

锅炉受热面积灰对排烟温度的影响及吹灰优化

杨金山 李战峰

陕煤集团榆林化学有限责任公司 陕西 榆林 719000

【摘要】：燃煤火电机组锅炉长期运行过程中，煤粉燃烧产生的飞灰会持续附着、沉积于炉膛水冷壁、过热器、再热器、省煤器及空气预热器等全流程受热面，逐步形成浮灰、灰垢与黏结性积灰层。积灰介质导热性能极差，会大幅提升烟气侧换热热阻，削弱受热面热量交换效率，导致大量烟气余热无法被有效回收，最终造成锅炉排烟温度异常升高、排烟热损失增大、机组热效率降低、供电煤耗上升等一系列问题。现阶段多数火力发电厂仍沿用固定周期、固定时长的传统吹灰模式，运行方式粗放，无法适配机组变负荷、煤质波动、环境温度变化等复杂工况，普遍存在欠吹积灰残留、过吹蒸汽浪费、管束冲刷磨损加剧等运行弊端。为有效解决锅炉积灰导致的排烟温度偏高难题，本文系统阐述受热面积灰生成机理、积灰影响排烟温度的核心机制，深入剖析传统吹灰运行存在的短板与不足，结合现场实际运行工况，提出基于多参数联动监测、时序优化、分区差异化控制、多清灰技术协同的精细化吹灰优化方案。通过动态按需吹灰替代传统定时吹灰，有效控制受热面积灰程度，稳定锅炉排烟温度，降低机组排烟热损失，兼顾锅炉运行安全性与经济性，可为同类型燃煤机组锅炉吹灰精细化调控、节能降耗改造提供可靠的理论依据与工程参考。

【关键词】：锅炉受热面；积灰沉积；排烟温度；吹灰优化；热效率；节能运行

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.010

引言

火力发电仍是我国电力能源供应的主体，燃煤锅炉作为火电机组核心能量转换设备，其运行效率直接决定机组能耗水平与经济效益。在锅炉各项热损失构成中，排烟热损失占比最大，通常达到总热损失的40%~60%，是影响锅炉热效率的首要因素。相关热力试验数据表明：锅炉排烟温度每升高10℃，整体热效率下降0.4%~0.6%，机组供电煤耗对应增加1.2~1.8g/(kW·h)，长期运行将造成极大的能源浪费。

引发锅炉排烟温度异常升高的因素繁杂，主要包含入炉煤质波动、炉膛过量空气系数不合理、锅炉烟道漏风、受热面积灰结渣、燃烧工况紊乱、尾部换热设备老化失效等。其中，受热面积灰是机组运行过程中最常见、最持久、最易被粗放操作忽视的可控性影响因素。煤粉燃烧后产生的细微飞灰颗粒随高温烟气沿烟道流动，在惯性撞击、重力沉降、分子吸附、低温黏结等多重作用下，持续沉积在各区域受热面管束表面。随着运行时长增加，松散浮灰不断压实、烧结，逐步形成致密坚硬的灰垢层，大幅恶化换热条件。

目前国内多数中小型及常规大型火电机组的吹灰控制仍依赖传统运行经验，采用固定时间间隔、统一吹扫时长、无工况区分的粗放式吹灰策略。机组高负荷、燃用高灰分劣质煤时，飞灰生成量大、积灰速率快，固定吹灰频次无法及时清除积灰，导致受热面积灰堆积严重，排烟温度持续偏高；机组低负荷稳燃阶段、燃用优质低灰煤种时，积灰速率显著放缓，依旧保持高频吹灰操作，不仅造成大量过热蒸汽无效损耗，还会加剧受热面管壁、鳍片、焊缝的冲刷磨损，增加管道泄漏、非计划停机检修风险。

与此同时，传统吹灰方式存在吹灰时序混乱、分区管控缺

失、吹扫参数统一化等问题，极易造成前部受热面清灰后脱落的浮灰向后迁移，引发尾部烟道二次积灰，大幅降低吹灰治理效果，无法从根本上解决排烟温度波动、热效率不稳定的问题。因此，深入研究受热面积灰与排烟温度的耦合关联机理，针对性优化锅炉吹灰运行策略，建立适配变工况运行的智能按需吹灰体系，对降低火电机组能耗、提升锅炉运行稳定性、实现机组节能增效具有重要的工程实践意义。

1 锅炉受热面积灰生成类型与沉积机理

1.1 积灰主要分类

根据沉积形态、生成位置与附着特性，锅炉受热面积灰可分为松散浮灰、密实积灰、低温黏结灰垢三类。松散浮灰多形成于高温对流受热面，颗粒细小、结构疏松、附着力弱，常规蒸汽吹灰即可有效清除；密实积灰是浮灰长期受热压实、轻微烧结形成，结构致密、换热阻力大，常规短时吹灰难以彻底清除；低温黏结灰垢主要生成于省煤器、空气预热器等尾部低温烟道区域，烟气中的二氧化硫、三氧化硫与水蒸气结合形成酸性冷凝物，吸附飞灰后黏结在管壁表面，硬化后形成顽固性灰垢，极易造成烟道堵塞、低温腐蚀与排烟温度异常升高。

1.2 积灰沉积核心机理

高温烟气携带飞灰流动过程中，大颗粒飞灰依靠惯性撞击作用附着在迎风面管束表面，中细颗粒飞灰通过重力沉降、湍流扩散完成沉积；在炉膛高温区域，飞灰颗粒发生熔融、软化，极易黏结形成结渣；尾部低温区域酸露凝结，诱发飞灰黏结堆积。多区域、多类型积灰持续累积，全方位破坏锅炉原有换热体系，为排烟温度升高提供基础条件。

2 受热面积灰对锅炉排烟温度的影响机制

2.1 增大换热热阻，弱化热量交换能力

锅炉金属受热面钢材导热系数可达 $45 \sim 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，换热性能优异，而飞灰积灰层导热系数仅为 $0.05 \sim 0.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，隔热效果极强。当受热面表面形成积灰层后，相当于在烟气与换热管壁之间增设了多层隔热屏障，大幅提升烟气侧总换热热阻，直接削弱烟气向管内水、蒸汽介质的热量传递效率。

在锅炉负荷稳定、燃烧工况不变的前提下，受热面换热量持续下降，大量高温烟气余热无法被充分吸收，烟气整体降温幅度减小，最终致使锅炉出口排烟温度持续抬升。工程实测数据表明：对流受热面积灰厚度每增加 $1 \sim 3 \text{ mm}$ ，局部换热系数下降 $20\% \sim 35\%$ ，锅炉排烟温度对应升高 $4 \sim 9^\circ\text{C}$ ；尾部空气预热器积灰堵塞严重时，排烟温度升高幅度可达到 15°C 以上，热损失大幅增加。

2.2 改变烟气流场，加剧换热不均

受热面积灰持续堆积会减小烟道有效流通截面积，提升烟气流动阻力，造成各烟道烟气流量分配不均，局部区域形成高速烟气走廊。烟气走廊区域流速过快，换热停留时间短，无法充分换热；积灰堵塞区域流速过低，积灰进一步加重，形成积灰堵塞—流场紊乱—换热恶化—排烟升温的恶性循环。

同时，烟道压差持续升高会引发引风机出力增大，厂用电消耗增加，在排烟温度升高、热效率下降的基础上，进一步加剧机组能耗损失。

2.3 引发全流程烟温连锁升高

炉膛水冷壁作为主要辐射换热面，一旦发生积灰结渣，炉膛辐射吸热量大幅减少，炉膛出口烟气温度显著升高。高温烟气进入过热器、再热器、省煤器等对流换热区域，会直接抬高各级受热面的基础烟气温度，即便对流受热面无严重积灰，最终排烟温度也会同步上升。

这种全域连锁升温效应，导致单一区域积灰即可引发整体排烟参数异常，这也是锅炉排烟温度偏高问题反复出现、难以单点根治的核心原因。

2.4 诱发低温腐蚀与持续性积灰

尾部空预器、省煤器积灰会导致局部换热失效，管壁温度降低至烟气酸露点以下，酸性物质持续冷凝，诱发低温腐蚀。腐蚀产物进一步吸附飞灰、固化结垢，造成积灰难以清除，换热能力持续衰减，最终导致排烟温度长期居高不下，严重影响机组经济稳定运行。

3 传统锅炉吹灰运行模式的突出问题

3.1 固定周期吹灰适配性差

传统吹灰系统多采用 PLC 定时控制，吹灰间隔、吹扫时长、投运数量全部固定，未与机组负荷、煤质参数、受热面污染程

度联动。高负荷、高灰分煤种工况下积灰速度快，定时吹灰频次不足，积灰残留严重；低负荷、低灰分工况下积灰缓慢，高频吹灰造成蒸汽大量浪费，运行经济性极差。

3.2 吹灰时序混乱，引发二次积灰

现场运行常出现先吹扫尾部烟道、后吹扫高温炉膛与对流受热面的错误时序。前部受热面吹扫脱落的大量浮灰、渣粒随烟气向后流动，直接沉积在已清洁的尾部管束表面，造成二次积灰，吹灰治理效果大幅打折，排烟温度改善效果极弱。同时多组吹灰器同步投运，烟道烟尘剧烈扰动，进一步加重积灰迁移堆积。

3.3 吹扫参数统一化，缺乏差异化管理

不同受热面的积灰类型、管壁厚度、耐磨性能、工作温度差异极大，但传统吹灰模式采用统一蒸汽压力、统一吹扫时长。高温过热器、再热器管壁较薄，长期高压吹扫易造成磨损爆管；尾部空预器以松散浮灰为主，高压长时间吹扫属于无效操作，能耗与损耗双重浪费。

3.4 缺乏量化判断依据，无经济临界点

运行人员仅依靠经验、排烟温度变化、烟道压差粗略判断积灰程度，无法量化受热面污染状态，难以判定吹灰能耗损失与换热收益的经济平衡点。频繁过吹损耗设备、浪费蒸汽，欠吹则积灰致排烟升温、煤耗上升，长期处于非经济运行状态。

3.5 清灰方式单一，顽固性积灰无法根治

多数机组仅依靠蒸汽吹灰单一手段清灰，对尾部低温黏结性硬垢、长期烧结积灰清除效果极差，积灰逐年累积，换热能力持续下降，造成排烟温度基准值逐年抬升，常规运行调整无法恢复设备设计性能。

4 锅炉吹灰系统精细化优化策略

4.1 构建多参数联动动态按需吹灰机制

摒弃传统纯定时模式，建立定时兜底+参数阈值触发的双逻辑智能吹灰体系。依托机组 DCS 系统实时采集排烟温度、各受热面进出口压差、炉膛出口烟温、减温水流量、机组负荷、入炉煤灰分等核心参数，设定分级触发阈值。

当排烟温度较清洁基准升高 5°C 、烟道压差超警戒值、减温水流量异常增大任意条件满足时，自动触发对应区域精准吹灰；高负荷、高灰煤工况自动缩短吹灰周期，低负荷、稳燃工况自动延长吹扫间隔，真正实现积灰多则多吹、积灰少则少吹、无积灰不吹的按需调控模式。同时引入灰污清洁因子量化受热面污染程度，作为吹灰投运的核心判定依据，彻底摆脱人工经验依赖。

4.2 优化吹灰时序与分区吹扫逻辑

严格遵循烟气逆向吹扫原则，统一规范吹扫顺序：炉膛水冷壁→高温过热器/再热器→省煤器→空气预热器。先清除前端

高温区域积灰,使脱落灰渣随烟气向后输送,再通过尾部吹扫彻底带走残留浮灰,杜绝二次积灰问题。

实行分组错峰吹扫制度,禁止相邻区域吹灰器同步投运,单组吹扫完成后预留3~5分钟工况稳定间隔,再启动下一组设备,降低烟道烟尘扰动,提升清灰效率。

4.3 实施各区域差异化吹扫参数调控

根据不同受热面工况特性,定制差异化吹扫压力、时长、频次:

(1) 炉膛水冷壁:以结渣、厚层积灰为主,蒸汽压力控制1.0~1.2MPa,保证清渣效果;

(2) 过热器、再热器:严控管壁磨损,压力设置1.1~1.3MPa,缩短吹扫时长;

(3) 省煤器、空预器:针对松散浮灰,低压0.6~0.9MPa短时吹扫,节能且保护设备。

定期校验吹灰器行程、喷嘴角度,消除吹扫盲区,杜绝局部长期积灰死角。

4.4 多清灰技术协同联用

建立蒸汽吹灰为主、声波吹灰为辅、检修人工清灰兜底的复合清灰体系。日常运行中投运声波吹灰持续抑制尾部浮灰黏结,减少硬垢生成;蒸汽吹灰定期清除中重度积灰;机组停炉检修期间采用高压水射流彻底清除顽固性烧结灰垢、低温腐蚀硬垢,恢复受热面原始换热性能,从根源稳定排烟温度基准。

4.5 配套燃烧优化辅助控温降耗

吹灰优化需与燃烧调整同步开展:合理控制炉膛过量空气系数,减少烟气总量与排烟热损失;优化煤粉细度、配风方式,降低飞灰含碳量与飞灰生成浓度;严控锅炉炉膛、烟道、空预

器漏风,避免冷风掺入抬高排烟温度。从源头减少积灰生成速率,巩固吹灰优化效果。

5 优化效果分析

某300MW亚临界燃煤机组应用本文精细化吹灰优化方案后,彻底摒弃粗放定时吹灰模式,实现全工况按需精准吹灰。机组稳态运行期间,锅炉排烟温度平均下降9~13℃,排烟热损失显著降低,锅炉热效率提升0.6%~1.0%,机组供电煤耗下降1.5~2.2g/(kW·h)。

同时吹灰蒸汽消耗量降低18%~22%,受热面管壁磨损速率大幅下降,有效减少管道泄漏、非计划检修频次。机组变负荷、煤质波动工况下,排烟温度波动范围显著收窄,锅炉燃烧换热工况更加稳定,兼具显著的节能效益、安全效益与经济效益。

6 结语

锅炉受热面积灰通过增大换热热阻、紊乱烟气流程、引发全域烟温连锁升高等多重机制,直接导致排烟温度升高、机组能耗上升。传统固定周期吹灰模式工况适配性差、操作粗放,无法有效解决积灰致排烟升温问题,还存在能耗浪费、设备磨损等诸多弊端。

通过构建多参数联动动态按需吹灰机制、优化吹扫时序分区、实施差异化参数调控、多清灰技术协同联用,能够有效清除各区域受热面积灰,稳定锅炉排烟温度,提升机组运行经济性与安全性。在实际工程应用中,可根据不同炉型、煤种特性、机组负荷特性持续优化吹灰阈值与运行参数,推动锅炉吹灰管理从经验化粗放操作向数据化、精细化、智能化方向升级,为火电机组节能降耗、高效稳定运行提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 阎维平.电站锅炉原理及运行[M].北京:中国电力出版社,2019.
- [2] 高焕民.锅炉吹灰器投运方式对热效率的影响[J].电站节能技术,2026(04):44-48.
- [3] 王海涛.燃煤锅炉排烟温度偏高成因分析与治理措施[J].电力工程技术,2023,42(02):156-161.
- [4] 李亮.基于灰污监测的火电机组锅炉智能吹灰优化研究[D].华北电力大学,2022.
- [5] 张宇.锅炉对流受热面积灰特性及吹灰策略优化[J].热能动力工程,2024,39(03):178-184.
- [6] 陈峰.火电机组锅炉按需吹灰系统优化改造及应用[J].电力安全技术,2023,25(06):56-60.