

工业锅炉NO_x控制技术指南 (试行)

环境保护部华南环境科学研究所

目 次

1 适用范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
3.1 工业锅炉 INDUSTRIAL BOILER.....	1
3.2 氮氧化物 NITROGEN OXIDES, NOX.....	1
3.3 控制技术 CONTROL TECHNOLOGY.....	1
4 工业锅炉氮氧化物排放特性.....	1
5 氮氧化物控制技术.....	2
5.1 低氮燃烧技术.....	2
5.2 选择性非催化还原脱硝技术.....	3
5.3 选择性催化还原脱硝技术.....	6
5.4 化学吸收技术.....	9
5.5 组合技术.....	10
6 控制技术选用建议.....	10

1 适用范围

本指南适用于以煤、油和气为燃料，单台出力 10~65 t/h 的蒸汽锅炉、各种容量的热水锅炉及有机热载体锅炉；各种容量的层燃炉、抛煤机炉。

使用型煤、水煤浆、煤矸石、石油焦、油页岩、生物质成型燃料等的锅炉，参照本指南。

本指南不适用于以生活垃圾、危险废物为燃料的锅炉。

2 引用文件

下列文件中的条款通过本指南的引用而成为本指南的条款。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本指南。

GB 13271 锅炉大气污染物排放标准

HJ 462 工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫 工程技术规范

HJ 562 火电厂烟气脱硝工程技术规范 选择性催化还原法

HJ 563 火电厂烟气脱硝工程技术规范 选择性非催化还原法

DB44/765 广东省地方标准 锅炉大气污染物排放标准

3 术语和定义

3.1 工业锅炉 industrial boiler

指提供蒸汽或热水以满足生产工艺、动力以及采暖等需要的锅炉。

3.2 氮氧化物 nitrogen oxides, NO_x

指由氮、氧两种元素组成的化合物。工业锅炉烟气中的氮氧化物主要为一氧化氮（NO）和二氧化氮（NO₂）两种。

3.3 控制技术 control technology

针对生活、生产过程中产生的各种环境问题，为减少污染物的排放，从整体上实现高水平环境保护所采用的与某一时期的技术、经济发展水平和环境管理要求相适应，在公共基础设施和工业部门得到应用的，适用于不同应用条件的一项或多项改进、可行的污染防治工艺和技术。

4 工业锅炉氮氧化物排放特性

工业锅炉排放的氮氧化物（NO_x）来自燃料燃烧过程，主要类型包括：空气中的氮气在高温下被氧

化生成热力型 NO_x，燃料中各种含氮化合物被分解并氧化生成燃料型 NO_x，空气中的氮和燃料中的碳氢粒子团反应生成快速型 NO_x。燃煤锅炉和燃油锅炉以燃料型 NO_x 和热力型 NO_x 为主。

工业锅炉 NO_x 的生成量与燃烧区温度、反应区氧浓度和燃料在高温区的停留时间有关，其浓度范围因燃料类型和炉型而异，具体见表 1。

表 1 工业锅炉 NO_x 排放浓度范围

炉型		排放浓度范围 (mg/m ³)
燃煤锅炉	循环流化床锅炉	100~300
	链条炉/炉排炉	100~600
	煤粉炉	100~600
燃油锅炉		100~800
燃气锅炉		100~300
生物质锅炉		100~800

5 氮氧化物控制技术

5.1 低氮燃烧技术

5.1.1 技术特点

低氮燃烧技术（简称低氮燃烧）主要通过改进燃烧技术来降低燃烧过程中 NO_x 的生成与排放，其主要途径有：降低燃料周围的氧浓度，减小炉内过剩空气系数，降低炉内空气总量，或减小一次风量及挥发分燃尽前燃料与二次风的混和，降低着火区段的氧浓度；在氧浓度较低条件下，维持足够的停留时间，抑制燃料中的氮生成 NO_x，同时还原分解已生成的 NO_x；在空气过剩的条件下，降低燃烧温度，减少热力型 NO_x 的生成。

低氮燃烧技术一般可使 NO_x 的排放量降低 10%~40%。

5.1.2 技术分类

低氮燃烧技术大致可分为低氮燃烧器、空气分级燃烧技术和燃料分级燃烧技术三类。

低氮燃烧器通过特殊设计的燃烧器结构，改变经过燃烧器的风煤比例，使燃烧器内部或出口射流的空气分级，控制燃烧器中燃料与空气的混合过程，尽可能降低着火区的温度和氧浓度，在保证燃料着火和燃烧的同时有效抑制 NO_x 生成。低氮燃烧器主要有旋流式和直流式两类。

空气分级燃烧技术将燃料的燃烧过程分阶段完成，将燃烧用风分为一、二次风，减少煤粉燃烧区域

的空气量（一次风），使得在燃烧器出口附近的着火区形成一个贫氧富燃料区域，并推迟二次风的混入过程，使得燃料先在缺氧的富燃料条件下燃烧。缺氧燃烧生成的 CO 与 NO 进行反应生成 CO₂ 与 N₂，燃料氮分解而成的中间产物（如 NH、CN、HCN 和 NH₃ 等）相互作用或与 NO 反应生成 N₂，从而抑制燃料型 NO_x 的生成。二次风延迟与燃料的混合，燃烧速度降低，火焰温度也降低，从而抑制热力型 NO_x 的生成。燃烧所需的其余空气则通过燃烧器上面的燃尽风喷口送入炉膛与第一级所产生的烟气混合，完成整个燃烧过程。空气分级燃烧主要有轴向分级燃烧、径向分级燃烧等。

燃料分级燃烧技术又称为再燃烧技术或三级燃烧技术，将燃烧分成主燃烧区、再燃烧区和燃尽区三个不同区域。主燃烧区内呈氧化性或弱还原性气氛，会生成 NO_x；在再燃烧区内，二次燃料被送入炉内，使其呈还原性气氛，在高温和还原气氛下，生成碳氢原子团，该原子团与主燃烧区生成的 NO_x 反应生成 N₂。

5.1.3 成本评价与分析

低氮燃烧技术仅需对锅炉炉膛设施系统进行改造，只有一次性投资，无运行成本。

5.2 选择性非催化还原脱硝技术

5.2.1 技术特点

选择性非催化还原（SNCR）脱硝技术无需催化剂，在炉膛或烟道合适温度的位置喷入还原剂（氨或尿素），在一定的温度范围内，还原剂将 NO_x 还原为 N₂。根据还原剂不同，SNCR 脱硝技术分为尿素—SNCR 和氨—SNCR 两种。

SNCR 脱硝技术具有工艺简单、系统阻力小、占地面积小、建设周期短、易于改造等技术特点，脱硝效率一般为 30%~50%。

5.2.2 工艺流程与系统组成

5.2.2.1 工艺流程

典型的 SNCR 工艺流程如图 1 所示。

5.2.2.2 系统组成

SNCR 系统通常由还原剂制备储存系统、还原剂输送系统、稀释/计量模块、分配模块、炉前喷射系统、电器控制系统及烟气在线监测系统组成。

尿素溶液制备储存系统由尿素储放、尿素溶液配制和尿素溶液储存等部分组成，主要设备包括尿素溶解罐、尿素溶液储罐、尿素溶液输送泵等。

尿素溶液输送系统将尿素溶液储罐内的尿素溶液经输送泵送至喷射系统，将回流液自动返回尿素溶液储罐。

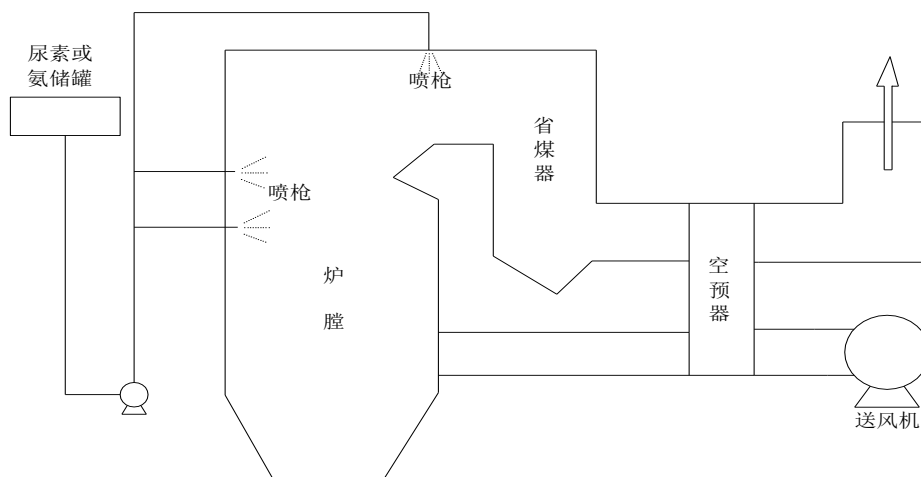


图 1 SNCR 工艺流程示意图

稀释计量模块为 SNCR 系统提供定量的还原剂和调节压力，包括稀释泵、用于计量的调节阀和流量计、用于控制压力的控制阀和压力传送器等。

分配模块由自由基座、空气压力调节器、还原剂流量计、手动喷射区隔断阀及仪表组成，用来控制每个喷枪的雾化/冷却空气、混合的化学剂和冷却水的流量。

炉前喷射系统由若干喷射层和喷射器组成，喷射层均布于炉膛燃烧区上部和炉膛出口处，以适应锅炉负荷变化引起的炉膛烟气温度变化。每个喷射器插入炉膛的地方可设套管固定，当喷射器不投运时，可将喷射器从炉膛退出以避免高温受热。

电气控制系统由数据通讯网络、控制器及现场仪表等组成，分为公用配置控制系统和脱硝工艺控制系统。公用配置控制系统可实现脱硝尿素溶液循环组件、尿素溶液制备、输送等过程的自动控制。

在 SNCR 装置出口应对烟气进行连续在线监测，监测 NO_x 浓度、O₂ 浓度、烟气温度等数据，监测数据反馈至控制系统。

5.2.3 关键工艺参数

5.2.3.1 还原剂类型

尿素和氨水为 SNCR 工艺最常用的还原剂，二者的特性详见表 2。

表 2 尿素溶液和氨水的特性

性质	尿素溶液	氨水
化学式	CO(NH ₂) ₂	NH ₃ H ₂ O
分子量	60.06	35.05

常温下形态	液态	液态
常用溶液浓度	质量分数约 50%	质量分数约 20%
溶液中 NH ₃ 含量	质量分数约 28.3%	质量分数约 20%
凝固点	约 18 °C	-77 °C
易燃易爆性	不易燃	爆炸上限：体积分数 25% 爆炸下限：体积分数 16%
气味	轻微	超过 5 ppm 时有明显刺激性气味
存储器材材质要求	塑料；钢铁；不锈钢（慎用铜、铜合金、铝、锌配件）	不锈钢槽罐，须耐压（慎用铜或铜合金配件）

选用还原剂时应考虑投资、运行成本和安全等因素。氨水易分解出氨气，可形成爆炸性气氛，温度越高，分解速度越快。若遇高热，容器内压增大，有开裂和爆炸危险。使用氨水作为还原剂时，应采取消防措施和泄露应急方案。尿素作还原剂时，常采用 40%~50% 的水溶液，需配备搅拌溶解装置。尿素无毒、挥发性较弱、储运方便、安全系数高，更适合用作 SNCR 工艺的还原剂。

5.2.3.2 氨逃逸

氨逃逸会引发诸多不良影响，如生成硫酸铵和硫酸氢铵，造成空预器、烟气管道、风机等设备的堵塞和腐蚀，同时造成飞灰品质下降，不仅产生空气污染，也给飞灰的储存和填埋带来难题。SNCR 氨逃逸应控制在 8 mg/m³ 以下。

5.2.3.3 反应温度

反应温度宜控制在 800~1100 °C，反应温度过低时反应速率较慢，脱硝效率低且易增加氨逃逸，反应温度过高时会发生副反应，可能产生二次污染物。

5.2.3.4 停留时间

停留时间决定了 SNCR 反应是否能完全进行，较长的停留时间可保证传质过程和化学反应的顺利完成，有利于脱硝效率的提高。工业锅炉 SNCR 反应区停留时间不宜低于 0.5 秒。

5.2.3.5 气体混合

喷入的还原剂应与 NO_x 充分混合，混合不充分或混合时间过长会降低脱硝效率和反应选择性。还原剂与 NO_x 的混合主要通过喷射系统控制，喷射角度和喷射速率对混合效果影响甚大，宜通过流体模拟进行优化设计。

5.2.3.6 氨氮比

SNCR 工艺的理论氨氮比为 1，增大氨氮比有利于提高脱硝效率，但会增加氨逃逸量和运行费用。氨氮比不宜超过 2，宜控制在 0.5~1.6。

5.2.4 成本评价与分析

SNCR 脱硝系统的投资成本分为直接投资成本和间接投资成本，直接投资成本主要包括 SNCR 系统设备、电气自控系统、附属设施、土建、设备运输及安装等；间接成本主要包括技术费、设计费、调试费、税费及其它等。SNCR 系统的运行成本包括电费、还原剂耗费、水费、运行管理人工费、设备维护及修理费等。SNCR 脱硝系统投资成本一般较低。

5.2.5 工程管理

SNCR 脱硝工程的设计、施工、验收、运行和维护参考 HJ 563。

5.3 选择性催化还原脱硝技术

5.3.1 技术特点

选择性催化还原（SCR）脱硝技术是指在催化剂的作用下，还原剂（氨等）选择性地与烟气中的 NO_x 反应生成 N₂ 和 H₂O 的过程。

SCR 脱硝工艺占地面积大，但脱硝效率高，一般为 80% 以上。

5.3.2 工艺流程与系统组成

5.3.2.1 工艺流程

图 2 为 SCR 脱硝工艺的典型流程图，选用液氨作为还原剂。

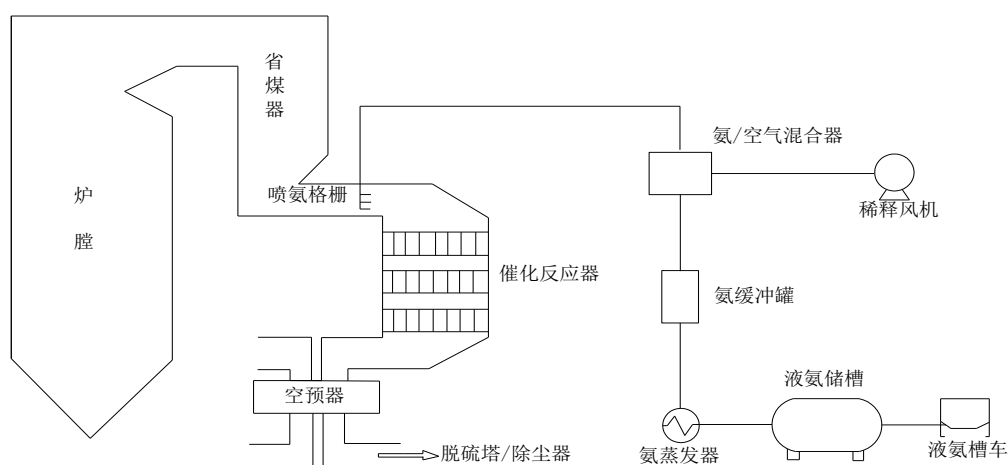


图 2 典型 SCR 脱硝系统工艺流程示意图

5.3.2.2 系统组成

一套完整的 SCR 脱硝系统必须包括供氨系统、注氨系统、反应器、吹灰系统、控制系统和烟气在线监测系统。

供氨系统包括液氨卸料压缩机、液氨储存罐、液氨蒸发器、氨缓冲槽、氨稀释罐等设备，另外还必须备有喷淋设施、废水泵、废水池等附属设施，同时安装计量和监测仪表。

注氨系统包括稀释风机、供氨母管及集管和注氨格栅。为保证氨注入烟道的绝对安全以及均匀混合，需要引入稀释风，将氨浓度降低到爆炸极限以下，一般控制在 5% 以内。注氨格栅一般采用碳钢，布置在省煤器出口与催化反应器入口之间的烟道上。反应器主要包括外部箱体结构、内部填放的催化剂，是发生脱硝化学反应的场所。吹灰系统用于催化剂的在线清灰，可采用声波吹灰器或蒸汽/空气吹灰器。蒸汽吹扫较传统，可靠性高，应用广泛。声波发生器操作时振动或流化飞灰颗粒，并让烟气夹带颗粒流出反应器。催化剂宜分多层设计，每层催化剂上方均应布置吹灰器，用于除去覆盖催化剂活性表面及堵塞气流通道的颗粒物。控制系统包括氨气注入量控制单元、氨气管线保护单元、风机控制单元、催化反应器保护单元和控制器单元等。控制系统应保证被控制参数不超出允许值。在 SCR 装置的出口应对烟气进行连续在线监测，监测出口 NO_x 浓度、出口 O₂ 浓度、烟气温度等数据，监测数据反馈至控制系统。

5.3.3 关键工艺参数

5.3.3.1 还原剂类型

SCR 脱硝还原剂通常为液氨、尿素和氨水，三者的对比详见表 3。液氨的投资、运输和使用成本最低，应用最广，但具有安全隐患，必须配备严格的安全防火措施。尿素具有安全性能高的优势，在人口密度高、安全要求高的地区宜优先选用。

表 3 SCR 脱硝还原剂比较

还原剂	优点	缺点
液氨	直接使用、方便；不需要制氨系统、投资成本低	储运成本高、安全风险较大、管理要求较高
氨水	安全性比液氨高	储运成本高、蒸发制氨气能耗较大
尿素	安全性高、运输和储存方便	尿素制氨系统复杂、运行能耗大

5.3.3.2 催化剂

SCR 脱硝系统需使用催化剂，以 TiO₂ 为载体、V₂O₅-WO₃ (MoO₃) 等金属氧化物为活性组分的催化剂应用最为广泛。脱硝催化剂的选择依据主要为烟气工况、灰质特征和脱硝效率，应满足催化活性、选择性、使用寿命、外形和尺寸等方面的要求。

常用的脱硝催化剂有蜂窝式、波纹式和板式三种，其中蜂窝式应用最广。当气体流速确定时，蜂窝式催化剂的孔间距过大会导致进入催化剂内部的气体量减少，过小会导致催化剂积灰和堵塞，这两种情况均会降低脱硝效率。

中毒、烧结、堵塞和磨损会使催化剂活性下降，脱硝效率下降。脱硝效率降低到 80% 以下宜更换催化剂。对于燃煤锅炉，脱硝催化剂寿命宜为 10000~30000 小时，对于燃油或燃气锅炉，脱硝催化剂寿命宜超过 30000 小时。

催化剂的非选择性行为表现为 SO_3 和 N_2O 的生成。 SO_3 会导致亚微米级的 H_2SO_4 酸雾形成，引发蓝烟/黄烟，并给机组设备带来堵塞、低温腐蚀和高温结垢等危害； N_2O 是温室气体，且会破坏臭氧层。对于 $\text{V}_2\text{O}_5-\text{WO}_3$ (MoO_3) / TiO_2 催化剂，400 °C 以下时 N_2O 生成量极低， SO_2/SO_3 转化率应控制在 1% 以内。

5.3.3.3 反应温度

SCR 脱硝催化剂仅在某一特定温度区间内具有较高活性，1% $\text{V}_2\text{O}_5-\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ 催化剂的最佳反应温度区间为 300~400 °C。催化床层温度过低时，反应速率降低且氨逃逸量增加，催化床层温度过高时，催化剂易烧结且会生成 N_2O ，一般要求反应器进口烟气温度大于 300 °C。

5.3.3.4 气体混合

SCR 工艺在反应器前的管道内完成气体混合，应保证注氨格栅与反应器间的管道足够长，或安装静态混合器改善混合效果。

5.3.3.5 停留时间和气体空速

SCR 系统的停留时间是指反应气体在反应器内停留的时间，增大停留时间可提高脱硝反应速率。停留时间常通过气体空速来表示，二者呈反向相关，气体空速宜取 5000~15000 h^{-1} 。

5.3.3.6 氨氮比

SCR 工艺的理论氨氮比为 1，氨氮比过高会增加投资成本和运行成本，过低则可能降低脱硝效率，应根据实际需求选定，宜取 0.6~1.1。

5.3.3.7 氨逃逸

SCR 工艺存在氨逃逸，会因氨逃逸量过大而产生设备堵塞和腐蚀、飞灰品质下降等问题，氨逃逸量应控制在 2.5 mg/m^3 以下。

5.3.3.8 系统压降

SCR 脱硝系统的压降宜小于 1500 Pa，宜通过设置导流板、整流器等措施降低系统压降。

5.3.4 成本评价与分析

SCR 脱硝系统投资成本分为直接投资成本和间接投资成本,直接投资成本主要源于 SCR 系统设备、催化剂、电气自控、附属设施、土建、设备运输及安装等;间接成本主要包括技术费、设计费、调试费、税费及其它等。SCR 系统的运行成本包括电费、还原剂耗费、水费、运行管理人工费、设备维护及修理费等。SCR 工程投资和运行费用相对较高,根据脱硝效率不同,投资费用存在一定差别。

5.3.5 工程管理

SCR 脱硝工程的设计、施工、验收、运行和维护参考 HJ 562。

5.4 化学吸收技术

5.4.1 技术特点

化学吸收技术(简称化学吸收)通过吸收剂与烟气中的 NO_x 反应使其净化,通常可同时去除 NO_x 、 SO_2 、重金属等污染物,实现多污染物一体化净化。该技术工程应用脱硝效率一般为 40~60%,会产生吸收尾液。

5.4.2 工艺流程与系统组成

化学吸收系统主要包括吸收塔、吸收液配置及循环系统、尾液处理系统、电气控制系统和烟气在线监测系统。化学吸收技术的典型工艺流程如图 3 所示。

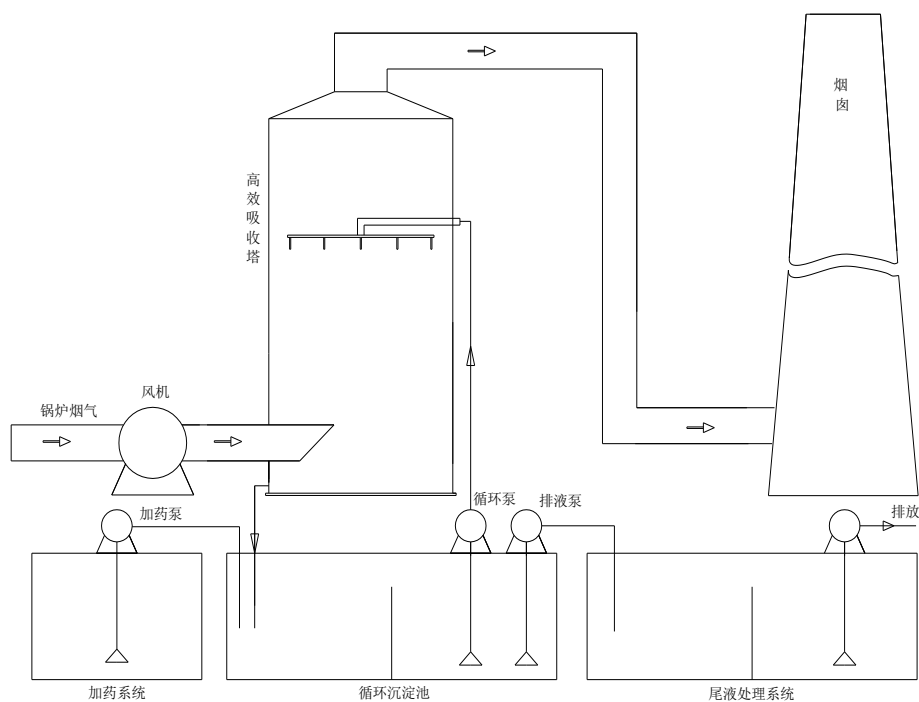


图 3 化学吸收工艺流程示意图

5.4.3 关键工艺参数

5.4.3.1 吸收剂

常用脱硝吸收剂有尿素、氨水、黄磷乳浊液、高锰酸钾、漂白粉、双氧水及其它合成物质等溶液。

5.4.3.2 空塔气速

吸收塔空塔气速对吸收效果有重要影响，空塔气速越小，气体在吸收塔内停留时间越长，吸收效果越好，但设备尺寸越大、造价越高；空塔气速太大，吸收效果差。空塔气速宜取 1~4 m/s。

5.4.3.3 液气比

在一定的液气比范围内，脱硝效率随着液气比的增加而升高。但液气比增加，要求循环水泵流量增大，导致系统阻力增大，水泵与风机的功率增大。液气比宜取 1.0~4.0 L/m³。

5.4.4 成本评价与分析

化学吸收技术的投资成本分为直接投资成本和间接投资成本，直接投资成本主要包括吸收塔设备、电气自控、附属设施、土建、设备运输及安装等；间接成本主要包括技术费、设计费、调试费、税费及其它等。运行成本包括电费、吸收剂耗费、水费、运行管理人工费、设备维护及修理费等。化学吸收技术的成本与吸收剂类型及尾液的处理方法相关。

5.4.5 工程管理

采用化学吸收技术时，循环尾液必须进行处理，根据吸收尾液的不同，可采用回收或无害化处理方式，防止造成二次污染。化学吸收法脱硝总体设计、施工与验收、运行与维护参考 HJ 462。

5.5 组合技术

低氮燃烧、SNCR、SCR 及化学吸收四种单项技术可以组合成低氮燃烧+SNCR、低氮燃烧+SCR、SNCR+SCR、低氮燃烧+化学吸收、SNCR+化学吸收及低氮燃烧+SNCR+化学吸收等组合技术。组合技术可达到更高的脱硝效率，也会增加投资成本，宜根据排放浓度控制需要进行选择。组合技术应满足各单项技术的关键工艺参数。SCR 作为组合技术的一部分时，宜根据排放标准调节催化剂用量。

6 控制技术选用建议

低氮燃烧、SNCR、SCR、化学吸收及其组合技术均可作为工业锅炉 NO_x 的控制技术，各项技术的适用性见表 4。基于不同类型工业锅炉的 NO_x 排放特性差异及各控制技术不同的适用性，表 5 列出了不同类型工业锅炉 NO_x 排放控制技术选用建议。控制技术应用后，氮氧化物排放应符合 GB 13271、DB44/765 的规定或满足当地环境保护的要求。

表 4 工业锅炉 NO_x 排放控制技术的适用性

技术类型	脱硝效率	投资成本	运行成本	适用性
低氮燃烧	10%~40%	低	无	煤粉炉宜选用，其他类型的锅炉应根据具体情况决定
SNCR	30%~50%	低	低	适用于现有空间小、拥挤的锅炉烟气脱硝
SCR	>80%	高	高	适用于对脱硝效率要求高的锅炉烟气脱硝
化学吸收	40%~60%	视尾液处理方式而定	视尾液处理方式而定	多污染物同时控制
低氮燃烧+SNCR	35%~65%	中	低	脱硝效率要求较高时，宜考虑使用
低氮燃烧+SCR	>85%	高	高	脱硝效率要求较高时，宜考虑使用
SNCR+SCR	>85%	高	高	脱硝效率要求较高时，宜考虑使用
低氮燃烧+化学吸收	>55%	视尾液处理方式而定	视尾液处理方式而定	脱硝效率要求较高、多污染物同时控制
SNCR+化学吸收	>65%	视尾液处理方式而定	视尾液处理方式而定	脱硝效率要求较高、多污染物同时控制
低氮燃烧+SNCR+化学吸收	>65%	视尾液处理方式而定	视尾液处理方式而定	脱硝效率要求较高、多污染物同时控制

表 5 不同类型工业锅炉 NO_x 排放控制技术

炉型	控制技术	
燃煤锅炉	循环流化床锅炉	SNCR、SCR、化学吸收或组合技术
	链条炉	低氮燃烧、SNCR、SCR、化学吸收或组合技术
	煤粉炉	低氮燃烧、SNCR、SCR、化学吸收或组合技术
燃油锅炉	SNCR、SCR、化学吸收或组合技术	
燃气锅炉	SNCR、SCR、化学吸收或组合技术	
其他锅炉	视情况参考上述控制技术	