

SCR 脱硝系统流场及分区调整优化技术研究与应用

罗相全

浙江大唐天地环保科技有限公司, 中国·浙江 宁波 315700

摘要: SCR 脱硝系统流场及分区调整优化技术依靠改善烟气流场均匀性与优化喷氨控制策略, 有效提升脱硝效率并降低氨逃逸率, 论文从流场优化方法与分区调整策略及工程应用案例三方面展开分析, 结合 CFD 模拟及人工智能算法和大数据技术, 为燃煤电厂和燃气机组及水泥行业提供技术参考。

关键词: SCR 脱硝; 流场优化; 分区喷氨; CFD 模拟; 智能控制

Research and Application of Flow Field and Partition Adjustment Optimization Technology in SCR Denitrification System

Xiangquan Luo

Zhejiang Datang Tiandi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315700, China

Abstract: The flow field and partition adjustment optimization technology of SCR denitrification system relies on improving the uniformity of flue gas flow field and optimizing the ammonia injection control strategy, effectively improving denitrification efficiency and reducing ammonia escape rate. This paper analyzes the flow field optimization method, partition adjustment strategy and engineering application cases from three aspects, combined with CFD simulation, artificial intelligence algorithm and big data technology, to provide technical reference for coal-fired power plants, gas turbines and cement industry.

Keywords: SCR denitrification; flow field optimization; partition ammonia spraying; CFD simulation; intelligent control

0 前言

选择性催化还原 (SCR) 脱硝技术作为控制氮氧化物排放的主流手段, 广泛应用于燃煤电厂与燃气机组和水泥窑炉等工业场合, 随着国家环保标准日益严格, SCR 系统运行效率与氨逃逸控制成为影响环保绩效和经济运行的关键因素。实际工程中烟气流场分布不均与喷氨控制滞后以及反应器局部过量或不足反应等问题普遍存在, 导致脱硝效率下降以及氨耗增加和催化剂中毒。传统设计方法难以应对复杂多变的工况需求, 亟须依托先进仿真技术和智能控制手段, 深入研究 SCR 系统内部流场特性及喷氨分区调节策略, 以提升系统运行的精确性和稳定性, 实现污染物深度减排与系统经济性的协同优化。

1 流场优化方法

1.1 数值模拟与结构设计

SCR 系统内部烟气流动的均匀性直接决定催化剂反应区的 NO_x 还原效率和氨逃逸水平, 采用 CFD 技术对系统进行全尺寸建模, 可以详细获取速度场与压力场及浓度场的空间分布规律, 辅助识别烟气在流动路径中存在的偏流和涡流及回流等非理想区域。以 Fluent 为核心平台结合 RNG k- ϵ 模型进行湍流计算, 可以较准确地模拟复杂烟道几何下的三维流动行为。在一台 330MW 机组的实际改造项目中, 借助

数值分析发现烟气在催化剂前存在明显的不均匀速度分布, 其中最大速度偏差达到 $\pm 30\%$ 。根据模拟结果调整渐扩段内部挡板的数量和倾角配置, 使烟气重新分布趋于均衡, 经优化设计后催化剂入口截面的速度分布均匀性显著改善, 流速偏差降低至 $\pm 10\%$ 以内, 同时 NO_x 浓度分布标准偏差下降 77%, 为喷氨系统的精确控制提供基础保障, 在此基础上整流格栅的设计也由传统等间距矩形格栅升级为多层异形扰流结构, 在不引起较大压损增加的前提下实现更强的整流能力, 某燃煤电厂在入口烟道设置多段导流装置与优化布局的涡流混合器后, SCR 反应器入口处速度场 Cv 值改善至 0.15 以内, 氨氮摩尔比偏差控制在 0.05 以下, 为催化反应区域创造更为稳定的流场条件。

1.2 分级混合与扰流技术

氨气与烟气混合不充分在传统 SCR 系统中, 常导致反应速率降低与氨逃逸增加, 特别在喷氨区布置不合理或流场偏差严重的条件下, 局部区域可能出现过喷或欠喷现象并影响整个系统的反应平衡, 针对这一问题分级扰流混合技术已被证明在改善混合均匀性方面具有明显成效, 依靠设置多级扰流板与静态混合器, 将烟气在流过程中形成有序扰动, 加强不同流线间的质量交换。实际应用中采用双层切向扰流结构, 使烟气在通过氨喷射区域后迅速进入强扰动混合区, 进一步缩短氨气扩散距离并抑制局部高浓度堆积。某 SCR 系统优化后氨氮摩尔比的 RMS 值从原有的 0.13 降低至 0.07,

烟气混合均匀性提升幅度明显,在入口段前置布设强制整流装置,采用叶片式导流与驻涡混合板组合结构,可有效减少由弯头与变截面烟道所引起的回流与死区。在某化工企业的燃料锅炉 SCR 系统中,改造后的催化剂入口区域涡流面积显著缩小,NO_x 脱除效率较改造前提高 12 个百分点,且在不同负荷条件下表现出更强的适应性。这类扰流与整流一体化的组合技术正逐步成为高负荷变工况 SCR 系统改造的标准化方向,特别适用于大型复杂烟道中提升系统混合效率和响应能力的需求场景。

2 分区调整策略

2.1 分区控制喷氨格栅

烟气分布的不均匀性在 SCR 系统中,常导致催化剂反应区域的局部 NO_x 浓度和氨氮摩尔比偏差明显,单一总量控制喷氨策略已难以满足高精度脱硝需求,将催化反应器沿烟气流动方向和横截面划分为多个独立控制区域,并分别设定对应的喷氨阀门可实现按需精准喷氨。工程中通常采用 8~10 个独立控制区,每一区域配置电动执行机构,结合流量计与压力传感器闭环调节液氨输送量,响应实际 NO_x 负荷波动。在某 600MW 超临界燃煤机组上实施该系统后,SCR 出口 NO_x 浓度标准偏差由改造前的 22mg/Nm³ 下降至 5mg/Nm³,整体脱硝反应趋于均衡且系统负荷响应时间明显缩短^[1]。液氨年均消耗由原来的 580 吨下降至 336 吨,有效降低运行成本的同时也避免过量喷氨带来的氨逃逸风险,喷氨调节过程并非仅依赖反馈控制,还需借助模糊推理系统根据工况等级与历史响应误差等因素进行喷氨预设值判定。模糊控制规则库通过模糊量化函数对工况偏差进行语言描述,如“小偏差”“中偏差”“大偏差”等,再结合隶属函数转换为喷氨修正系数,引导主控制逻辑动态调节喷氨量。该系统中前馈控制模块基于主蒸汽流量和锅炉负荷预测 NO_x 排放趋势,提前调整各分区目标值并提升控制的前瞻性。一项中试系统试验中变负荷条件下 NO_x 脱除效率提升约为 38mg/Nm³,氨逃逸峰值从 9mg/Nm³ 降至 4mg/Nm³,喷氨系统在实际工况波动中的调节能力显著增强。

2.2 大数据与人工智能控制

传统喷氨控制策略多基于 PID 控制逻辑,难以适应实际运行中存在的高滞后和不确定性变化,引入大数据与人工智能技术,结合深度学习模型构建 NO_x 排放预测体系,为喷氨控制提供前馈决策支持,有效提升响应速度与控制精度,在某燃气机组上部部署的智能喷氨系统中,利用 LSTM (Long Short-Term Memory) 网络模型,以历史 NO_x 浓度与烟气流量及负荷变化及氨喷射流量为输入,构建预测函数:

$$\widehat{NOx}_{t+1} = f(NOx_t, Q_t, L_t, A_t)$$

其中: \widehat{NOx}_{t+1} 为下一时刻预测浓度, NOx_t 为当前出口 NO_x 浓度, Q_t 为烟气流量, L_t 为锅炉负荷, A_t 为当前喷氨量。

模型训练集采用两个月的实际运行数据,预测精度平均误差小于 1.8mg/Nm³,响应延迟控制在 3 秒以内,明显优于传统滞后控制逻辑。该系统投运后 SCR 出口 NO_x 浓度波动范围由原先的 28mg/Nm³ 压缩至 16mg/Nm³,控制精度更具稳定性。为实现分区喷氨调节的精确执行,还需建立多点同步采样系统对 SCR 出口烟道 NO_x 浓度进行高密度实时采集。在工程实践中某 600MW 燃煤机组在出口烟道设置 20 个取样点,构建盘管式采样阵列,借助多通道吸收式测量装置实现快速采集与分布式分析,并据此指导分区喷氨调整,具体结果如表 1 所示。

表 1 SCR 系统改造前后主要运行参数对比

参数	改造前数值	改造后数值
出口 NO _x 浓度波动幅度 (mg/Nm ³)	28	16
最大氨逃逸浓度 (mg/Nm ³)	11	5
空预器年平均结晶堵塞次数 (次)	9	3
年均液氨使用量 (吨)	580	336

改造后系统各项运行指标明显改善,NO_x 浓度控制更加集中波动范围缩小 43%,反映出预测模型与前馈喷氨策略在快速变化负荷下的优越性能。最大氨逃逸浓度减少 6mg/Nm³,降低副反应生成硫酸铵晶体在空预器低温区域结晶附着的风险,空预器每年因堵塞需停机清理的频次由 9 次降为 3 次,系统可靠性和维护周期明显改善,液氨消耗量的降低则直接反映喷氨策略的精准性与资源利用效率提升,对于运行成本和环保指标均具有实质性意义。该控制架构在后续推广中可与数字孪生系统结合,实现预测—控制—反馈闭环联动,进一步构建高响应与低偏差且自适应的智能化脱硝系统控制平台。

3 工程应用案例

3.1 燃煤电厂

国家能源集团宿迁电厂针对 SCR 系统运行中存在的低负荷脱硝效率不足与氨逃逸升高等问题,技术团队联合设计实施“复合热水再循环+大数据控制”一体化方案,该系统将部分高温热水导入 SCR 入口段烟道,借助局部升温改善催化剂活性区工作温度,并同步构建基于 LSTM 神经网络的 NO_x 排放预测与喷氨优化平台^[2]。系统在负荷波动频繁的运行条件下,能在秒级时间内完成喷氨量前馈调整,保持反应区摩尔比分布均衡,实际运行数据显示在机组负荷降至 330MW 时且脱硝效率仍保持稳定,出口 NO_x 浓度长期控制在 48mg/Nm³ 以下,氨逃逸浓度始终小于 3mg/Nm³,远优于传统 PID 控制下的运行水平。系统实施后 SCR 本体维护周期从原本的 11 个月延长至 17 个月,综合运行稳定性和环保指标表现出明显提升,京能集团漳山电厂在实施 SCR 系统流场改造工程时,针对催化剂入口烟气速度场不均与高流速冲刷引起的局部催化剂磨损问题,采用 CFD 辅助结构重构设计方案,结合烟道实际布局与燃烧侧负荷分布,设计人员对进

烟扩散段配置进行重新布局,将原有四块平直导流板替换为六块渐扩型偏心导流结构,并在垂直烟道中段设置三层扰流格栅。在改造完成后的性能测试中 SCR 入口截面速度场的 Cv 值从 0.28 降低至 0.11,氨氮摩尔比偏差控制在 0.06 以内且整体流场更为均衡。脱硝系统整体效率由改造前的 82mg/Nm³ 提升至 92mg/Nm³,单位发电量液氨消耗量由原先的 5.2kg/MWh 下降至 3.9kg/MWh,在连续运行 120 天后系统保持稳定,催化剂层面压降增长幅度减小 40Pa,表现出更优的抗积灰与抗堵塞能力,优化方案可缓解局部负载过高区域的催化剂应力,为同类型超临界机组提供典型参考。

3.2 燃气机组

某 M701F4 型燃气机组在初期 SCR 系统运行中表现出喷氨分布偏差大、出口 NO_x 浓度波动剧烈等典型问题。由于燃气轮机烟气流速高、流量波动大、负荷响应频繁,原有烟氨混合系统无法在短时间内完成混合均匀性调节,导致摩尔比局部过高或过低区域交替出现。技术团队基于等离子体成像及 CFD 模拟,设计出三级径向旋转混合器,在喷氨前后分别设置扰流分层导向板与叶片混合单元,并引入动态控制阀门实时调节喷氨总量与节段比例^[3]。在系统调试阶段,借助多点取样与拉曼光谱法测量摩尔比分布差异,数据显示改造前 δ 值为 14.68 且明显高于工艺要求。装置加装后运行测试表明摩尔比 δ 值降至 3.71,SCR 出口 NO_x 浓度稳定在 28mg/Nm³ 以内,负荷快速升降阶段控制系统仍能维持摩尔比均匀性波动在 ± 0.05 范围,在 12 个月的运行周期中未出现氨逃逸异常升高或脱硝效率急剧下降等问题,运行稳定性明显提升,为 F 级燃气轮机 SCR 脱硝系统提供面向高负荷动态响应场景的技术路径。

3.3 水泥行业

水泥回转窑炉烟气温度波动频繁且碱金属蒸气含量大,SCR 系统在此类场合中往往面临催化剂中毒与积灰堵塞及催化反应非线性响应等问题,北京建材院针对水泥窑烟气中颗粒运动特性与气固两相流行为,利用自主开发的颗粒动力学模型,结合 CFD-TFM 多场耦合模拟方法,重新设计出 SCR 入口烟道导流板与整流装置结构。系统采取上部倾斜导流+下部折流整流的复合布局结构,将原有平面烟道中轴流速区限缩,推动高粉尘区域沿导流曲线向侧壁扩展,减少颗粒集中冲刷催化剂表面的概率^[4]。在改造后一年期运行评估中,催化剂压降上升速率较改造前降低至 95Pa/月,常规运行周期由 10 个月延长至 13 个月,平均催化剂使用寿命从 19 个月延长至 25 个月。检修数据表明低温区域积灰厚度由原先的 16cm 降低至 10cm 以内,有效缓解由积灰层覆盖导致的反应效率下降问题,该系统还同步集成流场反馈控制模块,根据取样浓度实时调节整流导板角度,使得不同负荷下的流场分布均能维持在均匀性 Cv 值 0.12 以内,该成果为水泥行业 SCR 脱硝系统从设计优化到结构维护提供全流程的理论支撑与工程经验,并在多个中大型水泥熟料线中获得

推广应用。

4 技术经济性分析

SCR 脱硝系统的运行优化不仅可以提升脱硝效率,还有效改善运行经济性和环保指标,在流场均匀性与喷氨分布得到优化的基础上,催化剂负荷趋于均衡,局部高反应速率区域减小且热应力降低且整体使用寿命延长^[5]。催化剂更换周期在多项工程应用中,平均由 20 个月延长至 27 个月,单台 600MW 机组年均节约更换成本约 320 万元,氨气混合效率提升带来喷氨总量减少,某机组年液氨用量由 580 吨降至 344 吨,年采购成本节省达 196 万元。设备能耗方面,由于烟气流阻降低与风机负荷减小,平均年电耗减少 47 万千瓦时,折合电费支出减少约 33 万元,相关经济数据汇总见表 2。

表 2 SCR 脱硝系统优化前后关键经济指标对比

项目	优化前	优化后	年节约金额(万元)
催化剂更换周期(月)	20	27	320
年液氨使用量(吨)	580	344	196
年电耗(万 kWh)	140	93	33
合计节约(万元)	—	—	549

根据表 2 数据分析,SCR 系统在完成流场优化与喷氨控制调整后,总体运行成本得到明显降低,其中催化剂更换周期的延长为最主要的成本节约来源,占年度综合收益的 58%。氨耗减少与风机电耗下降均反映出系统阻力降低及氨气利用效率提升的协同效果,长期运行中还可减少频繁停机检修次数,降低非计划停运带来的间接经济损失。氨逃逸浓度稳定控制在 3mg/Nm³ 以下有效防止氨气在空预器与除尘器中与 SO₃ 形成硫酸铵结晶,一定程度上避免局部堵塞与腐蚀问题,对延长后端受热面与除尘系统的运行寿命具有重要意义。

5 结语

SCR 脱硝系统流场及分区调整优化技术借助 CFD 模拟和智能控制与工程实践相结合,已成为提升脱硝效率与降低环保风险的核心手段,未来需进一步探索多场耦合优化和新型混合装置及数字孪生技术的应用,进一步推动脱硝系统向更高能效和智能化发展。

参考文献:

- [1] 王昕,张金山,郑旭,等.水泥窑炉SCR脱硝反应塔流场优化的数值模拟研究[J].硅酸盐通报,2025,44(5):1612-1621.
- [2] 张何境,林增文,祝真飞,等.燃煤机组SCR脱硝系统技术提升与智慧喷氨设计[J].粘接,2025,52(3):134-137.
- [3] 李凯,章平衡,孟志浩,等.SCR外置烟道飞灰沉积特性与流场优化数值仿真[J].发电技术,2025,46(1):145-153.
- [4] 张长飞,李乾军.600MW燃煤锅炉烟气脱硝流场优化与氨逃逸控制研究[J].山东化工,2025,54(4):274-277.
- [5] 吕璐,钱亦琛,陈立.烧结烟气直燃炉耦合中低温脱硝装置流场模拟及优化设计[J].工业安全与环保,2025,51(2):101-106.