化工过程结合,可以生产多种化工产品,与燃气—蒸汽动力装置相结合,组成整体煤气化联合循环,进行更洁净、更高效的发电。

我国已把洁净煤技术作为重大的战略措施,列入“中国 21 世纪议程”和国家重大基础研究和产业化领域,电力工业将洁净煤发电技术列为跨世纪的五大科技工程之一,大力开发和实施洁净煤发电技术,不仅关系到我国环境的保护和经济的可持续稳定增长,而且是未来能源技术市场激烈竞争的需要。



## 第二章

## 火力发电动力用煤的洗选加工

## 第一节 我国动力用煤的原煤质量及加工概述

## 一、动力用煤及其加工特点

我国煤炭资源丰富,品种齐全,尤其是适用于动力用煤的煤种,如气煤、长焰煤、不粘煤、褐煤、无烟煤等储量较多,其特点是难选煤多,高灰、高硫煤的比重大。我国动力用煤中灰分和硫分有以下赋存特点:

(1) 煤层的内在灰分较高,多为中、高灰分煤,内在灰分一般在10%~20%。煤矿多为中等厚度煤层和薄煤层,煤层中的夹带矸石层较多,开采时混入矸石的比例较大,使生产的原煤的外在灰分含量显著增加。灰分小于15%的煤约占40%,原煤的平均灰分含量为28%左右。

(2) 硫分分布不均匀。只有东北、内蒙东部及新疆、青海等少数地区的煤属低硫和特低硫煤,其他地区煤矿的硫分普遍偏高,例如,山西煤的硫分介于低硫和中硫之间,河北、山东、河南等地的煤也主要为低硫、中硫煤,贵州、四川、重庆等地为中高硫煤。表2-1给出了各类动力用煤的平均硫分。硫分赋存的另一个特点是浅部煤层硫分低,深部煤层硫分高,将来开采的煤的硫分将有继续升高的趋势。

表 2-1 动力用煤的平均硫分

项 目	无烟煤	贫 煤	烟 煤	褐 煤	未分煤种	平 均
占动力用煤 (%)	16.16	7.85	40.5	12.81	22.68	
平均 $S_{t,d}$ (%)	1.24	1.67	0.68	0.55	0.80	0.86

因此,我国有相当数量的动力用煤需要进行以排矸降灰和脱硫为主要目的的煤炭洗选加工。对动力用煤来说,煤炭加工的核心是选煤。因多数选煤工艺常在水中(或其他流体介质中)进行,故也称为洗选煤。选煤是降低原煤中杂质(常规的选煤方法可除去50%~70%的灰分和30%~40%的硫分)含量,提高煤质,并加工成质量均匀、用途不同的各品种煤的煤炭加工技术。

选煤加工提高煤质表现在以下几个方面:

- (1) 排矸降灰,可以大大减少煤中灰分并提高煤的发热量。
- (2) 降低硫的含量。煤中硫的可脱除性,主要取决于硫的赋存状态和分布特征,煤中