

火电厂烟气脱硝技术

及工程应用

孙克勤 钟秦 编著



化学工业出版社

火电厂烟气脱硝技术

及工程应用

孙克勤 钟秦 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书围绕着火电厂烟气脱硝技术这一主题,在简要阐述火电厂氮氧化物的排放与控制技术的基础上,着重介绍了选择性催化还原烟气脱硝技术的原理与工艺,脱硝系统的设计、建设、调试和运行,烟气脱硝的技术经济分析及工程实例。

本书可供从事大气污染物控制的科研人员、相关领域的管理人员和火电业主参考,也可作为高等院校环境工程、热能工程和化学工程等专业的本科生、研究生和教师的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂烟气脱硝技术及工程应用/孙克勤,钟秦编著.

北京:化学工业出版社,2006.12

ISBN 978-7-5025-9883-9

I. 火… II. ①孙…②钟… III. 火电厂-烟气-脱硝
IV. X701.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第001570号

责任编辑:左晨燕 管德存

责任校对:蒋 宇

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京云浩印刷有限责任公司

装 订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张12¼ 彩插1 字数303千字 2007年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:38.00元

版权所有 违者必究

前 言

目前,我国发电装机容量已经突破4亿千瓦,其中绝大多数为燃煤机组。2004年,由火电厂排放的 NO_x 超过665万吨。“十一五”期间规划开工的火电项目达1.41亿千瓦,按照现在的 NO_x 控制政策,初步测算2010年火电厂排放的 NO_x 将达850万吨左右。已有研究表明, HNO_3 对酸雨的影响呈增长之势,降水中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值在全国范围内逐渐增加。我国已在两控区(酸雨和 SO_2 控制区)对 SO_2 排放开展了全面控制工作,但 NO_x 排放总量的快速增长及其大气浓度和氧化性的提高有可能抵消对 SO_2 的控制效果,使酸雨的恶化趋势得不到根本控制。因此,烟气脱硝是新上火电机组控制 NO_x 排放的必然选择,也是国家环保政策的要求。可以预见烟气脱硝将成为烟气脱硫产业化后又一个爆发性增长的市场。

烟气脱硝应用较多的是选择性催化还原法(SCR)和选择性非催化还原法(SNCR)。在我国,随着环境保护法律、法规和相关标准的日趋严格以及执法力度的加大,各火电厂必须采用烟气脱硝来实现对 NO_x 排放的有效控制。SCR技术的脱硝效率可达90%以上,氨逃逸率较小,技术可靠,从长远看,SCR应该是我国烟气脱硝技术的主流。

目前,烟气脱硝工程实例在我国还极为有限,更缺乏我国自有技术的脱硝工程建设经验,因此在实施以烟气脱硝为主的 NO_x 控制过程中,相关人员多为首次接触,常常因为经验不足或认识偏差而导致事倍功半,从而不利于我国烟气脱硝事业的健康发展。这样就迫切需要一本系统地论述从国家环保政策要求及发展趋势到脱硝项目的工艺特性、技术研发、系统设计、装置建造直至工程调试运行方面的参考书。

本书的宗旨是针对烟气脱硝的各个重要相关因素,结合工程实际,为社会相关机构和组织、电厂业主、相关科研人员以至个人提供在实际工作中有参考价值的信息。

本书共分为七章。第一章为概论;第二章介绍了选择性催化还原脱硝的原理与工艺;第三章从科研和工程的角度讨论了选择性催化还原脱硝系统的研发与设计;第四章和第五章分别对选择性催化还原脱硝系统的建设、调试和运行进行了论述;第六章对燃煤电厂烟气脱硝系统进行了技术经济分析;第七章结合国内外火电机组烟气脱硝工程实例,介绍了烟气脱硝系统的设计、建造及运行经验。

本书由孙克勤、钟秦编著,李明波、于爱华、樊荟、黄丽娜、沈凯、华玉龙、徐海涛、徐延忠、张东平、周长城、张俊礼、陈道轮、代旭东、卢作基等承担了本书部分内容的编写和整理工作。

书中介绍的脱硝项目经验和工程实例主要来自江苏苏源环保工程股份有限公司、国华太仓发电有限公司等单位的工程实践,同时参考了国内外发表的有关文献,谨在此一并表示衷心的感谢。

由于作者的水平 and 经验有限,书中难免有一些缺点和疏漏,敬请读者批评指正。

作者

2006年9月于南京

目 录

第一章 概论	1
第一节 我国的 NO_x 污染	1
一、 NO_x 的危害	1
二、我国 NO_x 污染的发展趋势	2
第二节 燃煤电厂 NO_x 的排放与控制对策	2
一、我国燃煤电厂 NO_x 的排放	3
二、我国电力工业 NO_x 控制情况	3
三、各国对燃煤电厂 NO_x 排放所采取的控制对策	4
第三节 低 NO_x 燃烧技术	5
一、第一代低 NO_x 燃烧技术	5
二、第二代低 NO_x 燃烧技术	6
三、第三代低 NO_x 燃烧技术	6
四、低 NO_x 燃烧器	6
第四节 烟气脱硝技术	9
一、选择性催化还原烟气脱硝技术	9
二、选择性非催化还原烟气脱硝技术	9
三、SNCR/SCR 联合烟气脱硝技术	10
四、其他烟气脱硝技术	12
五、各种烟气脱硝工艺的比较	15
六、国内外烟气脱硝装置的应用情况	15
第二章 选择性催化还原脱硝原理与工艺	18
第一节 选择性催化还原脱硝原理	18
一、SCR 反应原理	18
二、 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 催化反应机理	18
三、SCR 反应动力学	22
四、SCR 脱硝效率的主要影响因素	23
第二节 选择性催化还原脱硝工艺	25
一、SCR 脱硝工艺	25
二、SCR 还原剂的选择	33
第三章 选择性催化还原脱硝系统的设计	36
第一节 SCR 反应器的设计	36
一、SCR 反应器的组成和作用	36
二、SCR 反应器壳体的设计	37
三、SCR 催化剂的设计	43
第二节 SCR 系统辅助设备的设计	53

一、烟道及其附件	53
二、吹灰器	53
三、卸氨压缩机	55
四、液氨储罐	57
五、液氨蒸发器	58
六、蓄积槽	59
七、稀释风机	60
八、氨/空气混合器	61
九、稀释槽	61
十、废水泵	63
十一、气氨泄漏检测器	64
十二、水雾喷淋系统	64
十三、阀门站	65
十四、喷氨混合装置	66
十五、SCR 系统设计及设备选型应遵循的规范	69
第三节 SCR 控制系统的设计	72
一、控制原理	72
二、仪表	75
第四节 SCR 系统材料的设计	77
一、保温材料	77
二、SCR 系统材料	78
第五节 已建锅炉的脱硝系统的改造设计	80
一、SCR 与锅炉系统特性的兼容	80
二、空间的安排	84
三、锅炉结构的改造	84
四、空气预热器改造	85
五、引风机增容	87
六、烟道核算加固	88
第四章 选择性催化还原脱硝系统的建设	89
第一节 实施烟气脱硝系统建设项目渠道与基建程序	89
一、新建工程项目	89
二、技改工程项目	89
三、外国政府贷款项目	89
四、协力基金项目	91
第二节 烟气脱硝系统建设项目总承包	91
一、烟气脱硝系统建设项目的建设模式	91
二、EPC 项目招投标程序	92
三、EPC 项目合同的执行	98
四、EPC 项目合同的验收与结算	103
第五章 选择性催化还原脱硝系统的调试与运行	107
第一节 SCR 系统调试	107

一、SCR 系统调试项目	107
二、调试质量管理	107
第二节 SCR 系统运行	107
一、启动及操作程序	108
二、维护程序	108
三、SCR 运行的主要控制参数	110
四、防止结垢的措施	112
五、影响系统性能的化学因素	113
六、影响 SCR 性能的物理因素	116
七、粉尘	117
八、锅炉负荷对 SCR 系统的影响	117
九、SCR 运行对锅炉的影响	117
十、影响 SCR 安全运行的要素	118
十一、SCR 运行安全性要点	118
十二、SCR 系统运行监测	119
第三节 供氨系统的防爆	122
一、液氨储存	122
二、氨气供应系统	123
三、氨气防爆	124
四、消防及防爆措施	124
第六章 燃煤电厂烟气脱硝技术经济分析	125
第一节 烟气脱硝投资分析	125
一、概述	125
二、SCR 系统的主要设备	126
三、SCR 总投资成本分析	126
第二节 国华太电 2×600MW 机组烟气脱硝工程经济分析	128
一、投资说明	128
二、投资分析与评价	129
第三节 综合分析	132
一、环境效益和社会效益	132
二、建议	132
第七章 烟气脱硝工程实例	133
第一节 国华太电 2×600MW 机组烟气脱硝工程	133
一、工程概况	133
二、SCR 烟气脱硝系统设计	133
三、SCR 烟气脱硝系统分系统介绍	142
四、工程实施简况	150
五、系统的调试与验收	152
第二节 福建漳州后石电厂 6×600MW 机组烟气脱硝工程	155
一、工程概况	155
二、SCR 系统的设计	156

三、烟气脱硝系统及工艺特点·····	157
第三节 美国 Somerset 电厂 675MW 机组烟气脱硝工程 ·····	158
一、工程概况·····	158
二、SCR 系统的设计 ·····	158
三、安装和运行·····	159
第四节 台中电厂 4×550MW 机组烟气脱硝工程 ·····	160
一、工程概况·····	160
二、SCR 系统的设计 ·····	161
三、安装和运行·····	161
四、巴威公司 SCR 工程经验总结 ·····	162
第五节 国电铜陵发电有限公司 600MW 机组烟气脱硝工程 ·····	163
一、工程概况·····	163
二、SCR 系统的设计 ·····	163
三、烟气脱硝系统及工艺特点·····	164
第六节 嵩屿电厂 300MW 机组烟气脱硝工程 ·····	166
一、工程概况·····	166
二、工艺过程·····	167
三、相关设备的技术改造·····	170
附录一 火电厂大气污染物排放标准 (GB 13223—2003) ·····	171
附录二 招标书模板·····	178
参考文献·····	180

第一章 概 论

第一节 我国的 NO_x 污染

氮氧化物是大气主要污染物之一。通常所说的氮氧化物有多种不同形式,如 N_2O 、 NO 、 NO_2 、 N_2O_3 、 N_2O_4 和 N_2O_5 等,其中 NO 和 NO_2 所占比例最大,是重要的大气污染物。如无特殊说明,本书中氮氧化物 (NO_x) 仅指 NO 和 NO_2 。 NO_x 排入大气中后,通过物理、化学作用,引发一系列的环境问题。

一、 NO_x 的危害

各种污染源产生的氮氧化物中,绝大部分为 NO ,其毒性不是很大,但是 NO 在大气中可以氧化生成 NO_2 。 NO_2 比较稳定,其毒性是 NO 的 4~5 倍。空气中 NO_2 的含量在 3.5×10^{-6} (体积分数) 持续 1h,就开始对人体有影响;含量为 $(20 \sim 50) \times 10^{-6}$ 时,对人眼有刺激作用;当含量达到 150×10^{-6} 时,对人体器官产生强烈刺激作用。此外, NO_x 还参与光化学烟雾和酸雨的形成。

大气中 NO_x 和挥发性有机物 VOC 达到一定浓度后,在太阳光照射下经过一系列复杂的光化学反应,就会产生以高浓度 O_3 和细颗粒物为特征的光化学烟雾,形成了夏季城市天空经常出现的蓝色烟雾。由于我国大气中 VOC 浓度较高,光化学烟雾的产生主要受 NO_x 制约,大气 NO_x 浓度的微小增加都会加重光化学烟雾的污染。光化学烟雾是一种二次污染,污染区主要位于污染源下风向 30~50km。由于 O_3 和细颗粒物可以作长距离传输,造成区域性的氧化剂污染和细颗粒物污染,使区域空气质量退化,太阳辐射减少,气候发生变化,对生态系统造成损害,使农作物减产。美国目前由于 O_3 污染使谷物减产 10% 以上,估计太阳辐射减少对产量的影响更大。光化学烟雾会使大气能见度降低,对眼睛、喉咙有强烈的刺激作用,并会产生头痛、呼吸道疾病恶化,严重的会造成死亡。

由于大气的氧化性, NO_x 在大气中可形成硝酸 (HNO_3) 和硝酸盐细颗粒物,同硫酸 (H_2SO_4) 和硫酸盐细颗粒物一起,发生远距离传输,从而加速了区域性酸雨的恶化。已有研究表明, HNO_3 对酸雨的贡献呈增长之势,降水中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值在全国范围内逐渐增加。目前我国已对两控区(酸雨和二氧化硫控制区) SO_2 排放开展了全面控制工作,但 NO_x 排放总量的快速增长及其大气浓度和氧化性的提高有可能抵消对 SO_2 的控制效果,使酸雨的恶化趋势得不到根本控制。

NO_x 排放量的剧增使我国城市大气中的 NO_x 污染程度加重。监测表明,近年来我国一些大城市的 NO_x 的浓度超标,环境质量不容乐观。如上海市黄浦区的 NO_x 浓度年平均值由 1997 年的 $0.074\text{mg}/\text{m}^3$, 上升至 2001 年的 $0.103\text{mg}/\text{m}^3$, 呈明显的上升趋势。国内其他许多城市也有类似的趋势。 NO_x 也是导致酸雨的主要物质之一,我国一些地方的酸雨污染已经由单一的硫酸型向硝酸根离子不断增加的复合型转化。根据降水的离子成分分析,2002 年浙江省降水中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的当量浓度比值平均为 3.5 : 1, 与“九五”期间降水中

SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的当量浓度比值平均为 4 : 1 相比较, 降水中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的当量浓度比值正在缩小, 说明氮氧化物对该省降水酸化的影响正在逐步增加。在今后相当一段时期内, NO_x 污染将成为我国城市大气污染的一个重要方面。

二、我国 NO_x 污染的发展趋势

我国 80% 以上 NO_x 来自占国土面积 45% 的华东、中南、华北及东北地区, 而占国土面积 55% 的西南和西北地区 NO_x 排放量不足全国排放总量的 1/5。 NO_x 排放大省包括河北、江苏、辽宁、山东、广东、河南等。

近年来, 随着我国产业结构由粗放型向集约型的转变和能源消费结构的优化调整, 能源消耗排放 NO_x 不断增加的趋势有所缓解, 但是, NO_x 排放在行业、燃料及地区分布上均极为不平衡的特征并没有根本改变。排放 NO_x 较多的经济行业依然是工业、电力和交通运输部门, 占排放总量的 90% 以上。电力工业又是我国的燃煤大户, 火电厂是 NO_x 的主要来源之一。“十一五”期间, 我国经济仍将快速发展, 能源需求旺盛。据预测, 到 2010 年, 我国煤炭消耗将达到 16.9 亿~19.9 亿吨; 到 2020 年, 原煤消耗将达到 20.5 亿~29.0 亿吨, 燃煤产生的 NO_x 将急剧增加。我国近一段时期发电能源结构及趋势见表 1-1。

表 1-1 我国发电能源结构及趋势 %

年 份	火 电	水 电	核 电	新 能 源
2000	77.8	21.0	0.9	0.3
2010	75.3	20.0	3.8	0.9
2020	70.6	21.5	6.1	1.8

根据国务院审议通过的电力工业“十一五”发展规划, “十一五”期间规划开工火电项目 1.41 亿千瓦, 按照现有的 NO_x 控制政策, 初步测算 2010 年 NO_x 排放量将达 850 万吨左右。我国 NO_x 排放量和大气 NO_x 浓度的快速增加, 将使我国大气污染的性质发生根本性的变化, 大气氧化性增加, 从而导致一系列的城市和区域环境问题, 对人体健康和生态环境构成巨大的威胁, NO_x 控制任务非常艰巨。因此, 今后我国应通过经济、技术、法律及政策等多种手段, 加大洁净煤技术的开发力度, 鼓励开发利用低污染的替代燃料 (LPG、天然气等), 大力推进水力、核能、风能、太阳能等可再生能源的利用, 减少高污染排放的煤炭消耗, 逐步改善以煤为主的能源消费结构, 从而有效控制能源消耗产生的 NO_x 污染。

第二节 燃煤电厂 NO_x 的排放与控制对策

研究表明, 煤等化石燃料在燃烧过程中会生成 NO_x , 其生成途径主要有三种: ①“热力” NO_x (Thermol NO_x), 系燃烧用空气中的 N_2 在高温下氧化而产生的氮氧化物; ②“快速” NO_x (Prompt NO_x), 系碳化氢燃料过浓时燃烧产生的氮氧化物; ③“燃料” NO_x (Fuel NO_x), 系燃料中含有的氮的化合物 (如杂环氮化物) 在燃烧过程中氧化而生成的氮氧化物。

燃烧过程中, 空气带入的氮被氧化为 NO_x 的反应可以概括地表示 (忽略中间过程) 为:



以上两个反应共存于燃烧系统中，烟气中包含 NO、NO₂，主要为 NO，约占总 NO_x 的 90% 以上，其余为 NO₂。

一、我国燃煤电厂 NO_x 的排放

电力行业是国民经济的基础行业，随着经济的快速发展，我国电力需求不断增长，大容量高参数的 300MW 及以上火电机组正成为电力工业的主力机组，火电厂氮氧化物排放总量日益增加。我国电力结构以火力发电为主，火电厂燃煤量占全国煤炭消耗总量 50% 左右，这个比例今后还将不断增加，其燃煤产生的大气污染物也将持续增长。2004 年，全国 NO_x 排放总量达到 1600 万吨左右，电力行业排放量约占一半。近几年我国电力行业氮氧化物排放量见表 1-2。

表 1-2 我国近几年电力行业氮氧化物排放量 万吨

年 份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
排放量	359.3	350.3	360.5	401.9	469.0	497.5	536.8	597.3	665.7

2004 年全国火电装机容量约为 350GW。规划至 2010 年末全国火电新增装机容量约为 230GW，其中 2006 年增加 70GW，2007 年增加 68GW。其中典型机组情况如表 1-3 和表 1-4 所列。

表 1-3 2004 年前的老机组 NO_x 排放情况

典型机组	300MW
NO _x 平均排放浓度	800mg/m ³ (标)
单位发电量的 NO _x 排放量	4.0g/(kW·h)
2004 年平均运行时数	5700 小时/年

表 1-4 2006~2010 年新增机组 NO_x 排放的情况

典型机组	600MW
NO _x 平均排放浓度	400mg/m ³ (标)
单位发电量的 NO _x 排放量	2.0g/(kW·h)

随着我国经济的发展，作为我国主要能源的煤的消耗量将越来越大，据预测，2010 年火电厂装机及典型排污水平如表 1-5 所列。

表 1-5 2010 年火电厂装机及典型排污水平

项 目	新机组	旧机组	新+旧机组
装机容量/GW	230	350	580
典型机组/MW	600	300	
典型 NO _x 排放浓度(标准状态)/(mg/m ³)	400	800	640
单位发电量的 NO _x 排放量/[g/(kW·h)]	2.0	4.0	3.2
年运行小时/h	5700	5700	5700
年排放 NO _x 总量/万吨	260	800	1060

由此可见，今后电力工业 NO_x 排放量将十分巨大。如果不加强控制，NO_x 将对我国大气环境造成严重污染。由于环保相对滞后，火电厂 NO_x 的直接污染越来越大，NO_x 的污染问题也日趋突出，尽管目前 NO_x 治理力度有所加强，但是由于对 NO_x 认识还有待进一步提高，治理 NO_x 还有很长的路要走。环境污染已是电力工业发展的一个制约因素，电力工业必须解决和环境的协调发展问题，才能真正促进经济的繁荣，造福于社会。

二、我国电力工业 NO_x 控制情况

面对电力行业严峻的环保形势，我国于 1991 年制定了第一部《火电厂污染物排放标准》，在此后的 12 年间，历经两次修订（1996 和 2003），排放标准日益严格。2003 年修订

的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2003)对 NO_x 排放做了明确的规定(见附件1)。在严格的排放标准的要求下,目前国内普遍使用的低 NO_x 燃烧技术已经不能满足要求,因此,寻求新的脱硝方式势在必行。在一些排放要求较高的发达国家如美国、德国和日本普遍使用的是烟气脱硝,而在烟气脱硝方式中普遍使用而且脱硝率很高的是选择性催化还原技术(SCR)。

国家发改委组织编制的《电力行业“十一五”计划及2020年发展规划》要求:在优化发展煤电方面,在大电网覆盖范围内新建燃煤机组的单机容量要在60万千瓦及以上,鼓励建设超临界、超超临界大容量机组。电力工业“十一五”发展的主要目标是安排投产规模为1.65亿千瓦左右,关停凝汽式火电小机组1500万千瓦。与此同时,关停小机组的平均单机容量提高到6万千瓦,其中火电平均单机容量提高到8万千瓦,单机容量30万千瓦及以上火电机组所占比重达到50%,每千瓦时供电煤耗下降到370克标准煤。“十一五”计划制定了一系列的政策与措施,其中一方面是研究制定可再生能源发电和清洁能源发电优惠政策,执行可再生能源法,建立清洁发电良性发展机制;另一方面注重环保和节水、节地,采用大型、高效机组,同步治理和改善生态环境。在清洁发电优惠政策方面,对于国家规划内的电厂环保项目,国家将给予一定的财政补贴。

NO_x 控制问题的复杂性是基于以下事实:现在的电站锅炉有不同的结构和不同的燃烧方法,建成时间从最近的10年到最近的50年,电站的作用是调峰或基负荷运行。在可以承受成本的前提下,这些电站要求一套低成本、低年运行费用并适合电站位置等特殊问题的先进的 NO_x 控制系统。

三、各国对燃煤电厂 NO_x 排放所采取的控制对策

20世纪80年代以来,世界上许多国家围绕 NO_x 排放控制问题采取了一系列国家行动和国际性合作方案。早在1979年,有33个国家签署了联合国经济委员会《关于长距离越境空气污染公约》。欧洲在1988年通过了“欧共体关于大型燃烧设备污染物排放限制法令”,要求欧共体1987年7月以前安装的、大于50MW的全部燃烧设备,其 NO_x 排放总量到1993年要在1980年的基础上削减10%,到1998年要削减30%。其中德国、比利时、法国、荷兰和卢森堡等国到1993年削减20%,1998年削减40%。除上述国际公约外,许多国家还根据各自特点采取了相应的国家行动。如奥地利、比利时、丹麦、德国、意大利、日本、荷兰、瑞典、瑞士、英国和美国等均制定了现有锅炉和新增锅炉的 NO_x 排放标准及国家控制方案。在 NO_x 控制技术方面,上述国家均已应用商业化的低 NO_x 燃烧技术,其中奥地利、日本和德国等已应用商业化的烟气脱硝技术。

例如,针对 NO_x 污染问题,日本采取了一些相应的控制措施。对固定源采取的控制对策为:①实施全日本统一的排放标准,对于那些 NO_x 排放量较大、造成大气污染严重的设备,其 NO_x 排放限值逐年减小;②总量控制,对于污染源排放较为集中的区域,仅按排放标准进行限制难以确保该区域的大气 NO_x 浓度达到环境质量标准,从1982年起开始对 NO_x 实施排放总量控制;③实施降低 NO_x 排放的技术措施,如安装烟气脱硝设施。

又如美国自1990年修订《清洁空气法》后,对 NO_x 的控制采取区域性控制和州际性控制战略,20世纪末制定了区域性 NO_x 减排法规,其中包括排放权交易制度。美国环保局(EPA)2004年对2003年美国东部8州和哥伦比亚特区 NO_x 排放权交易制度的实施结果进行了总结,参与这一交易制度的区域,其 NO_x 排放量比上一年减少了30%。EPA预计,通过 NO_x 交易制度的实施,2007年可减少100万吨 NO_x 的排放,1亿人居住地的大气污染将

得到改善。2005 年制定了《清洁空气州际法规》(Clean Air Interstate Rule, CAIR), 2007 年将实施 $0.27\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 的 NO_x 排放限值, 由此各州发电厂 NO_x 排放量平均需要降低 64%。

总之, 各国对燃煤电厂 NO_x 排放的控制主要是通过逐步提高其排放限制标准, 不断开发新的减排技术并引进排放权交易等经济手段进行调节来实现。

第三节 低 NO_x 燃烧技术

国外从 20 世纪 50 年代就开始了燃烧过程中 NO_x 生成机理和控制方法的研究工作。大量的燃烧研究工作已基本探明了 NO_x 的形成和破坏机理, 根据已取得的成果, 影响 NO_x 形成的主要因素为: ①燃料中氮的含量 (即燃料种类); ②反应区中氧、氮、一氧化氮和烃根的含量; ③燃烧温度的峰值; ④可燃物在火焰峰和反应区中的停留时间。目前在实施低 NO_x 燃烧时, 主要针对不同的影响因素和具体情况 (如燃料含氮量等), 选用不同的方法。同时, 还要兼顾其他方面, 如燃烧是否完全, 烟尘量和热损失是否大等, 才能得到比较好的燃烧条件。由此而产生了很多低 NO_x 燃烧方法、低 NO_x 燃烧器和低 NO_x 炉膛等。

低 NO_x 燃烧技术的特点是工艺成熟, 投资和运行费用低。在对 NO_x 排放要求非常严格的国家 (如德国和日本), 均是先采用低 NO_x 燃烧器减少一半以上的 NO_x 后再进行烟气脱硝, 以降低脱硝装置入口的 NO_x 浓度, 减少投资和运行费用。进入 20 世纪 90 年代, 有关电厂锅炉供货商又对其开发的低 NO_x 燃烧器做了大量改进和优化, 使其日臻完善。纵观低 NO_x 燃烧技术的发展过程, 可大致将其划分为三代。

一、第一代低 NO_x 燃烧技术

第一代技术的基本特征是不要求对燃烧系统做大的改动, 只是对燃烧装置的运行方式或部分运行方式做调整或改进, 其主要燃烧技术如下。

(1) 低过量空气系数运行 这是一种优化装置燃烧、降低 NO_x 生成量的简单方法。它不需要对燃烧装置做结构改造, 并有可能在降低 NO_x 排放的同时, 提高装置运行的经济性。这种方式抑制 NO_x 生成的幅度与燃料种类、燃烧方式和排渣方式有关, 但总的降低幅度有限, 因为过量空气系数降低过多有可能造成受热面粘污结渣和腐蚀、气温特性变化及因飞灰可燃物增加而导致经济性下降。

(2) 降低助燃空气预热温度 可降低火焰温度峰值, 从而减少热力型 NO_x 生成量, 但此措施不适用于燃煤、燃油锅炉, 对于燃气锅炉效果比较明显。

(3) 浓淡燃烧技术 这种方法是让一部分燃料在空气不足的条件下燃烧, 即燃料过浓燃烧; 另一部分在空气过剩的条件下燃烧, 即燃料过淡燃烧。无论是过浓燃烧还是过淡燃烧, 其过量空气系数 (α) 都不等于 1, 前者小于 1, 后者大于 1, 故又称非化学当量燃烧或偏差燃烧。浓淡燃烧时, 燃料过浓部分因氧气不足, 燃烧温度不高, 所以燃料型和热力型 NO_x 都会减少。燃料过淡部分因空气量大, 燃烧温度低, 热力型 NO_x 生成量也减少。这一方法可用于燃烧器多层布置的电厂锅炉, 在保持总风量不变的条件下, 调整各层燃烧器的燃料和空气分配, 便能达到降低 NO_x 的效果。

(4) 炉膛的烟气再循环 把烟气掺入助燃空气, 降低助燃空气的氧浓度, 通常的做法是从省煤器出口抽出烟气, 加入到二次风或一次风中。加入二次风时, 火焰中心不受影响, 唯一作用是降低火焰温度。此方法对热力型 NO_x 所占份额较大的液态排渣炉、燃油和燃气锅

炉有效，对于热力型 NO_x 所占份额不大的干态排渣炉作用有限。

(5) 部分燃烧器退出运行 这种方法适用于燃烧器多层布置的电厂锅炉。具体做法是停止最上层或几层燃烧器的燃料供应，只送空气。这样，所有燃料从下面的燃烧器送入炉内，下面的燃烧器区实现富燃料燃烧，上层送入的空气形成分级送风。这种方法尤其适用于燃气、燃油锅炉而不必对燃料输送系统进行重大改造。德国把这种方法用于褐煤大机组，效果也较好。

二、第二代低 NO_x 燃烧技术

第二代技术的特征是把助燃空气分级送入燃烧装置，降低着火区（也称一次区）的氧浓度，相应降低了火焰峰值温度。属于这一代技术的有现阶段最广泛应用于电厂锅炉的各种低 NO_x 空气分级燃烧器，其最具代表性的直流燃烧器当属原美国 ABB-CE 公司的整体炉膛分级燃烧器 (OFA)、同轴燃烧系统 (CFS I、CFS II)、低 NO_x 同轴燃烧系统 (LNCFS) 及种类繁多的变异型，如 TFS2000 燃烧系统。其最具代表性的旋流燃烧器是美国 B&W 公司的双调风旋流燃烧器 (DRB、EI-DRB、DRB-XCL) 及原德国 Steinmüller、Babcock 公司的各种旋流燃烧器。

三、第三代低 NO_x 燃烧技术

第三代技术的特征是空气和燃料都是分级送入炉膛，燃料分级送入可在主燃烧器下游形成一个富集 NH_3 、 C_mH_n 、HCN 的低氧还原区，燃烧产物通过此区时，已生成的 NO_x 会部分被还原为 N_2 。属于这一代措施的典型技术是用于墙式和切圆燃烧的三级燃烧技术。三级燃烧技术又称再燃烧/炉内还原 (IFNR) 法或 MACT 法，是在炉内同时实施空气和燃料分级的方法（见图 1-1）。

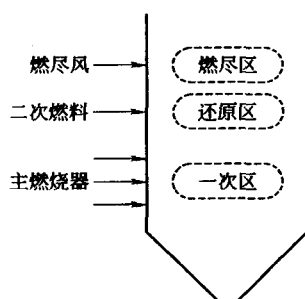


图 1-1 三级燃烧示意

采用此技术时，炉内形成 3 个区域，即一次区、还原区和燃尽区。在一次区内，主燃料在稀相条件下燃烧，还原燃料投入后，形成缺氧的还原区，在高温 ($>1200^\circ\text{C}$) 和还原气氛下析出的 NH_3 、 C_mH_n 、HCN 等原子团与来自一次区已生成的 NO_x 反应，生成 N_2 。燃尽风投入后，形成燃尽区，实现燃料完全燃烧。这种方法与其他先进的手段结合，可使 NO_x 排放量下降 80% 左右，是目前在发达国家颇受青睐的方法。

四、低 NO_x 燃烧器

按照燃烧技术及原理，低 NO_x 燃烧器分为空气分级燃烧、燃料分级燃烧以及烟气再循环三大类型，每种类型又有若干种类，并发展了几代产品，世界各大锅炉制造商亦有各自开发的低 NO_x 燃烧器。

空气分级低 NO_x 燃烧器是目前使用最广泛、技术最成熟的燃烧器，其基本原理是在燃

烧器喷口附近的着火区形成 $\alpha < 1$ 的富燃料区，形成还原性气氛，同时将二次风分成 2 股，分级送入已着火的煤粉气流。在煤粉着火的初始阶段，只加入部分二次风，继续维持一段距离的富燃料燃烧，形成一级燃烧区。另一股二次风则送入一级燃烧区的下游，形成 $\alpha > 1$ 的二次燃烧区（燃尽区），使燃料完全燃烧。有的燃烧器还设有“火上风”，将三次风混入燃尽区。空气分级低 NO_x 燃烧器主要分双调风低 NO_x 燃烧器、PM 型直流式低 NO_x 燃烧器、燃料分级低 NO_x 燃烧器三种。

双调风低 NO_x 燃烧器将二次风分成内、外两股气流，通过调风器和旋流叶片分别控制各自的风量和旋流强度，以调节一、二次风的混合。典型的有德国斯坦谬勒（Steinuller）公司设计的 SM 型、巴布科克-日立（Babcock Hitachi）公司的 HT-NR 型、德国巴布科克公司第二代产品 WB 型和美国巴布科克-威尔科克斯（B&W）公司 DRB 低 NO_x 燃烧器，后两者的结构和原理相似。

PM 型直流式低 NO_x 燃烧器对于燃烧器布置在炉膛四角的切向燃烧方式，一般采用直流煤粉燃烧器。送入主燃烧器的一、二次风占总风量的 80% 左右，使 $\alpha < 1$ ，再在直接燃烧器上部装设“火上风”喷口。典型的产品有日本三菱公司的 PM 型低 NO_x 燃烧器（图 1-2），它将炉膛的分级燃烧和燃烧器的分级燃烧结合在一起。为使煤粉在着火过程中形成富燃料燃烧，一次风煤粉混合物在进入燃烧器前先经过一个弯头进行惯性分离，密度大的细煤粉由于其惯性大多进入上面的富燃料喷口，其余的随空气进入下面的贫燃料喷口，故又称为燃料浓淡燃烧。贫燃料燃烧时，由于空气过多使得火焰温度降低，有利于抑制热力型 NO_x ；富燃料燃烧的还原性气氛抑制燃料型 NO_x ，同时，贫燃料燃烧有利于稳定着火过程。这样，在燃烧器中，燃料的贫、富燃烧同时进行，然后再一起上升并与最上面的“火上风”混合，在燃尽区完成整个燃烧过程。

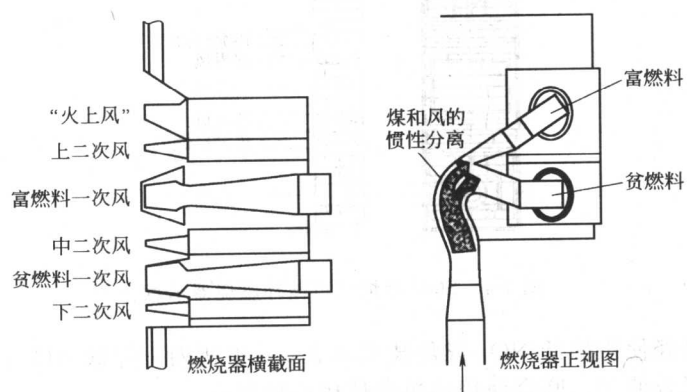


图 1-2 日本三菱公司的 PM 型低 NO_x 燃烧器

燃料分级低 NO_x 燃烧器为德国斯坦谬勒公司按照燃料分级燃烧原理设计的 MSM 型旋流煤粉燃烧器（图 1-3）。一次风煤粉混合物在喷口附近着火并与旋流的二次风混合，形成 $\alpha_1 = 0.9$ 的一级燃烧区，燃烧在接近理论空气量的条件下进行，保证煤粉在锅炉运行的全部负荷范围内均有很高的着火稳定性。在距一次燃料喷口一定距离处，沿半径方向对称布置有 4 个二次燃烧喷口。煤粉在 $\alpha_2 = 0.55$ 的条件下被送入炉膛，并在距喷口一定距离处与来自一级燃烧区的煤粉混合，形成还原性气氛很强的二级燃烧区。此区不但可以抑制 NO_x 的生成，还可将一级燃烧区中生成的 NO_x 还原。同时，二级燃烧区推迟了燃烧过程，使火焰温

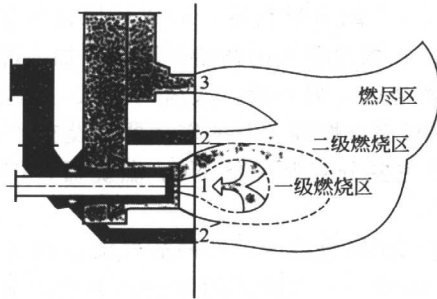


图 1-3 MSM 型低 NO_x 燃烧器结构示意图

1—一次燃料喷口；2—二次燃料喷口；3—OFA 喷口

度降低，抑制了热力型 NO_x 的生成。保证煤粉完全燃烧的“火上风”由 OFA 喷口送入燃烧器上部的炉膛，并与来自二级燃烧区的火焰混合，在 $\alpha_3 = 1.25$ 的条件下将煤粉燃尽。

SGR 型烟气再循环低 NO_x 燃烧器是日本三菱公司在直流煤粉燃烧器上应用烟气再循环技术而开发的（图 1-4）。再循环的烟气不与空气混合，而是直接送至燃烧器，在一次风煤粉空气混合喷口上、下各装有再循环烟气喷口，因烟气吸热和氧的稀释，在一次风喷口附近形成还原性气氛，使燃烧速度和燃烧区温度降低，抑制了 NO_x 的生成。上二次风起着“火上风”的作用，当它与自下而上的还原性火焰混合时，在 $\alpha > 1$ 的条件下完成煤粉的燃尽过程，当 $\alpha = 1.2$ 时，不同煤种的 NO_x 排放值均在 $200 \sim 500 \text{ mg/m}^3$ 之间。

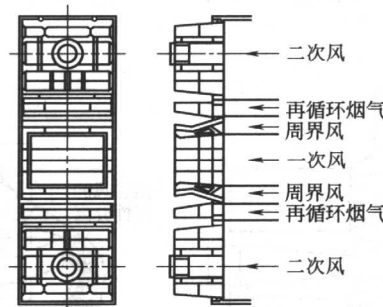


图 1-4 SGR 型烟气再循环燃烧器示意图

综上所述，已经使用的低 NO_x 燃烧技术如表 1-6 中所列，降低 NO_x 的燃烧方法往往是两个或三个方法联合使用，联合使用比单独使用的效果好。

表 1-6 低 NO_x 燃烧技术

燃 烧 方 法	技 术 要 点	存 在 问 题
二段燃烧法(空气分级燃烧)	燃烧器的空气为燃烧所需空气的 85%，其余空气通过布置在燃烧器上部的喷口送入炉内，使燃烧分阶段完成，从而降低 NO_x 产生量	二段空气量过大，会使不完全燃烧损失增大，一般二段空气为空气总量的 15%~20%；煤粉炉由于还原性气氛易结渣，或引起腐蚀
再燃法(燃料分级燃烧)	将 80%~85% 的燃料送入主燃区，在 $\alpha \geq 1$ 的条件下燃烧；其余 15%~20% 的燃料在主燃烧器上部送入再燃区，在 $\alpha < 1$ 的条件下形成还原性气氛，将主燃区生成的 NO_x 还原为 N_2 ，可减少 80% 的 NO_x	为减少不完全燃烧损失，须加空气对再燃区的烟气进行三段燃烧

续表

燃 烧 方 法		技 术 要 点	存 在 问 题
排烟再循环法		让一部分温度较低的烟气与燃烧用空气混合,增大烟气体积和降低氧气的分压,使燃烧温度降低,从而降低 NO _x 的排放浓度	由于受燃烧稳定性的限制,一般再循环烟气率为 15%~20%;投资和运行费较大;占地面积大
乳油燃料燃烧		在油中混入一定量的水,制成乳油燃料燃烧,由此可降低燃烧温度,使 NO _x 降低并可改善燃烧效率	注意乳油燃料的分离和凝固问题
浓淡燃烧法		装有两个或两个以上燃烧器的锅炉,部分燃烧器供给所需空气量的 85%,其余部分供给较多的空气,由于都偏离理论空气比,使 NO _x 降低	注意乳油燃料的分离和凝固问题
低 NO _x 燃烧器	混合促进型	改善燃料与空气的混合,缩短在高温区的停留时间,同时可降低氧气剩余浓度	需要精心设计
	自身再循环型	利用空气抽力,将部分炉内烟气引入燃烧器,进行再循环	燃烧器结构复杂
	多股燃烧型	用多股小火焰代替大火焰,增大火焰散热面积,降低火焰温度,控制 NO _x 生成量	
	阶段燃烧型	让燃料先进行浓燃烧,然后送入余下的空气,由于燃烧偏离理论当量比,故可降低 NO _x 浓度	容易引起烟尘浓度增加
	喷水燃烧型	让油、水从同一喷嘴喷入燃烧区,降低火焰中心高温区温度,以减少 NO _x 浓度	喷水量过多时,将造成燃烧不稳定
低 NO _x 炉膛	燃烧室大型化	采用较低的热负荷,增大炉膛尺寸,降低火焰温度,控制热力型 NO _x	炉膛体积增大
	分割燃烧室	用双面露光水冷壁把大炉膛分割成小炉膛,提高炉膛冷却能力,控制火焰温度,从而降低 NO _x 浓度	炉膛结构复杂,操作要求高
	切向燃烧室	火焰靠近炉壁流动,冷却条件好,再加上燃料与空气混合较慢,火焰温度水平低,而且较为均匀,对控制热力型 NO _x 十分有利	

第四节 烟气脱硝技术

一、选择性催化还原烟气脱硝技术

选择性催化还原法 (Selective Catalytic Reduction, SCR) 是指在催化剂的作用下,以 NH₃ 作为还原剂,“有选择性”地与烟气中的 NO_x 反应并生成无毒无污染的 N₂ 和 H₂O。其原理首先由 Engelhard 公司发现并于 1957 年申请专利,后来日本在该国环保政策的驱动下,成功研制出了现今被广泛使用的 V₂O₅/TiO₂ 催化剂,并分别在 1977 年和 1979 年在燃油和燃煤锅炉上成功投入商业运用。SCR 目前已成为世界上应用最多、最为成熟且最有成效的一种烟气脱硝技术。SCR 技术对锅炉烟气 NO_x 控制效果十分显著,占地面积小,技术成熟,易于操作,可作为我国燃煤电厂控制 NO_x 污染的主要手段之一。同时 SCR 技术消耗 NH₃ 和催化剂,也存在运行费用高、设备投资大的缺点。有关 SCR 工艺和设备、运行的经济性等将在后续章节中详细讨论。

二、选择性非催化还原烟气脱硝技术

SCR 技术的催化剂费用通常占到 SCR 系统初始投资的一半左右,其运行成本很大程度