

锅炉尾部烟道高效旋流吹灰装置有效应用探究

周明, 石森, 李鹏, 马鹏兴

大唐陕西发电有限公司延安热电厂, 陕西 延安 716000

DOI:10.61369/ETQM.2026020008

摘 要 : 锅炉尾部烟道积灰结渣会使受热面的热阻增大, 导致传热效率降低、排烟温度上升, 对机组的运行经济性与安全性都会造成严重的影响。高效旋流吹灰装置利用旋流射流产生的强剪切、卷吸作用而广泛应用, 但是实际使用时存在工况匹配度不高、运行参数与热态工况不符等现象。基于此, 本文从锅炉尾部烟道高效旋流吹灰装置有效应用的基础保障、核心路径及长效保障体系三方面展开探究, 通过多维度系统优化可充分发挥装置清灰效能, 实现受热面清洁度和设备寿命的双重保障。

关 键 词 : 锅炉尾部烟道; 旋流吹灰装置; 应用

Research on the Effective Application of High-Efficiency Cyclone Flue Gas Ash Blowing Device in the Tail Flue of Boiler

Zhou Ming, Shi Sen, Li Peng, Ma Pengxing

Datang Shaanxi Power Generation Co., Ltd. Yan 'an Thermal Power Plant, Yan' an, Shaanxi 716000

Abstract : Ash and slag accumulation in boiler tail flue ducts increases thermal resistance on heated surfaces, reducing heat transfer efficiency and raising flue gas temperatures, which severely impacts both operational economy and safety of power units. Although high-efficiency swirl ash-removal devices are widely used due to their strong shear and entrainment effects from swirling jets, practical applications often face challenges such as mismatched operating conditions and deviations between operational parameters and thermal conditions. This paper investigates three key aspects for effective implementation of high-efficiency swirl ash-removal devices in boiler tail flue ducts: foundational safeguards, core operational pathways, and long-term maintenance systems. Through multidimensional system optimization, the research demonstrates how to maximize the device's ash-removal efficiency, ensuring dual benefits of enhanced heated surface cleanliness and extended equipment lifespan.

Keywords : boiler tail flue; swirl ash blowing device; application

引言

锅炉作为能源转换的重要设备, 锅炉热效率高、运行是否安全, 将对工业生产能源利用率的高低产生决定性影响。尾部烟道包括省煤器、空气预热器、脱硝反应器等重要受热面和环保设备, 飞灰随烟气携带长期运行中, 飞灰在布朗运动、惯性碰撞、热应力的作用下沉积形成积灰, 黏结性灰分随烟气温度降低也会产生结渣。积灰、结渣不仅会导致受热面换热效率降低, 还会引起空气预热器堵灰、脱硝催化剂活性下降等问题, 严重时会导致受热面超温爆管。传统蒸汽直射式、声波式吹灰技术存在清灰盲区、容易引起受热面冲刷等缺点, 高效旋流吹灰装置是基于射流动力学原理, 利用喷嘴产生的强旋流射流来实现积灰的高效剥离。但若想将该装置的运用价值全面展现出来, 需要与尾部烟道热态工况精准对接, 所以研究其适配性优化及运行管控策略, 对于提高锅炉系统综合效能具有一定的现实意义。

一、锅炉尾部烟道高效旋流吹灰装置有效应用的基础保障

(一) 尾部烟道工况与装置的耦合适配分析

旋流吹灰装置有效运用的关键在于与尾部烟道工况深度匹

配, 需要从烟气特性、积灰属性、受热面结构三个方面来建立分析体系。烟气方面主要分析流速场、湍流强度和温度梯度, 不同区域烟气流速相差 1.5 ~ 2 倍, 直接影响射流覆盖效果, 高温区要考虑介质热膨胀对射流能量衰减的影响^[1]。积灰需要取样确定黏结指数、堆积密度和成分, 黏结指数 > 0.6 需要射流更大的剪切

力，高硫积灰需要加强装置耐蚀性。受热面要根据管排、蓄热元件等结构来调整射流参数，省煤器管排间距 $\leq 100\text{mm}$ 时，射流扩散角控制在 30° 之内。尾部烟道工况与装置的耦合适配分析过程中应严格按照 GB/T16507 标准，并建立适合数据库的量化依据。

（二）基于应用需求的装置结构参数定制

以适配分析为基础，优化喷嘴、旋流组件、传动系统这三个主要部分。喷嘴出口口径和收缩角要适应射流要求，黏结性积灰用 15° 度收缩角锥形喷嘴提高流速，松散积灰用 25° 度扩张角喷嘴扩大覆盖；材质根据腐蚀性选择，高 HCl 环境用双相不锈钢，普通场合用 304 不锈钢。旋流组件依靠 30° 到 60° 叶片扭角和叶片数量的调整形成稳定的旋流场，叶片经过等离子喷涂增强耐磨。传动系统适应烟道布置，卧式用水平传动，立式用垂直升降，精度为 0.1mm/r ，迷宫式密封加外壳隔层抗高温、高尘^[2]。

（三）安装工艺对应用效能的精准把控

科学的安装工艺是旋流吹灰装置发挥应用效能的关键落地环节，应建立“基准定位-精度安装-过程校验”的全流程管控体系。安装前用三维激光扫描建立数字化模型，基准点偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$ 。用受热面中心线和烟道几何中心作为基准，用全站仪检测喷嘴角度，保证射流覆盖积灰高发区^[3]。省煤器采用错层布置，空气预热器采用径向错位安装，喷嘴和受热面距离设为出口直径的15到20倍。每组装后应实施空载试运转操作，若喷射轨迹偏差 $> 2^\circ$ 时应及时调整。

（四）调试环节的应用效能前置验证

效能前置验证操作环节，应分冷态模拟和热态实测两个阶段调试。冷态用压缩空气测试，PIV 技术检测流速场，气密性试验1.2倍额定压力下30分钟不泄漏为合格。热态在不同的负荷下检测排烟温度、壁温、烟气阻力，用红外热成像检测积灰清除率。根据问题来优化参数，例如调节喷嘴角度解决覆盖不足的问题。调试之后登记《装置应用参数手册》，并总结最优运行参数以及操作规范^[5]。

二、锅炉尾部烟道高效旋流吹灰装置有效应用的核心路径

（一）吹灰介质参数的动态匹配优化

吹灰介质参数动态优化为装置的有效利用打下了基础，根据积灰状况、工况的变化实时调整。介质压应平衡清灰阈值和冲蚀上限，根据积灰临界清除压力的试验结果确定黏结型积灰用高值、松散型积灰用低值；蒸汽介质需按温度修正压力，避免因温度下降而使射流能量损失。流量优化要结合喷嘴数量和密度，根据连续性方程计算得到最优值来保证雷诺数达到湍流临界值，使用比例积分调节阀进行闭环控制，波动幅度控制在 $\pm 5\%$ 以内^[6]。温度控制，蒸汽经汽水分离器除冷凝水防低温腐蚀，压缩空气干燥后露点比烟道最低温度低 10°C 以上防硬垢。运行中建立参数与清灰效果对照表，达到精准匹配的目的。

（二）吹灰时序的智能调控策略

吹灰时序智能控制的效果和经济性，应根据积灰规律动态安

排。为此可选用在线监测排烟温度、热流密度等指标的方式，建立积灰沉积速率预测模型，指标偏离基线时发出预警。频率采用负荷联合法，和锅炉负荷正相关，高负荷提频防快速积灰，低负荷降频并采用“长时吹扫”清深层积灰。在此过程中可根据积灰厚度来调节吹扫时间，建立关联曲线，采用分段吹扫和效果反馈的模式；顺序为从后到前、从高到低，空气预热器→省煤器→脱硝反应器依次进行，防止二次污染。利用智能控制可以明显减少介质的消耗^[7]。

（三）变负荷工况下的适配运行技术

锅炉变负荷时应创建负荷联动适配体系。比如额定负荷时采用标准参数组，用 PID 控制器稳压稳流，检测射流的对称性、覆盖均匀性。高负荷时烟气流速增大、积灰范围扩大，要按照负荷增幅的比例增加流量、缩短吹灰间隔，用分区交替吹灰的方式扩大覆盖面。低负荷时烟气温度降低、积灰黏结性增强，需要提高介质压力增加剥离力、延长吹扫时间，对省煤器弯头等容易积灰的部位进行定点强化吹灰。负荷波动时采用预判调整，根据负荷变化率提前调整参数，防止清灰不足或者过度，保证积灰清除率不低于90%。

（四）多装置协同运行的系统优化

大型锅炉应搭建起多装置“时序同步+参数联动”协同体系，并运用 CFD 模拟烟道流场，结合积灰高发区划分责任分区，保证无覆盖死角、重叠合理。使用主从控制模式，中央控制器根据整体积灰状况进行统一调度，防止同时启动造成介质压力突然下降。启动采用错峰交错的方式，相邻装置间隔10~15秒，按烟气流向逆向启动防落灰二次沉积。建立参数联动机制，在某一区域调节压力的时候，相邻区域同步做小幅度的调整来保证整体的效果均衡。此外可利用 DCS 实时监测运行状况，形成故障互备安排，出现故障的时候相邻装置自动补位，实现定期联调，调整参数，保证最佳效能。

三、锅炉尾部烟道高效旋流吹灰装置有效应用的保障体系

（一）全工况状态监测预警机制

建立全工况状态监测预警机制是保证装置长期有效运行的基础，因此应创建“设备状态、清灰效果、环境参数”三者一体化的监测体系。设备状态监测采用的是“在线传感+离线检测”的方式，在系统上安装压力、流量、温度传感器以及振动监测装置，在线实时采集介质参数以及设备运行数据，当喷嘴振幅超过设备的设计要求或者出现异常波动时系统就会自动发出警告^[8]。此外离线监测一般每季度做一次，主要观察喷嘴的磨损量、旋流叶片变形和密封件老化情况；清灰效果监测采用直接检测与间接评估相结合的方式，在锅炉停机期间用内窥镜对受热面进行清灰检测，通过排烟温度修正系数、受热面热流密度等指标来间接判断，当排烟温度修正系数大于1.05时，判定清灰效果不够。环境参数监测的重点是烟气成分、湿度和粉尘浓度，从而给出介质参数调节以及设备防腐的依据。监测数据经由工业互联网平台完成实时上传、分析并发出预

警，形成“监测－评价－处置”的闭环管理。

（二）关键部件全周期运维策略

关键部件的全周期运维是保证装置运行效能的重要部分，需要根据部件失效机理采取不同的维护方法。喷嘴是关键执行部件，运用“磨损量检测、性能测试”双指标来控制，根据设备说明书和运行工况确定运行周期，每运行一个周期检测一次口径磨损量，磨损量达到设计允许极限或者射流扩散角偏离正常范围时则应立即更换，更换后需要校准喷射轨迹。对传动部件实施“油液分析+精度校准”维护操作，每月检测润滑油水分含量及颗粒度，水分含量>0.1%时更换润滑油，每季度利用激光对中技术执行齿轮啮合精度校准，保证传动误差≤0.1mm。密封系统分为静密封和动密封维护，静密封每半年进行一次压力测试，动密封每月检测泄漏量，泄漏量大于0.1L/min时更换密封件，更换时保证密封面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu m$ ^[9]。与此同时建立重要部件全生命周期档案，记录采购、安装、维护、更换等信息，用大数据分析预测部件剩余寿命，从而实现预防性更换，防止部件突然故障影响应用效果。所有的运维工作应符合 DL/T5210.9号火力发电厂锅炉吹灰系统检修导则。

（三）积灰治理的协同保障方案

积灰治理过程应选用“装置清灰+辅助措施”的组合方式，保证旋流吹灰装置应用效能最大化。装置自清洁方面，实行定期吹扫和化学除垢制度，每周用压缩空气脉冲对喷嘴和介质管道进行吹扫清除堆积的粉尘；每半年对管路内结硬垢用柠檬酸溶液清洗循环并钝化。受热面积灰治理要因地制宜。松散型积灰用旋流吹灰法进行常规清除，黏结性积灰用旋流吹灰和蒸汽吹扫相结合的方法进行联合处理，在锅炉停运期间用机械刮刀辅助清理硬质结渣，刮刀接触压力控制≤0.2MPa，以免损伤管壁。对脱硝反应器等特殊部位配合使用声波吹灰作为辅助，构成旋流、声波结合的复合清灰模式，解决催化剂表面积灰问题。积灰预防方面，应改善锅炉燃烧工况，减小飞灰含碳量及黏结性，从根源上削减积

灰产生；定时查看烟道导流板，保证烟气流场均匀，防止局部积灰过多。协同治理操作可以保证受热面保持较高的清洁度，从而为装置的有效利用打下良好基础^[10]。

（四）故障快速处置与应急保障

建立故障快速处置体系是保证装置连续有效运行的应急支持，需要以故障树分析法（FTA）确定常见的故障处理流程。针对喷嘴堵塞故障，采用压力突然升高、清灰效果变差的方法进行快速判断，运用降压拆卸、超声清洗、校准安装的流程予以处理，全过程控制在2小时内；传动部件卡涩故障根据电机电流异常、异响进行判断，采用停机检查、异物清理、润滑保养的方式修复，严重时使用备用传动组件。介质系统故障分为泄漏和压力异常两种情况，泄漏故障选用“分区隔离－漏点定位－焊接修复”处理方式，压力异常采用管路检漏、阀门校准等方式处理。建立应急保障机制，配置喷嘴、密封件、传动齿轮等关键备品备件库；制定应急预案并进行每年四次演练，明确应急处置责任和程序。故障处理完毕之后要开展性能试验，采用对比试验的方式确认清灰效果的恢复状况，并展开根本原因剖析，优化运维方案以防止同类故障再次出现，确保装置长时间稳定高效运转。

四、结束语

综上所述，锅炉尾部烟道积灰结渣治理是保证能源转换设备高效、安全运行的重要环节，而高效旋流吹灰装置凭借其强旋流射流的技术优势，成为破解传统清灰难题的关键。有效运用的关键就是建立工况匹配、参数改良、系统保证的协同体系，采用烟道运行特性与装置结构参数深度耦合的方式动态调节吹灰介质、时序、负荷适应策略，依靠全周期监测运维、多维度协同治理达到清灰效果与设备保护双重目的，进一步提升锅炉热效率、节约能源消耗、延长设备使用寿命。

参考文献

[1]宋广，张晨，王磊，等.某1025t/h锅炉水平烟道压缩空气叠式吹灰技术[J].电力设备管理，2025(1):52-54.
[2]李友志，邱化海，王继松，等.基于沉积灰粒径分布特征的锅炉水平烟道吹灰策略[J].电力设备管理，2025(5).
[3]李旭峰，李贵兵，张晨.某超超临界直流炉水平烟道的叠层盘式射流吹灰优化[J].能源与环境，2024(6):67-70.
[4]孙亮，程器.高声强可变频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.
[5]朱伟，钟江，苏根荣，等.旋笛式声波吹灰器在CFB锅炉尾部烟道的应用[J].电力系统装备，2024(1):120-122.
[6]文绍秋，罗伟，王增慧，等.660MW锅炉对流烟道炉底管改造技术研究[J].特种设备安全技术，2024(2):8-10.
[7]何文兵，李兴智，徐亚，等.350MW燃用贫煤锅炉改烧强结渣沾污烟煤的调整及改造技术研究[J].洁净煤技术，2024,30(S01):255-262.
[8]孔庆有，汤云峰，方晶剑.声波吹灰器在锅炉吹灰中的应用[J].电力系统装备，2023(9):131-133.
[9]李振亮.降锅炉排烟损失运行研究[J].电力工程技术创新，2023,5(1):73-75.DOI:10.12346/peti.v5i1.7521.
[10]李萌.超低排放改造对300MWCFB吹灰器选型影响分析[J].现代工程科技，2023,2(13):109-111.