

“双碳”目标下火电厂脱硫脱硝系统绿色转型路径研究

吴远翔

武汉华德环保工程技术有限公司 湖北 武汉 430070

摘要: 本文旨在系统性地探析“双碳”背景下火电厂脱硫脱硝系统所面临的挑战,并提出一条融合技术创新、智能化升级与管理优化的绿色转型路径。文章首先阐述了脱硫脱硝技术的基本原理与当前超低排放标准,继而深入剖析了现有系统在“双碳”目标下面临的运行成本高企、能效矛盾突出、副产物处置困难等核心挑战。在此基础上,本文构建了一个多维度的绿色转型框架,重点论述了通过工艺优化与设备革新降低物耗能耗、依托数字孪生与人工智能技术实现智能精准控制、以及推动副产物资源化利用与循环经济模式等关键路径。研究表明,火电厂脱硫脱硝系统的绿色转型不仅是满足日益严苛环保法规的被动应对,更是主动融入新型电力系统、提升综合竞争力的战略选择。未来的发展将趋向于更高效、更智能、更低碳的一体化协同治理模式。

关键词: 双碳目标; 火电厂; 脱硫脱硝; 绿色转型; 智能化; 资源化

引言

全球气候变化严峻,中国“双碳”目标推动绿色转型,能源行业首当其冲。火电以煤为主,是SO₂、NO_x和CO₂主要排放源。本世纪初以来,我国广泛应用石灰石-石膏湿法脱硫和SCR脱硝技术,实现从“达标”到“超低排放”的跨越。但“双碳”目标要求更高,不仅关注末端减排,还需统筹能耗、物耗、碳排放及全生命周期环境影响。当前脱硫脱硝系统虽减排成效显著,却面临运行成本高、能耗大、副产物难处置等问题,制约火电绿色高效发展。因此,亟需推动脱硫脱硝系统深度绿色转型,在提升环保绩效的同时,实现节能、降碳、增效协同,支撑火电行业可持续发展。

1 “双碳”目标下火电厂脱硫脱硝系统的技术现状与核心挑战

1.1 脱硫脱硝技术原理与超低排放标准

火电厂脱硫脱硝系统主要包括脱硫(FGD)和脱硝(DeNO_x)两部分。主流脱硫技术为石灰石-石膏湿法,利用石灰石浆液吸收烟气中SO₂,生成可资源化利用的石膏,脱硫效率超95%;其他工艺包括氨法、海水法等。主流脱硝技术为选择性催化还原(SCR),在催化剂作用下,以NH₃为还原剂,在300-400°C将NO_x还原为N₂和H₂O,脱硝效率达80%-90%以上。我国已大规模完成火电超低排放改造,现行标准规定:基准氧含量6%下,燃煤锅炉烟尘、SO₂、NO_x排放浓度分别不高于10(部分地区5)mg/m³、35mg/m³和50mg/m³,严于天然气发电排放限值。

1.2 “双碳”目标下的核心挑战

1.2.1 运行成本高企与经济效益承压

“双碳”目标加速了能源结构转型,新能源装机占比

不断提升,导致火电机组利用小时数下降,普遍处于低负荷甚至深度调峰状态^[1]。然而,脱硫脱硝系统的固定运行成本(如设备折旧、维护)和部分变动成本(如电耗)并未同比例下降。同时,脱硫所需的石灰石、脱硝所需的液氨/尿素等大宗原材料价格波动剧烈,进一步推高了运营成本。对于许多火电厂而言,高昂的环保运行成本已成为沉重的财务负担。

1.2.2 能效矛盾与碳排放隐忧

脱硫脱硝系统本身是能耗大户。例如,脱硫系统中的浆液循环泵、氧化风机,脱硝系统中的稀释风机等设备消耗大量厂用电。有研究表明,环保设施的厂用电率可占到全厂总厂用电的20%以上。在追求极致减排的同时,巨大的能耗间接增加了煤耗和CO₂排放,形成了“为减污而增碳”的悖论。如何在保证污染物达标排放的前提下,最大限度地降低系统自身的能耗,是实现真正意义上的“绿色”运行的关键。

1.2.3 系统适应性与稳定性挑战

随着火电机组深度参与电网调峰,其负荷波动频繁且幅度大。这给脱硫脱硝系统的稳定运行带来了巨大挑战。例如,低负荷时烟气温度可能低于SCR催化剂的最佳活性窗口,导致脱硝效率下降;负荷快速变化时,烟气流量和污染物浓度随之剧烈波动,传统的基于人工经验的控制策略难以及时、精准地调整药剂投加量,易造成排放超标或药剂浪费(如氨逃逸)^[2]。

1.2.4 副产物处置与资源化瓶颈

脱硫产生的石膏若品质不佳或市场消纳不畅,会堆积成山,占用土地并存在环境风险。脱硝过程中产生的废催化剂属于危险废物,其回收处理成本高昂。如何打

通副产物的资源化利用链条,变废为宝,是实现循环经济、降低全生命周期环境影响的重要环节。

2 脱硫脱硝系统绿色转型的多维路径探析

面对上述挑战,火电厂脱硫脱硝系统的绿色转型不能仅停留在单一技术的修补,而应构建一个涵盖技术、管理和商业模式的系统性解决方案。

2.1 路径一:工艺优化与设备革新——夯实绿色转型的物理基础

2.1.1 高效节能设备的应用与精细化运行

脱硫脱硝系统的能耗主要集中在关键转动设备上。在脱硫侧,浆液循环泵是绝对的电耗大户,其厂用电率可占全厂总厂用电的1.0%~2.5%。推广使用高效水力模型的循环泵、永磁同步电机,并结合变频调速技术,根据实时负荷和入口SO₂浓度动态调整泵组的运行台数与转速,能有效避免“大马拉小车”的能源浪费。在脱硝侧,稀释风机和电加热器是主要耗电单元。采用尿素直喷热解(UDIP)等新技术,利用烟气余热分解尿素,可取消电加热器,显著降低系统电耗。同时,选用宽温度窗口、高活性的新型催化剂,能有效提升机组在低负荷深度调峰工况下的脱硝效率,减少因效率不足而采取的牺牲锅炉效率的补救措施。

2.1.2 系统集成与流程再造以降低阻力损失

传统的脱硫、脱硝、除尘系统多为分体式布置,烟气需经过多次转向和长距离输送,导致系统阻力大,引风机功耗高。探索采用一体化协同治理技术,如SPC超净脱硫除尘一体化工艺,将多项净化功能集成于单个塔内,可大幅缩短烟气流程,简化系统结构。此外,对现有烟道进行流场优化设计,采用流线型弯头、导流板等措施,减少涡流和局部阻力,也能有效降低引风机的压头需求,从而节约大量厂用电。

2.1.3 关键材料与部件的长寿命化与可靠性提升

脱硫环境具有强腐蚀性,设备和管道的腐蚀泄漏是导致非计划停机和维护成本增加的主要原因。推广应用高性能防腐材料,如搪瓷换热元件、高性能玻璃鳞片树脂衬里、双相不锈钢等,可以显著延长关键设备的使用寿命^[3]。例如,将GGH(烟气-烟气换热器)中的普通金属换热元件替换为耐腐蚀的搪瓷元件,不仅能解决堵塞和腐蚀问题,还能维持长期稳定的换热效率,保障系统安全经济运行。

2.2 路径二:智能化与数字化赋能——驱动绿色转型的核心引擎

2.2.1 构建覆盖全要素的数字孪生平台

依托物联网(IoT)技术,在脱硫吸收塔、浆液池、

氧化风机、SCR反应器、喷氨格栅等关键位置部署高精度、高可靠性的传感器网络,实时采集pH值、密度、液位、压力、温度、流量及污染物浓度等数百个关键参数。基于这些海量数据,构建高保真的数字孪生模型,实现物理系统与虚拟模型的毫秒级同步。该平台不仅能直观展示系统运行状态,更能为后续的智能优化和预测性维护提供坚实的数据底座。

2.2.2 AI驱动的智能优化与精准控制

为应对火电机组深度调峰带来的复杂工况,必须超越传统控制范式,深度融合人工智能(AI)技术,构建新一代智能控制系统。该系统的核心在于利用机器学习算法从海量历史运行数据中自主学习并挖掘最优控制规律,实现从“人控”到“智控”的根本性转变。具体而言,可构建一个多层级的AI控制架构:

宏观预测层:采用长短期记忆网络(LSTM)等时序预测模型,结合电网调度指令、锅炉燃烧状态及历史数据,对未来15~30分钟内的烟气流量、SO₂/NO_x入口浓度及温度等关键扰动变量进行高精度预测,为下层控制器提供前瞻性的决策依据。

中观优化层:基于预测结果,运用强化学习(Reinforcement Learning, RL)算法,在满足排放约束的前提下,动态求解全局最优的操作指令集(如浆液供给量、氧化风量、总喷氨量)。RL代理通过与数字孪生环境的持续交互试错,能够自主发现并固化在各种复杂工况下的最优控制策略,最大化能效与经济性。

微观执行层:针对脱硝系统的核心痛点——氨逃逸,实施AI赋能的分区喷氨(Zoned Ammonia Injection)策略。通过激光氨逃逸在线监测(TDLAS)网格化感知反应器出口的NH₃分布,智能控制系统利用卷积神经网络(CNN)等图像识别算法,实时分析氨分布的不均匀性,并对各独立喷氨分区的阀门开度进行毫秒级闭环调控,确保在任何工况下都将氨逃逸稳定控制在2~3ppm的安全阈值内,兼顾环保与经济性。

通过上述三层AI架构的协同工作,系统能够实现脱硫脱硝过程的自感知、自学习、自决策和自执行,彻底摒弃对人工经验的依赖,将控制精度和系统能效提升至全新水平。

2.2.3 基于大数据的预测性维护与健康管

通过对设备振动、电流、温度等运行数据的长期积累与深度挖掘,建立设备健康状态评估模型。AI算法能够识别出轴承磨损、叶轮结垢、电机绝缘老化等早期故障征兆,并提前发出预警^[4]。这使得维护工作从“事后抢修”转变为“事前预防”,不仅保障了脱硫脱硝系统的长

周期、高可靠性运行，避免了因突发故障导致的环保超标风险，也大幅降低了运维成本。

2.3 路径三：副产物资源化与循环经济——拓展绿色转型的价值边界

2.3.1 高品质脱硫石膏的稳定化生产

脱硫石膏的市场价值取决于其品质，而品质由精细的工艺控制决定。必须将浆液密度稳定控制在1080-1140 kg/m³的最优区间，以促进粗大、规则的短柱状晶体形成；严格将pH值维持在5.2-5.8的弱酸性环境，避免杂质包裹和晶体形态恶化；并精确匹配氧化风量，确保亚硫酸盐氧化率超过95%。通过建立这些关键参数的联动智能控制模型，可稳定产出符合建材行业标准（含水率<10%，纯度>93%）的优质石膏，用于生产高端石膏板或水泥缓凝剂，变废为宝。

2.3.2 废脱硝催化剂的全生命周期管理

失效的SCR催化剂属于危险废物，其处置是行业痛点。应建立从电厂到专业回收企业的闭环回收体系。通过物理破碎、化学浸出、溶剂萃取等工艺，高效回收其中的钒（V）、钨（W）、钛（Ti）等有价金属，用于新催化剂的再生制造。这不仅解决了危废处置难题，降低了环境风险，还实现了稀缺战略资源的循环利用，创造了新的经济价值。

2.3.3 探索跨产业协同的循环经济模式

超越电厂内部的资源化利用，积极探索与区域经济的深度融合。例如，将品质稍次但符合安全标准的脱硫石膏用于改良盐碱地土壤或矿井回填；利用火电厂的稳定蒸汽和电力资源，为周边工业园区提供集中供热、供汽服务，吸引下游石膏建材企业落户，形成“电厂-环保-建材”的区域性循环经济产业链，最大化资源利用效率和综合效益。

3 协同推进与保障机制

脱硫脱硝系统的绿色转型是一项复杂的系统工程，需要多方协同发力。（1）政策引导与标准完善：政府应出台鼓励性政策，如对采用先进节能降碳技术的电厂给予电价补贴或碳配额倾斜。同时，适时修订和完善相关技

术标准，将能耗、物耗、碳排放等指标纳入考核体系，引导行业健康发展。（2）技术创新与产学研合作：鼓励企业、高校和科研院所加强合作，共同攻关脱硫脱硝领域的前沿技术，如低温脱硝催化剂、新型吸收剂、CO₂捕集与脱硫脱硝耦合技术等，为绿色转型提供持续的技术动力。（3）企业内部管理变革：火电企业需转变观念，将脱硫脱硝系统视为价值创造中心而非成本中心。建立跨部门的协同工作机制，将环保、生产、燃料、经营等部门的数据和目标打通，实现全局最优。

4 结语

“双碳”目标为火电厂脱硫脱硝系统的发展设定了新的坐标系。未来的绿色转型，绝非简单的技术叠加，而是一场深刻的系统性变革。它要求我们从单纯追求“末端治理”转向“全过程优化”，从“被动合规”转向“主动创效”。通过夯实工艺设备基础、注入智能化数字动能、并拓展副产物资源化价值链，脱硫脱硝系统完全有能力从火电厂的“成本负担”蜕变为支撑其在新型电力系统中扮演灵活、清洁、高效角色的“核心竞争力”。这条转型之路虽然充满挑战，但也孕育着巨大的机遇。率先完成绿色、智能、低碳转型的火电厂，不仅能够有效应对“双碳”时代的政策与市场压力，更将在未来的能源格局中占据更加稳固和有利的地位。展望未来，深度融合了人工智能、大数据、新材料等前沿科技的下一代脱硫脱硝系统，将成为智慧电厂不可或缺的组成部分，为我国能源行业的高质量、可持续发展贡献关键力量。

参考文献

- [1]刘生璐,李甲周.火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保措施研究[J].中国战略新兴产业,2026,(08):54-56.
- [2]王连喜.探讨火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保问题[J].中国设备工程,2024,(17):193-195.
- [3]蔡正阳.火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保[J].清洗世界,2024,40(02):4-6.
- [4]丁伟.火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保策略探讨[J].电气技术与经济,2023,(09):92-94.