

SCR

烟气脱硝技术及工程应用

内蒙古电力科学研究所 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

SCR

烟气脱硝技术及工程应用

内蒙古电力学院图书馆
藏书

内蒙古电力科学研究所 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以 SCR 烟气脱硝技术及其工程应用为核心,着重从 SCR 烟气脱硝实际应用中的各个方面进行了阐述,包括 SCR 烟气脱硝关键技术、优化运行、催化剂性能测试、系统性能评价和安全性评价。关键技术主要对反应器流场优化、氨气/空气混合技术、还原剂选择进行了分析,探讨了关键技术的选择方案;优化运行以喷氨优化为重点,以运行的经济性为判定依据,从优化现有系统的角度出发提高了系统运行的安全性、经济性、稳定性;催化剂性能测试详细介绍了催化剂物理化学性能表征方法和催化剂寿命管理计划;系统性能评价则是依据性能保证值,对脱硝系统的整体运行性能进行了全面、系统的评价,为运行调整提供了可靠依据;安全性评价中对 SCR 烟气脱硝系统的风险进行了分析,并提出了相应的应对措施。书中还介绍了国内外现有烟气脱硝技术及其特点和应用情况。

本书立足于 SCR 烟气脱硝技术的实际应用,以理论结合实际的方式,通过详尽的试验数据和案例分析,对 SCR 烟气脱硝技术进行了阐述,可供 SCR 烟气脱硝设计、设备选型、运行、生产服务、科研教学等生产人员、技术人员及管理干部参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

SCR 烟气脱硝技术及工程应用 / 内蒙古电力科学研究院
编著. —北京: 中国电力出版社, 2014.9
ISBN 978-7-5123-6485-1

I. ①S… II. ①内… III. ①燃煤发电厂—烟气—脱硝
IV. ①X773.017

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 216303 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 298 千字

印数 0001—3000 册 定价 36.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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

《SCR 烟气脱硝技术及工程应用》

编 委 会

主 任 张叔禹

副主任 韩 星

主 编 禾志强 刘永江

副主编 韩秀峰 陈世慧 张 铭 李浩杰

郭晓红 姜 冉

前言

新的火电厂污染物排放标准的颁布实施，对火电厂污染物控制提出了新的挑战。相对于原标准，在“十一五”提出火电脱硫标准的基础上，新标准首次提出了“十二五”期间的脱硝标准，“十二五”期间，我国将执行新的《火电厂大气污染物排放标准》。该标准规定“新建、改建和扩建的燃煤火电锅炉，须同步配套建设烟气脱硝装置，执行 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 的限值”。因此，我国今后逐步加强对燃煤电厂氮氧化物的排放治理是大势所趋。从火电厂脱硫改造的历史经验可以看出，脱硝设备普及将贯穿整个“十二五”期间。综合中电联和环保部的测算口径，未来 5 年，火电企业将要为新设立的脱硝标准多支付近 2000 亿元，未来数年我国脱硝行业出现爆发式增长，我国电力工业面临的 NO_x 治理形势严峻。

选择性催化还原脱硝技术（selective catalytic reduction, SCR）作为目前最为成熟、应用最为广泛的烟气脱硝技术，非常适合我国火电厂烟气脱硝的实际要求，是目前脱硝改造及新建电厂配套脱硝工程的首选方案。目前，虽然我国绝大部分燃煤电厂锅炉配有低氮燃烧技术，但脱硝效率比较低，低氮燃烧技术只能使电厂烟气中氮氧化物的浓度达到 $300\sim 400\text{mg}/\text{m}^3$ ，在这种情况下，再利用 SCR 烟气脱硝就可以达到 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，两者配合使用，脱硝效率可达 $80\%\sim 90\%$ ，是实现新标准限值最为可靠、可行的实施方案。因此，SCR 烟气脱硝技术实际应用中出现的各类问题也就成为目前国内脱硝专业人员研究的重点领域。

SCR 烟气脱硝技术在我国应用时间较短，实际应用中各类问题较多，工程经验尚待积累。SCR 烟气脱硝技术的工程应用通常涉及关键技术的选择、运行方式的优化、催化剂的选型、维护和性能评价，以及系统性能评价和安全性评价等方面。本书从提升 SCR 烟气脱硝实际应用效果的目的出发，在参阅了大量文献资料的基础上，总结工程应用数据，并结合相关的试验工作，最终编写而成。

本书共分七章，第一章介绍目前国内外主要应用的烟气脱硝技术及其技术特点和应用情况。第二章介绍 SCR 烟气脱硝技术，包括其工艺流程、系统组成和设计理念。第三章主要探讨反应器流场优化、氨气/空气混合技术、还原剂选择等 SCR 烟气脱硝中的关键技术，分析各

种关键技术在工程应用中的优点和问题，为实际工程中的技术、设备甄选提供依据。第四章对 SCR 烟气脱硝系统运行的主要控制参数进行分析，并以经济性和可靠性为考核依据，详细阐述脱硝系统优化运行的思路 and 方案，并结合实际工程案例，详细分析脱硝系统优化运行的可行性，以及优化运行取得的实际效果。第五章以 SCR 烟气脱硝系统的核心——催化剂为讨论对象，对其活性组分构成、运行维护、失活处理及性能检测方法进行系统展现，为发电企业催化剂实际运行提供思路。第六章介绍 SCR 烟气脱硝系统的性能评价方法，明确系统性能评价的指标和方法。第七章着重对 SCR 烟气脱硝系统安全性评价工作进行介绍。

本书在编写过程中，得到了内蒙古电力（集团）有限责任公司相关领导、内蒙古电力科学研究院领导和同事的大力支持、帮助以及自筹科技项目资金的资助（电科院〔2013〕48 号、电科院〔2012〕58 号）；国华准格尔发电有限责任公司相关领导和运行人员在脱硝系统优化运行中给予了大力支持和协助；内蒙古电力科学研究院的李浩杰、姜冉、赵全中同志参与了国华准格尔发电有限责任公司 4 号机组脱硝系统优化运行试验，李浩杰、姜冉参与了 SCR 烟气脱硝催化剂性能测试试验，为本书的编写提供了翔实的试验数据，在此对他们表示真挚的谢意！

除了本书所列的参考文献外，在编写书稿过程中还参阅了许多近年来我国电力、环保、化工等领域专家及专业技术人员撰写的报告、文献、总结资料，恕难一一详列，在此一并向各位专家、同仁致谢！

限于编者水平，书中难免存在疏漏与不足之处，恳请读者谅解并批评指正！

编著者

2014 年 7 月

目 录

前言

第一章

烟气脱硝技术概述

/ 1

第一节 NO_x 减排技术分类

/ 1

第二节 工业烟气脱硝技术

/ 5

第三节 烟气脱硝技术发展趋势

/ 14

第二章

SCR 烟气脱硝技术概述

/ 20

第一节 SCR 烟气脱硝工艺流程

/ 20

第二节 SCR 烟气脱硝系统组成

/ 23

第三节 SCR 烟气脱硝设计理念

/ 30

第三章

SCR 烟气脱硝关键技术

/ 41

第一节 SCR 烟气脱硝流场优化

/ 41

第二节 SCR 烟气脱硝氨气/空气混合技术

/ 49

第三节 SCR 烟气脱硝还原剂选择

/ 53

第四节 SCR 烟气脱硝反应器布置方式

/ 62

第四章

SCR 烟气脱硝系统运行及优化

/ 65

第一节 SCR 烟气脱硝运行主要控制参数

/ 65

第二节 SCR 烟气脱硝优化运行方案

/ 70

第三节 SCR 烟气脱硝运行优化案例

/ 74

第五章

SCR 烟气脱硝催化剂

/ 93

第一节 SCR 烟气脱硝催化剂分类

/ 93

第二节 SCR 烟气脱硝工业催化剂

/ 96

第三节 SCR 烟气脱硝催化剂的失活与处理

/ 106

第四节 SCR 烟气脱硝催化剂性能评价

/ 115

第六章

SCR 烟气脱硝系统性能评价

/ 150

第一节 SCR 烟气脱硝性能评价指标

/ 150

第二节 SCR 烟气脱硝性能评价试验方法

/ 150

第三节 SCR 烟气脱硝性能评价试验案例

/ 155

第七章

SCR 烟气脱硝系统安全性评价

/ 164

参考文献

/ 186

烟气脱硝技术概述

第一节 NO_x减排技术分类

燃料中及燃烧过程中产生的 NO_x 通常可以分燃烧前、燃烧中、燃烧后三个阶段进行控制。目前, 燃烧前 NO_x 的控制研究较少, 也无成熟技术应用, 研究及工业应用主要集中在燃烧中和燃烧后的 NO_x 控制上。

一、燃烧中脱硝

燃烧中 NO_x 控制技术, 即低 NO_x 燃烧技术, 目前在火电厂中已得到了普遍应用。该技术是指根据一定的燃烧学原理, 通过改变运行工况, 来抑制或还原燃烧过程中生成的 NO_x, 主要技术有低过量空气系数燃烧、空气分级燃烧、燃料分级燃烧、浓淡燃烧、烟气再循环、低 NO_x 燃烧器等。其普遍特点是: 锅炉容易改造, 投资的费用相对较少, 但脱硝效率较低, 一般在 50% 左右, 不能满足新的火电厂污染物排放要求。

1. 空气分级燃烧

空气分级燃烧技术原理如图 1-1 所示。

该技术是目前国内外采用较多的一种低氮燃烧技术, 又称分段送风, 基本原理是将燃烧过程分两阶段完成。将燃烧所需要的空气量分成两级送入, 一级所用的过量空气系数, 气体燃料为 0.7, 烧油时为 0.8, 烧煤时为 0.8~0.9, 其余空气在燃烧器附近适当位置送入, 使燃烧分两级完成。该方法可降低 NO_x 生成量 15%~30%。但该技术会导致锅炉燃烧效率下降, 并引起部分炉膛内的结渣和腐蚀。

2. 低过量空气系数燃烧

低过量空气系数燃烧也叫低氧燃烧, 是使燃烧反应在炉内总过量空气系数较低的工况下进行。根据原苏联科学家捷里道维奇提出的热力 NO_x 生成机理, NO 的生成速率为

$$\frac{dC_{\text{NO}}}{dt} = KC_{\text{N}_2} C_{\text{O}_2}^{0.5} \quad (1-1)$$

式中 C_{O_2} 、 C_{N_2} 、 C_{NO} ——烟气中 O₂、N₂、NO 的浓度, mol/cm³。

由式 (1-1) 可以看出, 热力 NO_x 生成量与氧气浓度的平方根成正比。这是由于氧气浓度增大时, 在较高的温度下会使氧分子分解所得的氧原子浓度增加, 因而氧原子与氮气生成的

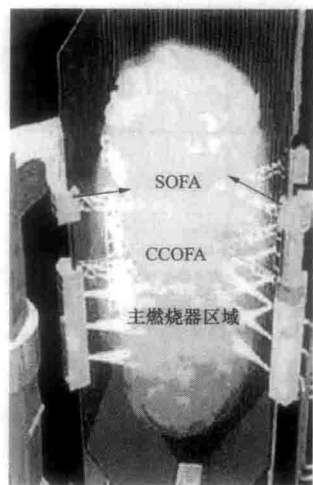


图 1-1 空气分级燃烧技术原理

热力 NO_x 也相应增加。但在实际过程中情况会复杂一些, 因为过量空气系数的增加, 一方面会增加氧浓度, 另一方面也会使火焰温度降低。总体趋势来看, 随着过量空气系数的增加, NO_x 生成量先增加, 达到一个极值后会下降。

通常而言, 采用低过量空气系数燃烧, 可降低锅炉 NO_x 排放量的 15%~20%。

3. 燃料分级燃烧

燃料分级燃烧技术原理如图 1-2 所示。

燃料分级燃烧技术的特点是将燃烧过程分成三个阶段: 一次燃烧区(即主燃烧区)为氧化性或弱还原性气氛; 在再燃烧区, 再燃燃料被送入炉内, 使再燃烧区呈还原性气氛($\alpha < 1$), 在高温和还原气氛下, 再燃燃料热解生成的碳氢原子团与主燃烧区生成的 NO_x 反应, 将 NO_x 还原成 N_2 ; 在还原区的上方, 送入

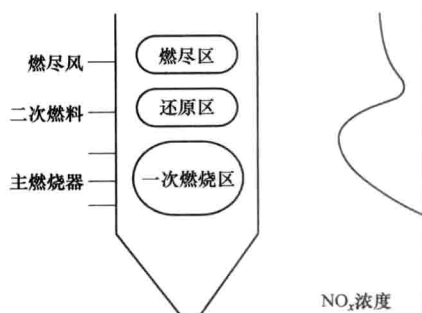


图 1-2 燃料分级燃烧技术原理

空气, 使再燃燃料完全燃烧, 该区域称为燃尽区, 这部分空气也称为燃尽风。

4. 低 NO_x 燃烧器

低 NO_x 燃烧器是根据空气分级、燃料分级及烟气再循环等技术进行设计的。该类燃烧器可与其他一次措施, 如 OFA (分离式燃尽风)、再燃烧或烟气再循环技术相结合, 更大程度地降低 NO_x 的排放。

各种燃烧中脱硝技术性能对比见表 1-1。

表 1-1 各种燃烧中脱硝技术性能对比

名 称	特 点	缺 点
低过量空气系数燃烧	空气过量系数小	热损失大, 降低锅炉效率
空气分级燃烧	空气分级进入炉膛	损失大, 结渣, 腐蚀
燃料分级燃烧	燃料分级进入炉膛	热损失大, 结渣, 腐蚀
浓淡燃烧	部分燃料富氧燃烧, 部分缺氧燃烧	NO_x 降低效率不高
烟气再循环	尾气一部分循环进入炉膛	费用高
低 NO_x 燃烧器	改变风煤比, 降低燃烧温度, 特殊设计的燃烧器	结构复杂, 易结渣, 腐蚀

二、燃烧后脱硝

燃烧后脱硝即烟气脱硝, 相对于燃烧中脱硝, 烟气脱硝系统更为复杂, 但脱硝效率较高, 能够满足更加严格的火电厂烟气污染物排放标准要求, 因而得到了广泛的重视和应用。

目前, 烟气脱硝技术主要分为干法烟气脱硝和湿法烟气脱硝两种。干法烟气脱硝包括选择性催化还原法 (SCR)、选择性非催化还原法 (SNCR)、碳还原法、吸附法和等离子法等; 湿法脱硝的办法是用可以溶解氮氧化物或可以与氮氧化物发生反应的溶液吸收废气中的 NO_x , 包括酸吸收法、碱吸收法、氧化吸收法和配合吸收法等。

(一) 干法烟气脱硝

1. 选择性非催化还原法 (SNCR)

该方法是在高温 (900~1000℃) 和没有催化剂的情况下, 在锅炉炉膛壁面上安装有还原

剂喷嘴，向烟气中喷氨气或尿素等还原剂，选择性地把烟气中的 NO 还原为 N₂。SNCR 工艺的主要反应如下：

NH₃ 为还原剂时，有



尿素为还原剂时，有



反应式 (1-2) 主要发生在 950℃ 左右，当温度低于 900℃ 时，反应不完全，氨逃逸率高，造成新的污染。当温度高于 1100℃ 时则可能发生反应式 (1-3)，生成一部分 NO。因此，用 NH₃ 作还原剂时，SNCR 中的温度控制是至关重要的。当还原剂为尿素时，部分还原剂将与烟气中的 O₂ 发生氧化反应，生成 CO₂ 和 H₂O，因此还原剂消耗量较大。SNCR 脱硝技术由于在锅炉内部进行，脱硝效率受锅炉设计、锅炉负荷等因素的影响较大，脱硝效率较低，在 30%~60% 之间。

2. 选择性催化还原法 (SCR)

选择性催化还原法 (SCR) 是指在 O₂ 和非均相催化剂存在的条件下，用还原剂 NH₃ 将烟气中的 NO 还原为 N₂ 和 H₂O 的工艺。与 SNCR 相同，这种工艺之所以被称为选择性，是因为还原剂 NH₃ 优先与烟气中的 NO 反应，而不是被烟气中的氧气氧化。烟气中氧气的存在能促进反应，是反应系统中不可缺少的部分。SCR 技术是 20 世纪 70 年代由日本研究开发的，目前已广泛应用于燃煤电厂的烟气脱硝中。SCR 的主要反应式为



当温度高于 400℃ 时，也会发生如反应式 (1-2) 的氧化反应。

SCR 技术中，由于使用 NH₃ 作还原剂，以及催化剂每 3~4 年就需更换等原因，其脱硝成本较高。

3. 碳还原法

碳还原法是利用活性炭、焦炭等碳质固体还原废气中的 NO_x，属于非催化非选择性还原法，过程的反应式为



与 SCR 技术相比，碳还原法的优点是不需要昂贵的催化剂，因而不存在催化剂中毒所引起的问题，并且炭价较便宜、来源广；缺点是还原反应所需的温度较高，一般需要 700℃ 以上的温度，在此温度下，如果烟气中有较多的 O₂，可能引起炭的燃烧。

4. 吸附法

活性炭具有较大的比表面积，对低浓度 NO_x 有较高的吸附能力，NO 与尾气中的 O₂ 在活

性炭表面发生氧化反应生成 NO_2 ，进而再与水反应生成稀硝酸，或与碱性溶液反应生成硝酸盐。吸附法净化 NO_x 的优点是工艺简单，脱除效率较高，且能同时脱除 SO_2 等。但由于吸附剂容量有限，需要的吸附剂量大，设备庞大，且由于大多数烟气中有氧存在， 300°C 以上活性炭就有自燃的可能，给吸附和再生造成相当大的困难，在工业上应用受到了一定的限制。

5. 等离子法和电子束照射法

等离子法和电子束照射法都是利用高能电子撞击烟气中的 H_2O 、 O_2 等分子，产生 O^- 、 OH^- 、 O_3 等氧化性很强的自由基，将 NO 氧化成 NO_2 ， NO_2 与 H_2O 生成 HNO_3 ，并与喷入的 NH_3 反应生成硝酸铵，用电除尘器捕集， NO_x 的脱除效率能达到 $80\%\sim 85\%$ 。但由于投资和操作费用较高，并没有得到广泛的应用。

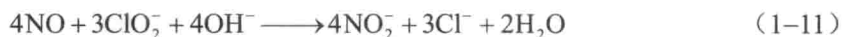
(二) 湿法烟气脱硝

在现有的脱硝技术中，干法仍占主流地位，原因是烟气中最主要的组分 NO 为 10^{-6} 级，而 NO 在低浓度下相对稳定，缺乏化学活性，难以被水溶液吸收。湿法烟气脱硝技术是将 NO 氧化成 NO_2 ，生成的 NO_2 再被水或碱性溶液吸收，从而实现脱硝。由于目前广泛运用的成熟脱硫方法是湿法，因此对已有的湿法脱硫工艺加以改进，使脱硫脱硝同时进行，是国内外广泛关注并进行研究的一个热点，有很好的发展前景。湿法脱硝技术主要有氧化吸收法、液相还原吸收法和配合吸收法。

1. 氧化吸收法

氧化吸收法是采用催化氧化或氧化剂直接氧化，将 NO 氧化成 NO_2 后再用碱液进行吸收。氧化剂包括气相氧化剂和液相氧化剂，其中气相氧化剂有 O_3 、 Cl_2 、 ClO_2 等，液相氧化剂有 HNO_3 、 KMnO_4 、 NaClO_2 、 H_2O_2 等，应用较多的是 NaClO_2 、 KMnO_4 和 O_3 。

NaClO_2 氧化还原法是用 NaClO_2 将 NO 氧化成 NO_2 ，在碱性溶液中被吸收形成硝酸盐，反应式为



该法的脱硝效率可达 95% ，且可同时脱硫，但 NaClO_2 和 NaOH 的价格较高，运行成本较大。

KMnO_4 氧化法是用 KMnO_4 将 NO 氧化为 NO_2 ，然后将其固定生成硝酸盐，其副产品 KNO_3 可作化肥。此法脱硝率可以达到 95% 以上，但 KMnO_4 价格较为昂贵，脱硝费用较高。

臭氧脱硝的原理在于臭氧可以将难溶于水的 NO 氧化成易溶于水的 NO_2 、 N_2O_3 、 N_2O_5 等高价态氮氧化物。臭氧脱硝的工艺简单，脱硝率也较高，但由于目前臭氧发生器的大型化还有一定困难，对大型火电厂来说，由于烟气中的 NO 总量较高，则需要多个臭氧发生器，投资较高。

2. 配合吸收法

配合吸收法是液相配合剂（金属配合物）直接与难溶于水的 NO 反应，形成金属亚硝酰化合物，增大 NO 在水中的溶解性，从而使 NO 易于从气相转入液相，对于处理含有 NO 的烟气具有特别意义。能与 NO 配合并可用于湿法脱硝的金属离子主要有 Fe^{2+} 和 Co^{2+} 。该法目前尚处于试验研究阶段，无工业应用报道。

各种湿法烟气脱硝技术性能对比见表 1-2。

表 1-2

各种湿法烟气脱硝技术性能对比

名称	技术特点
水吸收法	用水作吸收剂对 NO_x 进行吸收, 吸收率低, 仅可用于气量较小、净化要求不高的场合, 不能净化含 NO 为主的 NO_x
酸性吸收法	用稀硝酸等作为吸收剂对 NO_x 进行物理吸收和化学吸收, 可以回收 NO_x , 消耗动力较大
碱中和吸收法	用 NaOH 、 Na_2SO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 NH_4OH 等碱性溶液作吸收剂对 NO_x 进行化学吸收, 对含 NO 较多的 NO_x 废气, 净化效率低
氧化吸收法	对 NO 较多的 NO_x 废气, 用浓 HNO_3 、 O_3 、 NaClO_2 、 KMnO_4 等作催化剂, 先将 NO_x 中的 NO 氧化成 NO_2 , 然后再用碱溶液吸收, 使净化效率提高, 成本高
液相还原吸收法	将 NO_x 吸收到溶液中, 与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 、 $(\text{NH}_4)\text{HSO}_3$ 、 Na_2SO_3 等还原剂反应, NO_x 被还原为 N_2 , 净化效果优于碱溶液吸收

第二节 工业烟气脱硝技术

随着近年来工业技术的不断进步和环保法规的日益严格, 各国研究者依据不同原理, 开发出了众多的烟气脱硝技术, 有力推动了脱硝技术的发展和大气环境的改善, 但部分研究尚处于试验研究阶段, 离工业应用要求差距较大, 还有一些烟气脱硝技术则是因为投资或运行成本过高, 难以实际推广应用。

目前, 已经成功工业应用的烟气脱硝技术主要有 SCR 烟气脱硝技术、SNCR 烟气脱硝技术和 SNCR-SCR 混合法烟气脱硝技术。SCR 烟气脱硝技术将在第二章中作出详细介绍, 本节主要介绍 SNCR 和 SNCR-SCR 混合法烟气脱硝技术。

一、SNCR 烟气脱硝技术

选择性非催化还原法 (SNCR), 于 20 世纪 80 年代中期在国外开始研发成功, 至 90 年代初成功应用于 600MW 以上大型燃煤机组, 它建设周期短、投资少、脱硝效率中等, 比较适合对中小型电厂锅炉的改造。目前, SNCR 的工业应用程度仅次于 SCR 烟气脱硝技术。

SNCR 烟气脱硝技术是在无催化剂存在条件下向炉内喷入还原剂氨或尿素, 将 NO_x 还原为 N_2 和 H_2O 。SNCR 烟气脱硝工艺流程见图 1-3。

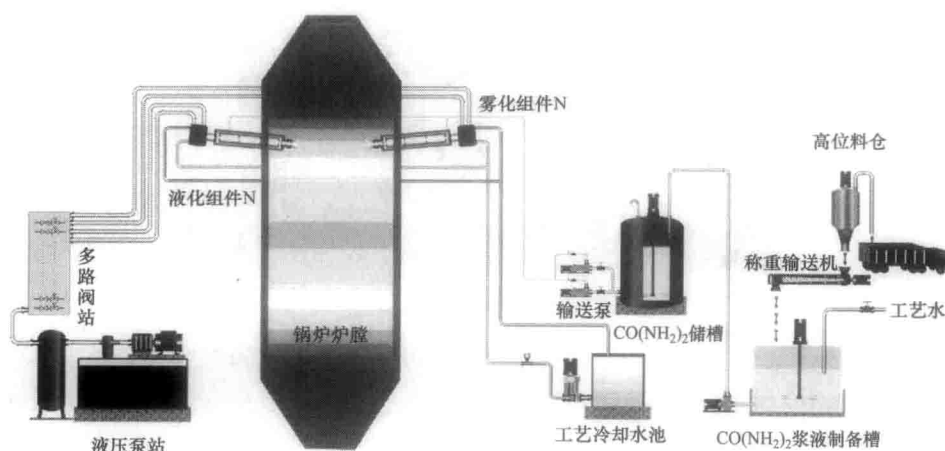
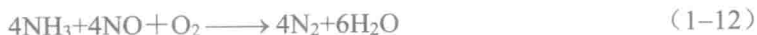


图 1-3 SNCR 烟气脱硝工艺流程

还原剂喷入锅炉折焰角上方水平烟道 ($900\sim 1000^{\circ}\text{C}$), 在 NH_3/NO_x 摩尔比 $2\sim 3$ 情况下, 脱硝效率 $30\%\sim 50\%$ 。以尿素为还原剂, 在 950°C 左右温度范围内, 反应式为



当温度过高时, 会发生如下的副反应, 又会生成 NO , 即



当温度过低时, 又会减慢反应速度, 所以温度的控制是至关重要的。该工艺不需要催化剂, 但脱硝效率低, 高温喷射对锅炉受热面安全有一定的影响。存在的问题是温度随锅炉负荷和运行周期而变化, 以及锅炉中 NO_x 浓度的不规则性, 使得该工艺应用复杂。在同等脱硝

率的情况下, 该工艺的 NH_3 耗量要高于 SCR 工艺, 从而使 NH_3 的逃逸量增加。

SNCR 脱硝系统主要包括尿素溶液配制及稀释、尿素溶液输送和尿素喷射三部分。

在还原剂的接收和储存系统中, 尿素一般采用 50% 的水溶液, 可直接喷入炉膛。由于尿素的冰点仅为 17.8°C , 因此在较冷的季节应对尿素溶液进行加热和循环。尿素可采用固体颗粒运输, 但在厂内必须设置溶解装置。

尿素溶液配制及稀释系统如图 1-4 所示。

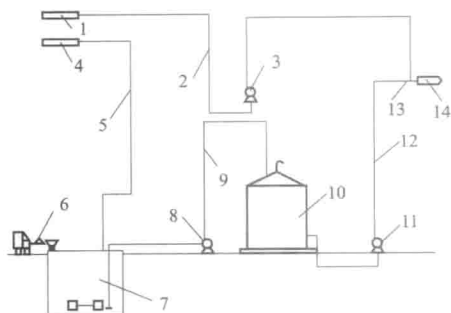


图 1-4 尿素溶解配制及稀释系统

- 1—稀释水入口；2—稀释水管道；3—稀释水泵；4—溶解水入口；
5—溶解水管道；6—袋装尿素；7—溶解池；8—尿素溶液输送泵；
9—尿素溶液管道 A；10—尿素溶液储罐；11—尿素溶液给料泵；
12—尿素溶液管道 B；13—混合器；14—去喷射系统管道

尿素溶液配制系统可实现尿素储存、溶液配制和溶液储存的功能, 其稀释模块如图 1-5 所示。

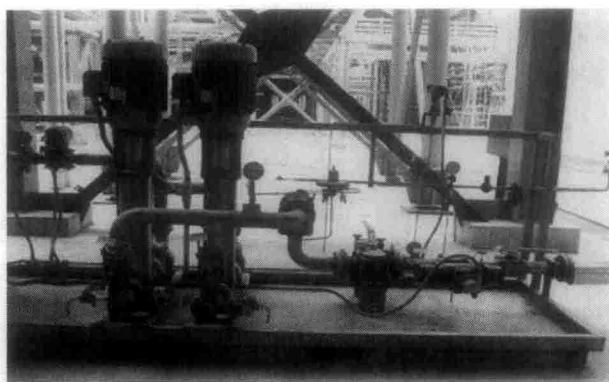


图 1-5 尿素稀释模块

制备好的尿素溶液经尿素溶液输送泵输送, 在喷入炉膛前, 再经过计量分配装置的精确计量分配至每个喷枪, 然后经喷枪喷入炉膛, 进行脱氮反应。喷射区计量模块是脱硝控制的核心装置, 用于精确计量和独立控制到锅炉或焚化炉内每个喷射区的尿素溶液浓度。该模块采用独立的化学剂流量控制, 通过区域压力控制阀与就地 PLC 控制器的结合, 以及响应来自

机组燃烧控制系统、 NO_x 和氧监视器的控制信号，自动调节反应剂流量，对 NO_x 浓度、锅炉负荷、燃料或燃烧方式的变化做出响应，打开或关闭喷射区或控制其质量流量。

尿素溶液高流量循环模块如图 1-6 所示，尿素溶液计量模块如图 1-7 所示。

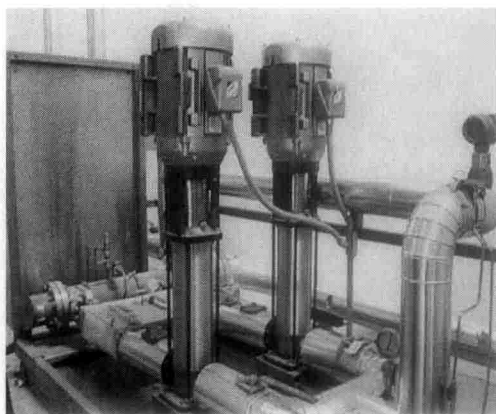


图 1-6 尿素溶液高流量循环模块

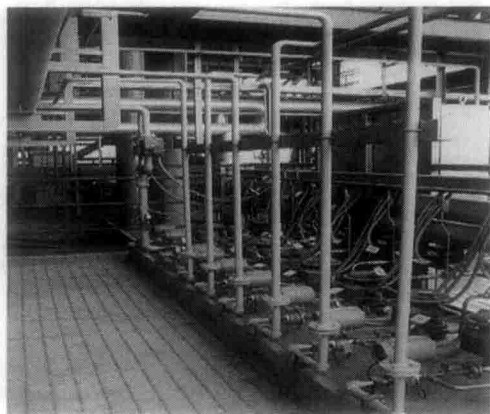


图 1-7 尿素溶液计量模块

分配模块用来控制到每个喷枪的雾化/冷却空气、混合的化学剂和冷却水的流量。空气、混合的化学剂可以在该模块上调节，达到适当的空气/液体质量比率，取得最佳的 NO_x 还原效果。尿素溶液分配模块如图 1-8 所示。

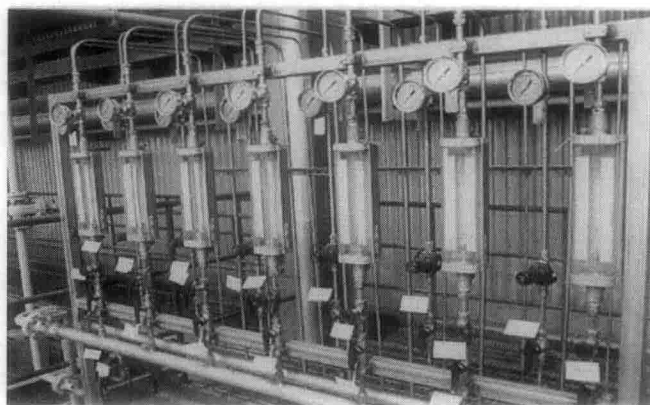


图 1-8 尿素溶液分配模块

尿素溶液喷射器有墙式和枪式两种类型。墙式喷射器在特定部位插入锅炉内墙，一般每个喷射部位设置一个喷嘴。墙式喷射器一般用于短程喷射，就能使反应剂与烟气达到均匀混合的小型锅炉和尿素 SNCR 系统。由于墙式喷嘴不直接暴露在高温烟气中，其使用寿命要比喷枪式的长。枪式喷射器由一根细管和喷嘴组成，可将其从炉墙深入到烟流中。枪式喷射器一般应用于烟气与反应剂难于混合的氨喷 SNCR 系统和大容量锅炉，由于喷射器受高温和烟气的冲击，易发生侵蚀、腐蚀和结构破坏。因此，喷射器一般用不锈钢制造，且设计成可更换的。为尽量避免使喷射器暴露在高温烟气中，喷枪式喷射器和一些墙式喷嘴设计成可伸缩的。当遇到锅炉启动、停运、季节性运行或一些其他原因使得 SNCR 需停运时，可将喷射器退出运行。墙式短枪和伸缩长枪分别如图 1-9 (a) 和 (b) 所示。

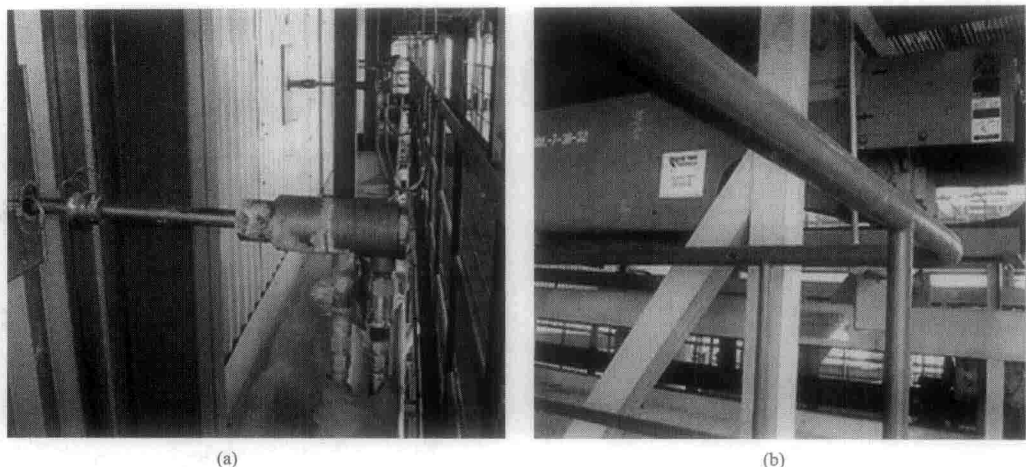


图 1-9 尿素溶液喷枪

(a) 墙式短枪; (b) 伸缩长枪

影响 SNCR 系统性能设计和运行的主要因素有以下几点:

(1) 温度窗口。

温度窗口是指脱硝反应的最佳炉膛温度区间。若反应温度过低,还原剂与 NO_x 没有足够的活化能使脱硝反应快速进行,从而导致脱硝效率降低。但若温度过高,尿素本身也会被氧化成 NO_x ,从而增加 NO_x 的排放,脱硝效率下降。可以预见,脱硝效率与反应温度的关系曲线为一条开口向下的抛物线,抛物线顶点左右两侧的区间即是温度窗口。以尿素为还原剂的 SNCR,温度窗口为 $900\sim 1150^\circ\text{C}$ 。机组不同的负荷对应于锅炉的炉膛温度分布也不相同,因此用于向炉膛中喷入还原剂的喷射器也是分若干层布置的,从而适应不同锅炉负荷。一般来说,SNCR 温度窗口大致对应于锅炉燃烧器上部至折焰角之间的区域。

(2) 停留时间。

在还原剂离开温度窗口前 SNCR 的整个反应过程必须完成,这样才能达到理想的脱硝效果。这些过程包括:①从喷射器中射出的尿素溶液与烟气混合;②尿素溶液中水的蒸发;③尿素中分解出 NH_3 ;④ NH_3 再分解为 NH_2 及自由基;⑤ NO_x 与 NH_2 反应。因此,延长还原剂在温度窗口下的停留时间,脱硝反应就会更加充分。若要获得理想的脱硝效率,还原剂的停留时间至少需要 0.5s。该参数主要取决于锅炉结构。

(3) 烟气中的氧量。

合适的氧含量是 SNCR 还原反应进行的一个重要因素。没有氧存在的条件下,NO 脱除效率很低;氧浓度从 2% 增到 4%,还原 NO 的量不随其变化;随氧量进一步增加,脱硝效率反而下降。因为过量的氧会氧化 NH_3 ,使 NH_3 泄漏减小,但增加了 NO_x 的排放量。工业煤粉锅炉中氧浓度一般为 3%~4%,其脱硝效率受氧浓度的影响很小。

(4) 喷入的还原剂与烟气混合情况。

氨与烟气的充分混合是保证脱硝充分反应的一个技术关键,是保证在适当的 NH_3/NO_x 摩尔比下得到较高 NO 脱除率的重要环节。大型电站锅炉由于炉膛尺寸大、锅炉负荷变化范围大,从而增加了对这四个因素控制的难度。国外的实际运行结果表明,应用于大型电站锅炉的 SNCR 的 NO_x 还原率只有 25%~40%。随着锅炉容量的增大,SNCR 的 NO_x 还原率呈下降

的趋势。

为了确保还原反应的进行,尿素喷入后需要立即扩散并与烟气混合。但在大型锅炉中,由于较大的空间尺度和模式,混合很难实现。实现混合是通过喷射系统,喷射器能够雾化还原剂,并且调整喷射角、速度和方向。为了帮助尿素溶液的混合传播,需通过特殊的设备将溶液雾化成合适的液滴尺寸和分布。液滴的蒸发时间和运动轨迹是液滴直径的函数,大液滴有更大的动量和在烟气中更强的穿透能力。蒸发时间的增加,就加大了需要的停留时间。

混合不均匀,一方面使还原 NO 的反应不充分,另一方面炉内未参加反应的还原剂会被氧化成 NO。

(5) NSR 和 ASR。

NSR 和 ASR 均是评价脱硝运行成本中物料消耗的重要指标。NSR 是 Normalized Stoichio-metric Ratio 的缩写,意为理论氨氮当量比。以尿素作为还原剂来讲,有

$$\text{NSR} = \frac{\text{还原剂折算成 NH}_3 \text{ 的摩尔数}}{\text{入口 NO}_x \text{ 折算成 NO}_2 \text{ 的摩尔数}} \quad (1-14)$$

ASR 是 Actual Stoichiometric Ratio 的缩写,为还原剂与氮的当量比,计算式为

$$\text{ASR} = \frac{\text{还原剂摩尔数}}{\text{入口 NO}_x \text{ 摩尔数}} \quad (1-15)$$

脱硝效率与 NSR 的关系如图 1-10 所示。

由图 1-10 可以看出,脱硝效率随着 NSR 值的增大而增大,当 NSR 超过 2 时,脱硝效率就不会有明显的增长。一般来说,NSR 在 0.5~3 之间。需要说明的是,无论是 NSR 还是 ASR,都不能与脱硫的钙硫比相提并论。NSR 公式中的分母是脱硝装置入口的污染物含量,而钙硫比公式中的分母是脱硫装置出口的污染物含量。在脱硝中有一个与钙硫比类似的参数,称为还原剂利用率,其计算式为

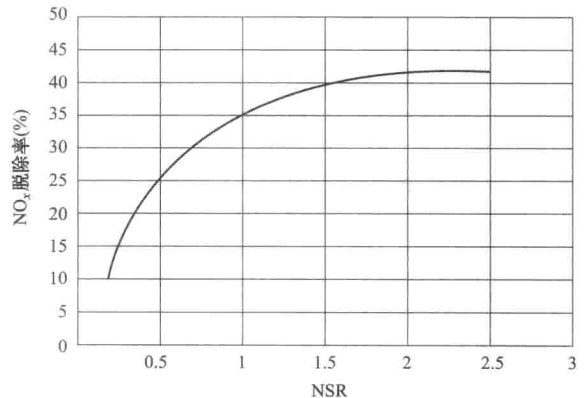


图 1-10 脱硝效率与 NSR 的关系

$$\text{还原剂利用率} = \text{脱硝效率} / \text{NSR} \quad (1-16)$$

(6) 氨逃逸率。

由于 SNCR 工艺中没有催化剂,不会增加烟气中 SO₃ 的浓度,在相同的逃逸氨浓度下,SNCR 工艺对由于烟气中 NH₃ 遇到 SO₃ 会产生 NH₄HSO₄ 而造成的锅炉尾部受热面上飞灰沉积、空气预热器堵塞、腐蚀的危险性最小。SNCR 工艺的逃逸氨一般控制在 5~10ppm。当飞灰中 NH₃ 含量超过 5ppm 就会闻到氨气的味道,从而影响飞灰的综合利用。

二、SNCR-SCR 混合法烟气脱硝技术

混合 SNCR-SCR 烟气脱硝技术不是 SCR 工艺与 SNCR 工艺的简单组合,它是结合了 SCR 技术高效、SNCR 技术投资省的特点而发展起来的一种新型工艺。

SCR 和 SNCR 都是通过在烟气中加入氨或尿素溶液等还原剂,在一定温度下,与烟气中