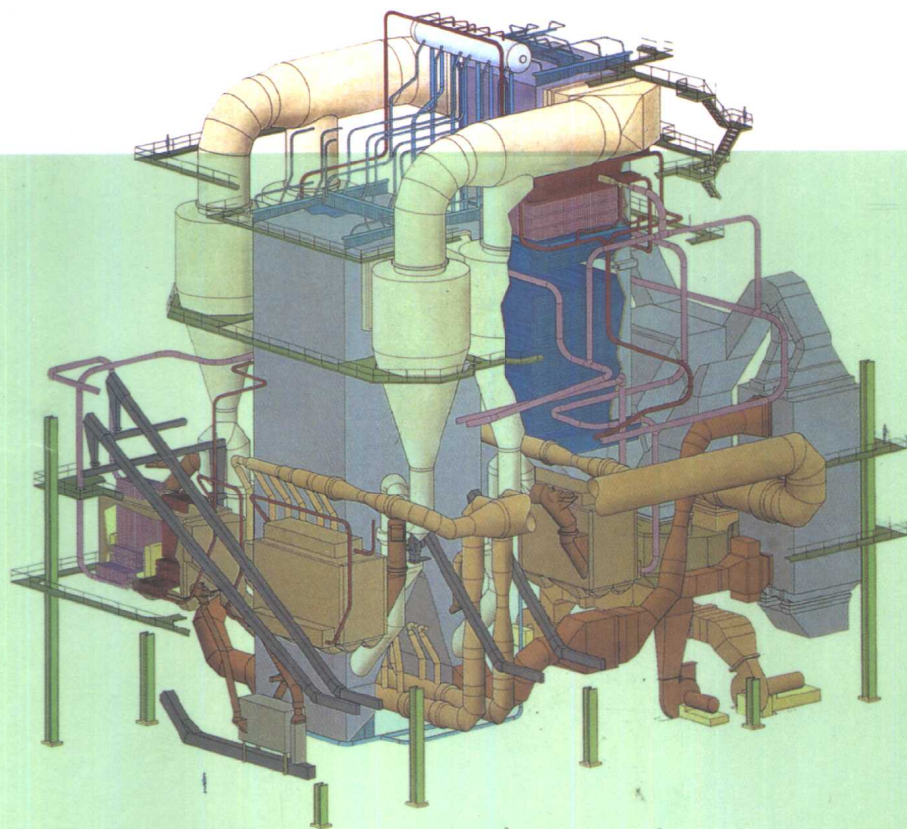


JIEJINGMEIFADIAN JISHU

华北电力大学 阎维平 编著

洁净煤发电 技术

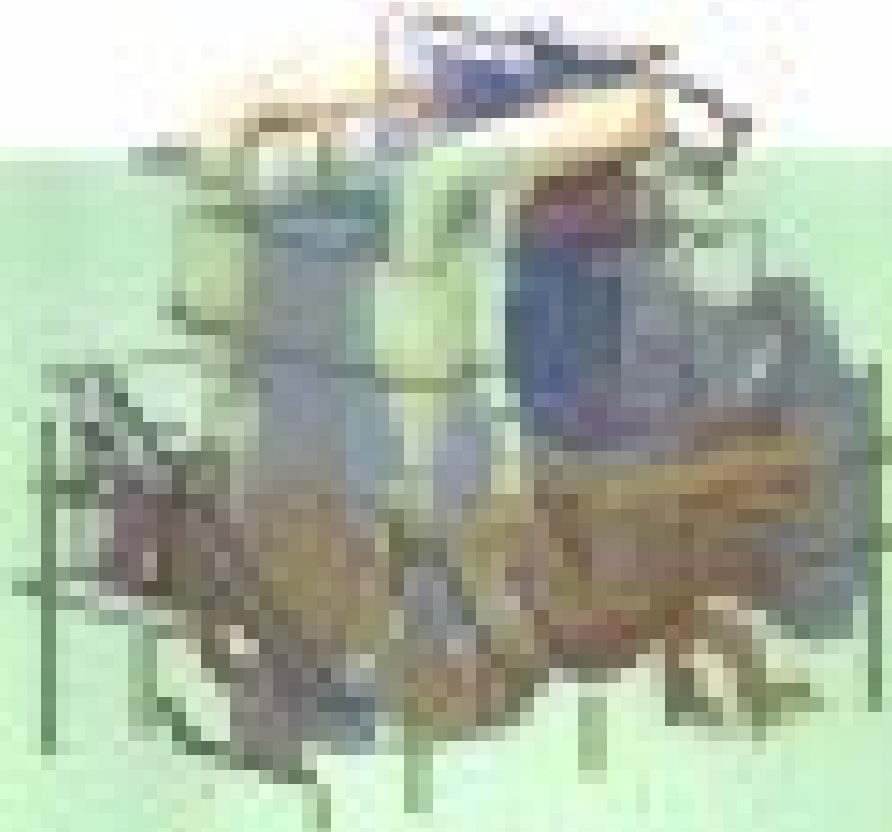
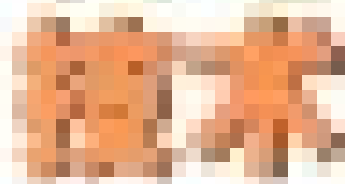


中国电力出版社

www.cepp.com.cn

THE UNIVERSITY OF CHINA PRESS
100871 BEIJING, CHINA

新學煤礦學



THE UNIVERSITY OF CHINA PRESS

201132

TM621.2

Y098

洁净煤发电技术

华北电力大学 阎维平 编著



中国电力出版社

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洁净煤发电主流技术的基本原理,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 掌握洁净煤发电技术的基本专业知识和最新进展。

全书共分十二章,除第一章绪论外,其余十一章分别介绍了各种洁净煤发电主流技术及其相关的主要技术领域。其中用较大的篇幅讲述了常规火电厂低氮氧化物燃烧技术、烟气净化技术、循环流化床燃煤锅炉与联合循环发电装置等内容,其余还包括煤的燃前处理、煤的气化技术、燃料电池与二氧化碳排放控制技术等。

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参考,可作为高等学校电厂热能动力专业的教材,也可以作为热能工程、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/阎维平编著.-北京:中国电力出版社,
2002

ISBN 7-5083-0874-3

I. 洁… II. 阎… III. 火电厂-燃煤锅炉 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 078210 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>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 2 月第一版 2002 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 324 千字

印数 0001—3000 册 定价 23.00 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)



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深入了解洁净煤发电技术，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运用显得尤为重要。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，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识，尽量减少繁琐的描述和复杂的理论推导，对此有兴趣的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，第五章由东北电力学院姜秀民教授审阅，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，在此表示衷心的感谢。

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文献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的资助。

编者

2001年9月

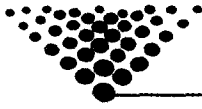
目 录

前言

第一章 绪论	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	2
第三节 洁净煤发电技术发展概况	5
第二章 煤的燃前处理	7
第一节 我国动力用煤的原煤质量及加工概述	7
第二节 重介质选煤	10
第三节 跳汰选煤	11
第四节 浮游选煤	12
第五节 水煤浆	13
第三章 常规燃煤电厂低氮氧化物燃烧技术	18
第一节 概述	18
第二节 煤燃烧中 NO_x 生成机理和降低 NO_x 排放的理论依据	20
第三节 燃煤电厂锅炉降低 NO_x 排放的燃烧技术措施	25
第四节 NO_x 排放控制技术改造存在的问题与对策	34
第四章 常规火电厂烟气净化技术	36
第一节 烟气净化技术概述	36
第二节 烟气脱硫剂的种类和特点	39
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 喷雾干燥法烟气脱硫技术	57
第六节 炉内喷钙尾部增湿活化烟气脱硫技术	59
第七节 循环流化床烟气脱硫技术	63
第八节 海水烟气脱硫技术	66

第九节	烟气脱氮技术	68
第十节	电子束辐照氨法烟气脱硫、脱氮技术	71
第十一节	活性炭联合脱硫、脱氮技术	76
第五章	循环流化床燃煤锅炉	79
第一节	循环流化床燃煤锅炉的基本原理和特点	79
第二节	循环流化床锅炉的构成和类型	86
第三节	循环流化床燃烧与污染控制	90
第四节	循环流化床锅炉的传热	95
第五节	循环流化床锅炉的燃烧产物和热效率计算	100
第六节	循环流化床锅炉的设计特点	103
第七节	循环流化床锅炉的运行控制特点	113
第八节	循环流化床锅炉的主要辅机设备及其特点	122
第九节	流化床锅炉脱硫灰渣的特性和综合利用简介	128
第六章	煤的气化技术	130
第一节	煤炭转化技术概述	130
第二节	煤的气化原理	132
第三节	煤气化产物的分类与特点	134
第四节	衡量煤气化炉的技术与经济指标	136
第五节	煤的气化工艺及其设备	137
第六节	煤气的净化处理	143
第七章	燃气—蒸汽联合循环	146
第一节	燃气—蒸汽联合循环的基本原理	146
第二节	燃气—蒸汽联合循环电站的类型及其特点	149
第三节	燃气轮机	155
第四节	余热锅炉	161
第五节	汽轮机	169
第八章	整体煤气化联合循环	171
第一节	概述	171
第二节	整体煤气化联合循环的工作过程和型式	172
第三节	整体煤气化联合循环的特点	173
第四节	整体煤气化联合循环系统的主要设备	176
第五节	整体煤气化联合循环的效率	180
第六节	整体煤气化湿空气透平循环方案	181

第九章 增压流化床燃煤联合循环	183
第一节 增压流化床燃煤联合循环的发展与现状	183
第二节 增压流化床燃煤联合循环的原理和特点	184
第三节 增压流化床燃煤联合循环电站的组成	186
第四节 增压循环流化床燃煤联合循环电站的特点	190
第十章 燃料电池	193
第一节 概述	193
第二节 燃料电池的原理和特点	194
第三节 燃料电池发电系统	199
第四节 燃料电池的类型及其特点	201
第五节 煤气化—燃料电池—燃气—蒸汽复合发电技术	205
第十一章 燃煤磁流体—蒸汽联合循环	206
第一节 磁流体发电概述	206
第二节 磁流体—蒸汽联合循环发电的特点	209
第三节 磁流体—蒸汽联合循环发电系统的主要设备	211
第十二章 二氧化碳排放与控制技术	217
第一节 概述	217
第二节 火电厂 CO ₂ 减排、捕集及储存	218
第三节 烟气再循环 O ₂ /CO ₂ 煤粉燃烧技术	220
参考文献	223



绪 论

第一节 能源供应与消耗的基本特点

一、全球矿物燃料的供求

根据近期世界能源状况的调查资料，地球上的能量资源估计为 110000 亿 t 标煤当量，而由于开采成本及技术所限，全球近期可资利用的能源储备只有 10600 亿 t 标煤当量，其中的 70% 为煤，16% 为石油和天然气，4% 为金属铀。

按当今世界能源消耗量和增长趋势推算，原油的年消耗量约 35 亿 t，今后 25 年中，年消耗量将达到 50 亿 t，足以把全球现已经探明的可采石油储量耗尽；天然气资源的开发较晚，尚可用 70 年左右；煤可用 250 ~ 300 年。预计到 2010 年，天然气和原油的价格将是煤的 8 倍以上。因此，从目前到本世纪中期，煤将是全世界最主要的提供电力的能源。

二、我国的煤炭资源和以煤为主的电力生产格局

我国拥有丰富的煤炭资源，经探明，地下深度 1000m 以内的储量已超过 1100 亿 t。我国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。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。

2000 年我国生产原煤近 14 亿 t，经过洗选加工的原煤仅为 20% 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。

火力发电的原煤消耗量占我国原煤产量的百分数在 1986 年之前大致为 20%，2000 年已超过 35%。某些工业化国家的这一比例为 50% ~ 70%，最高达到 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 45% 左右。因此，在我国，电力工业清洁、高效地利用煤炭，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主要的课题。

第二节 燃煤发电的污染物排放与危害

已被公认的全球性四大公害：大气烟尘、酸雨、温室效应、臭氧层破坏中，煤炭的燃烧产物构成其中的主要部分。燃煤火力发电厂排放的、对人类生存环境构成直接危害的主要污染物有粉尘、硫氧化物（ SO_2 、 SO_3 ）、氮氧化物（ NO_x ）及二氧化碳（ 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，而且几乎不经任何洗选等预处理过程，同时，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倍受重视。

长期以来，大部分燃煤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，还发现烟气中的痕量有害化合物，比如，汞、砷、氟等，对环境的影响也很大。

目前，只有少数火电厂开始安装和投运烟气脱硫装置，但大部分电厂的燃烧设备没有采取任何减排 NO_x 的技术措施，我国火电厂烟气中 SO_2 和 NO_x 的排放浓度和总量普遍超出目前的国家排放标准。因此，与燃煤有关的环境污染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 SO_2 和极少量的 SO_3 ，在大气环境中， SO_2 可以进一步转变为 SO_3 并形成硫酸雾。排入大气环境中的 SO_2 严重恶化了人类赖以生存的空间和环境。

SO_2 对人体健康有明显的危害， 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，引起分泌物增加和发生炎症。

SO_2 对植物的危害表现在破坏叶皮上的毛细孔， SO_2 进入叶片并溶解于水，沾结在细胞壁的表面，使植物受害，叶片发黄，严重时大量叶片枯萎，导致植物死亡。

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 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；在煤的转化过程中脱硫；在煤的燃烧过程中添加脱硫剂，吸收 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 NO 和少量的 NO_2 ，还包括 N_2O 、 N_2O_3 等，统称为 NO_x 。 NO_x 对人类自身及生存环境的直接和间接危害已远超过其他污染物。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 NO_x ，比如，汽车尾气排放的 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 NO 会被迅速地氧化成为 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 0.05mg/L (0.05ppm) 时，则会对人体产生危害作用。

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，沾结在细胞壁的表面，对植物造成严重的伤害。臭氧对人体也十分有害。

氧化二氮 (N_2O) 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，对人体造成危害。

在大气中， NO_x 会形成 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，我国每年因酸雨造成的直接经济损失超过 200 亿元。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 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 (CO_2)，其他还有甲烷 (CH_4)、氮氧化物 (NO_x) 等气体， CO_2 与 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 CO_2 。

对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 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， 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。

CO_2 等温室气体所产生的温室效应已经众所周知。通过各种可行的技术措施（比如，提高能量的转换效率，采用先进的燃烧技术，采取有效的节能技术措施，大量、长期存储或利用 CO_2 等），减缓以至最终控制能源与电力生产中的 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的一个前所未有的挑战。

四、我国火电厂大气污染物排放标准

国家环保局 1996 年颁布修订的《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223—1996) 分

别对 NO_x 与 SO₂ 排放浓度及排放量提出了严格的限制, 1998 年又确定了酸雨控制区和 SO₂ 污染控制区的划分范围和控制目标, 并对以后火电厂的建设提出了明确的减排 NO_x 与 SO₂ 的要求。

1. SO₂ 最高允许排放浓度

按《火电厂大气污染物排放标准》的规定, 对 1997 年 1 月 1 日起待审查、批准环境影响报告书的新、扩、改建电厂 (即标准第Ⅲ时段), 实行 SO₂ 的全电厂最高允许排放量与各烟囱排放浓度的双重控制, 各烟囱 SO₂ 最高允许排放浓度见表 1-1。

收到基燃料硫含量 (%)	小于 1.0	大于 1.0
允许排放浓度	2100	1200

注 表中内容是标准状态下, 干烟气, 换算到 6% O₂。

实测的 SO₂ 排放浓度, 应按下式换算到 α = 1.4 (相当于 O₂ = 6%) 时的浓度值。

$$C_{\text{SO}_2} = C'_{\text{SO}_2} \frac{\alpha'}{1.4} \quad \text{mg/m}^3$$

式中 α'——实测的过量空气系数;

C'_{SO₂}——实测的 SO₂ 排放浓度, mg/m³。

该标准中对燃煤含硫量大于 1% 的电厂制定的 1200mg/m³ 允许排放浓度, 在国际同类标准体系中处于中等水平, 低于某些较为发达的国家, 世界上允许排放浓度最低的国家为 400mg/m³。根据我国目前的实际状况, 该排放浓度限制对绝大多数燃煤含硫量大于 1% 的火电厂提出了均必须建设脱硫设施的要求。

2. NO_x 最高允许排放浓度

按《火电厂大气污染物排放标准》的规定, 对 1997 年 1 月 1 日起待审查、批准环境影响报告书的新、扩、改建火电厂, 锅炉氮氧化物最高允许排放浓度按表 1-2 执行。

锅炉额定蒸发量	液态排渣煤粉炉	固态排渣煤粉炉
≥ 1000t/h	1000	650

注 表中内容是标准状态下, 干烟气, 换算到 6% O₂。

实测的 NO_x (NO + NO₂) 排放浓度, 应按下式折算到过量空气系数 1.4 (相当于 O₂ = 6%) 时的浓度值。

$$C_{\text{NO}_x} = C'_{\text{NO}_x} \frac{\alpha'}{1.4} \quad \text{mg/m}^3$$

式中 α'——实测的过量空气系数;

C'_{NO_x}——实测的 NO_x 排放浓度, mg/m³。

该标准的排放限额与世界上其他多数工业发达国家的现行标准相当。在我国, 对绝大

部分没有采取任何降低 NO_x 排放技术措施的燃煤粉的常规电站锅炉，其 NO_x 排放值均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，其基本领域为：煤炭加工，煤炭燃烧，煤炭转化，污染物排放控制与废弃物处理和利用。

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排放，达到煤的高效、清洁利用和发电。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，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，并已经达到或接近商业化推广阶段，正朝着进一步完善技术、简化系统结构、减少投资、降低运行和维护费用的方向发展。

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. 煤炭利用前的净化技术

煤炭利用前的净化处理技术，就是对原煤进行加工，以改进煤炭的品质，提高燃煤的效率和减少污染物排放，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，选煤的目的是降低原煤中的杂质含量（比如，常规动力用煤的选煤工艺可除去 50% ~ 70% 的灰分，某些工艺还可以同时脱除 30% ~ 40% 的硫分），提高煤质。另外，水煤浆技术也是一种新型的洁净煤技术，煤基流体洁净燃料不仅是一种代油燃料，而且在某些应用场合能够代替直接燃煤，具有节能和环保的双重效益。

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最重要领域，是洁净煤发电技术的核心。在燃煤过程中排放的众多污染物中，危害很大的 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 NO_x 的生成量，以较低的代价来较大幅度地降低 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 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 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，各种先进的燃煤联合循环技术（整体煤气化联合循环发电、增压流化床联合循环发电、燃煤磁流体联合循环发电等），燃料电池技术等。其中的一些技术不仅可以大幅度减少 NO_x 的排放、还具有易于脱除 SO_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 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 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 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 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 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与烟气接触来进行脱硫反应。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 SO_2 的浓度却十分低，通常每立方米烟气中只含有几千毫克左右，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。

我国到目前为止，已有十几套先进的大型火电厂脱硫装置投入运行。

对氮氧化物来说，合理有效地组织煤的燃烧过程，可以较大幅度地降低 NO_x 的生成量，只有在排放限制更严格，而且炉内燃烧降低 NO_x 的技术措施不能满足要求的场合下，才采取进一步的烟气脱氮的技术措施。目前，烟气脱氮技术的应用范围和成熟程度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。基于现在的技术水平，由于从烟气中脱除 NO_x 的设备投资和运行费用十分昂贵，因此，近期在较大的范围内采用烟气脱除 NO_x 的装置还有很大的困难。

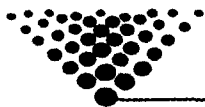
世界各国烟气净化技术正朝着进一步简化结构，减少投资，降低运行和维护费用的目标努力。实现脱硫脱氮一体化的联合烟气净化技术是目前的重要研究课题，也是未来烟气净化的发展方向。

4. 煤的转化

煤炭的转化利用方式主要是煤的气化和液化，通过煤的转化，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，还可以有效和方便地脱除大部分有害物质，使在煤气的进一步利用中大幅度减少污染物的排放。煤气化工艺与燃气—蒸汽动力装置相结合，组成整体煤气化联合循环，可以进行更洁净、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。



煤的燃前处理

煤的燃前处理技术就是对原煤进行加工，以提高煤炭的品质，提高燃煤的效率和减少污染物排放，因此，煤的燃前处理是洁净煤发电的源头技术。

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，比如气煤、长焰煤、不粘煤、褐煤、无烟煤等储量较大，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%。

(2) 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；表 2-1 为我国火电厂燃煤的灰分含量的调查统计结果，加权平均灰分为 27.88%。

表 2-1 全国电力系统 6MW 及以上火电机组燃煤灰分调查统计

平均灰分 (%)	燃煤量 (万 t)	百分比 (%)	平均灰分 (%)	燃煤量 (万 t)	百分比 (%)
$A_{ad} < 10$	0		$30 \leq A_{ad} < 35$	5395.29	22.76
$10 \leq A_{ad} < 15$	720.01	3.04	$35 \leq A_{ad} < 40$	1878.81	7.93
$15 \leq A_{ad} < 20$	1924.63	8.12	$40 \leq A_{ad} < 45$	1184.81	5.00
$20 \leq A_{ad} < 25$	4645.53	19.60	$45 \leq A_{ad} < 50$	373.81	1.58
$25 \leq A_{ad} < 30$	7557.01	31.88	$A_{ad} \geq 50$	26.48	0.11

(3) 硫分分布不均匀。只有东北、内蒙古东部及新疆、青海等少数地区属低硫和特低硫煤产区，其他地区煤矿的硫分普遍偏高，比如，山西煤的硫分在低硫和中硫之间，河北、山东、河南等地的煤也主要为低硫、中硫煤，贵州、四川、重庆等地的煤为中、高硫煤。

(4) 硫分赋存的另一个特点是浅部煤层低，深部煤层高，将来开采的深部煤的硫分将

有继续升高的趋势。

(5) 据统计,我国火电厂所燃原煤中含硫量超过 2% 的占总量的 15.7%。表 2-2 为我国火电厂燃煤的硫分含量的调查统计结果。

表 2-2 我国火电厂火电机组燃煤含硫量调查统计

含硫量 (%)	占总燃煤量的百分比 (%)	含硫量 (%)	占总燃煤量的百分比 (%)	含硫量 (%)	占总燃煤量的百分比 (%)
$S_{t,ad} < 1.0$	46.3	2.0~3.0	10	4.0~5.0	1.9
1.0~2.0	35	3.0~4.0	4.7	$S_{t,ad} \geq 5.0$	2.1

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含量(常规的选煤方法可除去 50%~70% 的灰分,某些工艺还可以同时脱除 30%~40% 的硫分),提高煤质,并加工成质量均匀、用途不同的各品种商品煤的煤炭加工技术。

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。煤中的硫以有机硫、硫化铁硫和硫酸盐硫三种形式存在,硫化铁硫主要以黄铁矿形式存在,硫酸盐硫通常含量很少。对于煤中的有机硫部分,目前还难以找到可行的除硫工艺,可考虑采用生物脱硫技术。对含黄铁矿高的煤,由于其形态易于解离,通过常规的重力分选即可以除掉一部分硫分,还可以利用黄铁矿与煤的磁性相反的特征,采取高梯度磁选方法脱除细粒黄铁矿。

入选 1 亿 t 原煤一般可减少燃煤 SO_2 的排放量 100~150 万 t,而其成本仅为烟气脱硫的 1/10。

(3) 煤炭脱硫过程中可以直接回收硫,硫是化学工业的重要原料。

(4) 实现生产更多品种的煤炭,如洗大块、中块、小块、粒煤、洗末煤、洗粉煤等,可以满足不同用户对煤炭粒度的要求。

(5) 对动力用煤最大的用户——电厂来说,煤的洗选加工对电厂的投资、运行费用、发电成本等经济指标影响巨大。

目前,我国原煤的入选率仍较低,不足原煤总产量的 1/4,商品煤质量普遍较差,而且我国发电行业的燃煤机组烧洗选煤的还很少。

与洗选炼焦煤等工艺用煤相比,动力用煤选煤具有不同的特点与要求:

(1) 动力用煤的洗选是以排矸为主,并随带脱除煤中的部分硫分;

(2) 燃煤电厂一般需要末煤,而工业和民用锅炉则需要块煤;

(3) 动力用煤价格低,因而,选煤的盈利性较差,应尽可能采用简单的工艺流程;

(4) 动力用煤洗选宜选用单台处理能力大、节能、节水、运行可靠,且操作维护方便的洗选煤设备。

二、动力用煤选煤工艺

1. 选煤工艺分类

各种选煤方法依原煤的有机质和其他杂质的密度、物理化学性质及颜色、形状等的不同而异。按选煤方法的不同,可分为物理选煤、物理化学选煤、化学选煤等。

传统的商业选煤工艺方法分为重力选煤法和浮游选煤法。属于重力选煤法的常有:重介质选煤、跳汰选煤等,均是比较成熟的物理选煤工艺,在煤炭行业和冶金行业已经有十分广泛的应用。浮游选煤法是一种常用的物理化学选煤方法。这几种传统的选煤方法,即跳汰选煤、重介质选煤、浮游选煤等,经过近一个世纪的研究和发展,在理论和工艺上日趋完善,选煤设备向着大型化和多层次化发展。

在新型、高效选煤方法的研究和工艺设备的开发方面,随着对超低灰分煤需求量的增加,对煤炭的深度降灰脱硫进行了大量的研究,一些先进的物理和物理化学选煤技术,比如,微细磁铁矿粉重介脱硫、高压静电选煤、高梯度磁选法脱硫、化学脱硫、电磁脱硫、细菌脱硫、微波脱硫、液态二氧化碳选煤法、微泡浮选、油团选和选择性絮凝等技术,可以生产出灰分小于3%、硫分小于0.5%的洁净精煤。

选煤工艺也可以按湿法分选和干法分选进行分类。湿法分选时,用于块煤排矸的方法有重介选、定筛跳汰选、斜槽选、螺旋滚筒选、动筛跳汰选等;适合于处理末煤的湿法有定筛跳汰选、重介旋流器、水介旋流器、摇床以及螺旋分选机等。湿法选煤工艺也称为洗选煤工艺。干式分选法有:风力摇床、风力跳汰、空气重介流化床以及选择性破碎等。

我国动力用煤选煤工艺多为跳汰或重介质选煤方法,有少数厂家采用重介质、跳汰联合工艺,其基本为一次分选,直接回收原生煤泥。

2. 动力用煤选煤工艺比较

各种常用动力用煤分选工艺适用性、分选效果和主要特点的比较如表2-3所示。

表 2-3 动力用煤分选工艺比较

分选方法	适用粒度 (mm)	工艺流程	适用可选性	分选效果	附 注
湿法:					
定筛跳汰	< 50	较复杂	各种煤	较好	用水较多
重介选	300~6	复杂	各种煤	好	用重介质
斜槽选	< 100	较简单	易选至较难	中	耗水特大
螺旋滚筒	< 100	较简单	易选至较难	好	粉煤再处理
水介旋流	< 13	简单	易选煤	较低	自生介质
动筛跳汰	300~25	简单	各种煤	好	用水极少
浮游选	< 0.5	复杂	适合煤泥	好	
干法:					
复合式风选	80~6	简单	易洗至较难	中	自生介质
空气重介选	50~13	较复杂	各种煤	好	用加重介质
选择性破碎	> 50	简单		低	
筛分	6~100	简单	各种煤	好	