



燃煤电站

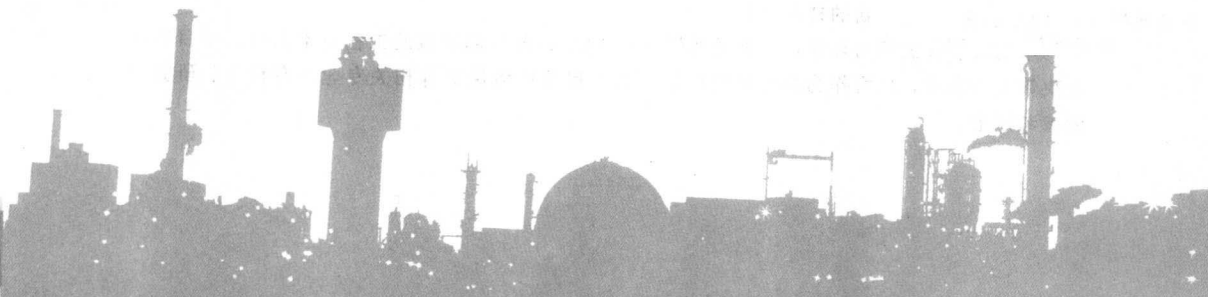
SCR烟气脱硝技术及 工程应用

Coal Fired Power Plants
SCR Nitrogen Oxides Control
and Removal

张强 编著



化学工业出版社



燃煤电站 SCR烟气脱硝技术及 工程应用

Coal Fired Power Plants
**SCR Nitrogen Oxides Control
and Removal**

张强 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

选择性催化还原(SCR)方法是国际上电站烟气脱除氮氧化物(NO_x)的主要技术手段之一。本书从工程应用的角度,全面系统地介绍了该技术的原理、工程应用案例以及系统组成和主要设备及设计、运行等方面的特点及技术要求。主要是为了帮助我国的读者尽快地了解这门技术及最新的技术进展。

本书可供我国电力环保,特别是燃煤电站 NO_x 排放控制领域的工程技术人员、项目管理及决策人员参考,也可作为高等院校热能动力工程及环境保护等相关专业本专科生、研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤电站 SCR 烟气脱硝技术及工程应用/张强编著.

北京:化学工业出版社,2007.7

ISBN 978-7-5025-9381-0

I. 燃… II. 张… III. 煤烟污染-烟气-脱硝-技术
IV. X701.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 096695 号

责任编辑:郑宇印

装帧设计:关 飞

责任校对:陈 静

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 装:北京市彩桥印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 14 字数 286 千字 2007 年 7 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

序

燃煤电厂在生产过程中会产生大量排入大气的有害污染物，主要有粉尘、 SO_x 、 NO_x 和有害金属元素等。我国火电厂的污染物排放控制首先从粉尘排放控制开始，经过 30 多年的努力，燃煤电厂的烟尘排放已得到有效的控制。在 SO_x 排放控制方面，我国已开始广泛采用烟气脱硫技术。在 NO_x 排放控制方面，我国在引进型 300MW 和 600MW 火电机组上首先采用低 NO_x 燃烧技术；随着新的《火电厂大气污染物的排放标准》的实施，可以预见，在未来 3~5 年的时间内，烟气脱硝技术在我国将会得到日益广泛的应用。我国急需一本全面、系统介绍烟气脱硝技术的专业书籍，张强博士编著的《燃煤电厂 SCR 烟气脱硝技术及工程应用》一书正好填补了这一空白。

张强博士的这本著作具有以下特点：

(1) 著作的内容系统、全面，涉及了燃煤电厂 SCR 烟气脱硝技术及工程应用的各个方面，从反应机理、催化剂、脱硝系统和装置的设计、控制系统，到运行维护、安全与卫生和应用实例等都有精彩的分析和论述，对工程应用来说是一本很好的参考书；

(2) 在理论和实际应用方面都做了比较详尽的介绍，特别要提到的是，著作中对流场的数值模拟和物理模型的冷态试验进行了比较详细的分析和介绍，对于 SCR 反应器的设计等很有参考价值。

作者在这本著作的内容安排上颇费了一番心思，在涉及一些工程问题时，有些内容介绍得十分详尽，这对工程技术人员是很有帮助的。但对于具体的工程项目，读者应根据相应工程的特点，灵活应用本书介绍的一些知识。

据我所知，张强博士是国内较早从事 NO_x 排放控制研究的科技人员之一。他在攻读博士学位期间研究了炉内脱硝技术，在博士后工作站期间研究了烟气脱硝技术，出站后主要从事电厂烟气脱硝的研究与工程应用工作。他不仅具有深厚的理论基础，还多次参加了国内脱硝项目的评标及设计审查等相关工作，积累了比较丰富的工程实践经验。

张强博士编写的这本 SCR 烟气脱硝技术及其工程应用的著作，展示了 SCR 烟气脱硝技术及其发展的最新成果，也包含了他的研究心得和经验，可使国内的读者，特别是关注电力环保的相关读者尽快地了解这门技术，对从事这方面研究和应用的读者也具有重要的参考价值。我深信这本书的出版，将会对 SCR 脱硝技术在我国电站的推广应用起到一定的促进作用。



中国电机工程学会名誉理事，学术委员会委员
西安交通大学兼职教授，博士生导师
西安热工研究院研究员

前言

我国以燃煤为主的电力生产所造成的环境污染是制约电力工业发展的一个重要因素。其中氮氧化物 (NO_x) 将是继粉尘和硫氧化物 (SO_x) 之后燃煤电站环保治理的重点。

由于高的还原率及技术的广泛使用,选择性催化还原 (SCR) 已成为目前国内外电站烟气脱硝的主流技术。

随着我国环保要求的日益提高,SCR 技术通过技术引进与消化吸收将在我国逐步推广使用,为了使我国的电力环保科技工作者尽快了解这门专业技术,同时又看到市场上还没有一本专门系统介绍 SCR 技术的工程科技书,为此,作者在多年从事 NO_x 控制研究及工程实践的基础上,参阅了大量的资料,编写完成了这本《燃煤电站 SCR 烟气脱硝技术及工程应用》。

全书共分成九章,第一章简要介绍了我国的电力发展与环境保护;第二章介绍了 SCR 方法的基本原理;第三章介绍了燃煤电站 SCR 的工艺过程及主要部件的设计原则;第四章系统介绍了 SCR 催化剂的特点、设计、中毒原理、管理方案、生产过程、安装程序、运行维护、再生及催化剂工程应用实例;第五章介绍了 SCR 系统使用的主要还原剂;第六章介绍了 SCR 的控制系统;第七章介绍了脱硝装置的运行及对锅炉的影响;第八章介绍了相关的劳动安全与职业卫生问题;第九章介绍了 SCR 装置在中国燃煤机组中设计应考虑的问题及国内的几个应用实例。

本书在编写过程中得到了华北电力大学李文彦教授、中国华能集团公司林勇先生、中国大唐国际发电有限公司黄先腾先生、丁德军先生、原国家电力公司舒惠芬司长、华北电力设计院王宝德先生、康宁催化剂公司王剑波先生、巴克-杜尔公司陆劲松先生、江苏苏源环保工程公司孙克勤先生、刘雪峰先生等领导与专家的支持与帮助。在此一并表示感谢。

全书由西安热工研究院有限公司危师让研究员审阅,在此表示衷心的感谢。

除了书末所列的参考文献外,作者在编写过程中还参阅了一些近期国内燃煤电站脱硝工程的招标文件,引用了其中的观点和部分资料,在此表示感谢。

另外,本书的出版受到了国家高技术发展研究发展计划 (863) 项目“高温高尘型烟气脱硝关键技术研究开发 (2006AA05Z305)”、“燃煤电站 SCR 脱硝催化剂制备技术研究 (2007AA05Z309)”及国家重点基础研究发展计划 (973) 项目“气化煤气与热解煤气共制合成气的多联产应用的基础研究 (2005CB221206)”的资助。

由于作者水平的限制及编写时间的仓促,书中错误及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2006 年 12 月于西安

目录

1 绪论	1
1.1 我国的能源结构及环境污染现状	1
1.2 煤燃烧 NO_x 的生成机理	4
1.3 NO_x 控制技术	7
2 SCR 方法概述	15
2.1 SCR 应用现状	15
2.2 SCR 反应的基本化学原理	16
2.3 影响 SCR 过程的主要反应条件	21
3 燃煤电站 SCR 工艺过程及设计要求	26
3.1 SCR 装置在电站中的总体布置	26
3.2 SCR 装置的系统组成及典型工艺流程	27
3.3 SCR 装置的主要设备及设计原则	31
3.4 流场模拟与试验	59
3.5 总体设计要求	77
3.6 脱硝系统的性能考核	79
4 SCR 系统采用的催化剂	81
4.1 SCR 催化剂的分类及特点	81
4.2 催化剂的设计	84
4.3 催化剂的钝化与中毒	88
4.4 典型的催化剂运行管理方案	91
4.5 SCR 催化剂的生产过程	92
4.6 催化剂的安装	97
4.7 催化剂的检修与维护	102
4.8 催化剂的再生技术	102
4.9 失效催化剂的处理	106
4.10 工程应用实例——Cormetech SCR 催化剂工程应用介绍	107
5 SCR 系统使用的还原剂	120
5.1 概述	120
5.2 液氨系统	120
5.3 氨水系统	121
5.4 尿素系统	122
5.5 尿素系统与液氨/氨水系统比较	127
5.6 还原剂选择建议	128
6 脱硝装置的控制系統	129

6.1	控制原理与方法	129
6.2	SCR-DCS 分散控制系统主要控制回路的控制策略	130
6.3	典型的控制系统的功能与工程设计要求	131
6.4	设备选型建议	150
7	脱硝装置的运行及对锅炉的影响	152
7.1	脱硝装置的运行对锅炉及其尾部设备的影响	152
7.2	脱硝系统的运行	154
7.3	脱硝系统的可靠性及可用率	159
8	劳动安全与职业卫生	161
8.1	氨的劳动安全与职业卫生	161
8.2	防火与防爆	166
8.3	防电伤及防机械伤害	166
8.4	防噪声及振动	167
8.5	防暑	167
8.6	其它劳动安全及卫生措施	167
9	SCR 装置在我国燃煤机组上设计需考虑的问题及应用实例	168
9.1	高灰条件下燃煤机组 SCR 设计需考虑的问题	168
9.2	液态排渣条件下燃煤机组 SCR 设计需考虑的问题	180
9.3	SCR 装置在国内燃煤机组中的设计及应用实例	182
主要参考文献		192
附录 1 NO_x 排放值的计算与换算方法		193
附录 2 电力环保法规		194
附录 3 国内主要的 SCR 脱硝工程公司简介		211

1

绪 论

1.1 我国的能源结构及环境污染现状

1.1.1 我国的能源结构

能源是人类生存和发展的重要物质基础。在过去的十多年里，世界能源生产和消费呈现快速增长的趋势，但传统的矿物燃料在很长一段时间内仍将是世界能源生产和消费的主体，而由此引发的环境问题日益严重，成为亟待解决的能源技术问题。

世界的能源需求持续上升。根据世界能源组织在“能源展望”报告中称，全球能源需求到 2030 年将增加 50%，2/3 来自于发展中国家。日本能源经济研究所（IEEJ）则预测能源需求的增加主要来源于亚洲国家。

2005 年，我国一次能源生产总量达到 20.6 亿吨标准煤，是新中国成立初期的 87 倍，改革开放初期的 3.29 倍。煤炭产量达到 21.9 亿吨，已多年位居世界第一；原油产量达到 1.81 亿吨，居世界第六位；天然气产量达 500 亿立方米；电力发电装机突破 5 亿千瓦，年发电量达到 24747 亿千瓦时，均居世界第二位；可再生能源近年来发展迅速。

2005 年，我国能源消费总量达 22.25 亿吨标准煤，是世界第二大能源消费国。近年来，通过积极调整能源消费结构，煤炭消费的比重趋于下降，优质清洁能源消费的比重逐步上升，1990~2005 年，煤炭消费比重由 76.2% 降到 68.7%，油气比重由 18.7% 提高到 24%，水电及核电由 5.1% 提高到 7.3%。

相对于世界能源消费结构，中国能源的生产和消费有如下特点：一次能源以煤炭为主（表 1-1）；人均能源占有率低（为世界人均占有量的 50%）；能源利用率低。

表 1-1 2005 年中国一次能源生产和消费结构

项 目	煤炭/%	石油/%	天然气/%	水核能等/%	总量/亿吨标准煤
生产	63.83	18.78	5.96	11.43	12.30
消费	57.58	26.34	5.62	10.46	13.02

据 BP (英国石油) 公司 2003 年的世界能源统计报告, 我国的石油、煤炭、天然气的储采比 (已探明的储量与当年的开采量的比) 分别为 15 年、82 年和 46.3 年。虽然天然气及可再生能源在最近几年发展很快, 但煤炭将作为唯一可以长期依赖的常规能源, 今后一段时间里, 依然占据我国能源结构中的主导地位。

可以预见, 在半个世纪内, 中国能源结构将以化石燃料, 尤其是煤炭为主。

1.1.2 燃煤发电概述

目前, 世界上普遍认为, 在煤炭的各种利用取向中, 煤炭用于发电的利用效率和环境效率是较好的。电力是世界上最重要的二次能源, 属于清洁高效的能源转换利用形式之一。我国电力生产以燃煤发电为主, 电力行业是最大的煤炭用户, 煤炭产量中用于发电的比例逐年有所提高, 2005 年电力工业耗用原煤占到煤炭总产量的一半以上。

“十五”期间, 我国发电装机年均增长 10%, 电力消费弹性系数平均高达 1.43, 基本满足我国在工业化快速发展中的国民经济和人民生活水平提高的需要。2005 年末, 我国装机总量达到 5.17 亿千瓦, 比上年增长 16.9%, 是建国以来增长最快的一年。其中, 火电占 75.7% (在火电中煤电占 95% 左右), 水电占 22.7%, 核电占 1.32%, 风电占 0.2%。2006~2007 年平均每年装机约 7000 万千瓦, 2007 年, 电力行业将进入一个潜在的相对产能富裕阶段。

预计到 2010 年, 电力装机容量将达到 8 亿千瓦左右, 其中, 煤电将达到 5.5 亿千瓦。到 2020 年, 电力装机容量将达到 11 亿千瓦左右。

从发达国家数十年的实践来看, 电力增长越快, 总的能源需求增长越慢; 电力占终端能源的比例越大, 单位产值的能源消耗越低。高效、环保及合理利用煤炭资源也是未来我国电力发展的方向。

1.1.3 燃煤发电的环境问题

我国燃煤发电主要是通过直接燃烧方式, 煤炭燃烧产生了大量的烟尘、硫氧化物 (SO_x)、氮氧化物 (NO_x)、汞等重金属氧化物以及大量的二氧化碳气体。此外, 还有固体渣和废水排放带来的环境问题。这些污染物排入大气, 已经造成了严重的环境问题, 是我国经济可持续发展亟待解决的重要问题。在燃煤电站污染物排放的控制方面, 由于我国近几十年来的努力, 固体渣和废水已经得到了很好的解决; 在烟尘排放方面, 通过采用高效率的烟气除尘装置, 烟尘排放也已经得到了有效控制; 但是随着环保要求的进一步提高, 如对 $2.5\mu\text{m}$ 以下的细微颗粒也提出了要求, 则普通的静电除尘器将面临严重挑战。为此, 国内近几年新建

的燃煤发电机组中有一部分采用了静电除尘器和布袋除尘器相结合的新技术,进一步提高了对细微烟尘的捕集效率,有望得到较快普及。

二氧化硫(SO_2)污染成为当前的突出问题。根据2004年6月3日公布的《2003年中国环境状况公报》显示:2003年,全国废气中二氧化硫排放总量为2158.7万吨,其中,工业来源的排放量为1791.4万吨,生活来源的为367.3万吨。2005年,全国二氧化硫排放量为2549万吨,其中燃煤发电二氧化硫的排放量占到50%以上。如果不加以治理,预计到2010年二氧化硫的排放量将达到3585万吨,到2020年二氧化硫的排放量将达到4000万吨。

氮氧化物(NO_x)成为继二氧化硫(SO_2)之后燃煤发电污染物治理的重点。据测算,我国2000年氮氧化物的排放量为1500万吨,如果不加以控制,预计到2010年氮氧化物的排放量将达到1765万吨,到2020年氮氧化物的排放量将达到2639万吨。然而我国环境的二氧化硫容量只有1620万吨,氮氧化物的环境容量只有1800万吨。出现酸雨城市已有265个,酸雨污染较以前有所增加。

进入21世纪以来,我国的环境形势日益严峻。烟尘、粉尘、 SO_2 、 NO_x 以及由此而产生的酸雨等对大气环境造成了极大的危害,酸雨面积已超过国土面积的29%。就大气而言,主要的污染物就是烟尘、二氧化硫、氮氧化物。而环境污染的最大来源是燃煤排放物,火电厂成为重要的污染排放源。火电厂排放污染严重的现实已制约了电力工业的发展。鉴于此,坚持走一条既要发展电力工业,又要保持环境的可持续发展的道路是十分重要的。

1.1.4 电力环保政策法规

对于燃煤发电的污染物排放问题,我国政府给予了高度的重视。

早在1992年8月1日,首次实施了单独为发电厂制定的GB 13223—1991《燃煤电厂大气污染物排放标准》文件,规定了 SO_2 的排放浓度由烟囱的有效高度确定,对 NO_x 未作规定。

1992年颁布了《关于开展征收工业燃煤 SO_2 排污收费试点工作的通知》,同时,1995年国家环保总局开始酸雨控制区和二氧化硫污染控制区的划分,1998年开始实施对占有国土面积11.4%,占二氧化硫排放量的60%的重点地区实行控制。

1995年修订了《中华人民共和国大气污染防治法》,规定了在“两控区”不能采用低硫煤的新建项目必须配套建设脱硫装置;对已建企业不用低硫煤的,应当采用控制二氧化硫的排放措施;并规定企业采取先进的脱硫技术。1996年发布了《火电厂大气污染物排放标准》GB 13223—1996,提出了 SO_2 排放量和排放浓度的双重控制,排放浓度为 $1200\text{mg}/\text{m}^3$ (标准,下同),只在“两控区”内执行,仅对 $\geq 1000\text{t}/\text{h}$ 的锅炉提出了 NO_x 的控制要求,排放浓度为 $650\text{mg}/\text{m}^3$ 。

1997年国家环保总局发布了《“九五”期间全国主要污染物排放总量控制实施方案》,确定了“九五”期间对包括二氧化硫在内的12种污染物的总量控制原则;国家环保总局在贯彻《国务院关于酸雨控制区和二氧化硫污染控制区有关问

题的批复》的执行方案中,建议有关部门应将脱硫技术的研究、开发、推广应用工作列入环保工作计划,引进适合我国国情的二氧化硫控制技术,大力发展相关产业,在有关项目和资金安排上,应向“两控区”倾斜。1997年8月,国家科委将脱硫装置列入《国家高新技术产品目录》。国家环保局1997年将脱硫脱硝列入《国家环境保护科技发展“九五”计划和2010年长远规划》。国家计委1997年还发布了《中国洁净煤技术“九五”计划和2010年发展纲要》,建议对脱硫技术等工程进行工程试验示范;提出了能源利用和资源节约的“十五”规划重大示范工程,包括洗选脱硫、燃烧中固硫及烟气脱硫等以污染技术治理为主的二氧化硫减排示范;机械工业“十五”规划要求攻克高温脱硫技术,重点发展火电厂烟气脱硫等成套设备。

1998年发布了《关于在酸雨控制区和二氧化硫污染控制区开展征收二氧化硫排污费扩大试点的通知》,规定了二氧化硫排污费的征收范围和征收标准。

1999年国家发展计划委员会和科技部联合发布了《当前国家优先发展的高新技术产业重点领域指南》,包括烟气脱硫工艺和设备;国经贸技术[1999]749号将火电厂脱硫技术、低 NO_x 燃烧器技术及烟气脱硫设备列为《近期行业技术发展重点》。

2000年2月,国家经贸委、国家税务总局将脱硫设备列入《当前国家鼓励发展的环保产业设备(产品)目录》(第一批)、第二批。同时,国家经贸委印发了《火电厂烟气脱硫关键技术与设备国产化规划要点》,对脱硫工艺的设计及脱硫设备的生产规定了目标。

2002年再次修订了《中华人民共和国大气污染防治法》,对于超过排放标准或者总量控制指标的新建、扩建项目必须配套建设脱硫装置,在“两控区”内,已建企业超过排放标准的,必须规定限期治理;要求企业对燃烧过程中产生的氮氧化物也采取措施。同年,国家环保总局、国家经贸委及科技部联合发布了《燃煤二氧化硫污染防治技术政策》。

2003年发布了《排污费征收标准管理办法》,规定从2005年7月1日起, SO_2 排污费按0.6元/当量(对于 SO_2 ,1当量=0.95kg)收取,从2004年7月1日起, NO_x 排污费按0.6元/当量(对于 NO_x ,1当量=0.95kg)收取。

从2004年3月7日,实施最新的GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》(见附录2),通过排放量和排放浓度双重控制,Ⅱ、Ⅲ时段燃煤 SO_2 为 $400\text{mg}/\text{m}^3$;Ⅱ时段燃煤 NO_x 为 $650\text{mg}/\text{m}^3$,Ⅲ时段燃煤 NO_x 为 $450\text{mg}/\text{m}^3$ 。

北京市环保局及北京市技术监督局联合颁发了“锅炉污染物综合排放”北京市地方标准DB 11/139—2002,提出了更为严格的排放标准(见附录2)。

1.2 煤燃烧 NO_x 的生成机理

燃煤发电过程中产生的众多气态污染物中, NO_x 是危害很大且又很难处理的气态污染物之一。煤燃烧所产生的氮氧化物主要是一氧化氮(NO)、二氧化

氮（NO₂），其它氮的氧化物很少。不过，NO 排到大气中很快就会被氧化成 NO₂。NO 和 NO₂ 都是有毒气体，其中 NO₂ 的毒性很大，5 倍于 NO。

NO₂ 是一种红棕色有毒的恶臭气体，空气中只要有 0.1ppm（1ppm=1μL/L，下同）浓度就可闻到，1~4ppm 即有恶臭，而 25ppm 就恶臭难闻了。NO₂ 对人类和动植物的危害很大（详见表 1-2）。更为严重的是，NO₂ 在日光作用下会产生新生态氧原子（NO₂ $\xrightarrow{h\nu}$ NO+O），这种新生态氧原子在大气中将会引起一系列连锁反应，并与未燃尽的碳氢化合物一起形成光化学烟雾，其毒性更强。如在 20 世纪 70 年代初，日本东京发生的一起光化学烟雾，使上万人喉咙发炎，眼鼻受到刺激甚至昏倒。因在这一些反应中产生了各种毒性很强的二次污染物，如臭氧（O₃）、过氧乙酰硝酸酯（PAN）、过氧基硝酸酯（PBN）以及过氧硝基丙酰（PPN）等。

表 1-2 NO₂ 对人类和动植物的影响

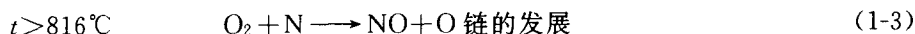
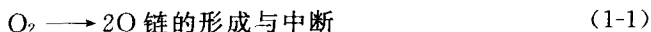
NO ₂ 浓度/ppm	影 响
0.5	连续 4h 暴露,肺细胞病理组织发生变化;连续 3~12 个月暴露,在支气管炎部位有肺气肿感染,抵抗力减弱
约 1	闻到臭味
2.5	超过 7h,豆类、西红柿等农作物的叶变白
3.5	超过 2h,动物细菌感染增大
5	闻到强烈恶臭
10~15	眼、鼻、呼吸道受到刺激
25	人只能短时暴露才安全
50	1min 内就感到呼吸道异常、鼻受刺激
80	3min 内感到胸痛
100~150	0.5~1h 就会因肺水肿而死亡
200 以上	人立即死亡

大气被 NO₂ 污染后还会使得机器设备和金属建筑物过早地损坏；妨碍和破坏植物的生长；降低大气的可见度；阻碍热力设备出力的提高，甚至使设备的效率降低。

因此，为了防止 NO₂ 及其引起的光化学烟雾的危害，就必须抑制煤炭燃烧时 NO_x 的生成量。

煤燃烧产生的氮氧化物主要来自两个方面：一是燃烧时空气中带进来的氮，在高温下与氧反应所生成的 NO，它被称为“热力 NO”（T-NO）；二是来自燃料中固有的氮化合物经过复杂的化学反应所生成的氮的氧化物，称为“燃料 NO”（F-NO）。这两部分氮的氧化物的形成机理是不相同的。除此之外，还有一部分是分子氮在火焰前沿的早期阶段，在碳氢化合物的参与影响下，通过中间产物转化的 NO_x，称为“瞬态型的 NO_x”，这部分数量很少，一般不予考虑。

空气中的氮在燃烧室的高温下被氧化成 NO 的机理是相当复杂的, 一般认为按以下连锁反应进行



反应 (1-1) 是在高温炉膛环境下空气中氧分子被离解成自由原子的过程, 它是连锁反应的开始, 所产生的氧原子在高温下 ($t > 1538^\circ\text{C}$) 与空气中的氮反应形成 NO, 同时释放出氮原子。所释出的氮原子又与空气中的氧反应生成 NO。由此可见, 反应 (1-2) 和反应 (1-3) 所生成的 NO 仅与空气中氮、氧浓度有关, 而与燃料的组成无关, 固称之为“热力 NO” (或“空气 NO”), 其生成量为

$$[\text{NO}] = \int_0^{\tau_c} A e^{-E/RT} \sqrt{[\text{N}_2][\text{O}_2]} dt \quad (1-4)$$

式中, τ_c 为排烟排出前在炉膛内的停留时间。从式 (1-4) 可看出, “热力 NO” 生产量与反应区的温度、反应区内氮、氧的浓度以及燃烧气体在反应区的停留时间成正比, 而其中温度的影响尤为显著。如果温度相当低, 自由基的氧原子数量又不够多, 则热力 NO 的生成就会被抑制。

“燃料 NO” 的形成则更复杂, 目前对此尚未透彻了解。大量试验研究表明, 其形成机理可能是: 燃料进入炉子后, 由于高温分解释放出 N、NH 或 CN 等各种可能形式的自由基, 这些自由基随即被氧化成 NO 或再被结合成 N_2 原子, 这就取决于局部地区的氧浓度。一般来说, 燃料中氮氧化物含量越高或炉膛中氧浓度越大, 则形成“燃料 NO” 就越多。这种“燃料 NO” 即使在温度比较低的情况下也能形成。

综上所述, 影响燃料燃烧时 NO 生成的主要因素有以下几方面。

(1) 燃料中氮化合物的含量 氮化合物含量越高, “燃料 NO” 生成就越多, 例如气体燃料中氮化合物含量极少, 故它燃烧时生成的 NO 几乎都是由空气中的氮转化而来; 相反, 固体燃料煤, 特别燃烧煤粉, 烟气中的 NO_x 绝大部分 (90%) 是由燃料中固有氮化物转化而来; 而液体燃料则介于上述两者之间。

(2) 火焰温度 (或燃烧区的温度) 和高温下的燃烧时间 (或滞留时间) 温度越高, NO 越易生成, 特别是“热力 NO”, 在 2000°C 以上时几乎可以在瞬间氧化而成; 在 $1600 \sim 2000^\circ\text{C}$ 范围内, 如果持续时间较长, 亦易生成 NO, 若时间较短, 则 NO 的生成速度就慢些; 在 1500°C 以下时, “热力 NO” 的生成速度就显著减慢, 但“燃料 NO” 的生成并不变慢。

(3) 燃烧区中氧的浓度 燃烧区中氧浓度增大, 则不论“热力 NO” 还是“燃料 NO”, 其生成量都将增大。此外, 当氧量供应适中时, 燃烧温度较高, 更易生成 NO; 若空气供应不足, 氧量减少, 此时燃烧不完全, 燃烧温度下降, 这样虽然使 NO 生产量减少, 但会增多炭黑以及 CO 等生产量。如果空气量大量过剩, 燃烧区中氧量与氮量虽然明显增加, 但由于此时燃烧温度下降, 反而会导致 NO 生成减少, 同时 NO 浓度也被大量过剩空气所稀释而下降。

在上述各因素中,火焰温度对 NO 生成有很大的影响。温度越高,NO 生成越多。此外,NO_x 的生成还与燃烧方式和燃烧装置形式有很大关系。

1.3 NO_x 控制技术

由前述可知,高温和高的氧浓度是产生热力 NO_x 的根源。因此,减少热力 NO_x 的措施有:①减少燃烧最高温度区域范围;②降低燃烧峰值温度;③降低燃烧的过量空气系数和局部氧气浓度。

燃料 NO_x 的产生是由于燃料中的氮在燃烧过程中生成离子析出,与含氧物质反应而形成 NO_x。燃料中的氮并非全部转化成 NO_x,依据燃料和燃烧方式的不同而存在一个转化率,一般为 15%~30%。因此,控制燃料 NO_x 的产生的措施有:①减少过量空气系数;②控制燃料与空气的前期混合;③提高入炉的局部燃烧浓度;④利用中间生成物反应降低 NO_x 产量。

根据以上讲述的 NO_x 的形成特点,把 NO_x 的控制措施分成燃烧前、燃烧中和燃烧后处理三类。燃烧前脱氮主要将燃料转化为低氮燃料,成本太贵,工程应用较少。燃烧中脱氮主要指各种降低 NO_x 的燃烧技术,费用较低,脱硝率不高,但仍然能满足当前及今后短期的环保要求。燃烧后脱氮主要指烟气脱硝技术,脱除效率高,随着环保要求的日益严格,高效率的烟气脱硝技术将是主要的发展方向。

因此,从工程应用的角度把控制火电厂 NO_x 排放的措施分为两大类:一类是通过燃烧技术的改进(包括采用先进的低 NO_x 燃烧器)降低 NO_x 排放量;另一类是尾部加装烟气脱硝装置。对于前者,国外低 NO_x 燃烧技术的发展已经历三代:第一代技术没有对燃烧系统做大的改动;第二代技术以空气分级燃烧器为特征;第三代技术则是在炉膛内同时实施空气、燃料分级的三级燃烧方式(或燃烧器)。由于这种措施投资、运行费用低,采用最广泛,也是主要工业国下大力气不断完善的措施。对于尾部加烟气脱硝装置,其优点是可将其排放量降至 200mg/m³ 以下,但其初投资及运行费用高,在德国、日本、奥地利等工业国得到了应用。下面对燃煤电站常用的几种脱硝技术做一简单的介绍及评述。

1.3.1 低过量空气燃烧

使燃烧过程尽可能地在接近理论空气量的条件下进行,随着烟气中过量氧的减少,可以抑制 NO_x 的生成,是一种简单的降低 NO_x 的方法。一般来说,采用低过量空气燃烧可以降低 NO_x 排放 15%~20%,但是采用这种方法有一定的限制条件,如炉内氧的浓度过低,低于 3%时,会造成 CO 的含量急剧增加,从而大大增加化学未完全燃烧热损失。同时,也会引起飞灰含碳量的增加,导致机械未完全燃烧损失的增加,燃烧效率降低。此外,低氧浓度会使炉膛内某些地区成为还原性气氛,从而降低灰熔点,引起炉壁结渣和腐蚀。因此,采用低过量空气燃烧来降低 NO_x 排放有一定限制,需慎重选择。

1.3.2 空气分级燃烧

传统的燃烧方式是将所有的煤粉和空气都通过燃烧器送入炉膛一起燃烧，这样煤粉与空气充分混合，燃烧强度大，燃烧温度高，但由此产生的 NO_x 排放量也很高。而空气分级燃烧技术是通过控制空气与煤粉的混合过程，将燃烧所需要空气逐级送入燃烧火焰中，以此实现煤粉颗粒在燃烧初期的低氧燃烧，达到降低 NO_x 排放的目的。空气分级燃烧技术可以分为垂直分级和水平分级。垂直分级是将一部分燃烧空气从主燃烧器中分离出来，从燃烧器上部送入炉膛，这股燃烧空气被称为燃尽风 (OFA)。根据 OFA 安装位置的不同，又分成紧凑型 OFA 和分隔型 OFA。OFA 的量一般占总空气量的 10%~20%，具体的量根据分级程度的不同而不同。由于 OFA 的存在，主燃烧区的氧量下降了，空气量减少了，燃料型 NO_x 的生成减少；由于燃烧温度降低，热力型 NO_x 的生成也减少了，因此，总的 NO_x 排放量降低了。水平分级是将二次风的喷射角偏转，与一次风形成大小不同的切圆，通过这种方式推迟二次风与一次风的混合，形成一定程度的空气分级。

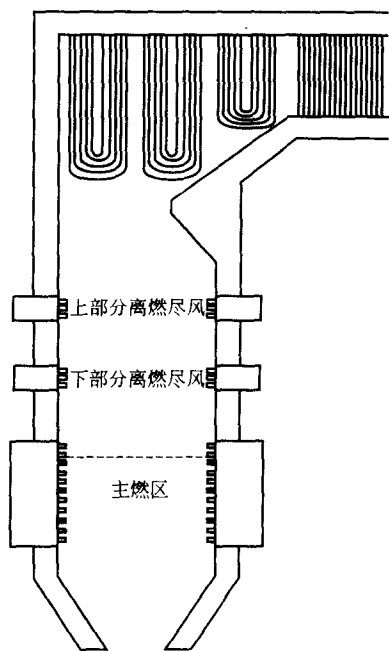


图 1-1 空气分级燃烧

根据空气分级燃烧技术降低 NO_x 的机理可知，其系统主要包括低 NO_x 燃烧器和燃尽风系统。主燃烧区域的过量空气系数尽可能低，燃料在此区域缺氧燃烧，产生少量的 NO_x ，烟气上行至燃尽区域，与燃尽风混合燃烧，此时由于燃烧温度低，生成 NO_x 相对较少，而未燃尽炭在此得以燃尽，其布置方式如图 1-1 所示。

使用空气分级燃烧技术对老机组实施改造较为方便，改动量小，改动费用相对较低，比较适合于高挥发分的煤种。在燃用挥发分较高的烟煤时，采用低 NO_x 燃烧器加燃尽风系统的改造可使锅炉 NO_x 的排放降低 20%~50%；改造后，锅炉排烟温度一般飞灰含量有所增加，锅炉效率有所降低。

由于空气分级燃烧降低了主燃烧区的空气系数，容易导致水冷壁附近还原性气氛增加，从而引起炉膛内的结渣和腐蚀问题，因此，在设计上必须考虑这一点，以减少这方面的影响。不过也由于空气分级燃烧降低了炉膛内的燃烧温度水平，这又对缓解炉膛结渣有好处。

空气分级燃烧技术在我国应用较为广泛，西安热工研究院曾对国内大型锅炉的运行业绩进行过调查，结果表明，国内 300MW 及以上机组 80% 应用了空气分级燃烧技术。国外应用更为广泛，其中美国采用空气分级燃烧的低 NO_x 燃烧器改造燃煤锅炉工程达到 400 多台，采用炉膛空气分级改造的燃煤锅炉工程有

120 多台，机组总容量分别达到 130GW 和 50GW。

1.3.3 低 NO_x 燃烧器 (LNB)

LNB 的特点是在燃烧器出口实现分级送风并与燃料合理配比，达到抑制 NO_x 生成的目的。LNB 的设计用于控制燃烧器附近燃料与空气的混合及理论空气量，以阻止燃料氮向 NO_x 的转化和生成热力 NO_x ，同时又要保持较高的燃烧效率。主要是通过控制燃烧器喉部燃料和空气的动量及流动方向来实现的。低 NO_x 燃烧器控制 NO_x 排放原理如图 1-2 所示。

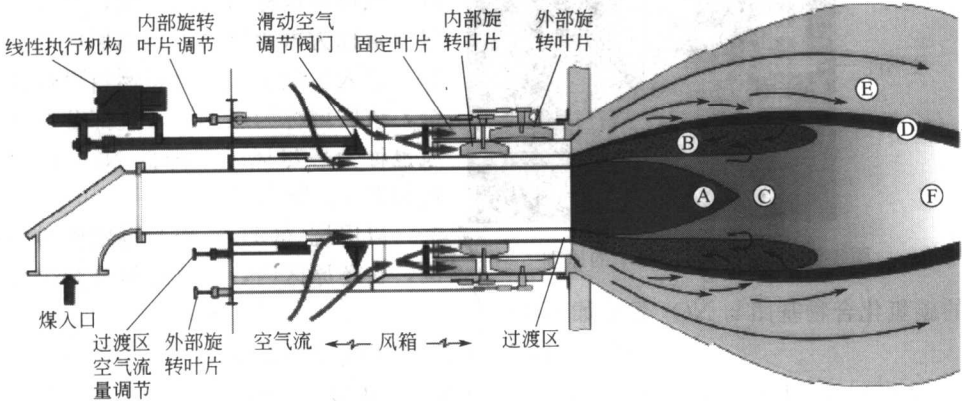


图 1-2 低 NO_x 燃烧器控制 NO_x 排放原理

A—贫氧挥发物析出；B—烟气回流区；C— NO_x 还原区；D—等温火焰面；
E—二次风控制混合区；F—燃尽区

低 NO_x 燃烧器技术在国内外的电站中具有广泛的应用业绩。图 1-3 为阿尔斯通公司先进的低 NO_x 燃烧器。图 1-4 为三井-巴布科克公司的低 NO_x 燃烧器。

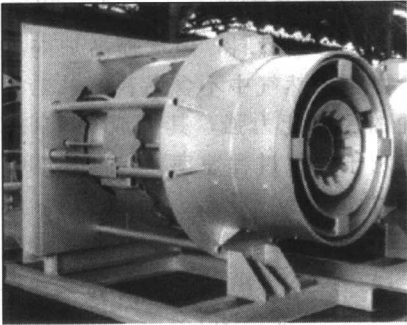


图 1-3 阿尔斯通公司先进的低 NO_x 燃烧器



图 1-4 三井-巴布科克公司的低 NO_x 燃烧器

1.3.4 再燃烧降低 NO_x 技术

燃料再燃烧技术又称为燃料分级燃烧技术，其特点是将燃烧分成三个区域：

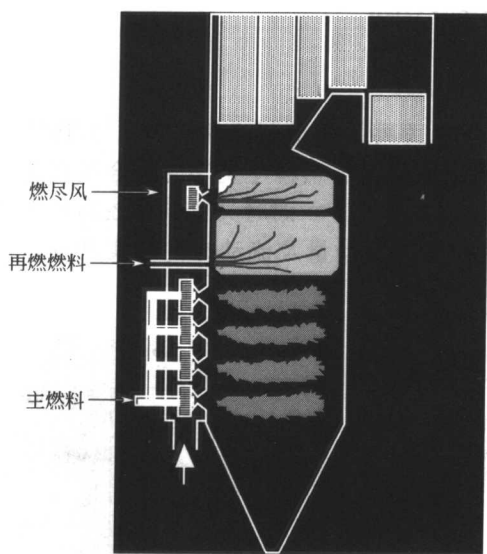
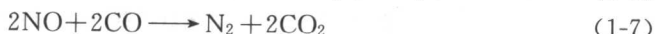
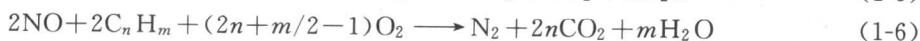
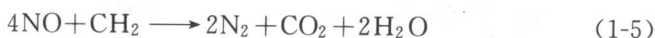


图 1-5 再燃烧降低 NO_x 的原理

主燃烧区、再燃烧区和燃尽区。主燃烧区是氧化性或弱还原性气氛，该区域内主燃料在欠氧或弱还原性环境下燃烧，产生了 NO_x ；再燃烧区，将二次燃料送入炉内，使其呈还原性气氛 ($\alpha < 1$)，在高温和还原气氛下生成碳氢原子团，该原子团与一次燃烧区生成的 NO_x 反应，将 NO_x 还原成 N_2 ，该区域通常也称为还原区域，二次燃料通常称为再燃燃料；在还原区的上方，送入少量空气使再燃燃料燃烧完全，该区域称为燃尽区，这部分二次风也称为燃尽风。其降低 NO_x 的原理如图 1-5 所示。

以甲烷 (CH_4) 作为再燃燃料为例，在还原区内，二次燃料分解生成

的碳氢化合物基团与 NO_x 发生如下反应



再燃烧技术降低 NO_x 的影响因素主要有以下几方面。

(1) 再燃燃料的种类和性质对再燃特性的影响 再燃燃料的品质对还原过程的质量是一个非常重要的影响因素，由于再燃燃料是从炉子上部引入，一般停留时间比较短，所以宜燃用易着火的燃料；此外还要求燃料含 N 量低，以减少 NO_x 再生成量。虽然天然气、油和煤都可以作为二次燃料，但从提高炉内再燃烧还原 NO_x 的效果来说，天然气最好，主要由于天然气中不含燃料氮，二次燃料含有燃料氮将降低还原效率。天然气和油的反应能力强，其生成 XN (NO 、 HCN 、 NH_3 等) 基团的反应时间极短暂，有利于还原过程速率的提高和 NO 还原反应的进行深度。与天然气比较，油在欠氧燃烧时易析出炭，难以燃尽。煤也可以作为二次燃料，但煤中的焦炭氮会使 NO 的还原效果降低，因此应尽量使用高挥发分煤种。另外，使用烟气作为二次燃料的输送介质可以保证燃料混合物中氧量较低，减缓二次燃料煤中氮的氧化反应速率，有利于 NO 分解。同时，还原反应使用超细煤粉，以加快挥发分完全燃烧和产生活性基团的速率，也有利于在该段极其短暂停留时间内维持高燃尽度。再燃燃料的选择受制于资源条件、技术经济性比较和产业及环保政策等条件。

(2) 再燃燃料的份额 再燃燃料太少，则达不到理想地降低 NO_x 的效果；