

火力发电烟气超低排放改造技术优化与环保效益研究

达选焯 顾 欢

摘要：火力发电厂属于国家的重点排污企业，随着国家对污染物排放的日益严格地管控，人们对持续烟气污染物的监测日益关注。为促进我国火力电厂的绿色转型，本文针对火力电厂超低排放干法工艺的优化问题，从政策适配性、突破瓶颈和提升竞争能力三个维度，阐释技术优化的核心价值。重点研究干法脱硫吸收剂改性-脱硝催化剂升级-除尘滤料创新-多系统集成调控的优化途径，通过工艺参数的精准把控，实现效能的提升。实践证明，这些措施的实施，可实现烟尘、SO₂、NO等排放浓度的有效降低，进而降低运行成本和资源消耗，达到环保和经济的双赢。
关键词：火力发电；烟气；超低排放改造技术；优化路径；环保效益

作为我国能源供应的重要支柱，火力发电厂的烟气排放一直是大气污染控制的关键环节。受“双碳”目标和《火电厂大气污染物排放标准》的双重约束，我国火力发电企业正面临着由“达标排放”到“超低排放”这一刚性转型的要求，因此我国火电厂的节能减排面临着严峻的挑战^[1]。传统干法脱硫技术存在脱硫效率不稳定、催化剂易中毒和运行成本高等瓶颈问题，难以满足高硫燃煤机组和苛刻的排放要求。因此，本文以火力发电烟气超低排放干法工艺的优化为研究对象，对其脱硫、脱硝和除尘系统的增效途径和协同调控策略进行系统研究，以期为火电企业突破技术瓶颈，实现绿色低碳发展提供理论和技术支持。

一、火力发电烟气超低排放改造技术优化的重要性

（一）政策合规与绿色转型的刚性需求

日益严格的环保政策对行业发展形成了刚性约束，《火电厂大气污染物排放标准》中明确规定了SO₂、SO、NO等超低排放限值，很多地方还将排放达标与环保电价和机组并网资格直接联系起来。技术优化作为火电企业实现政策合规的核心路径，既能保证排放稳定满足区域差异化需求，又能促进产业由“末端治理”向“源头减排”转变，符合“双碳”目标下能源结构绿色升级的战略导向，规避政策惩罚和市场准入风险^[2]。

作者简介：

达选焯（1988年7月）男，汉族，甘肃永登，本科，助理工程师，研究方向：火力发电环保技术研究。

顾欢（1989年7月）男，汉族，江苏，本科，工程师，研究方向：火电厂热控自动化。

（二）破解传统干法瓶颈的现实需要

传统干法工艺存在效率波动大和协同治理效果差等瓶颈问题，特别是受煤质硫含量影响较大，对于燃煤含硫量>2%的高硫煤而言，入口SO₂浓度急剧上升，脱硫效率普遍低于90%。此外，脱硝催化剂抗毒化能力差、氨逃逸产生硫酸铵易堵塞设备、电除尘无法有效捕捉亚微米颗粒物等问题，造成能耗高、吸附剂用量大。可通过工艺参数调控和复合吸附剂研发，解决干法气固传质效率低的难题，提高系统环境适应能力，降低副产物处理成本，解决“达标难，运行费用高”的现实问题。

（三）提升行业竞争力的战略抓手

火电企业要建立差异化竞争优势，关键在于技术优化。优化后的干法脱硫工艺可以降低单位污染物处理成本，在环保电价补贴的支持下，实现盈利增长。同时，超低排放性能也是电力市场交易的重要手段，技术领先者更容易得到大客户订单和绿色金融支持，在能源转型浪潮中巩固自己的市场地位，实现环保效益和经济效益的协同提高。

二、火力发电烟气超低排放改造技术优化路径

（一）干法脱硫系统优化：吸收剂增效与传质强化

在干法脱硫过程中，吸收剂性能和气固传质效率是决定该体系去除效果的重要理论核心。吸附协同作用通过对多孔材料的孔道结构进行调控和表面修饰，提高材料对SO₂的捕集能力和反应动力学性能。强化传质过程以构建更加高效的气-固接触方式为目标，通过优化反应器内流场结构和相界面特性，大幅提高污染物在气-固相的扩散和转化速率，实现有限停留时间下的高效脱硫^[3]。

在具体实施过程中,根据煤质硫份差异(0.8%~3.2%)进行分级处理方案的制定,如针对硫份 $\leq 1\%$,可采取基本钙基吸收剂;针对硫份 $> 1\%$ 的情况,可采用水化活化技术对其进行改性,通过控制水合温度($65 \pm 5^\circ\text{C}$),水钙摩尔比(4.5~5.0),获得比表面积大于 $35\text{m}^2/\text{g}$ 且具有较高反应活性的亚微米级氢氧化钙颗粒。同时还需在吸收塔前设置高效雾化增湿系统,采用双流体喷嘴控制雾化水粒径($60\text{--}80\mu\text{m}$),精确控制喷水量,使烟气温度接近露点温度 $12\text{--}15^\circ\text{C}$,在吸收剂表面生成活性水膜,实现 SO_2 由物理吸附向快离子反应转变,使反应速度提高3倍以上。在循环流化床脱硫反应器中,可将床层表观风速调至 $1.8\text{--}2.2\text{m/s}$,保持床层密度 $800\text{--}1200\text{kg/m}^3$;优化U型返料阀循环倍率至25~30倍,实现循环吸收剂充分混合和长时接触。同时,通过在吸收塔中增设多层环形旋流布风装置,将空塔横截面速度偏差系数控制在0.18以内,使烟气停留时间达到10~12s,钙硫摩尔比稳定在1.3~1.5,出口的 SO_2 浓度稳定在 28mg/m^3 以下。

(二) 干法脱硝系统优化: 催化剂升级与抗中毒设计

干法脱硝的核心在于维持催化剂在复杂烟气环境下的高效活性,氨逃逸是其中的一个关键问题:氨过量不仅降低了脱硝效率,而且与 SO_3 反应生成粘性硫酸铵,粘附于催化剂表面,加剧毒化,给后续电除尘带来糊袋风险。在此基础上,可通过介孔载体的制备及高分散组分降低反应活化能,构建物理-化学双重屏障,阻止砷、碱金属和硫酸铵等对催化剂活性位的破坏,延长催化剂使用寿命^[4]。

在具体实施中,可以使用蜂窝状钒钛基催化剂,引入孔径为4~6nm的介孔氧化钛为主载体,实现活性组分五氧化二钒负载量由原来的3.0wt%降至1.8wt%,并以7.0wt%氧化钨为助催化剂和抗钾型中毒药,使催化剂最优催化温区从 $320\text{--}400^\circ\text{C}$ 到 $280\text{--}420^\circ\text{C}$, 250°C 低温脱硝效率 $> 62\%$ 。针对砷中毒问题,可在催化剂前烟气中喷入直径在 $5\mu\text{m}$ 以下的氧化钙基吸收剂,使其优先与气态砷化合物反应生成稳定的砷酸钙,使其从 0.5mg/g 提高到 2.0mg/g ;针对飞灰冲刷和孔道堵塞问题,可将催化剂孔道间距由传统7.2mm减至6.4mm,壁厚由0.7mm提高到0.9mm,机械强度提高到2.0MPa以上;同时,采用分级孔道设计,使进气孔尺寸6.4mm,出气孔7.2mm,达到自清洁效果。在氨氮摩尔比为0.85、空速 3500h^{-1} 的条件下,保证脱硝系统出口 NO_x 浓度稳定在 42mg/m^3 以下,

催化寿命由24000小时延长到36000小时。

(三) 干法除尘系统优化: 滤料创新与智能清灰控制

干法除尘需与前端电除尘效果相结合,电除尘出口粉尘浓度大于 100mg/m^3 ,干法过滤材料负荷急剧增加,容易引起阻力激增。基于表面过滤与深度负载理论,创新滤料结构,强化亚微米颗粒物捕集;同时,构建清灰强度-频率-残阻动态模型,并结合电除尘预处理数据进行精准调控,在兼顾过滤效率和滤料使用寿命的前提下,实现非破坏性清灰^[5]。

在具体实施过程中,需进行滤料结构创新和调控体系升级,可采用梯度复合滤料结构,在基层采用 600g/m^2 的PTFE浸渍玻纤为基层,使其具有较高的机械强度和尺寸稳定性;在其表面复合一层开孔率不小于85%、孔径在0.8~1.2微米的多孔聚四氟乙烯微孔薄膜,覆膜剥离强度要大于 45N/cm ,从而形成一套完善的表面过滤机制,将粉尘排放浓度稳定在 3.5mg/m^3 以下。针对智能除尘,在除尘仓进出口布置高频差压变送器,检测下限为 0.5mg/m^3 的激光粉尘检测仪,根据采集到的实时数据,采用预先设定的模糊控制算法,动态调整清灰策略,当分区压差达到900Pa时,触发清灰程序,根据滤袋累计运行时间,在0.35~0.55MPa范围内自动调节清灰压力,对运行15000小时以上的区域,清灰周期延长至参考值1.3倍,脉冲宽度由120ms缩短至80ms,使除尘器平均年运行阻力降低180Pa,有效保证滤袋40000小时以上的设计要求。

(四) 多系统集成优化: 协同治理与智能化调控

构建脱硫、脱硝和除尘三个子系统之间的物质流-能量流-信息流协同网络,是多系统集成优化的理论基础。其核心是识别和利用系统之间的非线性耦合关系,如以脱硝过程中可控逸出的氨气为后续脱硫的辅助碱源,或者调节除尘系统运行阻力,优化末端反应器内流场分布和停留时间。智能调控通过建立全过程动态数学模型,使各子系统从孤立运行到协同作战,基于模型预测控制算法,在前馈-反馈复合控制框架下,对污染物浓度波动进行超前补偿,对系统运行能效进行全局优化。

在具体实施中,可建立基于工业以太网协议集成的厂级环保设施智能管控平台,对800多个过程测量数据进行集成采集,包括吸收塔压降、催化层温压差、过滤分区阻力等关键参数。比如,当负荷提升指令提前15分钟时,脱硝系统的氨水格栅开度就会自动提高5%,同时将脱硫系统的床层密度设定提高到 1000kg/m^3 ,并将相应

的除尘仓的清灰间隔临时缩短10秒，以协同应对污染物负荷和烟流速度。在物质协同方面，可通过对喷氨量的精确控制，使系统出口逃逸氨浓度保持在 $2.8\text{mg}/\text{m}^3$ 的临界值，随着烟气流向下游干法脱硫塔，可以中和约4.5%的二氧化硫，从而相应降低等当量新鲜吸收剂的投加量；通过以上深度整合和智能调控，使该系统综合电耗降低0.22个百分点，主要材料消耗降低5.2%，确保各项污染物排放指标稳定达标，达到环保性能和运行经济性同时提高的目的。

三、火力发电烟气超低排放改造技术优化的环保效益分析

（一）核心污染物减排效果量化

煤质硫份对核心污染物的减排有重要影响，改造后可突破原料限制——在燃用3.2%硫份的高硫煤的同时，二氧化硫的排放浓度仍然稳定在 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。与改造前相比，烟气中 SO_2 、SO、NO等排放浓度从数十到数百 mg/m^3 下降到5、35和 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 。以百万千瓦机组为例，在燃用2.0%硫份的情况下，每年可减少1200 t烟尘，8600 t SO_2 ，7400 t，为区域细颗粒物与臭氧协同控制提供支撑^[6]。

（二）资源环境协同效益凸显

超低排放技术体系可实现水体中主要污染物的深度去除，并产生显著的资源环境协同效应。该工艺可以实现三氧化硫和汞等重金属污染物的高效协同去除，实现三氧化硫浓度小于 $5\text{mg}/\text{m}^3$ ，烟气总汞浓度 $<0.7\text{mg}/\text{m}^3$ 。另外，干法工艺路线的推广，可有效避免传统湿法脱硫过程中产生的大量废水。部分改造方案将脱硫石膏高值资源化利用到95%以上，推动工业固体废弃物减量化和资源化，形成“污染治理-资源循环”的良性循环，体现循环经济理念在末端治理领域的深入实践。

（三）经济与环保的平衡价值

超低排放改造的价值不仅体现在环境效益上，而且在经济 and 环境保护之间找到了一个可行的平衡点。尽管新建项目伴随着初始投资和运行能耗的提高，典型机组

用电率将上升0.8-1.2个百分点，但是通过实施节能优化技术和副产品增值等措施，可以部分抵消这一压力。更重要的是，这一改革使得火电企业能够在严格的环保法规约束下继续运行，从而获得环保电价补贴和排污费支出减少等直接经济回报。这种将环境外部性成本内生化的机制设计，促使企业将其环境投入转变为合规生产率，达到环境合规和运营经济性的统一，是实现火电产业绿色转型的核心动力。

结束语

综上所述，随着国家对环保问题重视程度的增加和环保标准的逐步健全，火力发电企业对烟气污染物的控制也日益重视。通过对吸收剂改性、抗毒化设计等关键技术的升级，并结合多体系智能协同调控，可实现污染物排放浓度和处理成本双优化。未来，需要进一步推进技术与低碳目标的深度融合，强化数字孪生和人工智能调控，不断提高副产品附加值，为实现能源转型过程中环境保护、经济和社会效益的统一提供更加有力的支持。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 朱浩铭, 孟祥胜, 孙桦. 火电厂烟气脱硫系统超低排放改造技术的适应性与优化研究[J]. 当代化工研究, 2025(12): 173-175.
- [4] 陈利美. 南平市某锅炉烟气超低排放改造工艺分析[J]. 海峡科学, 2025(5): 96-99.
- [5] 武鑫. 火力发电厂烟气碳捕集与封存技术探究[J]. 中国高新科技, 2025(4): 80-81+90.
- [6] 李鹏程. 火力发电厂超低排放技术及其经济性分析研究[J]. 电力设备管理, 2025(17): 229-231.