

电厂锅炉烟气脱硫脱硝一体化技术的创新与应用研究

李锦荣

江苏国信淮安生物质发电有限公司 江苏 淮安 223200

摘要: 电厂锅炉烟气里的 SO_2 和 NO_x 是大气污染主要源头, 脱硫脱硝一体化技术因高效经济成为烟气治理主流。本文梳理其基础理论与核心问题, 深入分析催化剂改良、反应器优化等创新路径, 结合案例剖析技术落地瓶颈。研究表明, 材料创新与工艺集成是提升处理效率关键, 智能化与副产物资源化助力绿色发展。当前该领域存在基础研究与工程需求脱节、产业配套不完善等问题, 本文研究可为电厂烟气治理升级提供参考, 助力“双碳”目标下环保与效益双赢。

关键词: 电厂锅炉; 烟气处理; 脱硫脱硝一体化; 技术创新

引言: 在环保要求日益严苛、“双碳”目标稳步推进的当下, 电厂锅炉烟气中的 SO_2 和 NO_x 作为大气污染的主要源头, 其有效治理迫在眉睫。传统的分阶段处理模式存在工艺复杂、成本高昂等诸多弊端, 难以满足当下环保与经济性的双重需求。在此背景下, 脱硫脱硝一体化技术凭借独特优势成为烟气治理领域的研究热点与主流方向, 对其创新与应用展开研究具有重要的现实意义。

1 脱硫脱硝一体化技术基础理论与核心问题

1.1 核心概念界定

脱硫脱硝一体化技术是指在单一反应系统内, 通过协同作用同时实现 SO_2 和 NO_x 脱除的烟气治理技术, 相较于传统分阶段处理模式, 其核心优势在于简化工艺流程、降低设备投资与运行成本。该技术以“协同增效”为核心目标, 打破了脱硫与脱硝过程的独立性, 通过反应环境调控、介质协同作用等方式, 解决了分阶段处理中存在的药剂干扰、二次污染等问题。其概念范畴涵盖反应机理协同、设备结构集成、运行参数优化及副产物协同处理等多个维度, 并非简单的技术叠加。在电厂应用场景中, 该技术需满足锅炉负荷波动适应性、烟气成分耐受性及环保标准升级需求, 是兼顾技术可行性与经济合理性的综合解决方案。

1.2 核心反应机理

脱硫脱硝一体化技术核心反应围绕 SO_2 和 NO_x 的氧化、吸收与转化, 不同路径机理有别但本质相通。氧化型机理用氧化剂将难吸收的 NO 氧化为易溶的 NO_2 , SO_2 与吸收剂生成硫酸盐; 催化协同机理借助催化剂, 使二者在同一体系分别催化氧化与还原, 催化剂活性位点吸附两种污染物分子降低活化能; 吸收-还原协同机理用碱性吸收剂构建环境, SO_2 成盐, NO_x 在还原剂作用下变 N_2 。烟气温度等参数影响反应速率, 需调控机理实现高

效同步去除^[1]。

1.3 一体化技术核心问题解析

脱硫脱硝一体化技术应用核心问题有协同效率、反应干扰和系统稳定性。协同效率不足, 单一系统难同时高效脱除两种污染物, 反应条件冲突时一种提升另一种下降; 反应干扰源于烟气杂质, 会占据催化剂活性位点或生成惰性物质, 降低反应效率; 系统稳定性受锅炉负荷波动影响, 烟气量等突变使反应参数偏离最优, 引发设备故障。此外, 复杂副产物处理难, 部分技术有二次污染风险。这些问题阻碍规模化应用, 需从机理优化和工程设计层面共同解决。

2 电厂锅炉烟气脱硫脱硝一体化技术创新方向与核心技术

2.1 技术创新总体方向

当前电厂锅炉烟气脱硫脱硝一体化技术的创新总体方向聚焦于“高效化、低耗化、绿色化、智能化”四大维度。高效化以突破现有脱除效率瓶颈为目标, 通过多机理协同提升 SO_2 和 NO_x 同步去除率, 满足日趋严格的环保标准; 低耗化旨在降低技术运行成本, 重点通过能耗优化、药剂减量等方式, 解决传统技术能耗高、药剂消耗大的问题。绿色化创新强调减少二次污染, 核心是构建“反应物高效利用-副产物清洁处置”的闭环体系; 智能化方向则依托数字化技术实现精准调控, 通过实时监测与智能算法优化运行参数。创新过程中注重跨学科融合, 将材料科学、化学工程与信息技术相结合, 同时强化“理论研究-中试试验-工程应用”的衔接, 确保新技术兼具理论可行性与实际应用价值。

2.2 催化剂与吸收剂创新技术

催化剂与吸收剂的性能优化是一体化技术创新的核心突破口。催化剂创新聚焦于活性提升与寿命延长, 一

方面通过元素掺杂改良传统钒钛催化剂,引入钨、钼等元素增强抗中毒能力,降低烟气中As、Pb等重金属的抑制作用;另一方面开发新型非钒催化剂,如分子筛基、金属有机框架(MOFs)催化剂,其具有更高的活性位点密度与温度适应性,可在宽负荷范围内保持稳定催化效果。吸收剂创新则围绕高效性与循环利用展开,新型复合吸收剂通过复配碱性组分与氧化活性物质,实现对SO₂的快速吸收与NO_x的同步氧化,如石灰石-双氧水复合体系;同时研发可循环吸收剂,通过热解、再生工艺实现吸收剂重复利用,减少固废产生量^[2]。另外,催化剂与吸收剂的协同匹配设计成为新方向,确保二者在同一反应体系内性能互补。

2.3 反应器结构与工艺创新技术

反应器结构与工艺创新旨在强化传质反应效果,提升系统处理能力与适应性。反应器结构创新采用多区域集成设计,将氧化区、吸收区、催化区优化组合,如喷淋塔与流化床复合反应器,通过气流扰动增强气液固三相接触效率,解决传统反应器传质不均问题;同时采用模块化设计,便于根据电厂烟气量灵活调整处理规模,降低改造成本。工艺创新则以“极简流程”为目标,开发一步法协同处理工艺,如半干法一体化工艺通过优化雾化参数与反应温度,实现SO₂吸收与NO_x催化还原的同步进行;耦合工艺成为创新热点,将脱硫脱硝与除尘、脱汞等技术集成,构建“多污染物协同控制”系统,减少设备占地面积。工艺优化中引入动态调节机制,通过实时监测烟气参数自动调整药剂喷射量与反应温度,提升系统抗负荷波动能力。

2.4 副产物资源化创新技术

副产物资源化创新技术是实现“环保-效益”双赢的关键,核心是将脱硫脱硝副产物转化为高附加值产品。对于石灰石-石膏法产生的脱硫石膏,通过提纯、改性工艺生产建材用石膏板、水泥缓凝剂,相较于传统堆存处理,实现资源利用率提升至95%以上;氨法脱硫脱硝产生的硫酸铵、硝酸铵,经精制后作为农业肥料,建立“烟气污染物-化工产品”的转化链条。针对催化过程中产生的废催化剂,开发金属回收技术,通过焙烧、浸出工艺提取钒、钨等贵金属,降低资源浪费与环境风险。新型资源化路径不断涌现,如将副产物与煤矸石等固废协同制备复合胶凝材料,或通过热解技术转化为含硫气体与炭材料。资源化技术创新需兼顾经济性与安全性,通过工艺优化降低提纯成本,确保产品符合相关质量标准。

3 电厂锅炉烟气脱硫脱硝技术发展现存问题

3.1 基础研究不足

当前脱硫脱硝一体化技术领域存在显著的基础研究不足问题,主要体现在反应机理研究不深入与关键科学问题突破滞后。现有研究多聚焦于单一技术路径的优化,对多污染物协同反应的微观机理阐释不清,如SO₂与NO_x在复杂烟气成分中的相互作用机制、污染物分子在催化剂表面的吸附-转化路径等核心科学问题尚未形成统一认知。基础研究与工程实际需求脱节,多数实验室研究基于理想化烟气条件,忽略电厂烟气中粉尘、重金属、卤素等杂质的干扰影响,导致研究成果难以直接转化^[3]。另外,针对极端工况(如高硫高硝烟气、低负荷运行)的基础理论研究匮乏,无法为技术创新提供坚实支撑。

3.2 工程应用瓶颈

工程应用层面,脱硫脱硝一体化技术面临适应性差、运行稳定性不足及成本控制难度大等瓶颈。技术适应性问题表现为现有设备对不同煤种、锅炉类型的适配性有限,如针对高灰分煤种的烟气处理设备易出现堵塞、磨损,而低负荷运行时系统能耗与处理效率失衡。运行稳定性受烟气参数波动影响显著,电厂锅炉负荷调整常导致烟气量、污染物浓度突变,引发脱除效率大幅波动,部分技术在连续运行3-5年后出现催化剂失活、设备腐蚀等问题,维护成本居高不下。成本瓶颈体现在初期投资与运行费用双高,新型催化剂、吸收剂的价格较高,而传统技术的能耗占电厂总能耗的5%-8%,中小电厂难以承担技术升级成本。工程设计与实际运行衔接不畅,部分项目因设计参数与现场工况不符导致技术效果打折扣。

3.3 产业配套不完善

脱硫脱硝一体化技术的产业配套体系尚未完善,在核心材料供给、标准规范与服务支撑等方面存在明显短板。核心材料供给依赖进口,高端催化剂、高效吸收剂等关键产品的国产化率不足40%,部分特种材料如高性能分子筛催化剂仍被国外企业垄断,导致材料价格高企且供应稳定性不足。标准规范体系不健全,缺乏针对一体化技术的统一设计标准、性能评价指标及副产物资源化质量标准,不同企业的技术参数差异大,不利于行业规范化发展。服务支撑体系滞后,专业的技术咨询、运维服务机构数量不足,中小电厂难以获得精准的技术选型指导与高效的运维支持。另外,产业协同机制缺失,设备制造企业与科研机构与电厂之间的信息共享不畅,导致技术创新成果难以快速转化为产业优势,制约了整个产业的高质量发展。

4 一体化技术发展趋势

4.1 材料创新方向

材料创新将成为脱硫脱硝一体化技术发展的核心驱动力,未来方向聚焦于高性能、低消耗、环境友好型材料的研发与应用。催化剂领域将重点发展高效抗中毒催化剂,通过纳米技术构建多级孔道结构,提升活性位点暴露度与传质效率,同时开发可低温运行的催化剂,降低系统能耗;MOFs、共价有机框架(COFs)等新型多孔材料因具有可调的孔径结构与高比表面积,将成为下一代催化剂的重要发展方向。吸收剂创新将朝着高容量、可循环方向发展,新型离子液体吸收剂凭借选择性强、再生能耗低的优势,有望替代传统碱性吸收剂;同时开发多功能复合吸收剂,实现脱硫、脱硝与脱汞等多污染物同步处理。材料回收与再生技术将同步发展,构建“材料制备-使用-再生”的闭环体系,提升资源利用率。

4.2 工艺集成方向

工艺集成方向将以“全流程优化、多功能协同”为核心,推动一体化技术向更高效、紧凑的方向发展。一方面,强化脱硫脱硝与其他烟气处理单元的深度集成,开发“脱硫脱硝-除尘-脱碳”一体化工艺系统,通过流程耦合减少设备重复配置,降低占地面积与投资成本;另一方面,推进不同技术路径的融合创新,如将氧化法与催化法结合,利用氧化技术提升 NO_x 脱除效率,同时通过催化反应降低氧化剂消耗。工艺集成将注重模块化设计,开发可灵活组合的单元化设备,满足不同规模电厂的个性化需求,尤其适用于老旧电厂的改造升级^[4]。另外,间歇式与连续式工艺的优化组合将成为新探索,通过分时段调控反应模式,实现负荷波动下的高效节能运行。

4.3 智能化方向

智能化升级将彻底改变脱硫脱硝一体化技术的运行管理模式,实现从“经验调控”向“精准智控”的转变。未来将依托工业互联网、物联网技术构建全流程监测体系,通过布置温度、浓度、压力等多维度传感器,实时采集反应过程数据,实现烟气参数、设备状态的全面感知。基于大数据与人工智能算法构建预测模型,可精准预测污染物浓度变化趋势,提前调整运行参数,避免脱除效率波动;同时开发故障诊断系统,通过设备运行数据的异常分析,实现催化剂失活、设备腐蚀等故障

的早期预警。数字孪生技术将得到广泛应用,构建与物理系统高度一致的虚拟模型,通过模拟不同工况下的技术效果,为工艺优化与设备改造提供科学依据。智能化发展将大幅降低人工干预,提升系统运行的稳定性与经济性。

4.4 资源化方向

资源化方向将进一步深化“变废为宝”的理念,构建更加高效、高附加值的副产物利用体系。未来将重点开发副产物多元化利用路径,如将脱硫脱硝副产物转化为工业化学品,硫酸铵除作为肥料外,可进一步精制用于电子级化学品生产;脱硫石膏通过深度加工生产高端建材,如石膏晶须、医用石膏等,提升产品附加值。针对复杂副产物,开发分离提纯技术,实现不同组分的高效分离,如从混合盐副产物中分离硫酸根、硝酸根离子,分别制备相应的化工产品。资源化技术将与循环经济理念深度融合,推动电厂与化工、建材等产业构建产业链协同体系,实现副产物的就近消化与高效利用。

结束语

电厂锅炉烟气脱硫脱硝一体化技术是打赢蓝天保卫战、推动能源绿色转型的关键。研究表明,其已发展为多机理协同、多技术融合的综合体系,催化剂改良等创新提升了处理效率,但基础研究不足等问题制约规模化应用。未来,材料创新、智能化升级与资源化利用将推动技术全方位突破。电厂应与科研机构协同创新,选合适方案;行业要完善标准与配套。通过创新与协同,该技术将为“双碳”目标达成和大气环境改善提供有力保障。

参考文献

- [1]朱琳麒.燃煤电厂烟气脱硫脱硝一体化应用研究[J].工程技术研究,2020,5(9):69-71.
- [2]阿茹娜,付宏力,张晗,等.燃煤电厂烟气脱硫脱硝一体化应用研究[J].电力系统装备,2020(17):00030-00033.
- [3]郭增凤,冯伟.燃煤烟气脱硫脱硝除尘一体化技术研究[J].石油石化物资采购,2024(17):106-108.
- [4]刘翔.燃煤电厂烟气脱硫脱硝一体化技术发展趋势[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(17):159-160.