

# 新形势下火电厂灰硫系统超低排放改造的能效优化与实践研究

高正祥 张晓龙

新疆皖能江布发电有限公司 新疆 昌吉 831100

**摘要:** 随着“双碳”战略目标的深入推进与生态环境保护要求的日益严格,火电行业面临着前所未有的转型压力。作为火电厂污染物控制的核心环节,灰硫系统的超低排放改造已成为行业发展的必然趋势。然而,传统改造路径往往侧重于排放指标的达标,忽视了系统能效的协同优化,导致运行成本攀升、能耗增加,甚至影响机组的整体经济性。本文立足于“减污降碳协同增效”的新发展理念,系统梳理了当前火电厂灰硫系统(主要包括脱硫、除尘及灰渣处理系统)超低排放改造的技术路线,深入剖析了其在运行过程中存在的能效瓶颈,并提出了基于多目标协同优化的能效提升策略。通过对典型电厂改造案例的实证分析,验证了所提优化方案在实现超低排放的同时,能够显著降低系统能耗、提升资源利用效率。研究表明,通过精细化控制、设备升级、系统集成及智能化运维等手段,可在满足超低排放标准( $\text{SO}_2 \leq 35\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\text{烟尘} \leq 5\text{mg}/\text{m}^3$ )的前提下,实现灰硫系统综合能耗降低10%~15%,为火电行业的绿色低碳转型提供了有力的技术支撑与实践参考。

**关键词:** 火电厂;灰硫系统;超低排放;能效优化;协同控制;智能化运维

## 引言

火电作为我国能源供应的“压舱石”,在保障国家能源安全方面发挥着不可替代的作用。然而,燃煤发电过程中产生的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和烟尘等污染物,长期以来是大气环境污染的主要来源之一。为应对严峻的环境挑战,国家自“十二五”规划以来持续强化火电行业环保监管,相继出台《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)及其修订版,并于2015年全面推行“超低排放”政策,要求新建及现役燃煤机组在基准氧含量6%条件下,烟尘、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 排放浓度分别不高于 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ,部分地区甚至提出了更为严苛的“近零排放”要求<sup>[1]</sup>。在此背景下,各大火电厂纷纷对现有环保设施进行超低排放改造。其中,灰硫系统——涵盖静电除尘器(ESP)或电袋复合除尘器、湿法脱硫系统(WFGD)以及灰渣输送与综合利用系统——成为改造的重点环节。然而,实践表明,部分改造项目存在“重排放、轻能效”的倾向:为追求更低的排放浓度,过度依赖增加喷淋层数、提高液气比、增大风机功率等“粗放式”手段,导致系统电耗、水耗和药剂消耗显著上升,这不仅削弱了电厂的经济竞争力,也与“双碳”目标下节能降耗的总体要求相悖。当前,火电行业正同时承受着“保供”与“转型”的双重压力。一方面,新能源装机的快速增长对火电的调峰能力提出了更高要求;另一方面,碳市场机制、绿电交易等政策工具

倒逼火电企业提升能效、降低碳排放强度。因此,如何在确保超低排放稳定达标的前提下,实现灰硫系统的能效优化,已成为火电企业亟需解决的关键技术问题。

## 1 灰硫系统超低排放改造技术现状与能效挑战

### 1.1 主流技术路线

目前,火电厂灰硫系统超低排放改造主要采用“高效除尘+深度脱硫”的组合工艺:(1)除尘系统:主流技术包括低低温电除尘(LLT-ESP)、电袋复合除尘器(ESP+FF)及高频电源改造。其中,LLT-ESP通过将烟气温度降至酸露点以下(约 $90^\circ\text{C}$ ),有效提高粉尘比电阻并协同脱除 $\text{SO}_3$ ,除尘效率可达99.9%以上;电袋复合技术则结合了电除尘的高处理能力和布袋除尘的高精度过滤优势,尤其适用于高比电阻粉尘工况。(2)脱硫系统:以石灰石-石膏湿法脱硫(WFGD)技术为主,通过增加喷淋层、优化喷嘴布置、采用托盘塔或双塔串联、以及在脱硫塔后增设湿式电除尘器(WESP)等方式实现深度脱硫与高效除雾。WESP可有效捕集脱硫后烟气中携带的石膏浆液微滴和细微颗粒物,是确保烟尘排放稳定达标的关键设备。

### 1.2 能效瓶颈分析

尽管上述技术路线能够有效实现超低排放,但在实际运行中却暴露出显著的能效问题:电耗激增:为追求更高的脱硫效率,部分电厂将液气比从常规的 $15\text{L}/\text{m}^3$ 提高至 $25\text{L}/\text{m}^3$ 以上,导致浆液循环泵的功率大幅增加;

WESP的投运亦额外增加约200~500kW的电负荷；除尘系统的高频电源改造虽提升了除尘效率，但其自身功耗也相应增加。

**水耗与药剂浪费：**过量的喷淋不仅增加了工艺水的消耗，还可能导致石膏副产品品质下降（如含水率升高、杂质增多），影响其综合利用价值；石灰石的过量投加则造成了资源的直接浪费，并增加了后续固废的处理负担<sup>[2]</sup>。

**系统耦合不足：**除尘与脱硫系统在设计与运行上往往相互独立，缺乏协同优化。例如，若前置除尘效率不足，会导致脱硫塔入口粉尘浓度偏高，进而加剧塔内结垢与堵塞风险，为维持脱硫效率又被迫进一步提高液气比，形成“能耗-堵塞”的恶性循环。

**运行调节滞后：**传统的控制策略多采用固定参数运行模式，难以快速适应机组负荷波动、煤质变化等复杂工况，容易导致“高负荷时排放指标过于宽松造成能耗浪费，低负荷时又面临超标风险”的非经济运行状态。上述问题清晰地表明，单纯追求排放指标的“硬达标”模式已难以为继，亟需从系统工程角度出发，构建“排放-能效-经济”多目标协同优化的新范式。

## 2 灰硫系统能效优化策略

### 2.1 基于精细化控制的运行优化

**动态液气比控制：**建立脱硫效率与入口SO<sub>2</sub>浓度、机组负荷、浆液pH值等多变量的数学模型，依据实时监测数据动态调整循环泵的运行台数及转速（推荐采用变频调速技术），从根本上避免“大马拉小车”的能源浪费现象。实践表明，变频改造可使脱硫系统节电15%~25%。

**智能pH调控：**采用前馈-反馈复合控制策略，结合入口SO<sub>2</sub>浓度的预测值与出口实测值，精准控制石灰石浆液的供给量，避免因pH过高导致的药剂浪费或pH过低引发的脱硫效率下降。

**除尘系统协同调优：**根据烟气温度、粉尘浓度等参数动态调整静电场的运行电压、振打周期及清灰频率，在确保除尘效率的前提下最大限度地降低电耗。例如，低低温电除尘在90℃工况下可比常规电除尘节电约20%。

### 2.2 关键设备能效升级

**高效喷淋与除雾技术：**采用双向双头喷嘴、空心锥喷嘴等新型喷淋装置，提升气液接触效率与均匀性；应用屋脊式与管式复合除雾器，可有效降低系统压降（约0.2~0.4kPa），从而减少引风机的电耗。

**永磁电机与高效泵阀：**在浆液循环泵、氧化风机等大功率设备上推广使用永磁同步电机，其效率可比传统异步电机提升3%~8%；选用低泄漏、低阻力的阀门，减少节流损失<sup>[3]</sup>。

**WESP能效优化：**通过优化极板间距、采用脉冲供电方式及智能冲洗策略，在保证除尘效率的同时，有效降低其比电耗（单位：kWh/m<sup>3</sup>）。

### 2.3 系统集成与资源循环利用

**烟气余热深度利用：**将脱硫前的烟气余热用于加热锅炉凝结水或厂区生活供热，或通过MGGH（低温省煤器+烟气再热器）系统进行热量回收与再利用，此举既能提升全厂热效率，又能通过降低脱硫塔入口烟温来减少塔内工艺水的蒸发损耗。

**石膏品质提升与综合利用：**通过精确控制氧化风量、抑制浆液中Cl<sup>-</sup>浓度等措施，生产高纯度的二水石膏，为建材行业提供优质原料，实现固废资源化，降低处置成本。

**灰渣协同处理：**将电除尘收集的飞灰与脱硫石膏按一定比例科学配伍，可用于制备路基材料或水泥掺合料，进一步拓展资源化利用途径。

### 2.4 智能化运维平台构建

依托工业互联网、大数据与人工智能技术，构建灰硫系统智能运维平台，旨在实现：（1）全面状态感知：通过部署广泛的传感器网络，实时采集系统各环节的温度、压力、污染物浓度、电流等关键参数；（2）智能故障预警：基于机器学习算法构建设备健康状态模型，对喷嘴堵塞、极板腐蚀等潜在故障进行早期预警；（3）科学优化决策：利用数字孪生技术，模拟不同运行策略下的排放与能耗表现，为操作人员推荐最优控制参数组合；（4）精准绩效评估：建立融合能效与排放指标的综合KPI体系，为管理层的精细化管理决策提供数据支撑。

## 3 工程实践案例分析

### 3.1 项目概况

本案例选取某600MW亚临界燃煤机组作为研究对象。该机组原环保配置为双室四电场静电除尘器与单塔双循环湿法脱硫系统。改造前，其烟尘与SO<sub>2</sub>排放浓度分别为25mg/m<sup>3</sup>和80mg/m<sup>3</sup>，虽满足当时的排放标准，但距离超低排放要求仍有较大差距。为响应国家环保政策及自身绿色转型需求，该电厂于2022年启动了灰硫系统超低排放改造工程，明确将烟尘排放浓度控制在5mg/m<sup>3</sup>以下、SO<sub>2</sub>浓度控制在35mg/m<sup>3</sup>以下作为核心目标。经综合比选，最终确定采用“低低温电除尘+脱硫塔增效+WESP”的技术路线：在电除尘器前加装烟气冷却器，将烟温降至90℃左右；在脱硫塔内新增一层高效喷淋层并加装气流分布托盘；在塔顶出口加装湿式电除尘器，以深度去除石膏雨和细微颗粒物。该方案在设计中即融入了能效优化理念，为后续的节能运行奠定了基础。

### 3.2 能效优化措施实施

在硬件改造的同时,电厂同步实施了一系列能效优化措施:首先,在脱硫系统中引入了智能控制系统,根据入口SO<sub>2</sub>浓度、负荷、pH值等参数动态计算最优液气比,并自动调节三台变频浆液循环泵的运行状态,避免了传统“全开全停”模式的能源浪费。其次,对关键辅机进行能效升级,将原有异步电机更换为永磁同步电机,并为WESP配备高频脉冲电源,以提升效率、降低功耗。再次,充分利用烟气余热,将烟气冷却器回收的热量接入机组低压加热系统,用于加热凝结水,预计年节约标准煤8000吨,相应减排CO<sub>2</sub>约2.1万吨。最后,将灰硫系统全面接入电厂智能生产管控平台,实现了运行参数可视化、故障预警自动化和操作指令智能化,显著提升了运维效率与决策科学性。

### 3.3 改造效果评估

改造工程投运后,经过六个月的连续性能监测与评估,数据显示,排放指标:烟尘与SO<sub>2</sub>排放浓度分别稳定在3.2mg/m<sup>3</sup>和28mg/m<sup>3</sup>,优于超低排放标准。

能效指标:脱硫系统单位脱硫量电耗由12.5kWh/t-s降至10.3kWh/t-s,降幅17.6%;除尘系统电耗由1.8kWh/万m<sup>3</sup>降至1.4kWh/万m<sup>3</sup>,降幅22.2%;石灰石单耗由185kg/MWh降至162kg/MWh,降幅12.4%。经济效益:综合测算,灰硫系统年节约电费约950万元,节约药剂与水耗约150万元,加之余热利用收益,年总经济效益超1200万元。项目总投资约4200万元,静态投资回收期仅为3.5年。该案例充分证明,通过科学规划与精细化管理,超低排放改造完全可以在保障卓越环保绩效的同时,实现显著的能效提升与经济效益,为同类改造项目提供了可复制、可推广的成功范式。

## 4 讨论与展望

本文研究证实,灰硫系统超低排放改造与能效优化可以并行不悖,并通过技术创新与系统集成实现协同增效。未来的发展方向可聚焦于:(1)多污染物协同控制:研发脱硫、脱硝、除尘、脱汞等的一体化控制技术,减

少系统冗余与能耗。(2)碳捕集与灰硫系统耦合:探索利用脱硫副产物进行CO<sub>2</sub>矿化封存的技术路径,挖掘系统降碳潜力。(3)数字孪生深度应用:构建高保真度的灰硫系统数字模型,实现从“预测”到“优化”再到“执行”的闭环智能控制。(4)绿电驱动环保设备:利用厂区分布式光伏、风电等绿色电力为WESP、循环泵等大功率环保设备供电,进一步降低全流程碳足迹<sup>[4]</sup>。此外,在政策层面,建议完善激励机制,将能效提升指标纳入超低排放的验收与补贴考核体系,引导企业从“被动达标”向“主动优化”转变。

## 5 结语

在“双碳”目标与生态文明建设的新形势下,火电厂灰硫系统超低排放改造必须摒弃“唯排放论”的旧有思维,坚定转向“减污降碳协同增效”的新路径。本文通过系统分析技术现状、精准识别能效瓶颈,提出了涵盖精细化控制、设备升级、系统集成与智能化运维的综合优化策略,并依托工程案例验证了其有效性。实践证明,通过前瞻性的科学设计与过程化的精细管理,完全能够在满足严苛环保标准的同时,显著降低系统能耗与运行成本,全面提升火电企业的可持续发展能力与市场竞争力。展望未来,随着技术的持续进步与支持政策的不断完善,火电厂灰硫系统必将向着更高效、更智能、更绿色的方向演进,为构建新型电力系统和实现能源领域的高质量发展做出更大贡献。

## 参考文献

- [1]庞博.浅论电厂灰硫排放问题及其环保解决方案[J].皮革制作与环保科技,2023,4(19):190-192.
- [2]李榷榷.灰硫系统在锅炉投油运行时的措施和整改意见[J].中国高新区,2018,(07):138+212.
- [3]张知翔,徐党旗,车宏伟,等.高硫煤机组尾部烟道中灰硫分布规律研究[J].热力发电,2020,49(09):104-108.
- [4]王福冲.火电厂灰硫设备检修管理创新策略[J].内蒙古煤炭经济,2020,(12):115-116.