

火电厂烟气脱硝技术 —选择性催化还原法

陈进生 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

火电厂烟气脱硝技术 —选择性催化还原法

陈进生 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书在广泛综合国内外烟气脱硝技术资料的基础上,结合作者丰富的电厂烟气脱硝工程实际经验,较为全面、系统地阐述了选择性催化还原法(SCR)烟气脱硝技术及相关的专业知识。

本书分别对 SCR 催化剂及其催化原理,SCR 的工艺与设备,SCR 工程的调试与运行,SCR 脱硝性能与优化,SCR 催化剂的失活、再生与更换等内容进行了详细的阐述;并详细介绍了国内已建的 SCR 工程及部分国外工程。此外,本书还附有典型的烟气脱硝工程系统图,供读者参考。

本书涉及了烟气脱硝技术的各个方面,内容丰富,条理清晰,结合了作者本身的工程实际经验,是国内第一本详细介绍电厂烟气 SCR 脱硝技术的科技书,具有较强的实用性和参考价值。

本书适用于从事火电厂烟气脱硝工程设计、建设、系统运行管理工作的工程技术人员阅读,也可作为从事废气处理及环境监测等工作的科技人员、高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂烟气脱硝技术——选择性催化还原法/
陈进生编著. —北京:中国电力出版社, 2008
ISBN 978-7-5083-6085-0

I. 火… II. 陈… III. 火电厂-烟气-脱硝
IV. X773.013

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 150115 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷
710 毫米×980 毫米 16 开本 18.75 印张 309 千字
印数 0001—3000 册 定价 28.00 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



作者简介

陈进生（1970~），男，福建泉州人，博士，副研究员，高级工程师。主要从事环境污染治理与环境化学分析研究工作，负责过火电厂烟气脱硝、脱硫、除尘、废水治理和水处理工程的建设 and 运行管理，负责多项烟气净化科研项目。现已发表环境工程及工业水处理方面的技术论文20余篇。

前言

preface

燃煤电厂排放的氮氧化物(NO_x)已成为大气污染物的主要来源,同等当量的氮氧化物对大气的危害性高于二氧化硫。随着环保法规的进一步严格,单纯的低氮燃烧技术已经无法适应燃煤烟气 NO_x 的排放要求。目前,在沿海经济发达地区和人口稠密的中心城市,新建火电厂已开始同步建设烟气脱硝装置,运行机组也酝酿增设烟气脱硝装置,烟气脱硝装置的建设正进入一个快速的启动阶段。

烟气脱硝工程一般采用选择性催化还原脱硝技术(SCR)。但是,除了科技期刊上有一些烟气SCR脱硝技术的介绍外,目前国内尚未发现有专门的参考书籍,而烟气SCR脱硝工程中的设计、安装、调试及运行维护等环节均急需专业性的参考书。因此,笔者结合厦门嵩屿电厂SCR烟气脱硝系统的工程实践经验,并在参考大量国内外文献资料的基础上编写了本书。

本书共分九章。分别对烟气催化降解的理论基础,SCR催化剂及其催化的原理,SCR的工艺与设备,SCR设备的安装、调试与运行,SCR脱硝性能与优化,SCR催化剂的失活、再生与更换等内容进行了详细的阐述;并介绍了国内外大量的SCR工程实例及设计方案,对SCR新技术的应用及脱硝新工艺进行了展望。此外,本书还附录了典型的烟气脱硝工程系统图,供读者参考。

在本书的编著过程中,厦门华夏电力公司江长水同志做出了很大的贡献,本书的绝大部分插图由江长水同志绘制与校核,同时他还提出了许多修改与完善的建议。北京中联动力技术公司白文辉高工、西安热工研究院赵宗让高工、北京康宁公司王剑波先生为本书提供了大量的素材。武汉大学黄种买教授对本书的编写给予了指导。厦门大学袁东星教授、李权龙副教授在本书的编写与出版过程中给予大力支持与鼓励。为此,特向他们表示诚挚的谢意。

限于个人水平,加之国内的烟气SCR脱硝技术刚刚起步,有些工艺技术还涉及商业保密等问题,资料的获取相对较为困难。因此,本书难免有疏漏、不完善或不妥之处,欢迎批评指正。

陈进生

2007年2月于厦门

目 录

contents

前言

第一章 绪论	1
第一节 中国的能源结构与大气污染	1
第二节 燃煤 NO_x 的生成与还原	3
第三节 NO_x 的危害	4
第四节 NO_x 排放控制法规	6
第五节 低氮燃烧技术	10
第六节 烟气脱硝技术	16
第七节 SCR 脱硝技术在国内外的应用	22
第二章 气体催化降解的理论基础	25
第一节 催化剂的分类及固体催化剂	25
第二节 催化剂的表面积和孔结构	27
第三节 催化剂的性能	30
第四节 催化剂的作用原理	37
第五节 气固催化反应动力学	41
第六节 催化剂的失活	47
第七节 催化剂的再生	56
第三章 SCR 催化剂及其催化原理	60
第一节 SCR 催化剂的分类	60
第二节 整体式块状载体	70
第三节 商用 SCR 催化剂	78
第四节 SCR 催化剂设计参数	89
第五节 SCR 反应的机理与过程	92
第四章 SCR 的工艺与设备	99
第一节 工艺流程	99
第二节 工艺布置	100
第三节 工艺参数	105

第四节 供氨设备	108
第五节 注氨设备	115
第六节 反应器	119
第七节 预留及改造 SCR 的方案	130
第八节 SCR 控制系统	139
第九节 烟气在线监测系统	143
第五章 SCR 设备的安装、调试与运行	147
第一节 SCR 脱硝设备的安装	147
第二节 SCR 脱硝设备的调试	161
第三节 SCR 脱硝设备的运行	165
第四节 SCR 脱硝设备的维护	173
第五节 氨的性质与应急措施	175
第六章 SCR 脱硝性能与优化	178
第一节 脱硝效率的影响因素	178
第二节 SO_2 转化率的影响因素	184
第三节 其他因子的相互影响	186
第四节 SCR 流体模型与优化调整	188
第五节 SCR 系统的优化实例	192
第六节 SCR 系统的性能测试	196
第七章 SCR 催化剂的失活、再生与更换	200
第一节 SCR 催化剂运行中的活性问题	200
第二节 SCR 催化剂的活性检测	208
第三节 SCR 催化剂的管理计划	215
第四节 SCR 催化剂的活性复苏	216
第八章 SCR 工程实例与方案	222
第一节 后石电厂	222
第二节 嵩屿电厂二期工程	229
第三节 嵩屿电厂一期工程	236
第四节 国华太仓电厂	242
第五节 北京某电厂	247
第六节 广州恒运热电厂	251

第七节 台湾电厂	254
第八节 国外运行经验	255
第九章 SCR 技术的应用展望及脱硝新工艺	261
第一节 SCR 技术国产化与应用展望	261
第二节 烟气光催化脱硝技术	264
第三节 烟气甲烷催化脱硝技术	266
第四节 烟气同时脱硫脱硝技术	268
第五节 烟气选择性催化氧化脱硝技术	277
第六节 直接分解法催化脱硝技术	279
第七节 SCR 低温催化剂的开发与应用	281
第八节 SNCR 与 SCR 联用脱硝技术	284
附图 1	286
附图 2	287
参考文献	288

第一章

绪 论

能源和环境是人类赖以生存和发展的基本条件，是当今世界可持续发展的两大问题。随着世界人口的增长和生活水平的提高，能源的开采和利用程度越来越高，规模越来越大，特别是近十多年来，能源的消耗迅速增长，对环境的影响和压力达到了空前的程度。

目前全球性的四大公害——大气烟尘、酸雨、全球变暖（温室效应）、臭氧层破坏——都与能源的生产和利用不当有着直接的关系，上述四大公害已严重影响人类的生存条件。要实现可持续性发展，必须使能源的生产和利用与环境相协调。

目前，我国污染物排放总量长期居高不下，远远超过环境自净能力。随着经济的持续快速发展和能源消费的增加，化石燃料开采和利用量的不断增加，有害物质的排放也越来越严重，已经对经济的发展和人们的生活产生了严重的影响。其中，氮氧化物的污染不断加剧，特别是北京、上海、广州等一些大城市，氮氧化物含量超标，局部地区甚至出现了光化学烟雾污染。

目前，火电厂氮氧化物的排放量约占全国氮氧化物排放总量的一半。随着火电厂数量的不断增加，火电厂氮氧化物的排放量及所占的比例还将不断上升，因此，控制氮氧化物排放量已成为火电厂继烟气除尘、脱硫之后的第三项污染重点治理工作。单纯的低氮燃烧技术已无法满足氮氧化物的排放标准，在这种情况下，作为当前世界上最有效的脱硝工艺——烟气选择性催化还原技术（Selective Catalyst Reduction，简称 SCR），已开始在我国火电厂出现。在经济发达或人员稠密的地区，火电厂开始同步建设或在原有旧运行机组的基础上增设 SCR 脱硝装置。可以预计，烟气 SCR 脱硝工程将在我国大规模展开，有效地降低燃煤电厂氮氧化物排放对环境所带来的负面影响。

第一节 中国的能源结构与大气污染

我国是能源生产与消费的大国，一次能源供应以煤炭为主，石油、天

然气资源短缺。据统计,我国 2003 年能源消费总量为 16.78 亿 t 标准煤,其中煤炭占 67.1%,原油占 22.7%,天然气占 2.8%,可再生能源占 7.3%。2004 年全国一次能源生产总量达到 18.46 亿 t,能源消费总量高达 19.7 亿 t 标准煤。原煤生产总量达 19.56 亿 t,其中发电及热电联产用煤总量达 9.6 亿 t,约占煤炭生产总量的 50%。

截至 2006 年底,全国发电装机容量达到 622GW。其中,水电为 128.57GW,约占总容量的 20.67%;火电为 484.05GW,约占总容量的 77.82%。

国家对氮氧化物的控制主要针对电站、锅炉等燃煤装置。电站排放的氮氧化物主要有 NO 、 NO_2 、 N_2O_5 等,这些氮氧化物统称为 NO_x 。计算表明,我国发电量每增加 100 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, NO_x 排放量就增加 3.9 万~8.8 万 t。2004 年前,燃煤机组(以 300MW 为代表)标况下 NO_x 平均排放浓度为 $800\text{mg}/\text{m}^3$,单位发电量的 NO_x 排放量为 $4.0\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。2006~2010 年,新增机组(以 600MW 为代表)标况下 NO_x 的平均排放浓度为 $400\text{mg}/\text{m}^3$,单位发电量的 NO_x 排放量为 $2.0\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

根据电力工业十一五发展规划,十一五期间计划开工火电项目 141GW,按照现有的 NO_x 控制政策,初步测算,2010 年的 NO_x 排放量将达 850 万 t 左右。

预计在将来的 30~50 年内,煤炭在我国一次能源生产与消费中所占比例将继续保持在 70% 左右。我国电力工业中以煤炭为主的能源格局不会改变,这种格局是由中国富煤缺油少气的能源资源特点和经济发展阶段所决定的,煤炭的消耗量将持续增长。

这种以煤炭为主的一次能源生产和消费结构带来了严重的环境污染问题,并损害了可持续发展的经济和环境基础。在煤炭燃烧向大气排放的多种污染物中,控制酸性气体的排放是现阶段防治的重点。有关资料显示,由于大气中的酸性气体超标(主要是 SO_x 和 NO_x),我国降水 pH 值小于 5.6 的区域已占国土总面积的 40%,而且大多位于我国经济发达地区,造成巨大的经济损失。表 1-1 为近年来全国燃煤量、火电燃煤量及污染物的排放情况。

表 1-1

全国燃煤量、火电燃煤量及污染物排放量

万 t

年 份	全国燃 煤量	全国火电 耗煤量	全国火电二氧 化硫排放量	全国火电氮氧 化物排放量
1996	145370	52210	679.1	359.3
1997	138370	53340	682.9	350.3

续表

年 份	全国燃煤量	全国火电耗煤量	全国火电二氧化硫排放量	全国火电氮氧化物排放量
1998	128880	52650	752.5	360.5
1999	114650	53880	780.8	401.9
2000	124540	59190	810.0	469.0
2001	126210	64560	784.4	497.5
2002	136610	73280	761.0	536.8
2003	157900	85000	1054.0	597.3
2004	187000	99400	1200.0	665.7

第二节 燃煤 NO_x 的生成与还原

一、 NO_x 的生成

煤燃烧产生的 NO_x 主要有 NO 和 NO_2 ，另外还有少量的 N_2O 。在煤的燃烧过程中， NO_x 的生成量和排放量与燃烧方式（特别是燃烧温度和过量空气系数等）密切相关，燃烧形成的 NO_x 可分为燃料型、热力型和快速型三种。

1. 燃料型 NO_x

煤中的氮一般以氮原子的形态与各种碳氢化合物结合，形成氮的环状或链状化合物。燃烧时，空气中的氧与氮原子反应生成 NO ， NO 在大气中被氧化成毒性更大的 NO_2 。这种燃料中的氮化合物经热分解和氧化反应而生成的 NO_x 称为燃料型 NO_x 。煤燃烧产生的 NO_x 中，75%~90%是燃料型 NO_x 。燃料型 NO_x 的生成和还原过程十分复杂，它们有多种可能的反应途径和众多的反应方程式。但是，几乎所有的试验都表明，过量空气系数越高， NO_x 的生成和转化率也越高。

2. 热力型 NO_x

热力型 NO_x 是指空气中的 N_2 与 O_2 在高温条件下反应生成的 NO_x 。温度对热力型 NO_x 的生成具有决定性作用，随着温度的升高，热力型 NO_x 的生成速度按指数规律迅速增长。以煤粉炉为例，在燃烧温度为 1350°C 时，几乎 100%生成燃料型 NO_x ，但当温度为 1600°C 时，热力型 NO_x 可占炉内 NO_x 总量的 25%~30%。除了反应温度外，热力型 NO_x 的生成，还与 N_2

浓度以及停留时间有关。也就是说,过量空气系数和烟气停留时间对热力学型 NO_x 的生成有很大影响。

3. 快速型 NO_x

快速型 NO_x 主要是指燃料中碳氢化合物在燃料浓度较高的区域燃烧时所产生的烃与燃烧空气中的 N_2 发生反应,形成的 CN 和 HCN 等化合物继续被氧化而生成的 NO_x 。在燃煤锅炉中,其生成量很小,一般在燃用不含氮的碳氢燃料时才予以考虑。

二、 NO_x 的还原

煤燃烧过程中实际排放出的 NO_x 量远小于根据煤中氮含量计算出的 NO_x 理论排放量,原因是煤中的氮并不都转化成 NO_x ,还有相当一部分转化成对环境无害的 N_2 。对燃烧器内部和烟道气中 NO_x 浓度分布的分析表明,燃烧器从底部向上, NO_x 浓度趋于减小,烟道气中 NO_x 浓度更小,这是因为部分 NO_x 在煤的燃烧过程中被还原生成了 N_2 。与 NO_x 可以发生反应的物质还有焦炭、一氧化碳 (CO)、氨气 (NH_3)、氢气 (H_2)、碳氧化合物等,其中 NO_x 与焦炭的反应最为重要,是 NO_x 还原的主要因素。

第三节 NO_x 的危害

化石燃料燃烧生成的氮氧化物,几乎全是 NO 和 NO_2 。天然气、重油、煤炭等天然矿物燃料燃烧生成的 NO_x 中, NO 占 90%,其余为 NO_2 。随着电力工业的发展和汽车数量的增多, NO_x 排放量将越来越大,对我国大气环境的污染越来越严重。

一、 NO_x 对人体的危害

NO_x 排放量和大气中 NO_x 浓度的增加,将使大气污染的性质发生变化,大气的氧化性增加,导致一系列城市和环境问题,对人体健康和生态环境构成巨大的威胁。在 NO_x 中,对人体健康危害最大的是 NO_2 ,它比 NO 的毒性高 4 倍,可引起肺损害,甚至造成肺水肿,慢性中毒可导致气管及肺部发生病变。 NO_2 在空气中的浓度(体积分数)与其对人体或其他生物的危害情况见表 1-2。

表 1-2 NO_2 浓度症状

NO_2 的体积分数 ($\times 10^{-6}$)	对人体或其他生物的危害情况
0.5	连续暴露 4h, 肺细胞病理组织发生变化; 3~12 个月, 会出现肺气肿, 对感染的抵抗力减弱
1	闻到臭味
2.5	>7h 时, 豆类、西红柿等作物的叶子变为白色
3.5	>2h 时, 细菌对动物感染能力增大
5	闻到很难闻的臭味
10~15	眼、鼻、呼吸道受刺激
25	人只能短时间停留
50	1min 内, 人的呼吸异常, 鼻子受刺激
80	3~5min 内, 引起胸痛
100~150	30min 内, 至多 1h, 人就会因肺水肿而死亡
>200	人瞬间死亡

二、酸雨的来源

酸雨是大气污染物(如硫化物和氮化物)与空气、水和氧之间化学反应的产物, 目前我国酸雨正呈急剧蔓延之势, 是继欧洲、北美之后, 世界第三大重酸雨区。20 世纪 80 年代, 酸雨主要发生在以重庆、贵阳和柳州为代表的川、贵、两广地区, 酸雨区面积为 170 万 km^2 。到 90 年代中期, 酸雨区已扩展到长江以南、青藏高原以东及四川盆地的广大地区, 酸雨面积扩大了 100 万 km^2 以上。以长沙、赣州、南昌、怀化为代表的华中酸雨区现已成为全国酸雨污染最严重的地区, 其中心区年降水 pH 值低于 4.0, 酸雨频率高于 90%, 已到了逢雨必酸的程度; 以南京、上海、杭州、福州、青岛和厦门为代表的华东沿海地区, 也已成为我国主要的酸雨区; 华北、东北的局部地区也出现酸性降水。酸雨在我国几呈燎原之势, 危害面积已占国土面积的 29% 左右, 并继续呈逐年加重的趋势, 发展速度十分惊人。

酸雨对土壤、农作物、森林、湖泊、鱼类和其他动物以及建筑物等产生极大的破坏。例如, 1982 年夏季, 重庆南山马尾松死亡率高达 46%, 四川峨眉山的冷杉也有 40% 死亡。据估计, 仅两广和川贵地区, 因酸雨造成的年经济损失就达 160 亿元, 1995 年全国由于 NO_x 和 SO_x 排放造成的经济损失在 1100 亿元以上, 接近于当年国民生产总值的 2%。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, 同硫酸

(H_2SO_4) 和硫酸盐细颗粒一起发生远距离输送, 从而加速了区域性酸雨的恶化。已有研究表明, HNO_3 对酸雨的贡献呈逐年上升之势, 降水中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值在全国范围内逐渐增加。

目前, 我国已结合对两控区的划分工作, 对 SO_2 的排放进行了全面控制, 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的控制。专家预测, 随着我国对 SO_2 排放控制的加强, 以及未进行脱硝火电厂和城市汽车数量的不断增大, NO_x 对酸雨的“贡献”将逐步增加, 甚至超过 SO_2 。

三、 NO_x 与碳氢化合物生成光化学烟雾

光化学烟雾产生的罪魁祸首是 NO_2 和碳氢化合物 (HC)。当空气中有这两种物质存在, 再遇到合适的气候条件时, 如强烈阳光、无风、逆温等, 就会产生光化学烟雾。由于我国大气中挥发性有机物 (VOCs) 浓度较高, 光化学烟雾的产生主要受 NO_x 的制约。

光化学烟雾的害处极大, 会造成农作物减产, 对人的眼睛和呼吸道产生强烈的刺激, 并会导致头痛、呼吸道疾病, 严重的会造成死亡。

四、 NO_x 参与臭氧层的破坏

大气中的 NO_x 也破坏着臭氧层, 臭氧层被破坏将改变天气结构。臭氧层是地球大气不可分割的一部分, 对大气的循环以及大气的温度分布起着重要的作用。臭氧在平流层中通过吸收太阳的紫外线辐射和地面的红外线辐射而使大气升温, 臭氧层被破坏会使平流层获得的热量减少, 而到达对流层和地球表面的太阳辐射增加, 导致了对流层变热而平流层变冷, 破坏了地表的辐射收支平衡, 使全球气候变化。臭氧层的损耗导致到达地表的紫外辐射增加, 紫外线可以促进维生素的合成, 对骨组织的生长、保护起有益的作用, 但紫外线中 UV-B 段辐射增强会引起皮肤病、白内障及免疫系统的疾病等。

第四节 NO_x 排放控制法规

一、工业发达国家 NO_x 控制法规

控制 NO_x 的排放是大气污染防治的一项主要内容。绝大多数工业发达国家和地区都制定了较严格的限制 NO_x 排放的法规和标准。最初, 人们把

注意力较多地集中在减少汽车尾气中的 NO_x ，但最近十几年情况有所变化，注意加强了对电厂 NO_x 排放的控制，尤其对大型火力发电厂。现在，世界发达国家都把电站锅炉产生的 NO_x 作为一个重要控制指标，并均已制定了相应的 NO_x 排放标准。

在 NO_x 的控制方面，德国和日本是世界上起步最早、技术最先进的两个国家，美国作为世界头号经济大国，近年来也有很多大的举措。

1. 德国

在德国，随着工业的发展与居民生活水平的提高， NO_x 的排放量迅速上升，1948~1950 年间，原西德的 NO_x 排放量为 $0.5 \sim 0.8 \text{ Mt/a}$ ；到 1986 年， NO_x 的排放量高达 3.19 Mt/a ，其中，23% 的 NO_x 来自发电厂及供热厂。

德国首次以法规形式提到 NO_x 的控制问题是在 1974 年的 TA 空气法中。该法提到了 NO_x 的危害性，并要求通过烟气循环降低燃烧区的局部温度以及采用空气分层、两段燃烧等措施来降低 NO_x 的生成量。

德国第一次提出 NO_x 的排放标准是在 1983 年 7 月，当时规定干式排渣且容量大于 300MW 的老式石煤锅炉（德国把除褐煤外的其他煤种均称为石煤）标况下 NO_x 的排放浓度限值应为 1300 mg/m^3 ，随后又有专家认为 1300 mg/m^3 的限值太宽，建议限制在 600 mg/m^3 以下。于是在第二年，土地委员会提出 400 mg/m^3 的限值；同年的环保会议上，提出的限值更低至 200 mg/m^3 ，后者虽无法律效力，但它指出了新建电厂应争取达到的排放目标。原联邦德国在当年出台的《大型燃烧设备规定》中，制定出了严格的气体污染物排放限值。其中，300MW 以上燃煤设备的烟气中， NO_x 浓度控制在 200 mg/m^3 以下。因此，大型机组必须安装脱硝装置（二次脱硝），单纯依靠低 NO_x 燃烧已无法满足要求。

德国严格的 NO_x 控制对欧洲其他国家起到了良好的促进作用，欧盟随后制定了统一的排放限值，见表 1-3。

表 1-3 欧盟关于某些燃烧器氮氧化物排放的标准

燃料种类	容量 (MW)	标况下的排放限量 (mg/m^3)
固体燃料	50~500	600
	>500	500
液体燃料	50~500	450
	>500	400

续表

燃料种类	容量 (MW)	标况下的排放限量 (mg/m³)
气体燃料	50~500	300
	>500	200

2. 日本

日本是世界上控制 NO_x 排放最严格的国家之一。

1973 年以前，日本只有限制锅炉中 NO_x 排放浓度的建议，如燃油锅炉在 O₂ 含量为 4% 时，NO_x 排放浓度上限为 300ppm，燃气锅炉在 O₂ 含量为 5% 时，上限为 200ppm。

1973 年日本通过了关于 NO_x 允许排放量的第一部法律，对燃油和燃气锅炉，规定最高值为 300ppm 和 180ppm。

1974 年补充规定了燃煤锅炉的 NO_x 最高排放浓度，在 O₂ 含量为 6% ($\alpha=1.4$) 时，为 480ppm。

1975 年通过了燃油和燃气锅炉 NO_x 最高排放浓度的新标准，分别为 150ppm 和 100ppm。

1977 年对燃用各种燃料的大型锅炉重新确定了 NO_x 最高排放浓度，煤粉锅炉为 400ppm，燃油锅炉为 130ppm，燃气锅炉为 60ppm。

1983 年和 1987 年，经过两次修订后，新的最高排放标准见表 1-4。

表 1-4 日本煤粉锅炉的最高排放标准

燃料种类和过量空气系数	锅炉蒸发量 (t/h)	NO _x 的最高允许排放量	
		体积分数 (ppm)	质量浓度 (mg/m³, 换算到 NO ₂)
煤, $\varphi_{O_2}=6\%$	≤570	250	513
	>570	200	410
油, $\varphi_{O_2}=4\%$	≤540	150	308
	>540	130	267
气, $\varphi_{O_2}=5\%$	≤506	100	205
	>506	60	123

3. 美国

1990 年，《美国清洁空气法修正案 (CAAA)》提出将 NO_x 排放量比 1980 年水平减少 200 万 t 的目标。为保证该目标的实施，有关部门把占 NO_x 年排放总量 1/3 的电厂列为防范的重点。美国对已建电站锅炉 NO_x 排

放的规定见表 1-5。

表 1-5 美国对已建电站锅炉 NO_x 排放的规定 g/GJ

燃 料 种 类	控制标准	燃 料 种 类	控制标准
气 体 燃 料	86	煤	切圆燃烧 193
油	129		墙式燃烧 215

注 1g/GJ=2.857mg/m³ (标况下)。

在某些地区的新建电站锅炉，特别设立了 NO_x 排放必须小于 50g/GJ 的控制标准。对达不到排放要求者，给予严厉的处罚，直至关闭。

据报道，美国正在酝酿制定新一代空气洁净方面的方案。新方案将扩大限制排放污染物的范围，将要限制的排放物包括二氧化硫、氮氧化物、汞、二氧化碳等。这个方案将在美国全国范围内运用市场调节和行政调节相结合的办法加以实施。

纵观工业发达国家 NO_x 控制法规标准的发展历史，可以看出以下特点：

(1) 最初较多地关注减少汽车尾气中的 NO_x，后来注意加强对电厂 NO_x 排放的控制。

(2) 20 世纪 80 年代中期以后，有关 NO_x 排放标准大幅度地变得严格起来。

(3) 对 NO_x 排放量的控制，除利用法律手段以外，还运用了市场机制。

二、国内控制标准

我国在燃煤电厂 NO_x 排放控制方面起步相对较晚，现有的燃煤烟气排放标准为 GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》，具体情况如下：

1. 时段的划分

排放标准分三个时段，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 日起至标准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。

自 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（含在第 2 时段中通过环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目，自批准之日起满 5 年，在标准实施前尚