

# 火电厂除灰系统优化运行策略及能效提升研究

裴慧菊

中电建电力运维管理有限公司 甘肃 平凉 744106

**摘要:** 火电厂除灰系统是保障机组稳定运行的关键,但现存设备效率低、控制粗放、系统耦合性差及环保压力大等问题。本文从设备选型改造、智能控制算法应用、系统流程优化等方面提出优化策略,构建包含经济性、环保性、可靠性的能效评估体系,通过仿真与实际案例验证,优化后系统单位灰量能耗显著下降,粉尘排放达标,系统可用率提升,实现能效提升与环境友好双赢。

**关键词:** 火电厂; 除灰系统; 优化运行策略; 能效提升

引言: 火电厂作为电力供应主力军,其除灰系统运行效率与环保性能至关重要。当前,部分火电厂除灰系统存在设备老化、能耗偏高、控制手段落后及粉尘泄漏等突出问题,不仅增加运营成本,还对环境造成负面影响。在此背景下,开展除灰系统优化运行策略及能效提升研究,通过技术创新与管理改进实现节能降耗、降低污染,成为推动火电厂绿色可持续发展的迫切需求。

## 1 火电厂除灰系统运行现状与问题分析

### 1.1 除灰系统基本组成与工作原理

(1) 机械除灰: 核心设备包括刮板输送机、斗式提升机及埋刮板输送机,通过机械传动实现灰渣输送。刮板输送机利用链条带动刮板在封闭槽体内移动,将灰渣从锅炉下联箱输送至灰库;斗式提升机通过链条或皮带牵引料斗,垂直提升灰渣至指定高度,适用于短距离、高落差输送场景,但设备运行中易出现刮板磨损、链条松动等问题。(2) 气力除灰: 分为正压浓相和负压稀相两种形式。正压浓相系统以压缩空气为动力,通过仓泵将灰渣以高浓度(料气比30-50kg/kg)输送至灰库,输送距离可达数百米;负压稀相系统利用风机在管道内形成负压,将灰渣以低浓度(料气比5-15kg/kg)吸入并输送,适用于分散灰点收集,但输送能耗较高。(3) 水力除灰: 传统系统通过高压水泵将灰渣与水混合形成灰浆,经管道输送至灰场;新型节水技术采用高浓度灰浆输送(灰水比1:3),搭配脱水仓回收水资源,相比传统系统节水60%以上<sup>[1]</sup>。

### 1.2 典型除灰系统运行能耗分析

(1) 电耗: 机械除灰系统中,刮板输送机电机功率通常为15-37kW,吨灰电耗8-12kWh;气力除灰系统的罗茨风机功率达75-160kW,吨灰电耗15-25kWh;水力除灰系统的高压水泵功率为55-110kW,吨灰电耗10-18kWh,其中风机、水泵电耗占系统总电耗的70%以上。(2) 水耗:

传统水力除灰系统吨灰耗水量15-20m<sup>3</sup>,若电厂日排灰量500吨,日均耗水7500-10000m<sup>3</sup>;新型节水系统吨灰耗水量降至5-8m<sup>3</sup>,虽大幅节水,但仍需定期补充循环水以维持系统稳定。(3) 维护成本: 机械除灰设备的刮板、链条每3-6个月需更换,单次维护成本0.8-1.5万元;气力除灰系统的仓泵密封圈、管道耐磨衬里年更换成本约2-3万元;水力除灰系统的管道结垢清理、水泵叶轮修复年均花费1.2-2万元,维护成本占系统运行成本的25%-35%。

### 1.3 现存问题与瓶颈

(1) 设备效率低下: 部分电厂风机风量与实际灰量不匹配,存在“大马拉小车”现象,风机运行效率仅60%-70%;刮板输送机因灰渣湿度不均易出现卡涩,输送效率较设计值低15%-20%;水泵扬程冗余过大,实际运行工况点偏离高效区,能源浪费严重。(2) 控制策略粗放: 多数电厂除灰系统采用手动调节或固定参数运行,无法根据锅炉负荷、灰渣产量实时调整设备运行状态。例如,当锅炉负荷下降时,若仍维持原有输送频率,易导致管道堵塞或设备空转,增加能耗与故障风险。(3) 系统耦合性差: 除灰系统与锅炉、电除尘、灰库等子系统缺乏协同控制,各系统独立运行。如电除尘灰斗积灰量超标时,除灰系统无法及时响应,易引发灰斗坍塌;灰库料位信号未与输送设备联动,常出现满库或空库现象,影响整体运行效率。(4) 环保压力: 部分老旧除灰系统密封性能差,粉尘泄漏浓度达50-80mg/m<sup>3</sup>,超出国家标准( $\leq 20\text{mg/m}^3$ );水力除灰系统若灰浆管道泄漏,可能导致土壤、水体污染;灰场扬尘控制不当,遇大风天气易引发二次污染,面临环保部门处罚风险。

## 2 火电厂除灰系统优化运行策略研究

### 2.1 设备层面优化

(1) 高效设备选型: 优先选用低比转数、高效率风机,如高效离心风机效率可达85%-90%,较传统罗茨风

机降低电耗15%~20%；管道采用双金属复合耐磨管，其使用寿命较普通碳钢管道延长3~5倍，减少管道更换频次；针对高灰量工况，选用大输送量仓泵，单台仓泵小时输送量提升至50~80吨，降低设备配置数量。（2）设备改造技术：对风机、水泵实施变频调速改造，通过PLC控制系统根据灰量实时调节转速，当灰量下降30%时，变频改造后电机功率可降低50%以上；在气力除灰系统排气端加装余热回收装置，利用高温排气加热厂区供暖水，单套系统年节约标准煤100~150吨；对刮板输送机刮板进行耐磨涂层处理，采用陶瓷复合涂层，磨损量降低60%，延长刮板更换周期至1~2年<sup>[2]</sup>。（3）设备维护策略：建立预测性维护体系，通过安装振动传感器、温度传感器实时监测设备运行状态，当风机轴承温度超过70℃或振动值超标时，系统自动报警并推送维护建议，避免突发性故障；实施设备寿命周期管理，根据设备运行年限、工况参数制定分级维护计划，如新投运水泵前2年每6个月维护1次，运行5年后每3个月维护1次，将维护成本降低20%~25%。

## 2.2 控制策略优化

（1）智能控制算法应用：引入模糊控制算法优化气力除灰系统，通过模糊控制器根据灰斗料位、管道压力实时调整压缩空气压力与输送频率，使料气比稳定在35~45kg/kg的最佳区间，输送效率提升10%~15%；采用神经网络优化模型，基于历史运行数据（锅炉负荷、灰渣成分、环境温度）预测灰量变化，提前调整设备运行参数，减少系统响应延迟，降低管道堵塞概率。（2）基于工况的动态调节：建立工况联动调节机制，当锅炉负荷从100%降至60%时，系统自动将风机转速从1450r/min降至900r/min，水泵流量从200m<sup>3</sup>/h降至120m<sup>3</sup>/h，同步减少输送周期，避免设备空转；针对灰渣湿度波动，通过湿度传感器实时反馈数据，当湿度超过25%时，自动增加管道吹扫频次，防止灰渣结块堵塞。（3）多系统协同控制：构建除灰-锅炉-脱硫协同控制平台，当锅炉燃烧工况变化导致灰量骤增时，平台及时向除灰系统发送信号，提前启动备用输送设备，同时协调脱硫系统调整吸收塔液位，避免灰渣对脱硫效率的影响；实现除灰系统与灰库料位、卸灰设备的联动，当灰库料位低于10%时，自动降低除灰系统输送量，料位高于80%时，启动备用卸灰装置，确保灰库稳定运行。

## 2.3 系统流程优化

（1）气力除灰系统参数优化：通过流体力学模拟计算，确定最佳输送浓度与流速，针对长距离（>300米）输送，将料气比控制在40~50kg/kg，流速控制在6~8m/s，减少管道磨损与能耗；优化管道布置，采用大曲率半径

弯头（曲率半径 $\geq 5$ 倍管径），降低局部阻力损失，使系统压力损失减少20%~30%；根据各灰点灰量差异，采用分仓、分压输送方式，避免“一管多送”导致的输送不均问题。（2）水力除灰节水技术：升级灰浆脱水系统，采用高效真空脱水机，脱水后灰渣含水率降至15%以下，脱水产生的清水回收率达90%以上，回用于水力除灰系统，吨灰耗水量进一步降至3~5m<sup>3</sup>；推行“干除灰为主、水力除灰为辅”的混合除灰模式，对电除尘一、二电场粗灰采用干除灰，三、四电场细灰采用水力除灰，较全水力除灰系统节水70%以上。（3）灰渣资源化利用：将干灰用于水泥生产，作为掺合料替代15%~20%的水泥熟料，单厂日排灰500吨的电厂，年可生产水泥掺合料15万吨，创造经济效益800~1000万元；利用灰渣制备新型建筑材料，如蒸压加气混凝土砌块，其抗压强度达3.5MPa以上，符合建筑用砖标准；将灰渣用于农业改良，通过添加改良剂降低灰渣pH值，用于盐碱地改良，每亩地施用灰渣5~10吨，可使土壤含盐量降低30%~40%，提升作物产量<sup>[3]</sup>。

## 3 火电厂除灰系统能效评估模型构建

### 3.1 能效评估指标体系

（1）经济性指标：核心包含单位灰量能耗与运行成本。单位灰量能耗以“kWh/吨灰”为单位，气力除灰系统需控制在15~25kWh/吨灰，水力除灰系统需低于18kWh/吨灰，机械除灰系统需 $\leq 12$ kWh/吨灰；运行成本涵盖电耗成本（按0.55元/kWh计算）、水耗成本（按3元/m<sup>3</sup>计算）及维护成本，综合成本需控制在15~25元/吨灰，其中单位灰量能耗权重占经济性指标的60%，运行成本占40%。（2）环保性指标：重点监测粉尘排放浓度与废水排放量。粉尘排放浓度需符合国家标准 $\leq 20$ mg/m<sup>3</sup>，气力除灰系统密封点泄漏浓度需 $\leq 10$ mg/m<sup>3</sup>；废水排放量方面，新型水力除灰系统吨灰废水排放量需 $\leq 0.5$ m<sup>3</sup>，且回用率 $\geq 90\%$ ，无外排废水；环保性指标中，粉尘排放浓度权重为55%，废水排放量权重为45%，超标一项即扣减30%环保评分。（3）可靠性指标：主要评估设备故障率与系统可用率。设备故障率按“故障次数/千小时运行”计算，风机、水泵等关键设备故障率需 $\leq 0.2$ 次/千小时，刮板、管道等辅助设备故障率需 $\leq 0.5$ 次/千小时；系统可用率需 $\geq 95\%$ ，即年故障停机时间 $\leq 438$ 小时（按年运行8760小时计），其中设备故障率权重占40%，系统可用率权重占60%。

### 3.2 能效评估方法

（1）数据包络分析（DEA）：以除灰系统的电耗、水耗、维护成本为输入指标，以灰渣输送量、粉尘达标率、系统可用率为输出指标，构建DEA-BCC模型。通过计算技

术效率 (TE)、纯技术效率 (PTE) 与规模效率 (SE), 判断系统是否处于最优运行状态, 当  $TE = 1$  时为 DEA 有效,  $TE < 1$  时需通过调整输入输出参数优化, 适用于多输入多输出的能效横向对比。(2) 层次分析法 (AHP): 将能效评估分为目标层 (系统综合能效)、准则层 (经济、环保、可靠性)、指标层 (9项具体指标), 通过专家打分构建判断矩阵, 计算各指标权重。例如, 经济性指标权重设为 0.4, 环保性 0.35, 可靠性 0.25, 再结合指标实际值与标准值的比值, 加权计算综合能效得分 (满分 100 分), 得分  $\geq 85$  分为优秀, 60-84 分为合格,  $< 60$  分为待优化。(3) 生命周期评价 (LCA): 覆盖除灰系统 “设计-运行-退役” 全周期, 量化计算各阶段的能源消耗 (如设备制造能耗、运行电耗)、环境影响 (如粉尘排放、灰渣填埋占地) 及经济成本。例如, 运行阶段占全周期能耗的 80% 以上, 灰渣资源化利用可减少 30% 的环境影响, 适用于长期能效与可持续性评估<sup>[4]</sup>。

### 3.3 仿真模型与案例验证

(1) 基于 Fluent/CFD 的流场模拟: 建立气力除灰管道三维模型, 模拟不同料气比 (30-50kg/kg)、流速 (6-10m/s) 下的流场分布, 分析管道压力损失与灰粒沉积风险。结果显示, 料气比 45kg/kg、流速 8m/s 时, 管道阻力损失最小 ( $\leq 5\text{kPa/m}$ ), 灰粒沉积量仅 0.2kg/m, 与实际运行数据偏差  $\leq 5\%$ , 为参数优化提供依据。(2) 基于 MATLAB/Simulink 的控制策略仿真: 搭建模糊控制算法仿真模型, 输入锅炉负荷 (60%-100% 额定负荷)、灰斗料位 (0-100%) 等变量, 输出风机转速、输送频率等控制参数。仿真结果表明, 优化后系统响应时间缩短至 5 秒

以内, 管道堵塞概率从 15% 降至 3%, 与理论计算值吻合度达 92%。(3) 实际电厂数据验证: 选取某 300MW 火电厂作为案例, 对比优化前后能效指标。优化前: 单位灰量能耗 22kWh/吨灰, 粉尘排放浓度 35mg/m<sup>3</sup>, 系统可用率 90%; 优化后 (采用变频改造+智能控制): 单位灰量能耗降至 16kWh/吨灰 (下降 27%), 粉尘排放浓度 18mg/m<sup>3</sup> (达标), 系统可用率提升至 96%, 综合能效得分从 68 分升至 88 分, 验证了评估模型的准确性与优化策略的有效性。

### 结束语

综上所述, 本文针对火电厂除灰系统运行痛点, 从设备升级、智能调控、流程再造等多维度提出优化策略, 并构建覆盖经济、环保、可靠性的综合能效评估模型。实践验证表明, 优化后的系统单位灰量能耗显著降低, 排放指标全面达标, 运行稳定性大幅提升, 切实推动了火电厂降本增效与绿色转型。未来需持续融合新技术, 深化系统协同与资源循环利用, 为行业高质量发展提供长效支撑。

### 参考文献

- [1] 李冰浪. 火电厂集控运行节能降耗技术[J]. 电力设备管理, 2024, (20): 254-256.
- [2] 李冰浪. 火电厂集控运行中电气系统节能优化研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(10): 170-172.
- [3] 魏峰涛. 智慧化技术在火电厂自动控制管理系统中的应用[J]. 数字技术与应用, 2024, 42(10): 15-17.
- [4] 王会宝. 火电厂电气运行优化与节能降耗的技术探索[J]. 工程与建设, 2024, 38(04): 938-940.