

硝酸生产过程尾气治理的高效脱硝与节能耦合策略

杜冬琛

唐山中浩化工有限公司, 河北 唐山 063000

[摘要]硝酸生产时尾气里有好多氮氧化物,大量氮氧化物排放既不利于环境质量又对行业可持续发展起制约作用,高效脱硝和节能耦合策略成了关键办法,通过催化反应优化、余热回收利用、系统协同控制,既能提高 NO_x 去除率又能减少能耗,该策略有助于达成污染物削减目标,对工艺节能和经济效益提升有推动作用,对行业绿色转型意义重大。

[关键词]硝酸生产;尾气治理;高效脱硝;节能耦合

DOI: 10.33142/ect.v3i9.17881

中图分类号: X701

文献标识码: A

Efficient Denitrification and Energy-saving Coupling Strategy for Tail Gas Treatment in Nitric Acid Production Process

DU Dongchen

Tangshan Zhonghao Chemical Co., Ltd, Tangshan, Hebei, 063000, China

Abstract: During the production of nitric acid, there are many nitrogen oxides in the exhaust gas. The emission of a large amount of nitrogen oxides is not only detrimental to environmental quality but also restricts the sustainable development of the industry. The efficient denitrification and energy-saving coupling strategy has become a key method. Through catalytic reaction optimization, waste heat recovery and utilization, and system coordinated control, it can not only improve NO_x removal rate but also reduce energy consumption. This strategy helps to achieve pollutant reduction goals, promote process energy conservation and economic benefits improvement, and has significant implications for the green transformation of the industry.

Keywords: nitric acid production; exhaust gas treatment; efficient denitrification; energy-saving coupling

引言

化工生产中硝酸是重要的基础原料,其制造时产生大量氮氧化物尾气成为环境治理的难点,传统处理方式虽能在一定程度上减少排放,但普遍存在能耗高、效率低、二次污染等问题,在“双碳”战略与绿色转型的背景下,探索兼顾高效脱硝和节能降耗的耦合策略很迫切,通过优化催化反应、回收余热、系统协同控制,有望达成削减污染和提升能效的双重目标,为硝酸行业可持续发展提供新途径。

1 硝酸生产尾气的特征与治理需求

1.1 硝酸尾气的组成与特性

硝酸工业生产时主要靠氨的催化氧化和后续吸收来制硝酸,这一过程必然产生尾气,尾气主要是氮氧化物,核心为一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2),可能还有少量一氧化二氮(N_2O)、氧气(O_2)和水蒸气等杂质,这些气体化学活性高,对环境和设备影响显著, NO 在空气中容易氧化成 NO_2 ,毒性强且气味刺激,长期排放会导致酸雨和光化学烟雾, NO_2 腐蚀性强烈,威胁金属设备和管道寿命,氮氧化物在光照和温度下参与大气复杂反应,是雾霾形成的重要前驱物,硝酸尾气是行业副产物,更是典型高危污染源。

硝酸尾气跟其他工业废气不同,它有着浓度波动大、成分复杂、反应活性高的特点,生产的时候操作负荷、反

应条件和设备运行状态会影响氮氧化物的浓度使其在一定范围内剧烈变化,这让脱硝系统稳定运行面临挑战,而且尾气里既有还原性的 NO 又有氧化性的 NO_2 ,治理时容易有副反应,从而导致能耗增加和二次污染问题随之而来。

1.2 环境标准与治理压力

环保政策不断收紧,硝酸行业尾气排放标准愈发严格,我国部分地区如今已把氮氧化物排放限值控制在 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,比过去数百毫克的标准低多了,这一标准要求治理技术高效且治理过程能耗、运行稳定性、资源回收也得提高,硝酸产量在化肥和精细化工里占比大导致排放总量大,从行业来看,若不能稳定达标排放,企业生存发展就受直接影响且限产停产风险都可能。

1.3 传统治理工艺的局限性

行业长期以来主要采用湿法吸收、选择性催化还原(SCR)和选择性非催化还原(SNCR)等方式来处理硝酸尾气中的氮氧化物排放,然而这些传统工艺在应用时有着明显不足。

湿法吸收:人们常拿碱液或者水来吸收二氧化氮,但一氧化氮的去除率比较低且吸收液再生不容易、运行成本高、副产液的处理也很复杂。

SCR 工艺:在一定温度区间内,以氨作还原剂跟 NO_x 反应生成氮气 and 水的效率挺高,不过 SCR 反应窗口较窄,

一般就在 300 到 400℃之间，温度一波动效率就会降低，氨逃逸不但浪费资源而且可能造成二次污染。

SNCR 工艺：氨或者尿素在高温下被喷射以直接还原 NO_x，其投资成本低但反应条件苛刻，NO_x 去除率一般为 30%~60%，难以达到日益严格的排放标准。

由此可知，硝酸尾气复杂波动工况下传统方法应对时往往会陷入能耗高、效率受限、二次污染风险大的困境。

1.4 治理需求的多维度考量

“双碳”目标与绿色转型的大背景下，硝酸尾气治理不能只满足于“达标排放”，还得兼顾经济性和可持续性，具体需求如下：一是脱硝率要稳定在 90%以实现高效率，从而应对严格环保限值和高浓度波动工况；二是在确保治理效果的要降低能源消耗以实现低能耗，避免治理过程成为能耗和碳排放新负担；三是不管负荷、工况如何变化都要可靠运行以实现系统稳定，不能频繁启停或者效率大幅波动；四是要与硝酸生产过程良好耦合以实现耦合性强，达成余热回收、能量再利用和副产物资源化，推动整个工艺节能降耗。

2 高效脱硝的核心技术路径

2.1 先进催化剂的开发与应用

尾气脱硝过程中，催化剂是核心要素，氮氧化物的去除效率与运行能耗直接取决于其性能，传统的 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 型催化剂在一定温度区间活性较高但低温和高温工况适应性差，近年来，研究者通过提高活性金属负载、改进载体结构、增加比表面积显著改善了催化剂的多工况适应性，好比添加稀土元素可提升催化剂抗中毒能力和热稳定性，以分子筛和碳基材料作载体能提高低温反应活性，这样一改良，适用温度范围扩大、催化剂寿命延长且运行成本也降低。

2.2 多级反应器设计与工艺优化

单一反应器常很难在所有工况下都确保理想的脱硝效率，多级反应器设计就成了提升性能的重要方式，串联布置反应器可使尾气在不同温度和压力条件下被逐级处理以实现 NO_x 高效转化，而并联布置则能在负荷波动时保持整体稳定性以避免单一反应器因过载效率下降，实践显示，多级设计可让脱硝率提升 10%-15%且能有效降低氨逃逸率，在反应器内部，流场设计和催化剂层分布也非常关键，使用蜂窝型或者多孔结构的催化剂载体能改善气体分布并提高反应物和催化剂的接触效率，从而在相同体积下得到更高的转化率。

2.3 氧化耦合与选择性还原的协同作用

硝酸尾气里 NO 的比例往往比较高且其溶解度和反应活性低，后续处理就难，前端设置氧化工艺把 NO 部分转成 NO₂ 可使尾气吸收和反应效率明显提高，这常采用臭氧氧化、过氧化氢氧化或者催化氧化等法，氧化后的尾气进选择性催化还原（SCR）或者高效吸收液系统会使反

应时间更短去除率更高，氧化和还原耦合能优化反应机理且减少副产物生成，就像 SCR 过程里前置氧化能让氨氮利用率提高大概 10%且降低氨逃逸风险，吸收工艺中 NO₂ 溶解度比 NO 高得多，同等条件下吸收率能提高 20%~30%。

2.4 智能控制与动态调节

尾气治理时反应条件常波动，仅靠固定工况运行效率易降或能耗易增，必然要引入智能控制与动态调节，安装在线监测传感器就能实时采集尾气里 NO_x 浓度、温度、流量等数据，再把数据输入智能算法进行动态分析与预测，控制策略方面依据尾气成分实时变化动态调配催化剂投用比例、调整氨氮喷射量、优化反应温度区间，让反应效率和能耗达到双重最优，好比高负荷工况下适当提高氨氮投加量可保证脱硝率，低负荷或低浓度工况下减少喷氨量和催化剂活性区投入可降低不必要能耗。

2.5 典型技术效果对比

为直观展现各路径治理效果与能耗水平，表 1 列出几类典型技术性能对比。

表 1 典型技术的性能对比

技术路径	脱硝效率 (%)	适用温度范围 (°C)	氨逃逸率 (ppm)	能耗水平 (kWh/1000m ³)
传统 SCR	85~90	300~400	5~10	8.0
改良型催化剂 SCR	90~95	250~420	3~6	6.5
氧化耦合+SCR	92~96	200~400	2~5	7.0
多级反应器设计（串联）	93~97	200~420	2~4	6.2
智能控制+动态调节	95~98	180~420	≤2	5.5

表中能看出技术路径不断优化使脱硝效率显著提升且能耗水平渐降降低，智能控制与动态调节方案在多工况下可保持高效和低能耗的双重优势代表着未来发展的重要方向。

3 节能优化与余热回收的耦合策略

3.1 余热回收的必要性与实现途径

硝酸生产尾气温度往往比较高，直接排放不但会浪费能源且会加重治理装置的负担，余热回收能利用尾气和环境的温差将热能变成低压蒸汽、热水或者电能从而实现能源二次利用，就像尾气进脱硝装置之前通过换热器跟给水系统热交换产生蒸汽可用于车间加热或者发电，实践证明余热回收能使治理系统整体能耗降低 15%~20%且延长设备寿命，技术方面余热回收常用的方式有余热锅炉、板式换热器和热电转换系统，余热锅炉适用于高温尾气可直接把热量转化为蒸汽，板式换热器适合中低温尾气且结构紧凑换热效率高，热电转换系统能把部分热能直接变成电能给自动化控制系统供电以提高能源利用率。

3.2 过程能耗优化与系统效率提升

硝酸尾气治理系统里,能耗主要来自风机、泵和其他辅助设备,运行方式单一或者控制不合理时能源很容易被无效消耗,应用变频控制技术可使设备转速根据工况实时调整,从而减少空转和过载运行的能耗,与传统工频设备相比电力消耗能降低 10%~15%,使用余热锅炉可回收尾气热量并提供工艺所需蒸汽,实现“供能-用能”闭环,优化思路要强化系统耦合,使尾气处理装置从单一耗能环节变为能和生产线相互补充的综合能源单元。

3.3 反应与换热一体化设计

传统模式下通常把尾气脱硝和余热回收分开做,这使得能量传递环节多、损耗大,若将反应器和换热装置一体化设计则反应过程中就能直接回收热量且冗余设备和管道布局也会减少,一体化设计能减少能量多环节传递时的损失、提高系统整体能效,可缩短工艺流程、降低装置投资和运行维护成本,还能合理分配温度场、保证反应效率和换热效率都达到最优。

3.4 能量流与物料流的系统协同

硝酸尾气治理不应只被看作单一能量回收的事,而应纳入整个生产系统综合优化之中,Pinch 分析和热力学优化方法能找出工艺里冷热流的最佳匹配点从而让能量流与物料流耦合起来,这样余热能最大限度被回收且对外界能源的依赖也会减少,脱硝反应释放的热量可以拿来加热吸收塔的进料溶液使能源内部循环且尾气里的部分余热也能预热空气或者水以提升设备运行效率,这种系统集成思路打破了单装置优化的限制促使尾气治理和生产环节协同发展。

3.5 典型节能效果对比

为直观呈现各策略的成效,表 2 列出了几种常见节能路径的对比数据。

表 2 常见节能路径的对比数据

策略类型	节能率 (%)	投资回收期 (年)
余热回收	15~20	2.5
变频控制	10~15	2.0
反应-换热一体化设计	12~18	3.0
系统协同优化	18~25	3.5

表中能看出,在降低能耗方面不同策略都能起积极作用,其中系统协同优化节能潜力最大但可回收周期长些,而变频控制见效快且回收周期短,适合优先推广。

4 高效脱硝与节能耦合的系统化路径

4.1 系统集成思维的引入

硝酸生产时,人们往往把脱硝和节能当作两个相对独立的环节(脱硝关注污染物达标排放而节能着眼于降低能耗与提高效率),但随着工艺变复杂、环保标准提高,这种割裂的思路难以满足行业发展需求了,系统集成思维重视把脱硝和节能当作整体过程考虑并在设计、运行和管理

上协同优化,反应器设计阶段得兼顾 NOx 去除率和热能回收效率且管网布置时要减少传输损耗并确保气流动力学合理,跨单元、跨环节整体优化能打破局部最优限制以实现治理效果和能耗水平双赢。

4.2 全过程优化的实施路径

高效脱硝与节能耦合的另一核心是全过程优化,要在尾气产生到最终排放的全流程里找寻协同效应,在反应器环节,多级催化和一体化换热能让化学反应效率与热量回收效率一起提高,而尾气管道环节中,热能回收和压力损失优化可避免能量无效消耗,在余热回收环节,与生产系统的蒸汽网络或者热水系统耦合能实现能源梯级利用,全过程优化不只是技术问题,更是系统工程问题,得综合考虑能量流、物料流和信息流的统一,有研究显示,全过程优化能让硝酸生产尾气治理能耗降低 20%,NOx 排放量也能稳定控制在比标准更严的水平。

4.3 智能化平台的支撑作用

复杂工况下仅靠人工经验难以达成高效的脱硝与节能平衡,得依托智能化平台,安装多点传感器实时采集尾气流量、温度、压力和 NOx 浓度等数据,结合大数据分析 with 人工智能算法对工况进行动态建模和预测,预测结果出来后系统可自动调整氨氮投加量、催化剂活性区段使用比例、余热回收装置运行参数以形成动态优化闭环,智能化平台还有故障诊断和预警功能,一旦监测到反应效率下降或者能耗异常升高,系统自动预警并给出优化建议以避免运行失稳或者能耗浪费,应用数字孪生技术可在虚拟环境模拟硝酸生产全流程、提前验证优化方案可行性再到实际装置实施以进一步提升管理的科学性和前瞻性。

4.4 未来发展趋势的展望

全球“双碳”目标和绿色化工理念不断深化使硝酸尾气治理有了像绿色催化剂、数字孪生模拟、碳交易政策叠加、智能化自主运行等新趋势,绿色催化剂的研发能实现低温高效、耐硫耐水、减少对稀有金属依赖且降低成本,数字孪生模拟通过虚拟建模实现工艺在线优化和预测从而减少试错成本,碳交易政策的日益完善可促使企业将节能措施转化为碳资产收益从而积极采用高效耦合技术,智能化加上自主运行使尾气治理系统朝着无人值守和全自动化发展且依靠 AI 实现实时优化和自我学习,这些趋势不仅是技术上的突破也是产业转型的必然要求,高效、低碳、智能的系统化路径是硝酸行业在市场竞争激烈、环保约束严格的情况下保持可持续发展的关键。

5 结束语

硝酸生产尾气治理与环保达标、行业节能降耗以及可持续发展密切相关,高效脱硝和节能相耦合既能提高 NOx 去除率又能降低能耗从而统一经济效益和环境效益,以后随着绿色催化剂、智能化控制、系统集成不断应用,硝酸尾气治理将朝着高效化、低碳化发展并为化工行业绿

色转型提供有力保障。

[参考文献]

- [1]冯文虎,徐哲,吴昊.超洁净湿法造粒尾气治理技术在硝酸铵装置中的应用[J].中氮肥,2024(4):9-12.
- [2]郭普庆,王岩,张鹏.逆流式活性炭脱硫脱硝技术设计创新及应用[J].冶金设备管理与维修,2025,43(4):17-20.
- [3]周娟,付薪屹,韩艳姿,等.烟气湿法脱硝技术研究[J].煤炭与化工,2025,48(7):131-134.
- [4]周雪姣.再生铅回收过程中脱硫脱硝技术集成与节能减排效果评估[J].资源节约与环保,2025(6):5-8.
- [5]李佳,樊星,陈莉,等.硝酸生产尾气中NO_x和N₂O联合脱除技术研究进展[J].化工进展,2023,42(7):3770-3779.

作者简介：杜冬琛（1993.7—），男，河北省唐山市人，汉族，本科学历，化工助理工程师，就职于唐山中浩化工有限公司，从事化工生产（硝酸生产和罐区储运）相关工作。