

余热锅炉给水品质控制对受热面结垢的影响分析

渠文娥

广东大唐国际肇庆热电有限责任公司 广东 肇庆 526105

【摘要】：余热锅炉长期运行中，给水硬度、含盐量、二氧化硅及腐蚀产物控制偏差容易造成受热面沉积物累积，引起传热热阻增大、壁温升高及热效率下降。针对水质指标波动、处理环节衔接不足及异常响应滞后等问题，建立给水预处理、除盐净化、加药调节、连续监测及排污协同控制机制，压缩成垢物进入锅炉和浓缩沉积空间。水化学参数稳定后，受热面沉积速率下降，传热状态更加平稳，锅炉运行周期及设备可靠性得到改善。

【关键词】：余热锅炉；给水品质；受热面结垢；水质控制；传热性能

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.047

引言

余热锅炉承担烟气余热回收和蒸汽生产任务，受热面长期处于高温传热、水汽循环及盐分浓缩环境，给水中的微量硬度、硅酸盐和腐蚀产物进入锅内后，可能在蒸发强度较高区域持续沉积。结垢初期往往缺少明显运行征兆，沉积层增厚后却会迅速抬高传热热阻，使管壁温度、排烟温度及能耗参数发生变化。单纯依靠停炉清洗难以消除成垢根源，需要从给水品质控制环节识别关键指标，厘清水质偏差同沉积形成之间的联系，并将处理工艺、在线监测、排污调节纳入统一控制链条。

1 余热锅炉给水品质控制基础

1.1 给水硬度控制参数界定

给水硬度是判断余热锅炉潜在结垢风险的重要基础参数，核心控制对象包括钙、镁等易形成难溶性沉积物的离子。锅炉运行温度升高后，部分盐类溶解平衡发生改变，硬度残留即使处于较低水平，也可能在高热负荷受热面持续富集，逐渐生成结构致密的垢层。参数界定不能只依赖单次检测结果，还应结合补给水来源、处理工艺稳定程度、锅炉压力等级、蒸发强度及浓缩倍率确定控制边界。运行管理中需强化软化、除盐环节的连续监测，对硬度异常波动实施趋势识别，使控制方式由末端检验转向过程预警，减少成垢离子进入水汽系统的机会。

1.2 溶解盐浓度变化规律

溶解盐进入余热锅炉后不会随水分蒸发同步排出，蒸汽生成过程会推动盐分在锅中不断浓缩，电导率、总溶解固体及相关离子浓度随运行周期产生动态变化^[1]。蒸发量增加、补水品质波动或排污量不足时，局部高浓度区域更容易形成过饱和状态，促进难溶盐晶核生成并向受热面附着。浓度变化还受锅内循环速度、热负荷分布、补水平衡及汽水分离状态影响，因此不能采用固定阈值孤立判断。运行控制应依据在线电导率、补水流量、蒸汽负荷及排污数据建立趋势关联，动态修正浓缩倍率和排污节奏，避免盐分长期积聚造成沉积风险持续放大。

1.3 水化学指标运行要求

水化学控制需要兼顾防垢、防腐和汽品质稳定，pH、溶解氧、电导率、二氧化硅及铁含量等指标应形成相互制约的控制体系。pH 偏离适宜区间可能改变金属表面保护膜稳定性，溶解氧控制失衡容易加快腐蚀产物生成，二氧化硅及铁氧化物浓度升高又会增加受热面沉积负荷。单项指标达标并不能完全代表水质安全，关键在于识别多参数之间的联动变化及异常趋势。运行过程中可将在线检测、实验室复核、自动加药及排污调节接入统一水质管理链条，依据负荷变化修正控制值，使水化学状态始终匹配锅炉热力工况，减少沉积和腐蚀相互促进造成的受热面劣化。

2 给水品质偏差引发受热面结垢机理

2.1 钙镁盐析出促使垢层形成

给水中残留的钙、镁离子进入余热锅炉后，会受到温度升高、锅水浓缩及碱度变化等多重条件影响，原有溶解平衡被打破，碳酸盐、硫酸盐等难溶性物质逐步析出。高热流密度区域的壁面温度通常高于主体水温，盐类更容易达到过饱和状态，并以微小晶核形式附着于金属表面。持续蒸发会推动晶体不断长大，颗粒之间发生桥联和压实后，垢层由疏松沉积转向致密结构。若给水硬度控制波动较大，新增钙镁离子会持续补充沉积来源，使垢层厚度增加速度明显加快，并逐渐改变受热面局部传热边界条件。

2.2 硅酸盐浓缩加剧高温沉积

硅酸盐类物质在锅炉高温高压环境中具有较强的沉积倾向，尤其在锅水持续浓缩、pH 变化和局部蒸发强度升高时，更容易生成溶解度较低的复合硅酸盐。此类物质形成后黏附性较强，与钙、镁及金属氧化物共同作用，可构成结构坚硬、导热性能较差的复合垢层。高温受热区表面液膜较薄，局部浓缩速度快，硅酸盐沉积会优先向壁面聚集，并在反复热循环作用下逐步固化^[2]。若二氧化硅含量长期处于偏高状态，常规排污难以迅速降低沉积风险，垢层内部还可能形成多孔结构，进一步吸附其他盐类和腐蚀产物，使高温沉积从单一成分转变为多

组分协同积聚。

2.3 腐蚀产物迁移造成附着积聚

给水系统、凝结水系统及锅炉本体发生金属腐蚀后,会产生铁氧化物、铜氧化物等细微颗粒,这些腐蚀产物随水流进入受热面区域,并受流速变化、温度梯度及表面粗糙度影响发生迁移沉积。部分颗粒具有较强吸附能力,可优先附着于已有微小垢核或金属缺陷位置,形成新的沉积中心。热负荷较高时,颗粒表面脱水、烧结现象增强,沉积层会由松散状态逐渐转为致密附着状态。腐蚀产物还可能与钙镁盐、硅酸盐发生复合沉积,使垢层成分更加复杂,清洗难度随之增加。给水品质偏差若同时伴随腐蚀速率升高,结垢与腐蚀便会形成相互促进的累积过程。

3 受热面结垢造成的运行问题

3.1 沉积热阻增加削弱换热能力

受热面形成垢层后,金属壁与工质之间增加额外传热阻力,烟气热量向锅水传递的效率随垢层增厚持续下降。部分沉积物导热系数较低,即使厚度不大,也会使传热温差明显增大,造成排烟温度抬升、蒸发吸热能力下降及单位蒸汽产量对应的热耗增加。不同区域结垢程度不一致时,受热面热负荷分配还会发生偏移,原有稳定换热状态被打破,局部传热恶化进一步放大。长期运行后,锅炉余热回收能力受到限制,热效率波动加剧,运行参数调整空间被持续压缩。

3.2 局部壁温升高诱发管材损伤

垢层阻碍热量及时传向管内工质后,受热面金属会承受更高的壁温,尤其是高热流密度区域更容易出现局部过热^[3]。金属材料长期处于超过正常设计水平的温度区间,会加快蠕变、氧化及组织性能劣化,管壁强度和承压裕度逐渐下降。若垢层分布不均,壁温梯度还会造成局部热应力集中,使焊口、弯管及薄弱部位承受更复杂的交变载荷。持续高温叠加压力作用后,可能出现鼓包、裂纹、减薄甚至泄漏,受热面完整性因此受到直接影响。

3.3 流动阻力增大扰动水汽循环

受热面内壁结垢会缩小有效流通截面,并使管内表面粗糙度增加,水流经过结垢区域时摩擦阻力随之上升。局部阻力差异扩大后,各并联管路之间的流量分配容易失衡,部分管束可能出现流量不足、汽化提前或含汽率异常升高等情况。水汽循环稳定性下降后,受热面冷却条件进一步恶化,热负荷较高区域更容易形成偏流和局部干涸倾向。循环参数频繁波动还会增加给水调节、汽包水位控制及排污操作难度,使锅炉运行由相对稳定状态转向高频修正状态。

4 给水品质精细控制优化路径

4.1 强化预处理降低成垢离子输入

给水预处理应把硬度、悬浮物、胶体、有机物及部分金属离子的削减前移到进入除盐系统之前,避免后续处理单元长期承受高污染负荷。原水水质存在波动时,可依据浊度、硬度、电导率及碱度变化调整混凝、过滤、软化等运行参数,使钙镁离子和颗粒杂质在前端得到稳定去除。对容易造成受热面沉积的硬度成分,需要加强软化装置出水监测,避免树脂失效、再生不足或水流偏析导致硬度泄漏。过滤设备运行阻力、反洗周期及出水浊度应形成联动判断,发现压差异常后及时修正反洗强度和周期,防止细小颗粒穿透后进入锅炉水汽系统。预处理控制还应根据季节性水源变化和负荷变化进行参数修正,不能长期沿用固定运行值。通过在线检测数据建立趋势曲线,可提前识别硬度升高、浊度突变及过滤效率下降等异常,使处理方式由事后调整转向动态干预,降低成垢物质进入除盐和锅炉系统的总量,为后续水质稳定提供较低且可控的污染负荷。

4.2 优化除盐工艺稳定给水纯度

除盐环节应重点控制溶解性盐类、二氧化硅及残余硬度,避免离子交换或膜处理性能衰减后形成隐性水质波动。运行中需要结合电导率、硅含量、产水率、压差及设备运行周期判断除盐单元状态,防止单纯依据出水电导率判断水质是否合格^[4]。离子交换系统应合理控制树脂再生周期、再生剂浓度及流速,减少树脂交换容量下降造成的离子泄漏;膜处理系统则需关注膜污染、压差上升和脱盐率下降,及时调整清洗周期和运行压力,避免高盐分水进入给水系统。对于二氧化硅等容易在高温受热面形成难处理沉积物的成分,应设置更严格的趋势监测和报警阈值,使异常能够在浓度明显上升前被识别。除盐设备之间还应建立运行切换和备用机制,避免单套设备性能下降后继续带病运行。结合实时水质数据和设备状态,可动态优化运行组合,使给水纯度保持稳定区间,减少盐分浓缩后形成过饱和和沉积的可能,同时降低受热面垢层成分复杂化的风险。

4.3 联动加药排污校正水化学状态

加药和排污控制应根据锅炉负荷、给水品质、锅水浓缩程度及水化学参数同步调整,避免加药量固定、排污周期僵化造成局部水质失衡。药剂投加需要以pH、磷酸根或相应控制指标的实时变化为依据,既要保持适宜碱度和金属表面保护条件,也要防止药剂过量引起新的盐类沉积。排污操作则应结合电导率、溶解固体和二氧化硅变化确定排污强度,使锅水浓缩倍率处于可控范围,避免高负荷阶段因蒸发量增加导致盐分迅速累积。连续排污与定期排污可根据不同污染物分布特点进行协调,减少仅依靠单一排污方式造成的控制滞后。水质参数出现异常时,加药量、排污量和补水量需要联动调整,避免单项操作引起水汽平衡新的波动。结合在线仪表、实验室复核数据

和运行工况建立水化学状态判别规则,可对pH、电导率、硅含量及铁含量等指标进行综合判断,形成参数偏离、原因识别、操作修正、结果复核的闭环控制,使锅内化学环境保持稳定,降低沉积物生成、附着和继续生长的条件。

5 品质控制实施后的结垢抑制成效

5.1 受热面沉积速率明显降低

给水硬度、二氧化硅、电导率及腐蚀产物得到连续控制后,进入锅炉水汽系统的成垢物质总量明显下降,受热面表面晶核形成频率随之降低。预处理和除盐环节运行稳定,可减少钙镁盐类及细小颗粒持续输入,配合合理排污后,锅水浓缩程度保持在受控范围,难溶盐达到过饱和状态的概率降低。沉积物来源得到削减后,原有垢层继续增厚的速度受到抑制,高热负荷区域的附着积聚现象趋于缓和。定期检测受热面垢量、沉积厚度及垢样成分,还能够发现不同运行周期内沉积结构变化,为调整水质控制参数提供依据,使结垢管理由停炉后的被动清理逐步转向运行期间的持续控制。

5.2 传热参数运行区间趋于稳定

受热面沉积受到控制后,金属壁与工质之间的附加热阻减小,换热过程对负荷变化的响应更加平稳。烟气侧热量能够较充分地传递至水汽介质,排烟温度、蒸发量、受热面壁温及单位蒸汽热耗等参数的波动幅度随之收窄。结垢造成的局部传热不均得到缓解后,各管束热负荷分配更加接近设计状态,壁温

异常升高和局部温差扩大的情况减少^[9]。运行人员无需频繁依靠增加燃气侧热输入或调整给水量补偿换热能力下降,锅炉控制系统对负荷变化的调节余量得到恢复。传热参数长期保持稳定,还可为识别异常积灰、泄漏及水循环偏差提供更清晰的数据基础。

5.3 锅炉连续运行可靠程度提升

结垢风险下降能够减少受热面局部过热、管壁蠕变及水循环异常等连锁问题,锅炉连续运行期间的非计划波动随之减少。管内流通截面保持相对稳定后,并联管束流量分配更均衡,汽包水位、给水流量及蒸汽参数的调节难度降低,设备能够在较宽负荷区间内保持稳定状态。受热面清洁程度提高还可延缓管材热损伤和腐蚀沉积共同作用造成的性能退化,降低因结垢严重而提前停炉清洗或检修的频率。结合水质趋势、壁温变化、压差及运行周期建立状态评价机制,可提前识别结垢倾向和换热能力衰减迹象,使检修计划更加贴近设备实际状态,减少突发停机对余热利用和蒸汽供应连续性的影响。

6 结语

余热锅炉受热面结垢与给水品质控制水平密切相关,硬度、溶解盐、二氧化硅及腐蚀产物持续积聚,会造成传热恶化和壁温升高。强化预处理、除盐净化、加药调节及排污联动,可降低成垢物质输入,稳定水化学环境,减缓沉积速率,提高锅炉传热效率和连续运行可靠性。

参考文献:

- [1] 周洋,伏文,李良,等.某燃机余热锅炉过热器爆管原因分析[J].水泥,2025,(3):46-49+54.
- [2] 陈勇,杨学,杨文斌,等.国外某新建铜冶炼余热锅炉的化学清洗工艺设计及质量评定[J].清洗世界,2025,41(1):29-32+35.
- [3] 王炯,牛威,安军伟.水泥窑余热锅炉给水管振动原因分析及解决措施[J].中国水泥,2025,(12):36-38.
- [4] 熊鹏,汪林峰.9F等级联合循环余热锅炉给水系统优化配置[J/OL].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025,(7):136-139[2026-08-26].
- [5] 贾正万,陈进旺,白新华.硫磺回收装置制硫炉余热锅炉结垢堵塞原因分析及对策[J].石油与天然气化工,2025,54(2):29-34.