

空冷岛管束积灰与污垢对换热性能影响研究

张维琨

内蒙古大唐国际锡林浩特发电有限责任公司 内蒙古 锡林浩特 026000

摘 要: 空冷岛管束积灰与污垢对换热性能产生影响, 积灰与污垢的沉积会受到环境、材料、运行参数等因素耦合作用而发生非均匀和动态演化。积灰与污垢共同导致传热界面改变, 引起热阻上升、流场及温度场异常, 导致换热效率下降, 通过分层量化模型建立和数值模拟以及实验验证来评估其换热性能, 在此基础上构建动态评估模型, 进一步改善清洁运维技术, 完善标准体系并提出政策建议, 为优化空冷系统运维工作提供帮助, 推动其智能化、低碳化转型。

关键词: 空冷岛管束; 积灰与污垢; 换热性能

引言: 空冷岛是燃煤电厂的主要空气冷却装置, 换热效率关系到机组运行能否提升和环保性。干旱风沙季节, 空冷岛管束表面容易形成积灰与污垢沉积体系, 该过程复杂且多相耦合, 积灰、污垢除会改变传热界面物理特征外, 还会影响气流动力学行为导致换热性能下降, 研究空冷岛管束积灰、污垢的沉积特点、对换热性能的影响以及探索优化运维策略对于提高空冷系统的运行效率与可靠性, 推进空冷系统智能化、低碳化转型具有重要意义。

1 空冷岛管束积灰与污垢的沉积特性及影响因素

空冷岛是燃煤电厂重要的换热设备, 其可靠性直接关系到机组运行能效和环保。在干旱风沙环境中, 管束表面长时间暴露于高浓度颗粒物气流之下, 造成了积灰、污垢等沉淀现象。沉积过程除涉及物理吸附与机械捕集外还伴随着化学反应与热力学演化, 属于多相耦合的动态过程。研究空冷岛内部结构的沉积特点及影响因素, 是揭示换热性能退化机制的前提条件, 对提升系统可靠性与能效水平具有重要意义。

1.1 干旱风沙环境下的沉积规律

风沙颗粒的粒径和浓度等会影响其在管束表面上最初的捕获能力。细小颗粒在气流中容易悬浮, 随湍流扩散至管束表面并沉积在该处; 而粗颗粒由于惯性作用则容易在迎风侧附着, 导致沉积层存在很大的不均匀。长时间运行下, 局部区域堆积的积灰层厚度将增加, 形成热阻集中区, 极大降低了整体换热能力。颗粒物的沉积与管道外壁粗糙程度变化之间相互促进: 随着沉积物的增多, 管内越来越平坦, 表面湍流强度也更大, 便有更多的颗粒被滞留在此处, 如此循环往复, 逐渐加深颗

粒物的积累速度。这种过程特别是对于经常受到风向扰动影响的地区尤为明显, 使得换热性能的时空异质性非常严重。

1.2 管束材料与结构对沉积的影响

不同材料的表面特性会影响污垢附着形态及稳定性, 铝翅片管具有较高的亲水性, 表面水分膜可以帮助颗粒物湿润黏附, 但容易在蒸发水分后盐类结晶而形成硬质污垢层。钢翅片管虽然具备良好的耐久性, 但由于表面氧化层复杂, 很容易与尘粒产生界面反应, 改变污垢的化学组成和热导率^[1]。翅片间距、管径、排列方式可通过调节气流分布, 从而对颗粒物运动轨迹和沉积概率起到一个间接影响作用。紧凑的排列方式虽可提升换热面积, 但往往易产生局部滞流区, 增加了颗粒物沉积速度; 流场畸变还将造成热边界层厚度下降, 传热效率降低等情况, 这是一种材料与结构共同影响沉积行为的系统。

1.3 运行参数对沉积的动态调控

风速与风向的变化直接影响气流对积灰层的剪切力大小, 高风速可以部分冲刷已沉积颗粒减少厚度增长但如果风向是周期性变化的话容易引发沉积和剥落交替现象造成表面存在周期性粗糙度波动。环境温湿度通过控制颗粒物吸湿及结块倾向间接影响污垢形成速率; 当高湿度环境下, 颗粒吸湿膨胀, 黏附强烈, 加快污垢层的形成; 由于机组负荷变化引起管束表面温度产生周期性变化, 冷热交替导致材料微应变, 使得已经附着在污垢层内部出现裂纹并逐渐脱落, 这一过程虽然有效缓解了沉积问题, 但反复地受到热应力作用也会加速材料老化, 降低结构完整性, 运行参数的调节实质上就是改变

沉积-剥落平衡,从而影响污垢层的长期演化趋势。空冷岛管束中积灰、污垢的沉积主要受到环境、材料和运行条件多方因素耦合作用,非均匀性和动态演化特征直接影响换热性能的稳定性和可预测性。

2 积灰与污垢对换热性能的耦合影响机制

积灰与污垢在空冷岛管束表面的共同沉积会影响传热界面物理性质,造成表面温度场上升、流场结构失稳和温度场分布不均等问题,从而导致多个因素耦合的传热恶化现象。其中既包括了阻断热传导途径,也对气流动力学行为产生深层次的负向作用,导致局部换热效率降低或整体效果下降;再加之当干旱风沙条件存在时,粉尘颗粒及可凝结物也会随着气候环境变化不断地沉积于管束表面。二者的物性差异以及沉积形态复杂进一步增加了传热过程的非线性特征,厘清积灰和污垢各自独立和协同作用机制是提高空冷系统运行速率和可靠性的重要前提。

2.1 表面热阻的分层量化模型

积灰层和污垢层是界面传热过程中的重要障碍层,两者在不同时期热阻贡献与厚度、密度以及材料热导率等密切相关。其中,积灰层主要由沙尘颗粒组成,结构疏松且孔隙率高,有效热导率较纯固态材料而言低;污垢层一般为水溶性盐类与有机物沉积形成,密度与导热系数较大,热阻演化通常与环境湿度、运行温度密切相关;当二者聚集在管束表面并形成分层后,两者在一定范围内的热阻可看作独立层的串联叠加,但实际情况下存在界面接触热阻和材料界面扩散效应,因此两者的叠加并非完全线性^[2]。引入基于热阻串并联原理的分层量化模型,能够很好地描述积灰层与污垢在不同沉积阶段的热阻贡献动态变化。通过引入 GB/T42402-2023 中对换热器表面热阻的限值标准,建立随运行时间演化的动态阈值判定方法,合理设置清灰周期。

2.2 流场扰动与温度场畸变的数值模拟

三维数值模拟方法可用于揭示积灰-污垢耦合作用下的流场演化。具有可调边界条件的计算流体动力学(CFD)模型能够模拟不同风速、颗粒浓度和沉积形态时气流分布特征,并且随着积灰层表面粗糙度增加,会导致局部湍流强度提高,在沉积区域后方出现回流区与分离涡结构。因此,这些不断变化的流动结构将直接影响管束表面对流换热系数降低,使得局部换热效率降低;温度场的畸变则与其与流场分离区域紧密相连,传热热点与冷区交替存在。通过数值模拟实验证明了,在积灰-污垢协同作用下,流场畸变与温度场不均之间的耦合效

应加重,尤其是在低风速工况下更为明显。该机制的揭示为识别出造成传热恶化关键区域提供了理论支持。

2.3 多工况对比实验验证

为了验证数值模拟的准确性,需要设计出不同积灰程度、污垢类型的实际工况。在此实验中,对所选取的装置进行仿真,结合风沙环境和湿气沉积等不同条件(如风速、颗粒浓度与湿度),模拟其典型运行情景。通过红外热成像和表面温度传感器阵列监测管束表面温度分布情况,得到换热系数空间分布信息。实验表明当存在较大积灰和污垢时,其下降表面平均换热系数的效果远高于单独影响因素,即协同恶化效应发挥显著性。将本次试验获取的实验结果与数值模拟产生的结果相比对比,可以看出预测热点区域和温度梯度具有较强一致性。

2.4 多尺度沉积演化与动态评估机制

积灰与污垢的形成不是一个静态过程,随着运行时间、环境条件和系统工况动态演化。颗粒物在管束表面附着受气流速度、颗粒大小和表面润湿性影响,从初始吸附到局部聚集再到连续覆盖;污垢产生则是因为冷凝水膜的发生导致的。污垢在局部存在温度梯度以及湿度分布^[3]。污垢在不同尺度的多样性特点需要评估模型具备时变和空间异质性建模能力。利用实验数据结合数值模拟研究结果,搭建热阻演化规律下的动态评估机制可以对换热性能退化进行实时监测。该机制能够为清灰周期智能预警提供支持,推动运维从被动应付转向主动干预。

3 空冷岛管束积灰与污垢对换热性能影响及运维优化研究

根据多尺度沉积机制和动态热阻演化规律的研究,提出合理实用的空冷系统运维策略。重点分析干旱风沙环境下空冷岛管束表面灰垢形成过程及其对换热效率影响等,探讨了积灰层与污垢层在时间、空间上发生作用,颗粒物在管束表面的沉积受气流速度、颗粒粒径分布及表面润湿性影响,局部热阻显著增大;长期存在,使积灰层变得紧密且不易传递,同时发生边界层分离、留存现象加剧流场畸变,特别是高海拔低湿度条件下,进一步降低系统整体换热能力。

3.1 动态评估模型的构建

积灰与污垢的非均匀分布使得换热性能衰减有很强时间性和空间异质性,以内蒙古地区为例,利用长期工况记录中积灰清理周期与性能衰减速率建立相应模型,可对性能进行动态评估^[4]。采用时间序列方法分析热阻变化趋势并研究其在不同运行阶段之间的变化规律,发现

热阻随运行周期呈非线性增加,且在某些时段出现了加快衰减特征;引入机器学习算法实时预测热阻、流场和温度场参数,可较好捕捉系统性能微小波动,及早发现异常结果,提高抗风险能力,避免固定维护周期而产生资源浪费或性能劣化。运维决策支持根据实时监测情况自动调整清灰措施和周期,从被动干扰转向主动控制。

3.2 清洁运维技术的适应性改进

在高海拔风沙区域,恶劣的自然环境让清灰变得极为困难,传统的清灰方式不能兼顾清洁效率与防污垢再生,革新迫在眉睫。一系列创新举措的出现,为解决这一难题带来了曙光。其中有研发出新型积灰清理技术和防污垢涂层材料是一大关键。新型积灰清理技术可以在维持表面粗糙度的基础上降低颗粒附着力,提升了清洁周期;而涂层材料则通过对表面能、微观结构等进行精准调控,可以大幅减少粉尘黏附概率,极大缩短了积灰初始阶段沉积速率,从源头上降低了污垢的积累;分区、分时段的分差异化清洁方案十分科学,充分考虑管束不同位置的积灰强度和流场特征,避免“一刀切”运维模式造成能源浪费,实现了资源的高效利用。结合煤电灵活性改造和能效升级需求,空冷系统结构优化改进方案意义非凡。例如,合理地调整翅片间距、管束排列等,让气流更加均匀,有效地降低局部热阻集中程度,显著提升换热效率。以上改进措施应用到实际中后取得显著效果,不仅可以很好地解决高海拔风沙区域的清灰问题,还提升了能源利用效率,具备较广泛推广可行性,有望给该区域的清洁和能源利用带来全新变革。

3.3 标准体系与政策建议

在当下,现有的标准和体系都存在动态性能考核不足之处,无法及时对实际运行中出现的问题进行反馈。为了扭转这种局面,完善 GB/T42402-2023 里的动态性能考核指标迫在眉睫,补充多工况试验方式让该标准更加符合实际环境、更具长久的实用性。制定干旱地区空冷岛管束清洁运维规范意义重大,清晰明确积灰清理周期和质量要求可以为整个行业提供统一的技术参照,使得

运维工作有章可循^[5]。同时通过利用能耗补贴政策、并网调度政策等手段,以经济激励为杠杆,鼓励企业开展清洁运行,提高能效水平,促使电厂主动革新运营模式,从而提升运维效率。研究表明借助这些政策工具可以缩短技术推广周期,促进空冷系统朝着智能化、低碳化运维方向发展,由于空冷岛管束积灰和污垢生成过程复杂,对换热性能影响大且变化迅速,结合动态评估和智能调控技术十分必要。通过上述一系列举措可以显著提升空冷系统的性能与稳定性,有力促进能源行业的可持续发展,为干旱地区的能源利用和环境保护增添助力。

结语

综上所述,空冷岛管束积灰与污垢的沉积受环境、材料和运行参数等因素影响较大,对换热性能的影响机制复杂多变。通过建立分层量化模型,结合数值模拟实验进行评估;同时设计动态评估模型,改善清洁运维技术,构建标准体系并提出政策建议,为优化空冷系统的运维提供了有效方法;未来需要通过各类监测数据以及人工智能算法研究动态沉积过程,加强对于实时感知与预测能力,不断推动空冷系统向着智能化、低碳化方面的运维转型,保障其高效稳定运行。

参考文献

- [1] 任海彬,祁利明,樊泽国,等. 折叠挡风墙对 SCAL 型间冷塔换热性能的影响研究 [J]. 汽轮机技术,2026,68(01):29-33.
- [2] 黄友诚. 某热力电厂空冷岛换热性能影响因素研究 [J]. 电力系统装备,2025,12(05):107-109.
- [3] 任超,王远洋,张振焱,等. 运行方式对闭式冷却塔换热性能影响研究 [J]. 节能,2024,42(07):44-46.
- [4] 李磊,徐拴海,张卫东,等. 砂土层占比对双 U 型地埋管换热器换热性能影响研究 [J]. 煤炭工程,2023,55(04):173-179.
- [5] 陈占国,李新德,胡清,等. 自然对流换热条件下梯形翅片与其倾角对电子芯片散热性能影响的仿真研究 [J]. 商丘职业技术学院学报,2026,25(01):74-80.