

绿色工艺视角下硝酸生产过程能耗优化与减排路径研究

段 颖

唐山中浩化工有限公司, 河北 唐山 063000

[摘要]硝酸生产这个化工环节能耗高且排放也高,行业发展的关键方向是其绿色转型,优化工艺流程、调控反应条件、回收利用余热能显著降低单位能耗,升级催化剂、应用尾气治理技术会减少氮氧化物排放,结合数字化控制和智能监测手段来精细化管理生产全过程能提升资源利用效率也能为碳减排目标提供可行路径,这一研究对推动化工行业低碳转型意义重大。

[关键词]硝酸生产;能耗优化;减排路径;绿色工艺;智能化

DOI: 10.33142/ect.v3i8.17514

中图分类号: X783

文献标识码: A

Research on Energy Consumption Optimization and Emission Reduction Path of Nitric Acid Production Process from the Perspective of Green Technology

DUAN Ying

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

Abstract: The production of nitric acid is a chemical process with high energy consumption and emissions. The key direction for industry development is its green transformation, optimizing process flow, regulating reaction conditions, and recycling waste heat to significantly reduce unit energy consumption. Upgrading catalysts and applying tail gas treatment technology will reduce nitrogen oxide emissions. Combining digital control and intelligent monitoring methods to finely manage the entire production process can improve resource utilization efficiency and provide feasible paths for carbon reduction goals. This research is of great significance for promoting low-carbon transformation in the chemical industry.

Keywords: nitric acid production; energy consumption optimization; emission reduction pathway; green technology; intelligentization

引言

全球“双碳”战略不断推进,化工行业承受着前所未有的节能与减排压力,硝酸生产高能耗、高排放,在绿色转型里是重点环节,要在确保产能和质量的提升能源利用效率、减少污染物排放是行业急需解决的难题,引入绿色工艺有了新思路,流程优化和余热回收可降低能耗,智能化和数字化技术能推动全过程管控,为构建清洁高效的现代化化工体系有力支撑并为化工行业低碳、循环、可持续发展探索出可行路径。

1 硝酸生产过程的能耗特征与减排压力

硝酸生产过程典型地具有高能耗特征,主要能耗集中于氨氧化反应、尾气加压、吸收冷却和相关辅助设备运行等环节,氨氧化阶段涉及 850~930℃高温与 0.7~0.9MPa 高压条件,稳定反应环境需要大量能源且会产生约 2000~2500kJ/molNH₃ 的副产热量,吸收系统中氮氧化物和水反应生成硝酸时,冷却、循环喷淋和尾气压缩操作得持续进行,这既增加电力和冷却水消耗又对热交换器效率、循环水系统提出更高要求,装置产能不断扩大使得吨硝酸综合能耗水平成为衡量企业竞争力和环境绩效的重要指标,行业数据统计,传统工艺吨硝酸能耗一般在 5.5~6.0GJ 之间,若能效控制不好,运行成本会上升且企业可持续发展能力也会直接受影响。

能耗居高不下使硝酸生产过程减排压力巨大,氨氧化与尾气排放是氮氧化物(NO_x)的主要来源且排放浓度常在 800~1200ppm,治理不好会严重影响区域大气环境,氮氧化物是形成酸雨、臭氧、光化学烟雾的关键前体物且与 PM_{2.5} 控制、区域空气质量改善直接相关,近年“双碳”战略和《超低排放行业标准》出台让硝酸行业排放控制要求越来越严且 NO_x 排放限值已降到 200mg/m³ 以下,企业既要满足现行排放标准还要考虑碳交易政策下的长期减排目标,排放超标就会面临碳配额不足、碳交易成本增加、环保处罚等经济压力,保障装置稳定运行、产能达标并高效脱除和减排 NO_x 是行业发展必然要解决的问题。

全球能源结构转型与绿色化发展趋势对硝酸生产有了更高要求,传统靠化石能源驱动的生产模式难以适应低碳发展新形势,提升能效、清洁化转型成提升行业竞争力核心路径,单一设备改造或末端治理措施满足不了未来需求,因此得从工艺系统集成角度推进全流程优化,用余热回收锅炉和汽轮机系统实现能量梯级利用能大幅减少对外部蒸汽和电能依赖,催化剂升级换代(如铈-钨合金网、稀土改性催化剂)在高转化率时可减少副产 NO_x 生成,引入过程强化技术(像多级吸收塔、优化液气比设计)以及数字化监控平台能动态优化反应效率与排放控制,能耗特征和减排压力的双重挑战给硝酸行业推广绿色工艺提供现实动

力，为未来低碳化和智能化路径探索奠定坚实基础。

2 绿色工艺在硝酸生产中的应用与优化路径

在硝酸生产中，绿色工艺逐渐成为能耗优化与减排的关键手段，其应用主要体现在工艺流程的精细化改造、能源回收循环利用、反应条件优化调控等方面，硝酸生产的核心环节氨氧化反应，其操作温度和压力条件直接影响能耗和氮氧化物副产量，新型高效催化剂（像铑-钨合金网、稀土改性催化剂）的使用，既能降低活化能、提高氨转化率，又能减少一氧化二氮（ N_2O ）等温室气体的生成，钨基或者稀土修饰的催化剂在耐硫、抗水汽干扰方面性能好，能明显改善催化剂寿命与选择性，让反应更稳定高效，进而减少不必要的能耗，吸收系统的优化也很重要，配置高效换热器、分布式冷凝器和改进传质设备，可大幅提升传质速率，降低冷却水和电能消耗，让硝酸生产过程的能源利用效率更高。

绿色工艺应用时，能源回收与循环利用是能耗优化的重要途径，硝酸生产会释放大量余热，充分回收利用这些余热能显著降低总体能耗，像用废热锅炉（WasteHeatBoiler, WHB）回收氨氧化放热能转化成 3.0~3.5MPa 的中高压蒸汽，驱动空压机、汽轮机，或给吸收塔加热提供热源以实现能量梯级利用，行业实证显示，配备高效余热回收装置后，吨硝酸综合能耗可降 12%~15%， CO_2 间接排放强度约降 0.25t/tHNO₃，进一步缓解碳排放压力，而且把工艺和可再生能源深度结合，引入光伏发电、风能供电或者绿色氢能部分取代传统化石能源驱动，让硝酸生产体系在绿色工艺框架下能耗优化和减排路径协同发展，再进一步，引入储能系统，像锂电池、液流电池，平衡可再生能源供给的波动性，配合智能能量管理系统（EMS），削峰填谷的提高能源利用效率，确保硝酸装置不同负荷下稳定运行，给行业绿色、低碳、可持续发展有力支撑。

智能化和数字化深度融合成为推动绿色工艺落地的重要支撑，构建全流程数字孪生模型（DigitalTwin）能使企业在虚拟环境里模拟温度、压力、液气比等关键工艺参数对能耗与排放的动态影响，从而在设计阶段提前优化运行条件，而且 AI 预测模型和大数据分析平台助力系统实时监测和动态调控反应器的能量利用效率、尾气 NO_x 排放浓度以及冷却系统负荷，让装置长期处于最佳运行区间，部分采用智能化控制的企业数据表明装置综合能效提升约 5%~8%、NO_x 排放降低 10%~12%、吨硝酸碳排放强度下降约 0.3tCO₂eq，如此一来绿色工艺在技术、经济和环保方面的优势逐渐凸显，推广绿色工艺既是应对“双碳”战略的必然需求也是行业提升核心竞争力的有效方式，未来过程强化（ProcessIntensification）、智能优化控制（AdvancedProcessControl, APC）和循环经济理念深度融合会让硝酸生产逐步走向更高效、低碳、可持续的发展新阶段，绿色工艺应用效果对比表 1 所示。

表 1 绿色工艺应用效果对比

优化措施	能耗降低幅度	排放减少幅度	综合效益提升
高效催化剂应用	8%	10%	工艺更稳定
余热回收系统	12%~15%	8%	降低运行成本
智能化控制平台	5%~8%	≥10%	提高灵活性

3 能耗优化与尾气减排的技术策略

硝酸生产过程中，能耗优化和尾气减排特别关键，不但要降低单位产品能耗，还得使氮氧化物等污染物达标排放，以提高经济效益和环境效益。能耗优化方面，氨氧化反应是核心，该反应一般在 850~930℃、0.7~0.9MPa 的高温高压下进行，不但耗能多，而且运行波动时容易浪费能量，工业上为了减少这一环节的能耗，已逐渐推广高效合金催化网（如铑-钨合金网），其选择性提高，氨转化率能超 96%，副反应率能降 2%，从而减少反应中额外的能量损耗，并且反应器结构也可优化，采用径向流反应器和多级分布式进气设计，改善流场分布，使温度梯度更均匀，进而提高热效率，合理安排换热网络并引入余热回收系统，就能实现能源梯级利用，如把氨氧化放出的高温尾气送到余热锅炉产生高压蒸汽，用于驱动压缩机或者给下游吸收塔供能，有实践数据表明，使用高效余热回收后，每吨硝酸综合能耗能从 5.8GJ 降到约 4.9GJ，节能近 15%，运行成本也大幅降低，能源利用率从 82% 提升到将近 90%。

尾气减排的核心任务是治理氮氧化物（NO_x），硝酸生产尾气里 NO 和 NO₂ 浓度常达 800~1200ppm，直接排放会严重影响环境并招来严格监管处罚，选择性催化还原（SCR）、选择性非催化还原（SNCR）、尾气多级吸收与深度氧化等工艺成了主流。SCR 工艺注入氨或者尿素，在催化剂作用下可使 NO_x 转化成 N₂ 和 H₂O，脱除效率 90%，SNCR 在 850~1050℃ 温度窗口投加还原剂能再降低 NO_x 浓度约 30%~50%。优化尾气吸收系统液气比和吸收塔填料结构可提高吸收效率，使尾气中 NO₂ 含量降到 200ppm 以下，有些先进企业引入低温等离子体技术和催化耦合反应将没吸收的 NO_x 深度氧化进一步转化再回收利用，这些技术综合应用尾气排放浓度一般能降低 30%~40%，部分示范工程削减水平达到 50%，吨酸 NO_x 排放能控制在 150mg/m³ 以内，基本符合国际先进标准，为超低排放目标的实现提供了可行路径。

智能化与数字化技术在能耗优化与尾气治理融合时潜力巨大，构建工艺全流程在线监控与优化系统，通过分布式传感器网络实时采集温度、压力、流量和尾气组分等数据后用大数据分析人工智能算法动态预测和调节，可使反应过程始终处于最佳状态，而且数字孪生模型能在虚拟环境模拟不同操作参数对能耗与排放影响，在实际生产前优化方案从而降低试错成本，应用案例显示数字孪生和 AI 预测模型让生产装置能效提升约 7%~10%、尾气 NO_x 排放降低 12%~15%、碳排放强度下降约 0.25t/tHNO₃，

智能调度系统可全局优化余热回收与电力负荷进而使能源利用率提升 5%，碳排放监测与碳资产管理平台和企业一结合就能将节能减排量转化为可交易的碳配额或者碳信用，让企业有额外经济收益且增强市场竞争力，“双碳”战略不断深入推进，能耗优化与尾气减排技术的系统化和智能化应用不仅体现技术革新价值，还为硝酸行业构建绿色低碳智能可持续发展模式指明方向，为未来在国际市场提升绿色竞争力打下基础。

4 智能化与数字化赋能的绿色转型方向

智能化与数字化赋能为硝酸生产的绿色转型指出新的发展方向，关键在于用先进信息技术实现工艺的精细控制与全过程优化，传统生产模式下能耗与排放管理靠靠人工监测和经验判断，既滞后又不确定，容易造成能源浪费和排放超标，而工业互联网、边缘计算和大数据平台引入后硝酸生产逐渐具备全流程数据采集、实时监测和智能分析能力，部署分布式传感器网络可对温度、压力、流量、气体成分等关键运行参数进行秒级采集从而构建动态工艺数据库，多变量统计分析和预测性控制方法相结合能让系统为能耗评估与减排决策提供更科学的依据，这种数据驱动的运行方式使生产过程不再单纯依赖经验，而是依靠智能算法与模型预测支持下的精准管控，能源利用率和生产稳定性大大提高。

智能化系统在能耗优化上把大数据挖掘和人工智能算法（像 BP 神经网络、模糊控制与遗传算法优化）相结合，就能快速定位能耗薄弱环节并提出最优调控方案，氨氧化反应温度偏离设定区间时，系统会自动调整进料氨气与空气配比、催化床层温度和操作压力，使反应维持在最佳热力学与动力学区间以避免能量过度消耗。应用数字孪生（DigitalTwin）技术后，企业可在虚拟仿真环境里模拟和优化不同操作工况以提前评估节能与减排效果，从而降低实际运行的试错风险和经济损失，行业实践表明硝酸装置采用数字孪生和 AI 预测模型时能源效率一般能提升 5%~10%、吨硝酸碳排放强度能下降 0.2~0.3tCO₂eq，经济和环保效益显著提升，而且智能调度系统能依据能源管理系统（EnergyManagementSystem, EMS）优化余热回收、蒸汽分配和电力负荷，实现全厂范围能量梯级利用，推动硝酸生产朝着清洁化、低碳化转型，逐步实现智能电网和绿色能源协同融合。

在尾气治理和绿色转型的路径里，数字化赋能有着不可替代的作用，智能监控平台和在线分析仪（像红外气体分析仪、化学发光分析仪）能对尾气中的 NO 和 NO₂ 浓

度进行秒级连续监测，机器学习（MachineLearning, ML）和趋势预测模型相结合，系统就可以提前识别排放异常，触发自适应调节，像自动优化吸收液循环量、动态调节选择性催化还原（SCR）反应温区或者尿素喷射量，让氮氧化物脱除效率达到最大，有些先进企业还引入区块链碳排放追溯体系，把节能减排成果透明化管理，凭借碳交易市场转化成经济收益，“双碳”目标深入实施，智能化和数字化不只是生产过程优化的工具，更是驱动硝酸行业战略升级的重要手段，构建以数据驱动、智能控制和可追溯管理为核心的绿色工艺体系，硝酸生产会逐步达成高效化、低碳化和可持续发展的深度融合，在行业内成为可复制、可推广的示范样板，给整个化工行业的绿色转型提供坚实支撑和战略引领。

5 结束语

硝酸生产过程绿色转型是应对能耗高和减排压力的必然之举，也是达成“双碳”战略与可持续发展的关键，高效催化剂的使用、余热回收利用、尾气治理技术升级，再加上智能化和数字化平台赋能，企业就能提升能源利用效率，有效控制氮氧化物排放，实现经济效益和环境效益双赢，日后绿色工艺和智能化手段深度融合会不断推动行业创新，在政策支持和市场驱动下逐步完善，有力支撑硝酸生产构建清洁、高效、低碳的发展模式，助力化工行业整体走向绿色可持续发展。

【参考文献】

- [1]邓芳利.自动调节控制系统在硝酸铵生产中的应用[J].木工机床,2023(4):19-21.
- [2]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.
- [3]朱磊,任军.双加压硝酸装置的节能技术研究[J].化工设计通讯,2019,45(9):216-218.
- [4]戴付龙,肖亚冬.硝酸生产中循环水系统节能分析[J].氮肥技术,2022,43(2):36-37.
- [5]卢王奇,文鑫,但光局,等.蒸汽压缩机在硝酸锂蒸发浓缩过程中的节能减排应用研究[J].当代化工研究,2024(8):86-89.
- [6]何玮.科莱恩 EnviCatTMN2O-S 催化剂助力恒力石化硝酸工厂每年减少 69 万 t 二氧化碳当量排放[J].现代化工,2024,44(12):14.

作者简介：段颖（1991.11—），女，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。