

# 电站锅炉用蒸汽吹灰系统优化方式研究

刘超<sup>1</sup> 李娟<sup>2</sup> 王龙<sup>1</sup>

1. 低碳热力发电技术与装备全国市场监管重点实验室(特种设备安全与节能) 中国特种设备检测研究院

北京 100029

2. 中特检焱晶燃烧设备检测(北京)有限公司 北京 101300

**摘要:** 电站锅炉蒸汽吹灰系统是保障锅炉传热效率、降低能耗的核心设备,其运行性能对电厂低碳化水平至关重要。当前系统普遍存在吹灰不均、能耗高及安全隐患等问题,制约了热力发电行业绿色转型。本文基于系统工作原理与运行特性,深入剖析现存问题成因,从参数精准控制、智能系统构建、设备结构改进及低碳策略制定四个方面提出优化方案,并结合CCUS适配、氢能耦合及智慧电厂集成等场景探讨其应用前景,为电站锅炉节能降碳提供理论与技术支持。

**关键词:** 电站锅炉; 蒸汽吹灰系统; 低碳技术; 优化设计

引言: 在“双碳”目标引领下, 热力发电行业面临严苛的节能降碳要求, 电站锅炉作为核心用能设备, 其热效率提升成为关键突破口。锅炉受热面积灰结渣会导致传热阻力增加, 使供电煤耗上升5%-10%, 同时加剧污染物排放。蒸汽吹灰系统凭借对粘性积灰的良好清除效果, 成为电站锅炉的主流清灰设备。然而, 传统系统采用固定参数与定时控制模式, 易出现“过吹”或“欠吹”问题, 不仅浪费蒸汽资源, 还可能造成受热面损伤。近年来, 智能感知与低碳技术的发展为系统优化提供了新路径。本文聚焦蒸汽吹灰系统的性能提升, 通过解析运行机理、排查现存问题, 提出针对性优化策略, 助力智慧电厂建设与低碳发电目标实现。

## 1 电站锅炉蒸汽吹灰系统理论基础与运行特性

### 1.1 蒸汽吹灰系统工作原理

蒸汽吹灰系统通过抽取锅炉产生的高温高压蒸汽, 经减压稳压处理后输送至吹灰器喷头, 以高速射流形式冲击受热面, 利用蒸汽的动能与热能实现积灰清除。系统主要由蒸汽管路、吹灰器本体及程控装置三部分组成, 其中吹灰器按安装位置分为炉膛短吹灰器、水平烟道长伸缩式吹灰器及空预器吹灰器三类。工作时, 电动驱动装置带动吹灰管旋转进退, 机械式阀门控制蒸汽启停, 喷头的连续变径设计使蒸汽射流形成扇形覆盖区域, 确保受热面无吹扫死角。高温蒸汽不仅能直接冲刷积灰, 其温度优势还可软化粘性灰渣, 提高清除效率, 尤其适用于结渣性强、灰熔点低的积灰场景。该原理决定了系统性能与蒸汽参数、喷头结构及运行模式密切相关, 为后续优化提供理论依据。

### 1.2 电站锅炉积灰特性分析

电站锅炉积灰特性受煤种特性、燃烧工况及受热面结构多重影响, 呈现明显的区域差异化特征。炉膛燃烧区因温度高达1000℃以上, 易形成熔融态结渣, 冷却后紧密附着于水冷壁表面, 硬度高且难以清除; 水平烟道区域烟温降至400-600℃, 飞灰颗粒易发生惯性碰撞沉积, 形成疏松型积灰层, 厚度随运行时间呈线性增长; 尾部竖井受热面烟温较低, 积灰以硫酸氢铵等腐蚀性物质为主, 兼具粘性与腐蚀性双重危害。积灰生长过程存在“加速-稳定”两阶段特征, 初始阶段积灰厚度快速增加, 当达到临界厚度后, 吹灰清除与新生成积灰形成动态平衡。另外, 大比例掺烧经济煤种会导致灰分含量提升30%以上, 显著加剧积灰速率与难度, 需针对性优化清灰策略<sup>[1]</sup>。

### 1.3 蒸汽吹灰系统运行特性参数

蒸汽吹灰系统的核心运行参数包括蒸汽压力、温度、流量及吹灰周期、吹扫时间, 这些参数直接决定清灰效果与运行经济性。工业实践表明, 蒸汽压力控制在3.0-3.5MPa、温度维持450-480℃时, 可在保证清灰力的同时避免受热面损伤; 单台长伸缩式吹灰器的蒸汽流量通常为0.8-1.2t/h, 流量波动超过±10%即会导致吹扫力不足或过强。吹灰周期需匹配积灰生长速率, 传统系统多采用8-12小时固定周期, 而实际运行中, 炉膛区域积灰周期可缩短至4小时, 尾部区域则可延长至16小时。运行参数还存在耦合效应, 如蒸汽温度降低会导致粘度上升, 需通过提高压力补偿吹扫力, 这一特性要求参数优化需采用多变量协同调控模式。

## 2 电站锅炉蒸汽吹灰系统现存问题分析

### 2.1 吹灰效果不佳问题

吹灰效果不佳是当前系统最突出的问题, 主要表现

为局部积灰残留、受热面清洁度不均。其根源在于三方面：一是参数设置僵化，固定的蒸汽压力与吹扫时间无法适配不同区域的积灰特性，如尾部低温区采用高压吹扫导致积灰压实，而炉膛区域压力不足则无法清除硬渣；二是喷头布置不合理，部分老机组吹灰器间距过大，存在10%-15%的吹扫死角，尤其在受热面管束密集区域更为明显；三是蒸汽质量缺陷，管路疏水不彻底导致蒸汽带水率超过5%，降低射流冲击力的同时，还会使积灰遇水结块。某电厂实测数据显示，优化前锅炉受热面平均积灰厚度达3mm，局部区域超过8mm，导致热效率较设计值低2.3%。

## 2.2 设备运行安全隐患

设备运行安全隐患主要集中在吹灰器本体与管路系统，直接威胁锅炉运行稳定性。长伸缩式吹灰器的伸缩臂因高温变形易出现卡涩故障，发生率高达25%，卡涩后若未及时停机，会导致吹灰管被烧损，引发炉膛泄漏事故；吹灰管采用的耐热合金钢在频繁冷热交替冲击下，易产生疲劳裂纹，使用寿命缩短至设计值的60%-70%；蒸汽管路的阀门密封件因长期承受高压冲刷，泄漏率超过8%，不仅浪费蒸汽，还可能造成人员烫伤<sup>[2]</sup>。此外，传统程控系统缺乏故障自诊断功能，设备异常响应时间超过30分钟，进一步扩大了安全风险，某机组曾因吹灰器卡涩未及时处理，导致受热面爆管停机，经济损失超百万元。

## 2.3 能耗与环保问题

能耗偏高与环保性能不足是系统面临的核心低碳挑战。传统系统采用“全面吹扫”模式，无论受热面积灰情况如何均按固定程序运行，导致蒸汽消耗量偏大，某600MW机组日均吹灰蒸汽消耗达120t，占锅炉蒸汽总产量的3.2%；过量吹扫使锅炉排烟温度升高15-20℃，排烟热损失增加1.5%，间接导致供电煤耗上升0.8g/kWh。环保方面，不合理的吹灰操作会破坏锅炉燃烧稳定性，使氮氧化物排放量增加5%-8%；蒸汽带水导致受热面低温腐蚀加剧，烟道腐蚀泄漏率提升，污染物无组织排放风险增加。同时，吹灰蒸汽冷凝水回收效率不足40%，造成水资源浪费，与电厂节水减排要求存在差距。

# 3 蒸汽吹灰系统优化方式研究

## 3.1 吹灰参数精准优化

吹灰参数精准优化采用“分区调控、动态适配”策略，基于不同区域积灰特性建立参数数据库。通过在受热面布置红外测温与超声波测厚传感器，实时监测积灰厚度与表面温度，当积灰厚度超过1mm或传热效率下降5%时触发吹灰指令。针对炉膛区域，将蒸汽压力提升至3.5-

4.0MPa，吹扫时间控制在30-40秒，增强对硬渣的破碎能力；水平烟道区域采用中压模式（2.5-3.0MPa），延长吹扫时间至60秒，确保疏松积灰彻底清除；尾部区域降低压力至1.8-2.2MPa，缩短吹扫间隔至4小时，避免腐蚀加剧。某电厂应用该优化方案后，吹灰蒸汽消耗量减少22.9%，锅炉热效率提升1.7%，验证了参数优化的有效性。

## 3.2 智能控制系统优化

智能控制系统优化以“感知-预测-调控”为核心，构建多维度智能调控体系。硬件层面，集成温度、压力、红外及图像传感器，通过5G网络实现数据毫秒级传输，构建锅炉受热面灰污特征场数字孪生模型，积灰监测精度达毫米级；软件层面，基于深度学习算法训练灰污生长预测模型，结合煤种成分、燃烧负荷等参数，提前72小时预警结焦风险，动态生成最优吹灰方案。系统具备自适应调节功能，当检测到蒸汽带水时自动开启疏水阀，压力波动超过±0.2MPa时触发稳压装置。某350MW机组应用后，吹灰频次降低19.6%，故障诊断时间缩短至2小时内，彻底解决了传统定时控制的“过吹”“欠吹”问题，设备综合效率提升18%。

## 3.3 吹灰设备结构优化

吹灰设备结构优化聚焦提升吹扫效率与运行可靠性，从喷头、吹灰管及驱动装置三方面改进。喷头采用多喷嘴矩阵设计，将传统单射流改为扇形+直射复合射流，覆盖面积扩大40%，同时通过数值模拟优化喷嘴角度，消除吹扫死角；吹灰管采用双金属复合材质，内层为耐磨陶瓷涂层，外层为耐热合金钢，使用寿命延长至原来的1.5倍，同时增加防变形导向结构，卡涩故障率降低80%；驱动装置采用伺服电机替代传统异步电机，定位精度提升至±1mm，配合扭矩传感器实现卡涩自动反转保护<sup>[3]</sup>。针对空预器吹灰器，创新设计旋转式蒸汽分配阀，使蒸汽压力波动控制在±0.1MPa内。某钢铁厂锅炉应用优化设备后，安装周期从15天压缩至3天，年维护成本降低300万元。

## 3.4 低碳运行优化策略

低碳运行优化策略围绕“节能-回收-协同”构建闭环体系。节能方面，采用蒸汽梯级利用模式，将锅炉主蒸汽经减压后用于吹灰，余热通过换热器加热除盐水，实现能量梯级利用，热回收效率提升至85%；回收方面，改造吹灰蒸汽冷凝水回收系统，采用真空闪蒸技术提高回收率至90%以上，年节约补给水2000t；协同方面，将吹灰系统与脱硫脱硝设备联动控制，吹灰前30分钟降低脱硝喷氨量，避免积灰携带氨水加剧腐蚀，同时通过精准吹灰降低排烟温度，提升脱硫吸收塔效率。某项目应用

该策略后,年节标煤6000吨,二氧化硫排放量减少30%,实现清灰与减排的协同增效,完全契合工业能效提升政策要求。

#### 4 低碳热力发电场景下的应用拓展

##### 4.1 与CCUS技术的适配性优化

CCUS技术的应用使锅炉烟气成分与流速发生变化,需针对性优化吹灰系统以保障适配性。首先,烟气中CO<sub>2</sub>浓度提升会增加气体密度,导致积灰沉降速率加快,为此将吹灰周期缩短20%-30%,并在吸收塔入口烟道增设专用吹灰器;其次,CCUS系统运行会使烟气温度降低5-10℃,积灰粘性增强,通过提高吹灰蒸汽温度至480-500℃,增强积灰软化效果;最后,优化系统控制逻辑,将CCUS装置运行状态纳入吹灰决策模型,当装置启停或负荷波动时,自动调整吹灰参数。某电厂CCUS耦合改造中,应用该优化方案后,受热面积灰厚度控制在0.5mm以内,确保了CO<sub>2</sub>捕集效率稳定在90%以上,实现吹灰系统与CCUS技术的协同运行。

##### 4.2 氢能耦合锅炉的吹灰需求

氢能耦合燃烧使锅炉运行特性发生显著变化,对吹灰系统提出新要求。氢能燃烧温度高达1400℃以上,炉膛区域结渣风险增加,为此在炉膛上部增设高频吹灰器,采用“短周期、强冲击”吹扫模式,蒸汽压力提升至4.0-4.5MPa;氢燃烧无硫排放,尾部区域积灰以飞灰为主,可降低吹灰压力至1.5-2.0MPa,延长吹扫周期至8小时,减少蒸汽消耗;同时,氢能燃烧火焰传播速度快,易出现局部热偏差,通过智能系统实时监测炉膛温度场,对高温区域提前进行预防性吹灰。某氢能耦合示范锅炉应用优化后,炉膛结渣发生率降至零,吹灰蒸汽消耗量较纯燃煤工况降低15%,既保障了燃烧安全,又兼顾了低碳效益。

##### 4.3 智慧电厂框架下的系统集成

在智慧电厂框架下,吹灰系统通过“数据集成、业

务协同、智能决策”实现深度集成。数据层面,将吹灰系统运行数据接入电厂数字孪生平台,与燃烧系统、热控系统数据融合,构建多维度分析模型;业务协同层面,实现吹灰操作与机组负荷调节联动,当机组升负荷时提前1小时完成吹灰作业,保障传热效率匹配负荷需求,降负荷时减少吹灰频次,降低能耗;智能决策层面,基于电厂全生命周期数据,通过大数据分析优化吹灰系统运维计划,预测性更换易损部件,使设备非计划停机率降低90%。某智慧电厂集成应用后,吹灰系统实现100%无人值守运行,年直接经济效益增加28.4万元,为智慧电厂的高效运行提供了重要支撑。

#### 结束语

电站锅炉蒸汽吹灰系统优化是热力发电节能降碳的关键,对提升锅炉效率、降低成本意义重大。本文从参数、控制、设备、运行四个维度提出优化方案,有效解决了传统系统效果不佳、隐患多、能耗高等问题。在低碳场景下,其与CCUS、氢能耦合及智慧电厂的集成应用,进一步提升了价值。未来研究可聚焦极端工况参数自适应调控技术,借助AI大模型提升决策精度,探索吹灰蒸汽与其他工业余热协同利用模式。持续创新下,蒸汽吹灰系统将为锅炉绿色转型提供更强支撑。

#### 参考文献

- [1]汤学义,冉桑铭,王婷,等.大容量煤粉锅炉长伸缩式蒸汽吹灰器枪管变形失效分析[J].企业科技与发展,2021,(05):84-89.
- [2]韩方东,王伟国,温光,等.电站锅炉用蒸汽吹灰系统优化方式研究[J].节能,2025,44(5):93-95.
- [3]刘道庆,李鹤,陈昊,等.基于灰污特征场感知的电站锅炉智能吹灰系统设计与应用[J].热力发电,2025,54(5):140-147.