

火电厂除灰除渣系统智能化改造方案

马战南, 刘江, 贺孝峰, 张聪聪
国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500
DOI:10.61369/WCEST.2025070007

摘要 : 随着燃煤机组煤质劣化趋势加剧, 火电厂除灰除渣系统面临灰量激增、能耗攀升等挑战。本文以某600MW机组为研究对象, 针对传统气力输灰系统存在的控制单一、效率衰减、管路磨损等问题, 提出基于双套管智能控制技术的改造方案。通过构建动态参数调节模型、优化压力测点布局及流量控制策略, 实现系统出力稳定前提下耗气量降低25%, 显著提升生产效率与设备可靠性。研究为火电厂智能化改造提供了可复制的技术路径。

关键词 : 火电厂; 除灰除渣系统; 智能化改造; 双套管控制; 气力输送

Intelligent Transformation Scheme of Ash Removal System in Thermal Power Plant

Ma Zhannan, Liu Jiang, He Xiaofeng, Zhang Congcong

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD., Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : With the worsening deterioration of coal quality in coal-fired units, thermal power plants face challenges such as surging ash volume and rising energy consumption in their ash removal systems. Taking a 600MW unit as a case study, this paper proposes an intelligent control system based on dual-casing technology to address issues in traditional pneumatic ash conveying systems, including single-control mechanisms, efficiency degradation, and pipeline wear. By establishing dynamic parameter adjustment models, optimizing pressure measurement point layouts, and refining flow control strategies, the system achieves a 25% reduction in gas consumption while maintaining stable output, significantly enhancing production efficiency and equipment reliability. This research provides a replicable technical roadmap for intelligent transformation in thermal power plants.

Keywords : thermal power plant; ash removal and slag removal system; intelligent transformation; double tube control; pneumatic conveying

引言

当前火电厂普遍采用的气力输灰系统在煤质波动加剧和环保要求升级的双重压力下, 暴露出控制策略僵化、管路磨损失控、能效衰减显著三大技术瓶颈。传统PLC定值控制模式难以适应灰量动态变化, 系统响应延迟达30至60秒, 导致空压机长期高负荷运行。实测数据表明, 当煤质灰分从32%升至41%时, 单位输灰耗气量激增40% (从8.2 Nm³/t增至11.5 Nm³/t), 能耗较设计值偏高18%至25%。冗余配置的空压机进一步推高厂用电率, 部分机组空压机能耗高达1850kW, 远超实际需求。与此同时, 固定输送压力 (0.5-0.6MPa) 与灰柱密度超限 ($>1.2 \text{ t/m}^3$) 导致管路年均磨损速率达0.3mm, 弯头等关键部位甚至达到0.5mm/年, 由此引发的泄漏风险使维护成本占比高达运营费用的12%, 频繁停机检修更严重影响发电连续性。更为严峻的是, 传统定时吹灰模式脱离实际积灰状态, 造成受热面热阻增加15%至20%^[1], 迫使锅炉效率下降2至3个百分点, 过量消耗的吹灰介质进一步加剧能源浪费, 盲目吹灰还可能加速管壁磨损^{[2][3]}。

一、系统现状与问题分析

(一) 传统系统技术缺陷

现有电除尘气力输灰系统采用的PLC定值控制模式在应对复杂工况时暴露显著缺陷, 其核心问题集中体现在控制滞后性、参数僵化与监测失效三个维度。首先, 控制响应延迟导致系统无法

适应灰量动态波动。当煤质变化引起灰量突变时, 系统需30至60秒方能完成调节动作, 滞后期内灰柱密度会突破1.2 t/m³临界值, 形成高阻力灰栓。以某600MW机组为例, 灰分波动10个百分点 (32%→42%) 即造成管道压损陡增45%, 迫使空压机频繁启停, 单位输灰能耗激增40% (达11.5 Nm³/t)。其次, 参数僵化使系统丧失工况适应性。固定输送压力设定值 (0.5-0.6MPa)

与煤质灰分（28%–45%）严重脱节，高灰分煤种输送时压力不足导致堵管频发，低灰分时又因过压加速管道磨损（局部磨损率达0.5mm/年）。某电厂实测显示，灰分45%工况下采用0.55MPa定值输送，堵管率高达每月3.2次，而实际需求压力应达0.65MPa以上^[4]。第三，监测盲区直接削弱故障预判能力。15米间距的压力测点布局难以捕捉局部流场异常，当弯头或变径处出现初生灰栓时（压差突变>0.03MPa），系统因无法及时感知而错失调控窗口期。CFD流场模拟证实，传统布局对<5米的局部堵塞感知延迟超过20秒，致使75%的堵管事故未能提前预警。

（二）典型案例分析

某电厂运行数据实证揭示了煤质灰分波动对气力输灰系统的链式冲击：当入炉煤灰分从32%攀升至41%时，系统性能呈现断崖式劣化。耗气量指标从8.2 Nm³/t激增至11.5 Nm³/t（增幅40.2%），远超设计允许波动范围。其根源在于灰分升高触发灰量骤增，而传统定值控制系统未能动态调整输送参数，迫使空压机持续超压运行。经热工计算，此工况下实际需气量较设定值冗余达28%，导致单台空压机年耗电量增加逾120万千瓦时^[5]。

输灰效率同步恶化，单次作业周期从基准值延长至45分钟，较设计周期超限34%。灰柱密度持续突破1.2 t/m³临界值，在水平管段形成高阻灰栓。CFD流场模拟显示，灰栓导致局部流速衰减35%，迫使系统反复执行清堵操作。某660MW机组因此类延误导致的年等效停运时间长达210小时，损失发电量逾1.5亿千瓦时。

更严峻的是设备损耗加速，管路磨损速率飙升至0.5mm/年，较灰分32%工况恶化67%。微观分析表明，高灰分煤种产生的硬质灰粒（莫氏硬度>6）在0.6MPa输送压力下，对90°弯头冲蚀速率达常规工况的2.3倍^[6]。

二、智能化改造技术方案

（一）双套管智能控制系统架构

为解决传统气力输灰系统的控制缺陷，本文构建了“监测层-控制层-执行层”三级智能控制架构，实现从感知到执行的闭环优化。监测层部署激光颗粒传感器实时捕捉灰流浓度梯度（精度±1%），配合±0.5%精度的压差变送器构建管网易损区三维压力场，并在90°弯头等关键节点加装声波测堵装置（灵敏度≤0.02MPa压差突变）。某600MW机组实测表明，该层每秒生成超过2000组数据包，实现灰柱密度（0.8–1.2t/m³）、局部流态异常的毫秒级感知。

控制层依托边缘计算单元集成模糊PID算法，建立灰量-压力-流速的动态映射模型。当煤质灰分波动触发灰量变化时，算法通过隶属度函数自适应调整PID参数，将输送压力设定值响应时间压缩至5秒内。在某案例中，灰分从33%突增至40%时，控制系统在4.2秒内完成压力值从0.52MPa到0.63MPa的动态修正，避免传统系统60秒延迟导致的灰栓风险^[7]。

执行层采用变频输送风机（调速范围10–50Hz）与智能调节阀（调节比50:1）协同作用。当控制层输出新参数时，变频风机在3秒内切换转速（如从45Hz降至38Hz），同步调节阀开度

从80%收至65%，实现流量精准控制。某电厂改造后数据显示，该执行机制使系统在灰分35–45%波动工况下，耗气量稳定在8.6±0.3Nm³/t，较改造前波动幅度收窄82%^[8]。

（二）关键技术创新

1. 动态参数调节模型

建立灰量压力流速三维映射关系：

$$P_{\{set\}}=0.45+0.015 \times (A_{\{ash\}}30)+0.008 \times (Q_{\{ash\}}50)$$

其中：

$P_{\{set\}}$ 为设定压力 (MPa)

$A_{\{ash\}}$ 为灰分含量 (%)

$Q_{\{ash\}}$ 为灰量 (t/h)

2. 测点优化布局

采用CFD数值模拟确定最优监测点：

水平管段：每8m设置压差测点

垂直管段：每5m设置浓度监测点

弯头部位：增设声波测堵装置

三、改造实施与效果验证

（一）工程实施要点

在火电厂除灰除渣系统智能化改造实施阶段，需聚焦设备升级、网络架构与软件平台三大核心环节，形成协同增效的技术闭环。设备硬件改造首先针对管路磨损顽疾，采用8mm增厚型碳化硅耐磨内衬管道（莫氏硬度≥9.2），其弯头部位加装强化陶瓷贴片，经CFD冲蚀模拟验证可抵御灰粒流速>25m/s的长期冲刷。同步部署的智能执行机构集成压力-流量双反馈模块，例如在输送风机出口装配的电动调节阀配备0.1%精度位移传感器，配合液压伺服系统实现开度毫秒级调节（调节比50:1）。某660MW机组改造后实测显示，管路年磨损率从0.5mm降至0.22mm，弯头寿命延长至3.5万小时以上。

系统集成架构依托工业以太网构建全域数据通道，采用环形冗余拓扑（ERPS协议）确保千兆带宽下的传输可靠性。关键节点部署工业级交换机（防护等级IP67），通过OPC UA协议实现与现场132个传感器、28台执行器的互联互通，时延控制在8ms以内。特别在粉尘浓度>30mg/m³的恶劣环境中，采用铠装光纤替代传统网线，数据包丢失率降至0.01%以下。某项目运行数据表明，该系统每秒处理4.5万组实时数据流，为控制层提供<0.5秒的工况刷新周期。

（二）改造效果评估

单位耗气量从11.5 Nm³/t降至8.6 Nm³/t（降幅25.2%），其技术根源在于双套管智能控制系统的动态调节能力。通过激光颗粒传感器实时监测灰流密度，结合模糊PID算法动态调整输送压力（如灰分每增加1%，压力自动提升0.015MPa），彻底消除了传统定值控制导致的气量冗余。以某600MW机组年输灰量12万吨计，此项年节气量达34.8万Nm³，折合空压机电耗节约逾280万千瓦时。

输灰周期由45分钟/次缩短至32分钟（效率提升28.9%），

关键在于破解了灰栓形成瓶颈。声波测堵装置以 $\leq 0.02\text{ MPa}$ 灵敏度捕捉流场异常，配合前馈控制（依据给煤量预调阀门开度），使灰柱密度稳定在 $0.9\text{--}1.1\text{ t/m}^3$ 安全区间^[9]。改造后单次输灰时效提升13分钟，全年减少有效运行时间超650小时，直接降低厂用电率0.15个百分点。

管路磨损率从 0.5 mm/年 锐减至 0.25 mm/年 （降幅50%），得益于“材料+控制”双重革新。8mm碳化硅耐磨管道（抗冲蚀强度提升3倍）与智能流速调控协同作用：当灰分 $>40\%$ 时，系统自动将弯头流速限制在 18 m/s 以下（常规工况 22 m/s ），结合变频风机平滑启停，彻底消除流态突变对管壁的冲击。某电厂三年跟踪数据显示，弯头更换周期从8个月延长至22个月，年维护成本下降37%^[10]。

空压机能耗由 1850 kW 降至 1420 kW （节约23.2%），本质是系统能效的重构。智能调节阀（调节比50:1）与压力-流量解耦控制技术的应用，使供气压力波动范围收窄至 $\pm 0.03\text{ MPa}$ （改造前 $\pm 0.1\text{ MPa}$ ）。在灰分38%典型工况下，空压机负载率稳定在75%–82%高效区间（改造前频繁在45%–95%跳变），单台年节电量达376万千瓦时，相当于减排二氧化碳3740吨。

表1 效果评估数据

指标	改造前	改造后	降幅
单位耗气量	11.5	8.6	25.2%
输灰周期	45min	32min	28.9%
管路磨损率	0.5	0.25	50%
空压机能耗	1850kW	1420kW	23.2%

实测数据显示，在灰分42%工况下，系统连续运行72小时未发生堵管现象，输灰稳定性显著提升。

四、结论

通过双套管智能控制技术的工程化应用，实证了火电厂除灰除渣系统在运营经济性、设备可靠性及环保绩效的全面提升。运营成本降低18%–22%的核心驱动力在于动态调优机制的建立；基于灰量-压力实时映射模型（如 $P_{\text{set}} = 0.45 + 0.015 \times (A_{\text{ash}} - 30)$ ），系统自适应调整输送参数，使单位耗气量削减25.2%（ $11.5 \rightarrow 8.6 \text{ Nm}^3/\text{t}$ ），结合变频风机精准供气，空压机能耗直降23.2%（ $1850 \rightarrow 1420 \text{ kW}$ ），仅此两项即实现年运行费用节约逾300万元（以600MW机组计）。设备寿命延长1.5–2倍得益于“智能控制+材料升级”双轨策略：模糊PID算法将弯头流速控制在 18 m/s 安全阈值内（灰分 $>40\%$ 工况），协同8mm碳化硅耐磨管道（抗冲蚀强度3倍于常规钢管），使管路年均磨损率从 0.5 mm 锐减至 0.25 mm ，关键设备大修周期从12个月延至30个月以上，年维护成本下降37%。环保指标系统性达标表现为三层优化：直接减排层面，吨灰输送电耗下降28.5%，折算年减碳量达3740吨；间接协同层面，锅炉吹灰系统联动优化使蒸汽消耗降低40%，主汽温度波动收窄至 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；末端管控层面，LabVIEW平台实时监测粉尘逃逸率，确保排放浓度稳定 $\leq 15\text{ mg/Nm}^3$ 。该技术路径为火电厂实现供电煤耗降低 1.5 g/kWh 、厂用电率下降0.8个百分点的深度低碳转型奠定基础。

参考文献

- [1] 王珏, 余忠喜. 900 MW 机组灰渣控制系统 DCS 改造及分析 [J]. 上海节能, 2021, (10): 1150–1153.
- [2] 吴贤豪, 姜宝辉, 杨景焜, 王文欣, 朱迪. 燃煤电厂除渣系统抑垢研究 [J]. 能源工程, 2024, 44 (03): 36–39.
- [3] 李季, 沈东华. 某火电厂空压机站设计优化探讨 [J]. 能源研究与利用, 2025, (02): 50–52.
- [4] 桑国友. 火力发电厂脱硫除灰超净改造节能降耗技术研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65 (23): 167–169.
- [5] 孙亮, 程器. 高声强可调声波吹灰器在火电厂锅炉中的应用 [J]. 电力设备管理, 2024, (21): 64–66.
- [6] 郭炯. 火电厂除灰系统空压机站的优化设计 [J]. 中国机械, 2024, (04): 20–23.
- [7] 杨玉珍, 钱云亮, 皮中霞. 燃煤电厂除灰系统节能优化控制及其应用 [J]. 节能与环保, 2023, (08): 56–58.
- [8] 施以文. 空预器加装声波吹灰器效果研究 [J]. 锅炉制造, 2022, (05): 29–30+43.
- [9] 郁延亮. 双套管气力除灰技术在火电厂省煤器除灰系统的应用 [J]. 电工技术, 2022, (10): 185–187.
- [10] 宋新元. 火电厂气力输灰程控系统设计分析 [J]. 机械管理开发, 2022, 37 (02): 243–244.