

超低排放背景下火电厂SCR脱硝系统氨逃逸控制策略研究

高颖华

内蒙古自治区环境监测总站兴安分站 内蒙古 兴安盟 137400

摘要：在超低排放背景下，火电厂SCR脱硝系统氨逃逸控制至关重要。氨逃逸不仅影响脱硝效率，还会造成设备腐蚀、堵塞等问题。研究提出通过优化喷氨系统布局、采用智能喷氨控制、提升雾化效果、精准调控温度、加强流场均匀化设计、实施催化剂全生命周期管理及引入先进监测技术等策略，可有效降低氨逃逸率，确保系统稳定运行，满足超低排放要求。

关键词：超低排放背景；火电厂SCR脱硝系统；氨逃逸控制策略

引言：在超低排放政策强力推进下，火电厂氮氧化物减排压力剧增，SCR脱硝技术成为关键手段。但实际运行中，氨逃逸现象频发，这不仅会降低脱硝效率、造成氨资源浪费，还会引发硫酸氢铵沉积，堵塞催化剂孔隙、腐蚀设备，影响系统稳定运行。因此，研究超低排放背景下火电厂SCR脱硝系统氨逃逸控制策略，对提升脱硝效果、保障设备安全及实现环保目标意义重大。

1 火电厂 SCR 脱硝系统氨逃逸形成机理与影响因素

1.1 化学反应机理

(1) SCR主反应：在钒基、钛基等催化剂作用下，脱硝系统核心反应为 $4\text{NO}+4\text{NH}_3+\text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2+6\text{H}_2\text{O}$ ，该反应能高效将氮氧化物转化为无害的氮气和水，是降低烟气污染物排放的关键过程。但主反应存在严格的反应条件要求，若反应不完全，未参与反应的氨会随烟气排出，形成氨逃逸。(2) 副反应：烟气中含有的 SO_2 会发生 $2\text{SO}_2+\text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$ 的副反应，此反应在催化剂表面更易发生，生成的 SO_3 是后续形成硫酸氢铵(ABS)的关键物质。当系统内存在未反应的氨时，氨与 SO_3 快速结合生成ABS，不仅会堵塞催化剂孔隙，还会加剧设备腐蚀，同时进一步导致氨无法充分参与主反应，间接增加氨逃逸量。

1.2 关键影响因素

(1) 喷氨不均：喷氨格栅设计不合理、喷嘴堵塞或调节不当，会导致氨在烟道内分布失衡。某电厂实际运行案例显示，因喷氨格栅局部堵塞，出现局部区域喷氨过量情况，该区域氨逃逸率骤升至8ppm，远超行业3ppm的控制标准，直接增加了后续设备运维成本。(2) 温度窗口偏离：SCR系统常用的钒基催化剂，其活性温度范围严格控制在280-400℃。当锅炉负荷波动或烟气换热系统故障导致烟气温度低于280℃时，催化剂活性显著下降，主反应速率减缓，氨反应不完全；若温度高于400℃，则会加速催化剂烧结老化，同时引发氨的氧化副反应，双

重作用下氨逃逸率大幅上升。(3) 催化剂失活：催化剂长期运行后，会因烟气中飞灰磨损、碱金属中毒及ABS沉积等因素逐渐失活，其对 SO_2 的催化氧化能力却异常增强。数据表明，当催化剂导致的 SO_3 转化率每升高1%，ABS生成量会相应增加15%，大量ABS附着在催化剂表面，进一步堵塞反应通道，形成“失活-ABS增多-氨逃逸加剧”的恶性循环^[1]。(4) 流场紊乱：烟道内导流板布置不合理、烟道截面突变或设备安装偏差，会导致烟气流动速度分布不均。当烟道内局部速度偏差超过15%时，烟气与氨的混合均匀性严重下降，部分区域氨浓度过高而无法参与反应，使得氨逃逸量较流场稳定时增加3倍，同时还会造成催化剂局部磨损严重，缩短其使用寿命。

2 超低排放背景下火电厂 SCR 脱硝系统氨逃逸控制策略

2.1 喷氨系统优化

(1) 喷氨格栅(AIG)改造：针对传统喷氨格栅布氨不均问题，采用计算流体动力学(CFD)技术对格栅布局进行数值模拟优化，结合烟道结构与烟气流动特性，调整喷嘴数量、间距及喷射角度，实现氨在烟道截面的均匀分布。改造后可使烟道内氨浓度偏差控制在10%以内，避免局部喷氨过量或不足，从源头减少氨逃逸风险，同时为后续反应创造稳定的浓度环境。(2) 智能喷氨控制：引入长短期记忆(LSTM)神经网络预测模型，整合锅炉负荷、烟气流量、入口 NO_x 浓度等多维度运行数据，通过模型自主学习历史工况与氨逃逸的关联规律，实现喷氨量的动态精准调控。相较于传统PID控制，该系统响应时间缩短至5秒，能快速应对工况波动，避免因滞后调节导致的氨过量喷射，使氨逃逸率稳定控制在2ppm以下。(3) 雾化系统升级：对喷氨雾化装置进行技术改造，将压缩空气压力提升至350kPa，通过高压气流增强氨液雾化效果，使雾化后液滴粒径控制在50μm以内。更

小的液滴粒径大幅增加了氨与烟气的接触面积，提升混合效率，减少氨液在烟道壁面的附着损耗，同时降低因液滴团聚导致的局部氨浓度过高问题，进一步优化氨的反应利用率^[2]。

2.2 流场均匀化控制

(1) 导流装置设计：在烟道关键位置（如转弯处、变径段）加装定制化静态混合器与导流板，通过改变烟气流动轨迹，打破局部涡流与死区。某电厂改造案例显示，加装优化后的导流装置后，烟道内流速偏差从改造前的18%降至8%，烟气流动稳定性显著提升，为氨与烟气的均匀混合提供了良好的流场基础。(2) 数值模拟验证：采用ANSYS Fluent流体力学软件对烟道流场进行全尺寸模拟，通过调整导流装置参数（如叶片角度、安装位置），反复迭代优化流场分布。模拟结果表明，优化后的流场使NH₃/NO_x混合效率提升40%，有效解决了传统依赖经验设计导致的混合不均问题，为现场改造提供精准的技术依据，降低试错成本。(3) 现场测试数据：在某300MW机组流场改造后，通过网格布点法对烟道出口NO_x浓度进行实测，数据显示出口NO_x浓度标准差从改造前的97.18%降至15.42%，浓度分布均匀性大幅改善。这一变化直接反映出氨与NO_x反应的充分性提升，间接证明氨逃逸量显著降低，同时也验证了流场优化方案的实际应用效果。

2.3 温度精准调控

(1) 分级燃烧技术：在锅炉燃烧系统中采用分级燃烧工艺，通过调整一、二次风比例与喷燃器配风方式，在炉膛内形成还原性气氛，抑制NO_x生成。实际运行数据显示，该技术可使SCR入口NO_x浓度降低30%，减少后续喷氨量需求，从根本上降低因过量喷氨导致的氨逃逸风险，同时减轻催化剂反应负荷。(2) 温度补偿策略：针对锅炉低负荷时烟气温度偏低、高负荷时温度偏高的问题，制定动态温度补偿方案。低负荷阶段，通过热风再循环系统将350℃高温烟气掺混至SCR入口，维持催化剂活性温度；高负荷阶段，启动烟道喷水急冷装置，精准控制烟气温度不超过400℃。该策略确保催化剂始终处于280-400℃的最佳活性区间，保障主反应高效进行^[3]。

(3) 实时监控系统：在SCR反应器进出口及烟道关键节点部署可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)氨逃逸分析仪，其测量精度可达0.1ppm，能实时采集氨浓度数据并传输至中控系统。运行人员可根据实时数据及时调整喷氨量与运行参数，避免氨逃逸超标，同时为系统优化提供数据支撑，实现闭环控制。

2.4 催化剂全生命周期管理

(1) 抗硫催化剂应用：选用高性能钒钨钛基抗硫催化剂，通过优化活性组分配比与载体结构，降低催化剂对SO₂的催化氧化能力。工业应用表明，该类催化剂可将SO₃转化率控制在0.5%以下，减少ABS生成量，避免催化剂因ABS沉积失活，同时降低氨与SO₃的副反应消耗，间接减少氨逃逸。(2) 智能吹灰系统：采用声波吹灰与蒸汽吹灰组合的智能吹灰方案，根据催化剂压差变化与运行时长，自动调整吹灰频率与强度。声波吹灰可清除催化剂表面疏松积灰，蒸汽吹灰则针对顽固ABS沉积，两者协同作用使催化剂压差上升速率减缓60%，有效延长催化剂清灰周期，维持其反应活性，保障氨的充分反应^[4]。(3) 性能评估体系：建立催化剂全生命周期性能评估指标体系，涵盖活性（≥65%）、孔密度（≥7孔/cm²）、抗压强度（≥1.5MPa）、SO₃转化率（≤1%）、磨损率（≤0.5%/年）、寿命预测（≥3年）等6项核心指标。定期对催化剂进行取样检测与性能评估，及时识别失活风险，制定更换或再生计划，避免因催化剂性能衰减导致氨逃逸加剧。

3 火电厂 SCR 脱硝系统氨逃逸控制工程应用案例分析

3.1 某660MW超超临界机组SCR脱硝系统改造

3.1.1 问题诊断

该机组原SCR脱硝系统采用三层钒钨钛催化剂布局，运行3年后出现明显性能衰减。通过TDLAS激光分析仪多点监测发现，催化剂层间气流分布不均，局部区域因催化剂活性不足导致反应不完全，氨逃逸浓度最高达5.2ppm，远超GB13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》中3ppm的限值要求。同时，过量氨与烟气中SO₃反应生成大量ABS，造成催化剂孔隙堵塞，进一步加剧氨逃逸，形成恶性循环，且ABS附着在空气预热器换热元件表面，导致设备压差上升，锅炉热效率下降约1.2%。

3.1.2 改造方案

结合机组运行特性与问题根源，制定针对性改造方案：一是在原有三层催化剂基础上，新增一层高性能抗硫催化剂，采用CFD优化后的分层布置方式，提升整体催化反应效率，改善局部反应不足问题；二是引入SNCR/SCR耦合技术，在SCR反应器入口烟道前端增设SNCR喷氨装置，利用炉膛出口高温（850-1100℃）先将部分NO_x还原，减少SCR系统的脱硝负荷，从而降低SCR区域的喷氨量需求；三是同步对喷氨格栅进行改造，采用多孔式喷嘴替代原直射式喷嘴，配合智能喷氨控制模块，实现氨浓度偏差控制在8%以内。

3.1.3 实施效果

改造后经过6个月连续运行监测，机组SCR系统氨逃逸浓度稳定降至1.8ppm，满足超低排放控制要求；脱硝效率从改造前的85%提升至92%，出口NO_x浓度稳定控制在30mg/Nm³以下。同时，ABS生成量减少70%，空气预热器压差从改造前的2.8kPa降至1.5kPa，锅炉热效率恢复至设计值，每年可减少因热效率损失导致的标煤消耗约800吨，综合运维成本降低18%。

3.2 某1000MW机组SCR脱硝智能控制系统应用

3.2.1 系统架构

该机组搭建“物联网平台+边缘计算+DCS联动”的三层智能控制架构。底层通过部署物联网传感器，实时采集烟道温度、压力、NO_x浓度、氨流量等28项运行参数，数据传输速率达100ms/次；中层利用边缘计算节点对实时数据进行预处理，过滤干扰信号并提取关键特征值，避免数据冗余导致的控制滞后；顶层通过工业以太网与机组DCS系统深度联动，实现智能控制指令与现场执行机构的无缝对接，控制响应时间缩短至3秒。

3.2.2 控制策略

核心采用“基于入口NO_x浓度的动态氨氮摩尔比调节”策略。系统通过LSTM神经网络模型预测未来5分钟内入口NO_x浓度变化趋势，结合当前烟气流量与催化剂活性状态，自动调整氨氮摩尔比在0.8-1.2的区间内动态波动。当入口NO_x浓度升高时，快速提升摩尔比至1.0-1.2，确保脱硝效率；当入口NO_x浓度降低或催化剂活性增强时，将摩尔比下调至0.8-1.0，避免过量喷氨。同时，系统设置氨逃逸浓度反馈回路，若TDLAS监测值超过2ppm，自动触发摩尔比修正机制，进一步精准控制氨用量。

3.2.3 经济效益

智能控制系统投运后，实现了氨用量的精准调控。与传统PID控制相比，年液氨消耗量从1800吨降至1480吨，节约320吨，按液氨市场价4000元/吨计算，年直接经济效益达128万元。此外，因氨逃逸量稳定控制在1.5ppm以下，ABS生成量大幅减少，空气预热器与催化剂的清洗周期从3个月延长至9个月，每年减少清洗费用150万元，同时降低设备停机维护时间，机组年利用小时数据升约20小时，综合年经济效益超300万元。

结束语

在超低排放的严格要求下，对火电厂SCR脱硝系统氨逃逸控制策略的研究意义深远。通过深入剖析氨逃逸的形成机理与影响因素，针对性地提出喷氨系统优化、流场均匀化控制、温度精准调控以及催化剂全生命周期管理等一系列控制策略，并在工程应用中取得显著成效。未来，随着环保标准的进一步提高，需持续创新优化控制策略，推动SCR脱硝技术发展，实现火电厂绿色、高效运行。

参考文献

- [1]李博航,卢志民,廖永进,等.SCR烟气脱硝系统氨氮双控新方法[J].热力发电,2023,52(11):150-151.
- [2]马云.燃煤电厂SCR脱硝系统氨逃逸率控制技术研究[J].电力系统及自动化,2021(07):64-65.
- [3]王凯.燃煤电厂SCR脱硝系统氨逃逸率控制技术研究[J].电力系统及自动化,2025(03):52-53.
- [4]韩雪.氨逃逸在线检测技术在火电厂SCR脱硝的应用[J].电力系统及自动化,2021(01):97-98.