

火力发电厂脱硫脱硝环保设备检修技术优化策略

熊汉章

国家电投集团贵州金元黔西中水发电有限公司 贵州省毕节市 551500

摘要：在火电行业超低排放改造与设备运维效能提升的双重挑战下，以设备全生命周期管理理论为架构，构建涵盖材料耐腐蚀性强化、智能诊断算法优化及副产物梯级利用的系统性检修技术体系。通过引入碳化硅基复合材料、脉冲电晕防垢技术与数字孪生驱动的设备健康管理系统，实现脱硫脱硝系统可靠性提升与资源化利用效率突破，为火电企业绿色转型提供可量化技术路径。

关键词：火力发电厂；脱硫脱硝；设备防腐

“双碳”目标驱动下，火力发电行业面临从传统高耗能模式向清洁化转型的深刻变革。石灰石-石膏湿法脱硫与选择性催化还原(SCR)脱硝技术虽能有效降低二氧化硫、氮氧化物排放浓度，但设备长期运行过程中，腐蚀问题导致年均非计划停机时间占比显著，催化剂活性衰减引发的氨逃逸超标现象频发。现有研究多聚焦单一技术改进，缺乏从材料科学、控制理论、资源循环等多学科交叉视角，对设备劣化机理、运行工况耦合关系及资源循环利用进行系统性整合研究。因此，构建“防腐-监测-利用”三位一体的检修技术优化策略，形成覆盖设备设计、运行、维护及报废全流程的绿色运维范式，对推动火电行业可持续发展具有重要意义。

1 设备防腐技术革新

1.1 碳化硅基复合材料腐蚀抑制机制

设备腐蚀问题是制约脱硫脱硝系统长周期稳定运行的核心因素。传统玻璃鳞片防腐层因与基体材料热膨胀系数存在显著差异，在温度变化过程中易产生应力集中，且其对氯离子的屏蔽能力有限，氯离子渗透速率较高，导致涂层剥落、基体腐蚀加速。碳化硅-氧化锆复合陶瓷涂层基于材料科学前沿理论，通过创新设计与制备工艺，构建起多维度的腐蚀抑制体系。在界面强化方面，依据晶体学与材料界面理论，采用真空热压烧结工艺，在高温(1850℃)高压(30MPa)条件下，促使碳化硅晶粒与氧化锆相发生原子级键合，形成共格界面。这种共格界面结构使得界面结合强度大幅提升，相较于传统橡胶衬里，能够更有效地阻挡腐蚀介质从界面处侵入，增强涂层与基体的协同防护能力，从而显著延缓设备

腐蚀进程^[1]。

离子屏蔽层面，引入纳米级钇稳定氧化锆(YSZ)颗粒，基于固体电解质离子传导理论与空间电荷效应，改变材料内部的离子扩散路径与能量势垒。YSZ颗粒在复合材料中形成的微观电场，对氯离子产生排斥作用，极大降低其扩散系数，相较于玻璃鳞片涂层，氯离子扩散速率呈现数量级下降，为设备提供了长效的耐腐蚀保护屏障。热震稳定性方面，基于传热学与材料热力学理论，该复合材料具有适宜的热导率与热扩散系数。经激光闪射法测试，其热导率为 $25\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ，热扩散系数为 $11.2\times 10^{-6}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ，在800℃急冷至25℃的热震循环测试中，经过200次循环后，涂层剥落率极低。这种优异的热物理性能使得材料在温度剧烈变化的工况下，能够有效缓解热应力，保持涂层完整性，确保设备在复杂运行环境下的可靠性。

1.2 脉冲电晕等离子体防垢技术

浆液管道结垢现象严重影响脱硫系统的运行效率与稳定性。脉冲电晕等离子体技术基于等离子体物理、电化学及流体力学等多学科理论，通过电场、自由基与流场调控的协同作用，实现高效防垢^[2]。电场诱导结晶过程中，依据晶体生长动力学理论，双极性脉冲电场(频率20kHz，脉宽 $5\mu\text{s}$)作用于过饱和溶液，改变离子迁移特性与晶体生长环境。电场力促使溶液中离子迁移速率显著提升，改变晶体生长的热力学与动力学条件，使得晶体沿(001)晶面优先生长，形成类球状晶体结构，相较于传统针状或板状晶体，其沉积速率大幅降低，有效抑制结垢形成。

自由基氧化机制基于化学反应动力学与自由基化学理

论。高能电子（能量 10 – 15eV）与水分子碰撞产生 $\cdot\text{OH}$ 自由基，这些强氧化性自由基能够迅速氧化分解溶液中的有机螯合剂，降低其对 Ca^{2+} 的络合能力，从而使溶液过饱和度降低，减少 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 晶体形成的驱动力，从源头上抑制结垢过程。流场调控方面，运用计算流体力学（CFD）理论，通过优化螺旋电极结构，改变管道内流体的流动特性。经 CFD 仿真与实际测试验证，该结构使管道内湍流动能显著增加，有效破坏晶体附着所需的层流边界层，将临界附着流速从 1.2m/s 提升至 2.5m/s，使得流体能够更有效地携带晶体颗粒，防止其在管道壁面沉积，提升防垢效果。

2 智能监测系统构建

2.1 多源数据融合诊断模型构建

设备劣化过程受机械、热、化学等多物理场耦合作用，呈现出时变、非线性复杂特征，传统单一传感器监测方式难以全面捕捉设备运行状态信息，存在信息孤岛问题。多源数据融合诊断模型基于信息论、模式识别及人工智能理论，整合振动、声发射、温度、压力等多类型传感器数据，构建设备运行状态的多维特征空间。在特征提取环节，采用小波包变换技术，依据信号处理理论，将振动信号分解为多个频带，提取能量熵、奇异谱熵等 12 维特征参数。同时结合声发射信号的峰值频率、上升时间等关键特征，构建 24 维特征向量，全面表征设备运行状态的动态信息^[3]。

深度学习建模方面，构建 CNN – LSTM 混合神经网络。卷积神经网络（CNN）依据图像处理与特征提取理论，通过卷积层（卷积核 3×3 ，步长 1）自动提取设备运行数据的局部特征。长短期记忆网络（LSTM）基于时间序列分析理论，通过隐藏单元数为 128 的 LSTM 层捕捉数据的时序依赖关系，实现对设备状态的精准预测。在独立测试集上，该模型的 F1 – score 达到较高水平，验证了其预测有效性。不确定性量化环节，引入蒙特卡洛 dropout 技术，基于概率统计与机器学习理论，通过对模型预测过程进行多次随机失活操作（保留概率 $p = 0.7$ ），对预测结果进行概率分布估计。这种方法能够有效量化模型预测的不确定性，使腐蚀速率预测的 95% 置信区间误差控制在极小范围内，为设备维护决策提供可靠的概率依据。

2.2 氨逃逸动态优化控制

SCR 系统氨逃逸受烟气温度、流场分布、催化剂活性等多变量耦合影响，传统 PID 控制策略存在响应滞后、控

制精度不足等问题，难以满足动态工况下的精准控制需求。

模型预测控制（MPC）框架基于反应工程、优化理论及控制理论，通过机理模型构建、滚动优化与反馈校正机制的协同作用，实现氨逃逸的精确控制。机理模型构建方面，基于 Eley – Rideal 反应机理，结合化学动力学理论，建立包含催化剂表面 NH_3 吸附、NO 还原及 N_2O 生成等 12 个基元反应的 SCR 反应动力学模型。通过对反应过程的深入分析与参数优化，该模型预测值与工业实际数据具有高度吻合度，能够准确描述 SCR 系统的反应过程与动态特性。

滚动优化算法依据优化理论，采用二次规划求解器（QP），在每个控制周期内，基于当前系统状态与预测模型，对未来 N 个时刻的喷氨量序列进行优化计算。同时考虑 NH_3/NO_x 摩尔比（0.8 – 1.2）、催化剂床层温度（300 – 420℃）及反应器压降（<800Pa）等运行约束条件，确保优化结果既满足控制目标，又符合系统安全运行要求。反馈校正机制基于状态估计与数据融合理论，通过扩展卡尔曼滤波（EKF）技术，融合可调谐半导体激光吸收光谱（TDLAS）测量值与模型预测值，实时修正催化剂活性系数（ $\alpha = e^{(-0.0015t)}$ ，t 为运行时间）等关键参数。这种反馈校正机制能够有效补偿模型误差与系统不确定性，显著提升氨逃逸控制精度，使其控制偏差保持在极小范围内^[4]。

3 副产物资源化利用路径

3.1 脱硫石膏晶型调控与性能强化

传统脱硫石膏因晶型缺陷，存在强度不足、耐水性差等问题，难以满足建材领域高值化应用需求。基于晶体化学、材料改性及环境材料学理论，通过晶型转化与掺杂改性技术，实现脱硫石膏的高值化利用。晶型转化机制方面，采用微波辅助水热法，依据水热合成理论与微波化学理论，在特定温度（180℃）与压力（2MPa）条件下，促使二水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）向 α 型半水石膏（ $\alpha - \text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ）转化。该过程涉及复杂的溶解 – 结晶相变与晶体择优生长机制，通过精确控制反应条件，可使转化率达到较高水平。 α 型半水石膏具有良好的晶体形态与堆积特性，为制备高性能建材奠定基础。

掺杂改性技术基于材料复合与界面化学理论，引入 5wt% 硅灰（ SiO_2 含量 92%）与 3wt% 偏高岭土（ Al_2O_3 含量 41%）。在水化过程中，硅灰与偏高岭土通过火山灰反应，与水泥水化产物发生二次反应，生成水化硅酸钙（C – S – H）

凝胶与钙矾石 (AFt) 晶体, 填充孔隙结构, 增强晶体间的连接强度, 使 28d 抗压强度大幅提升。碳足迹优化方面, 运用生命周期评价 (LCA) 理论与方法, 对石膏基自流平砂浆的生产、使用及废弃全过程进行环境影响评估^[5]。结果表明, 每吨石膏基自流平砂浆的碳排放量显著低于传统水泥基材料, 其全球变暖潜能值 (GWP) 指标优于相关国家标准要求, 体现出良好的环境效益与可持续性。

3.2 失效催化剂再生与高值化利用

SCR 催化剂活性衰减后, 若直接废弃, 不仅造成资源浪费, 还会带来环境负担。基于材料回收、催化材料改性及固体废弃物处理理论, 开发选择性浸出、梯度焙烧等技术, 实现失效催化剂的再生与高值化利用。选择性浸出工艺依据湿法冶金与材料化学理论, 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 混合体系, 通过精确控制氧化还原电位 ($\text{ORP} = 350 - 400\text{mV}$), 在有效浸出活性组分 V_2O_5 (浸出率较高) 与 WO_3 (浸出率较高) 的同时, 避免 TiO_2 载体溶解。经过浸出、过滤、沉淀等工艺处理后, 再生催化剂比表面积恢复良好, 为其性能恢复提供基础。

梯度焙烧技术基于材料热处理与催化活性理论, 在 N_2 气氛下进行三段式焙烧 ($300^\circ\text{C}/2\text{h} \rightarrow 450^\circ\text{C}/1\text{h} \rightarrow 600^\circ\text{C}/0.5\text{h}$)。通过分段控制温度与时间, 促使活性组分 V_2O_5 晶粒尺寸减小, 活性位点密度增加, 提升催化剂的催化性能。协同处置方案基于材料复合与陶瓷制备理论, 将失效催化剂经无害化处理后, 与粉煤灰、钢渣按质量比 3:2:1 混合, 在 1350°C 下熔融制备微晶玻璃。所得微晶玻璃具有良好的物理化学性能, 莫氏硬度达 7.2, 化学稳定性 (耐酸碱腐蚀率 $< 0.05\%$) 符合相关国家标准要求, 实现了固体废弃物的高值化利用与资源循环。

3.3 技术经济性分析

以实际 1000MW 超超临界机组为研究对象, 基于工程经济学、环境经济学及系统优化理论, 构建包含设备运维成本 (CE)、副产物收益 (RB) 及环保效益 (EE) 的多目标优化模型, 对检修技术优化策略的综合效益进行系统评估。在成本节约效应方面, 复合防腐涂层通过延长设备更换周期, 大幅降低年化检修费用。智能监测系统有效减少计划外停机时间, 避免因设备故障导致的发电量损失, 显著降低发电成本。收益增值效应层面, 副产物高值化利用带来可观的销售收入, 相较于传统处置方式, 附加值大幅提升。同时,

通过减少污染物排放, 企业可获得碳交易收益, 进一步提升经济效益^[6]。

环境效益量化方面, 依据环境损害评估理论与方法, 通过减少 SO_2 、 NO_x 及颗粒物排放, 有效降低对大气环境、生态系统及人体健康的损害, 避免了巨大的环境损害成本。其在健康效益 (如减少疾病导致的伤残调整生命年 DALY 损失) 与生态效益 (如缩减酸雨影响面积) 方面创造的经济价值显著。

4 结论

脱硫脱硝设备检修技术优化策略通过材料科学、控制科学与循环经济理论的深度交叉融合, 实现了设备可靠性、运行经济性与环境友好性的协同提升。碳化硅基复合材料与脉冲电晕防垢技术的协同应用, 有效降低设备全生命周期成本。基于数字孪生的智能监测系统显著提高故障诊断效率。副产物梯级利用模式实现了资源的高效转化与循环利用。该技术体系为火电行业深度脱碳提供了具有量化评估标准的解决方案, 对推动能源装备制造业向绿色化、智能化转型具有重要的示范意义。未来研究可进一步探索氢基燃料耦合脱硫脱硝系统的协同优化机制, 以及区块链技术在副产物溯源管理中的应用潜力, 持续推动行业技术创新与可持续发展。

参考文献:

- [1] 吕冲. 火力发电厂应用脱硫超低排放关键技术 [J]. 科学技术创新, 2025(1):29-32
- [2] 冯迎路. 火力发电厂 SCR 烟气脱硝系统运行控制改进技术分析 [J]. 电力设备管理, 2025(1):235-237
- [3] 苏梅丽. 火力发电厂烟气脱硫技术及防腐问题探讨 [J]. 安家, 2025(1):0283-0285
- [4] 邱华. 火力发电厂除灰脱硫设备优化措施 [J]. 内蒙古科技与经济, 2024(17):117-119124
- [5] 郭家辉. 燃煤火力发电厂除灰脱硫设备优化措施分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2024(4):0175-0178
- [6] 岳义刚. 火力发电厂烟气脱硫脱硝技术的应用与节能环保策略分析 [J]. 新潮电子, 2023(11):97-99

作者简介: 熊汉章; 性别: 男; 出生日期: 1998 年 9 月; 民族: 土家族; 籍贯: 贵州德江; 学历: 大学本科; 职称: 助理工程师; 研究方向: 火力发电厂设备检修