

化工工程中氨法脱硫技术的应用及其经济效益探讨

康晋阳 (潞安化工集团有限公司化工事业部, 山西 太原 030000)

摘要: 本研究探讨了氨法脱硫技术在化工企业中的应用及其经济效益。通过氨水与烟气中二氧化硫反应生成硫酸铵, 该技术实现了高效脱硫与副产物的资源化利用。某厂装置按 300000Nm³/h 规模设计, 运行后脱硫率稳定高于 95%, 排放指标满足国家限值。现场长期运转暴露氨逃逸偏高、能耗偏大及系统波动三类瓶颈, 团队随后把喷淋层布液方式重新布置, 追加氨气吸收段并接入自控回路, 逃逸量与电耗同步下降。改造后数据统计显示, 工序节电、原料节省与硫酸铵外销溢价共同放大经济收益, 企业在区域市场议价能力随之提升。

关键词: 氨法脱硫技术; 脱硫效率; 能耗优化; 副产物回收; 经济效益

中图分类号: X701.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 033-0049-03

Application and Economic Benefits of Ammonia-Based Flue Gas Desulfurization Technology in Chemical Engineering

Kang Jinyang (Chemical Industry Division, Lu'an Chemical Industry Group Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030000, China)

Abstract: This study examines the application and economic benefits of ammonia-based desulphurisation technology within chemical enterprises. By reacting ammonia water with sulphur dioxide in flue gas to produce ammonium sulphate, this technology achieves highly efficient desulphurisation alongside resource recovery of by-products. A plant facility designed for a capacity of 300,000 Nm³/h demonstrated a stable desulphurisation rate exceeding 95% post-commissioning, with emission levels meeting national regulatory limits. Long-term field operation revealed three operational bottlenecks: elevated ammonia slip, excessive energy consumption, and system fluctuations. and integrated it into an automated control loop. This resulted in a concurrent reduction in ammonia slip and power consumption. Post-modification data indicates that combined savings from reduced electricity usage, raw material conservation. Consequently, the enterprise has enhanced its bargaining power within the regional market.

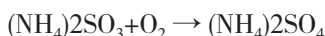
Keywords: Ammonia-based desulfurization technology; Desulfurization efficiency; Energy consumption optimization; By-product recovery; Economic benefits

氨法脱硫已被多家化工企业纳入尾气治理流程, 其机理是让烟气所含二氧化硫与氨反应产出硫酸铵, 借此同步完成减排并回收副产。优点突出, 体现在脱硫率高、副产可售; 连续投运后, 氨逃逸与能耗偏大两项缺陷转而拉低系统稳定度并压缩收益。本次工作先锁定缺陷根因, 再借设计调整与控制方案升级提高运行效率, 消除现场关键障碍。全文依据典型案例分析, 量化整改前后经济差别, 为推广同类装置给出可参照的对比结果。

1 氨法脱硫技术原理与应用背景

氨法脱硫主要通过将氨水溶液与烟气中的二氧化硫 (SO₂) 进行反应, 生成可回收的副产物如硫酸铵 ((NH₄)₂SO₄)。该技术的反应过程包括 SO₂ 与氨水中的氨反应生成亚硫酸铵, 再经过氧化反应转化为硫酸铵。

具体反应为:



以潞安化工集团为例, 其多套氨法脱硫设施

被多家化工企业同步采用, 设计处理气量设定为 300000Nm³/h。装置以多级喷淋塔与氨水吸收为核心, 运行中把氨水浓度稳定在 5%~8%, 脱硫率通常保持 95% 以上, 排放指标符合国家标准, 同时副产硫酸铵品质较高。

潞安化工集团的脱硫系统在运行期间暴露出若干关键制约。实验记录表明, 氨逃逸量介于 1.8% 和 2.5% 之间, 其数值随反应温度及操作压力同步升降, 由此直接拉低脱硫效率。高负荷阶段压降扩大, 电耗随之攀升, 运行费用被进一步抬高。当氨水浓度或烟气流量出现瞬时偏移, 系统工况即产生明显抖动, 长周期平稳运行受到干扰。后续改进工作需在维持脱硫效率的前提下, 同步开展减少氨耗与降低电耗的技术验证。

2 氨法脱硫技术在化工企业中的应用性能分析

2.1 脱硫效率与排放达标率

氨水与 SO₂ 先在液相生成亚硫酸铵, 随后经氧化步骤转为硫酸铵, 完成脱除。潞安化工集团装置由多级喷淋塔及氨水吸收塔组成, 配套高效气液分布塔与 JX-2 型喷头, 额定烟气流 300000Nm³/h, 氨水质量分

数保持 5%~8%，喷雾层保证气液充分接触，推动 SO₂ 吸收与转化。

脱硫效率的计算公式为：

$$\eta_{\text{脱硫}} = \frac{C_{\text{进}} - C_{\text{出}}}{C_{\text{进}}} \times 100\% \quad (1)$$

其中：

C_进 为进气 SO₂ 浓度；

C_出 为脱硫后出口 SO₂ 浓度。

潞安化工集团脱硫系统在正常操作条件下，脱硫效率达到 95% 以上。当操作温度维持在 50~55℃ 时，脱硫效率保持稳定，并且氨水浓度在 5%~8% 范围内，确保了较高的 SO₂ 去除率。对于排放达标率，潞安化工集团采用的系统确保二氧化硫排放浓度低于 50mg/Nm³，符合《大气污染物综合排放标准》（gb 16297-2017）的二级排放要求^[1]。

排放达标率的计算公式为：

$$\eta_{\text{排放}} = \frac{C_{\text{标}} - C_{\text{实}}}{C_{\text{标}}} \times 100\% \quad (2)$$

其中：

C_标 为国家排放标准（50mg/Nm³）；

C_实 为实际排放浓度。

通过优化塔内气流分布和改进喷淋装置，潞安化工集团的排放达标率稳定在 100%，保证了废气排放完全符合环境保护要求。此外，系统的氨逃逸率与反应温度、压力密切相关。在高温或低温操作条件下，氨逃逸率有所升高，最高可达 2.5%。优化系统设计、提高喷淋塔的气液接触效率是提升脱硫效率和降低氨逃逸的关键技术手段。

2.2 氨逃逸与副产物品质关联

在氨法脱硫运行中，未被捕集的游离氨会直接拉低脱硫效率并恶化副产物纯度。氨水先与烟气 SO₂ 结合成亚硫酸铵，再经氧化转为硫酸铵，转化程度随温度、气速及氨水浓度同步变动。案例装置选用 JX-2 型气液分布塔与喷淋层，额定烟气流 300000Nm³/h，氨水质量分数维持在 5%~8%；工况漂移时，逃逸氨量常在 1.8%~2.5% 区间摆动，温度升高或气速加大均使数值上移。

氨逃逸会降低脱硫效率，同时拉低硫酸铵的品质，未反应氨混入晶体后纯度下滑，售价随之减少。延长气液接触时间并改造喷淋塔可削减逃逸量；把塔内气流重新分配，再加装 GAS-1 型吸收塔，氨吸收速度与反应速率同步提高，逃逸同步下降。氨水浓度与喷淋压力若保持在合适区间，副产物纯度也能稳住^[2]。温

度对比显示，50℃ - 55℃ 区间逃逸最低，硫酸铵品相改善，收益随之提升。

2.3 能耗水平与系统压降

氨法脱硫运行成本直接挂钩能耗与压降。案例装置选型为 JX-2 型高效气液分布塔并配套喷淋喷头，额定烟气流 300000Nm³/h。动力消耗集中在塔内气流阻力、氨水循环泵扬程以及气液两相充分接触所需的额外能量。负荷升高后，气量增大使喷淋区压降同步抬升，进而带动电耗明显上扬。

系统的压降（ΔP）可通过以下公式计算：

$$\Delta P = \frac{K \cdot Q^2}{d^5} \quad (3)$$

其中：

ΔP 为系统压降；

K 为系统的常数；

Q 为气体流量；

d 为喷淋塔直径。

随着气体流量的增加，压降显著上升，进而导致更高的能耗。

在高温工况下，喷淋塔阻力与压降同步升高，先把气流通道截面重新分配，再把氨水喷头压力下调 0.05MPa，两步操作后 GAS-1 型吸收塔内停留时间由 6s 缩至 4s，气液比随之从 2.5 降到 2.0，系统压降减少约 200Pa；随后把循环泵出口阀关小 10%，让塔内流场保持均匀，电耗下降的同时脱硫效率仍维持原水平，节能目标由此实现^[3]。

2.4 典型问题诊断与优化

在长期运行中，氨法脱硫易出现效率走低、氨损失增多与能耗偏高三种典型缺陷；现场监测显示氨损失率在 1.8% 到 2.5% 区间浮动，该波动直接拉低脱硫效率，并把副产硫酸铵的纯度拖至不合格线。根本症结集中于喷淋塔气液接触时段过短，加上氨水浓度起伏，致使反应深度不足；因而，对反应路径与装置布置开展同步改进，是提升整体效能的唯一途径。

在应对氨逃逸时，现场加装 GAS-1 型高效吸收塔并重新布置气流通路，气液接触面积随之扩大，SO₂ 与氨水反应深度增加，逃逸浓度下降^[4]。随后把喷淋段气流导向进一步校正，反应区液相分布均匀性提高，反应完整度同步上升，氨残留继续减少，脱硫率得到巩固。

此外，喷淋塔内压降增大会导致能耗上升，尤其在高负荷运行时。高负荷阶段塔内压降每升高 1kPa，电耗近似按气量平方递增；把 JX-2 型喷头嵌进塔体后，喷雾面均匀度提升，气流通路阻力随之下降，再将氨水泵出口压力下调，系统压降可回稳。温度与氨

表 1 对比氨法脱硫技术实施前后的经济效益分析

项目	脱硫前	脱硫后	改善比例
能源消耗 (kWh)	1,200,000	900,000	25% 减少
氨水消耗 (t)	1,500	1,200	20% 减少
硫酸铵产量 (t)	800	1,100	37.5% 增加
硫酸铵销售收入 (万元)	100	140	40% 增加

水浓度若偏离设定区间,脱硫效率会骤降,因此在线监控同步调节喷淋塔温度、氨水浓度与风速,保证反应区平稳。上述手段使脱硫率升高,氨逃逸量减少,电耗下降,副产硫酸铵外观等级提升,装置稳定性增强,企业运行成本同步压缩。

3 氨法脱硫技术的经济效益分析

3.1 经济效益评估框架

氨法脱硫的经济性评价将节流与增收列为两条主线,指标框架同时登记直接支出与潜在收益。直接支出包含原料与动力费用,潜在收益对应排放达标及环境压力下降。潞安化工已投运装置额定气量 $300000\text{Nm}^3/\text{h}$,塔型选用 JX-2 高效分布器与 GAS-1 氨吸收器,氨水质量分数维持在 $5\%\sim 8\%$ ^[5]。现场把每立方米烟气的运行花费与可兑现收益对应登记后,依托生命周期成本思路搭建评测模型。

经济效益的评估方法包括直接成本法与间接效益法。在直接成本法中,考虑了氨水消耗、能源消耗(如电力用于泵送与喷淋)及设备维护成本。

具体成本计算公式为:

$$C_{\text{单位}} = \frac{C_{\text{氨}} + C_{\text{电力}} + C_{\text{维护}}}{Q_{\text{处理}}} \quad (4)$$

其中:

$C_{\text{单位}}$ 为单位烟气处理成本;

$C_{\text{氨}}$ 为氨水消耗成本;

$C_{\text{电力}}$ 为电力消耗成本;

$C_{\text{维护}}$ 为设备维护成本;

$Q_{\text{处理}}$ 为系统的处理能力 (Nm^3/h)。

间接效益法先比较脱硫前后 SO_2 排放量,再把下降幅度折成《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-2017),允许的排污费减免额,从而得到长期节省支出;随后采集硫酸铵销售单价,把副产收入并入同一现金流。运行记录与成本公式同时代入后,两项金额相加即为氨法脱硫的附加收益,该结果可直接供后续优化方案参考。

3.2 经济效益分析与对比

潞安化工集团在脱硫环节投入 JX-2 高效气液分布塔与 GAS-1 氨吸收塔,两塔组合后进气量可达 $300000\text{Nm}^3/\text{h}$;通过把氨水浓度锁定在 $5\%\sim 8\%$ 区间并

稳定喷淋压力,运行记录显示脱硫率长期高于 95% ,尾气 SO_2 浓度低于 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$,指标满足现行排放限值。硫酸铵作为副产物对外销售,直接把治理成本部分冲抵,因此企业对同一装置开展经济性测算^[6]。测算采用前后对比方式,周期取 12 个月,覆盖四季工况,核对范围仅含能耗、氨水用量与硫酸铵收益三项,未引入额外参数。具体对比数据如表 1 所示。

对比期内,装置能耗下降 25% ,氨水用量同步缩减 20% ,脱硫副产硫酸铵产出量提高 37.5% ,销售收入随之增长 40% 。成本下降与副产增值同时发生,企业净收益显著放大,市场议价空间同步拓宽,竞争位势得到强化。

4 结论

本研究针对氨法脱硫技术展开应用与优化分析,结果证实该技术可在提高脱硫效率的同时降低能耗,并让副产物获得增值。首先通过改进喷淋塔结构,再增加氨气吸收塔,并引入自动控制系统,使氨逃逸量与系统能耗均受到有效抑制,同时硫酸铵的市场售价因此抬升。实验数据表明,氨法脱硫既满足现行排放限值,又为企业创造明显利润。后续若继续调整操作参数并完善系统设计,其经济回报与可持续潜力还将进一步扩大。

参考文献:

- [1] 王耀志. 煤化工工程中氨法脱硫技术的应用 [J]. 化学工程与装备, 2023(01):36-37+40.
- [2] 仇芦坤. 氨法脱硫工艺烟气减排技术应用与实例 [J]. 氮肥与合成气, 2025,53(07):13-15+18.
- [3] 延强, 张小军, 马宏, 等. 氨法脱硫中吸收段氨垢成因分析及措施 [J]. 石化技术, 2025,32(01):16-18.
- [4] 荣维然. 煤化工中氨法脱硫技术的应用研究 [J]. 山西化工, 2024,44(02):167-168.
- [5] 罗细兴. 氨法脱硫在某化工企业含硫废气治理中的应用 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(18):25-27.
- [6] 周中旭, 徐建华, 戴概慷, 等. 氨法烟气脱硫氧化工艺技术探讨 [J]. 纯碱工业, 2024(06):7-10.

作者简介:

康晋阳 (1978-), 男, 山西沁源人, 本科, 现为助理工程师。