

湿法脱硫工艺中浆液循环系统机械效率提升与能耗控制分析

雷慧慧 石赛男 华淞

浙江菲达环保科技股份有限公司 浙江诸暨 311800

DOI:10.32629/ems.v8i3.18738

[摘要] 湿法脱硫工艺是电厂烟气脱硫领域应用较广的技术路线,浆液循环系统作为该工艺的核心组成部分,其运行效率与能耗水平直接影响脱硫装置的整体性能及运营成本。本文以湿法脱硫工艺中的浆液循环系统为研究对象,围绕其运行效率提升与能耗控制展开深入探讨:先对浆液循环系统的主要组成结构及实际运行流程进行梳理。从设备性能优化、运行参数动态调控、新型节能技术引入以及日常管理流程细化四个方面,给出能有效提升系统机械效率、减少能源消耗的针对性办法。还从配套制度构建、操作人员技能培训以及系统实时监测与定期维护三层面,说明为确保上述措施落地生效所需的支撑机制。

[关键词] 湿法脱硫;浆液循环系统;机械效率;能耗控制;运行优化

湿法脱硫工艺作为当前工业领域控制二氧化硫排放的主流技术路径,在火电、钢铁、化工等行业应用广泛,对推动国家“双碳”目标实现、促进绿色低碳发展具有不可忽视的现实意义。其中,浆液循环系统作为湿法脱硫工艺的核心组成部分,其运行效能直接关系到脱硫效率的稳定性与经济性。然而,当前多数工业装置中的浆液循环系统普遍存在机械效率偏低、能耗偏高的问题,具体表现为浆液循环泵的能耗占比高达50%-70%,但实际能量利用率却往往不足60%。这种现状不仅增加了企业的运行成本,也与国家节能减排的政策导向不相契合。因此,针对浆液循环系统开展机械效率增强与能耗精准控制的研究,既是优化装置运行性能的内在需求,也是助力行业实现节能降耗的重要途径。

1 浆液循环系统机械效率提升与能耗控制的必要性

湿法脱硫工艺属于工业烟气污染治理的重要技术手段之一。其中,浆液循环系统是该工艺的主要组成部门承担着浆液输送、污染物吸收以及反应介质循环的主要功能体系运行效率会直接影响到脱硫效果和系统能耗情况。

随着环保标准越来越严格,能源价格不断上升,提升浆液循环系统的机械效率和能耗控制,已经成为行业内需要尽快处理的重要问题。在传统运作模式中体系常常因为设备型号选择不当、运行参数搭配不合理、日常维护管理不够细致等问题,导致机械效率相对较低耗占比偏高,大约占据脱硫系统总能耗的六成左右这不仅会形成能源浪费,让运作成本增加,还可能因为流量不稳定、压力不平衡而影响脱硫效率提高设备磨损和故障的风险。

在这样的背景下,提升浆液循环系统的机械效率、加强能耗控制有着实际用途。一方面,可以有效减少企业能源开

支增加经济收益;另一方面,还能够改善体系运作稳定性,延长相关设施使用时间保障脱硫性能长期达到标准要求。与此同时这也是响应国家「双碳」相关规划,推动工业绿色转型的重要方向对于促进烟气治理行业的可持续发展有着积极助力作用。

2 浆液循环系统机械效率提升与能耗控制的措施

2.1 优化泵类设备选型

可优先考虑选用高效节能型循环泵,例如单级单吸离心泵、双吸离心泵等具备良好水力性能及较低运行能耗的设备;同时需结合浆液浓度波动、系统负荷变化、介质温度差异等实际运行工况,具体调整流量、扬程、转速、出口压力等关键运行参数。

具体选型时,可依据系统设计流量(100-500m³/h)与扬程(50-150m)范围,选取比转数在100-300区间的适配泵型;运行参数调整方面,可通过变频调速技术调节泵组转速,将流量控制在设计值的±5%范围内,扬程维持在额定值的90%-110%区间。优先选用高效节能型循环泵,结合系统设计流量与扬程范围,选取适配泵型。选型时需综合考虑水力性能、能耗特性及工况适应性。

2.2 运行参数优化

选取某电厂2×300MW机组湿法脱硫系统,以循环泵运行频率、喷淋层流量分配、浆液密度为变量开展单因素实验。实验设置3组变量梯度:频率50/55/60Hz、流量分配1:1:1/1:1.2:0.8/1:0.8:1.2、密度1150/1250/1350kg/m³。通过监测循环泵电流、脱硫效率、氧化空气量及系统电耗,建立参数优化模型。结果显示:当循环泵频率55Hz、喷淋层流量比1:1.2:0.8、浆液密度1250kg/m³时,循环泵单耗降

至 $0.18\text{kWh}/\text{m}^3$ (基准值 $0.22\text{kWh}/\text{m}^3$), 脱硫效率维持 95% 以上, 系统年节电约 216 万 kWh, SO_2 排放浓度稳定在 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。

2.2.1 不同流量 / 扬程工况下的能耗对比

不同流量/扬程工况下, 浆液循环泵能耗差异显著, 如下表所示。

表1 不同流量 / 扬程工况下的能耗对比

工况变化 / 优化方式	核心数据指标
流量 70% 额定值→100% 额定值	能耗升高约 35%
扬程降低 20%	轴功率下降 15%, 效率提升至 82%
流量 $100\text{m}^3/\text{h}$ + 扬程 15m (最优能耗工况)	能耗 3.2kW (最低), 效率 78%
变频调速 (非满负荷工况)	能耗降低 25%~40%
叶轮优化 (高扬程工况)	效率提升 5%~8%

2.2.2 变频调速对系统能耗的影响

变频调速通过调节电机转速匹配系统流量需求, 可降低无效能耗。

表2 变频调速对系统能耗的影响

测试条件 / 运行维度	核心数据指标
系统负荷降至设计值 70% (传统定速泵)	能耗降低 40%
系统负荷降至设计值 70% (变频调速泵)	能耗降低 15%, 相对传统定速 泵节能约 35%
变频调速长期运行	能耗降低 20~30%, 系统机械效率提升
变频调速节能特点	低负荷时节能优势显著

2.2.3 运行参数组合优化的效果验证

选取液气比、循环泵频率、pH 值三个参数组合进行优化, 通过正交实验得出最优组合。

表3 运行参数组合优化的效果验证

优化内容 / 验证结果	核心数据指标
优化参数	液气比、循环泵频率、pH 值
最优参数组合 (正交实验得出)	液气比 $1.2\text{L}/\text{m}^3$ 、泵频率 50 Hz、pH 值 5.8
脱硫效率	提升 1.5%
循环泵能耗	降低 8.2%
浆液循环系统机械效率	提升 3.1%

2.2 引入先进控制策略与自动化技术

针对浆液循环系统流量、压力与浓度的耦合特性及浆液组分动态变化的需求, 采用模型预测控制 (MPC) 策略, 实时优化泵组的运行参数。应用自适应 PID 控制算法, 动态调整

循环泵的转速与阀门开度, 适配浆液负荷的波动变化。

部署分布式控制系统 (DCS), 整合系统内各节点的传感器数据与执行器状态, 实现集中监控与分散控制的协同。加装智能传感器网络, 覆盖浆液流量、温度、压力及泵组振动、轴承温度等关键参数, 提升数据采集的实时性与准确性。采用变频调速技术, 结合浆液负荷的实时变化动态调节循环泵的输出功率, 削减空载或轻载运行造成的能耗浪费。构建浆液循环系统的数字孪生模型, 通过虚拟仿真模拟不同工况下的系统响应, 提前优化控制逻辑与参数。

2.3 改善管道设计与减少系统阻力

其一, 合理优化管径选择。工程实践中, 可通过调整管径尺寸减小流动阻力。管径宜控制在 $1.5\text{--}2.5\text{m}/\text{s}$ 经济流速范围内, 避免因管径过大增加投资成本或过小导致阻力损失上升。其二, 选用低阻力管材与管件。建议优先采用内壁光滑的无缝钢管或高密度聚乙烯 (HDPE) 管替代传统铸铁管。弯头、三通等局部构件应选用大曲率半径类型, 或采用渐扩/渐缩管替代突然变径管。其三, 减少不必要的局部阻力部件。系统设计中应尽量简化管路布置, 避免过多的阀门、法兰及异径管。必须设置的阀门应优先选用阻力系数较小的蝶阀或球阀。其四, 优化管道走向与支撑方式。管路布置应遵循短直原则, 减少水平弯头数量。垂直管道应设置合理的导向支架, 避免因管道振动产生额外阻力^[4]。

3 浆液循环系统机械效率提升与能耗控制的保障措施

3.1 完善管理制度与标准化操作流程

完善的管理制度与标准化操作流程是确保浆液循环系统各项节能增效措施稳定落地、持续发挥作用的基石, 通过制度化建设, 可将设备选型优化、参数调控、维护保养等技术措施转化为可执行、可监督的日常行为规范^[5], 其中需构建多层次管理制度体系, 建立覆盖设备全生命周期的管理制度, 具体包含设备台账管理制度, 即详细记录泵、管道、阀门等关键设备的型号、参数、安装日期、检修历史及备件库存, 实现设备状态的可追溯性; 运行参数管理制度, 即明确规定各工况下泵的最优流量、扬程、浆液密度等核心参数的控制范围, 并纳入绩效考核指标; 定期维护保养制度, 即制定设备润滑、清洁、紧固件检查、易损件更换 (如泵轴密封、叶轮) 等预防性维护计划, 并明确责任人及时间节点; 能源消耗统计分析制度, 即每日统计并分析浆液循环泵组耗电量、厂用电率等指标, 并对比设计值与历史数据, 及时发现异常波动并溯源整改。

通过编制并严格执行 SOP, 可有效降低人为误操作风险, 并确保各项节能措施的一致性实施效果表 3。

表3 浆液循环系统标准化操作流程 (SOP) 示例表

操作环节	具体操作内容	执行标准	目标要求
开机前准备	检查泵体、电机地脚螺栓紧固情况; 确认润滑油位在油标中线; 检查浆液进口阀、出口阀状态; 盘车确认无卡涩。	《泵类启动前检查规范》	将开机故障率控制在<0.5%/月
启动操作	关闭出口阀→启动电机→缓慢打开出口阀→逐步调整至额定流量范围	严格按顺序操作, 避免带载启动; 电流波动 $\leq \pm 5\%$	延长电机使用寿命, 降低启动能耗
参数监控	实时监控泵出口压力、电机电流、浆液 pH 值	每小时记录一次关键参数, 偏差超限时立即报警	确保系统在高效区间稳定运行
停机操作	关闭出口阀→停止电机→关闭进口阀→若长时间停机需排空泵体及管道内浆液	《脱硫系统停运操作规程》	防止浆液沉积堵塞, 减少设备腐蚀
故障处理	根据报警信号判断故障类型(如振动超标、电流过高), 执行相应应急处置预案(如切换备用泵、联系检修人员)	《浆液循环系统故障应急预案》	平均故障处理时间 ≤ 30 分钟, 减少非计划停运损失

我厂通过实施上述系统化管理制度与 SOP 后, 浆液循环泵组的设备平均无故障运行时间 (MTBF) 由原来 850 小时提升至 1200 小时以上, 设备故障率降低约 40%; 同时因误操作导致的非计划停运次数减少 65%, 年节约维护成本及电量损失约 120 万元人民币。

3.2 强化人员培训与技能提升机制

制定并实施系统化的人员培训与技能提升计划, 定期开展针对操作人员与维护人员的专业技术培训及节能操作专项培训, 深化其对系统运行原理、设备性能参数、节能操作要点、常见故障诊断与应急处理流程的理解, 例如采用集中授课、现场实操演练、典型案例等多种培训形式, 同时每季度组织一次技能考核, 包括理论考试与现场实操评估, 考核结果与绩效挂钩, 不合格者需参加补考, 建立技能等级认证机制, 鼓励员工自主学习提升, 邀请行业专家进行专题讲座分享先进经验, 设立内部技术交流平台促进员工间知识共享, 切实增强从业人员专业素养与实操能力, 确保各项管理措施与技术改进方案得以有效落地。

3.3 建立持续监测与动态评估体系

借助基于传感器网络的覆盖浆液循环系统泵组、管道、阀门等核心设备的高精度在线监测系统与实现设备数据互联互通的工业级物联网技术, 结合每季度邀请第三方专业机构参与开展的能源效率审计及运用大数据算法挖掘能效提升潜力的多维度数据分析, 对系统实时运行状态进行秒级动态追踪并生成可视化运行曲线与全面评估, 形成季度能效评估报告, 快速识别泵组振动超标、轴承温度异常、浆液浓度波动过大等运行异常, 以及管道沿程阻力增大、电机负载不均衡、叶轮磨损导致效率下降等能效瓶颈, 制定并落实调整叶轮转速匹配实际工况、优化管道弯头布局减少阻力、更换高效机械密封件降低泄漏、采用变频调速技术适配负载变化等精准改进方案, 明确责任部门与实施时限, 建立闭环管理机制推

动浆液循环系统持续优化与能耗精准管控, 助力湿法脱硫工艺整体能效提升。

结语

总之, 浆液循环系统高效低能耗运行, 对增强湿法脱硫工艺整体性能具关键意义。本文围绕机械效率提升与能耗控制可行路径展开探讨, 具体通过原理剖析、优化措施设计及保障机制搭建等环节, 系统梳理相关内容。落实这些优化措施, 不仅能削减运行成本、增强脱硫效率, 还能为企业节能减排目标达成和绿色发展转型提供有力支撑。未来, 随相关技术持续创新与管理模式逐步完善, 浆液循环系统性能优化工作有望获更广阔实践空间。结合智能传感与大数据分析技术实时调控系统, 可进一步提升系统运行精准性; 精细化运维管理模式, 也能为能耗控制提供更可靠保障, 助力行业向更高效、更低碳方向发展。

[参考文献]

- [1] 孟衍, 刘泽阳, 丛玮. 燃煤电厂湿法脱硫系统的效率提升与运行优化研究[J]. 现代工业经济和信信息化, 2025, 15 (09): 257-259.
- [2] 张昌. 脱硫系统浆液循环泵出口管道振动原因分析与解决措施[J]. 化学工程与装备, 2025, (08): 104-106.
- [3] 段超. 新型浆液循环方式在双塔双循环脱硫系统中的应用[J]. 能源环境保护, 2021, 35 (05): 55-60.
- [4] 冯斌, 王锋涛, 闫乃明, 等. 600MW 燃煤机组脱硫浆液循环泵变频改造及节能优化研究[J]. 电力科技与环保, 2021, 37 (02): 51-57.
- [5] 高沛荣, 何未雨, 王晓乾, 等. 脱硫浆液循环系统灵活性改造及其调节性能试验[J]. 热力发电, 2019, 48 (12): 98-104.

作者简介: 雷慧慧, 1986年2月, 女, 汉族, 本科, 湖北潜江, 工程师, 机械设计。