

电厂循环冷却水微生物污垢形成机制及抑制策略研究

钟丁平

广州粤能电力科技开发有限公司 广东 广州 510699

摘要: 电厂循环冷却水系统中,微生物污垢由细菌、藻类、真菌及其代谢产物构成,含泥沙、腐蚀产物等非生物成分,其形成遵循“吸附-生长-聚集-固化”机制,受物理、化学、生物多因素耦合影响。微生物污垢会导致传热性能劣化、金属材料腐蚀加速、系统运行成本增加。本文介绍了在线监测、离线分析及模拟实验平台等监测分析方法,并从物理、化学、生物抑垢技术及复合抑垢策略工程应用等方面提出针对性抑制策略,为电厂循环冷却水系统优化运行提供理论依据。

关键词: 电厂循环冷却水;微生物污垢;生物膜;腐蚀;抑垢策略

引言: 在电力生产中,循环冷却水系统是保障机组安全稳定运行的关键环节。然而,该系统易受微生物污垢影响,导致传热效率下降、金属腐蚀加剧、运行成本上升等一系列问题。微生物污垢的形成是物理、化学与生物因素协同作用的结果,其复杂机制给防控带来挑战。深入探究微生物污垢的形成机制,开发有效的监测分析方法与抑制策略,对提高电厂运行效率、降低运营成本、延长设备寿命具有重要意义。本文将围绕这些方面展开研究。

1 电厂循环冷却水微生物污垢形成机制

1.1 微生物污垢的组成与结构

电厂循环冷却水系统中的微生物污垢主要由细菌、藻类、真菌及其代谢产物构成,同时包含泥沙、腐蚀产物、无机盐结晶等非生物成分。细菌通过分泌胞外聚合物(EPS)形成生物膜,其核心为多糖、蛋白质及脂类构成的黏性基质,可吸附水中的悬浮颗粒、金属离子及有机物。藻类在光照条件下通过光合作用生成有机质,为异养菌提供营养,形成藻菌共生体。真菌则分泌消化酶分解纤维素等有机物,其菌丝体可穿插于生物膜网络中,增强污垢的机械稳定性。污垢结构呈现分层特性:表层为疏松的生物膜,富含活性微生物;中层为混合层,包含生物黏泥与无机沉积物;底层为致密垢层,以碳酸钙、磷酸钙等结晶为主^[1]。这种异质结构导致污垢导热系数显著低于金属基体,0.6毫米垢层即可使传热效率下降20%,同时形成氧浓差电池,加速局部腐蚀。

1.2 污垢形成的关键过程

微生物污垢的形成遵循“吸附-生长-聚集-固化”四阶段机制。首先,微生物通过范德华力、静电吸引等作用吸附于换热器表面,形成初始菌落。随后,菌落通过二分裂或孢子繁殖迅速扩张,分泌EPS构建三维生物膜网络。该过程伴随代谢产物积累,如SRB将硫酸盐还原为硫

化氢,与金属反应生成腐蚀性硫化物。第三阶段,生物膜通过捕获悬浮颗粒、沉淀无机盐实现体积增长,形成松软污垢层。最后,在高温(40–60℃)、高pH(8.5–9.5)条件下,碳酸钙等盐类过饱和结晶,与生物黏泥交织形成硬垢。实验表明,含SRB的生物膜可使碳钢腐蚀速率提升3–5倍,且垢下腐蚀产物(如FeS)进一步降低热阻,形成恶性循环。

1.3 多因素耦合作用机制

微生物污垢的形成是物理、化学与生物因素协同作用的结果。物理因素中,水流速度低于0.5m/s时,剪切力不足以剥离生物膜,促进污垢沉积;而流速过高(>2m/s)则导致微生物细胞破裂,释放胞内物质加速结垢。化学因素方面,循环水浓缩倍数超过4倍时,Cl⁻浓度突破200mg/L,破坏金属钝化膜;同时,高pH环境(>8.5)使碳酸钙溶解度降低,促进硬垢生成。生物因素中,营养源(COD>150mg/L、氨氮>10mg/L)可刺激异养菌繁殖,形成厚度达数毫米的黏泥层;而光照强度超过5000lux时,藻类光合作用释放氧气,加剧好氧菌腐蚀。此外,系统材质影响污垢附着强度,铜合金表面因氧化膜致密性优于碳钢,其生物膜厚度可减少40%。多因素耦合下,一电厂凝汽器运行6个月后,污垢热阻达0.0018m²·K/W,远超设计值(0.00035m²·K/W),导致端差升高8℃,发电煤耗增加2.3g/kWh。

2 微生物污垢对循环冷却水系统的影响

2.1 传热性能劣化

微生物污垢在换热器表面形成低导热系数的隔热层,显著降低系统传热效率。污垢层主要由生物黏泥、无机盐结晶及腐蚀产物构成,其导热系数(0.5–1.2W/m·K)仅为金属基体(如碳钢45W/m·K)的1/30–1/50。实验数据显示,0.5毫米厚的污垢层可使凝汽器端差升高5–8℃,

导致汽轮机背压上升0.02–0.05MPa,发电煤耗增加1.5–3.0g/kWh。污垢的异质结构进一步加剧传热阻力:表层疏松生物膜阻碍流体湍流,中层混合垢层形成热阻梯度,底层致密结晶层则完全阻断热传导^[2]。污垢覆盖导致换热面积减少10%–20%,迫使系统提高循环水量以维持热负荷,形成“污垢–能耗”恶性循环。

2.2 金属材料腐蚀加速

微生物污垢通过形成氧浓差电池、分泌腐蚀性代谢物及破坏保护膜三重机制加速金属腐蚀。污垢层内微生物代谢活动消耗氧气,形成垢下缺氧区($DO < 0.1\text{mg/L}$),与垢外富氧区($DO > 5\text{mg/L}$)构成电位差(可达0.3–0.5V),引发电化学腐蚀。硫酸盐还原菌(SRB)在厌氧环境下将硫酸盐还原为硫化氢,与铁反应生成FeS黑色腐蚀产物,其腐蚀速率是普通氧腐蚀的3–5倍。同时,污垢中黏性EPS吸附 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等侵蚀性离子,穿透金属钝化膜(如铜合金的 Cu_2O 膜),导致点蚀坑深度年均增长0.2–0.5mm。

2.3 系统运行成本增加

微生物污垢通过多途径推高循环冷却水系统运营成本。首先,传热效率下降迫使机组降低出力或增加燃料消耗:以300MW机组为例,端差每升高1℃,年多耗标准煤约1200吨,按当前煤价计算增加成本80–100万元。其次,腐蚀加速导致设备寿命缩短,凝汽器铜管更换周期从15年缩短至8–10年,单次更换费用超500万元;碳钢管道年均腐蚀速率达0.3mm时,5年内需全面更换。再次,污垢堵塞喷嘴、滤网等部件,增加系统压降(可达0.05–0.1MPa),迫使循环泵能耗上升8%–15%,年电费增加30–50万元。另外,为控制污垢生长需投加杀菌剂、阻垢剂等化学药剂,600MW机组年药剂费用达200–300万元,且过量投加导致水质恶化,形成“污垢–药剂–腐蚀”的次生灾害链。综合测算,严重污垢问题可使电厂年运营成本增加15%–20%。

3 微生物污垢的监测与分析方法

3.1 在线监测技术

在线监测技术通过实时采集循环冷却水系统参数,实现微生物污垢的动态预警与趋势分析。常见方法包括:基于超声波的污垢厚度监测仪,利用声波在金属与污垢界面反射的时间差,可连续测量0.01–10mm级垢层厚度,精度达 $\pm 0.005\text{mm}$;电化学阻抗谱(EIS)技术通过分析金属/溶液界面的阻抗变化,识别污垢形成初期的电化学特征,提前30–60天预警腐蚀风险;多参数水质传感器集成pH、电导率、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)等指标,结合机器学习算法建立污垢生长模型,当 Cl^- 浓度

$> 150\text{mg/L}$ 且 $\text{ORP} < -200\text{mV}$ 时,触发SRB污垢预警。

3.2 离线分析技术

离线分析技术通过实验室检测揭示微生物污垢的组成与形成机制。扫描电子显微镜(SEM)结合能量色散X射线谱(EDS)可观察污垢表面形貌(如菌落形态、结晶结构)并定量分析元素组成(如Ca、Fe、S含量);荧光显微镜通过DAPI染色区分活/死菌,结合FISH技术鉴定特定微生物种群(如SRB占比 $> 5\%$ 时腐蚀风险显著上升);高通量测序技术解析污垢中微生物群落结构,发现电厂循环水中变形菌门(Proteobacteria)占比达62%,其分泌的EPS是污垢黏附的关键介质;热重分析(TGA)测定污垢中有机物(EPS、藻类)与无机物(CaCO_3 、 Fe_2O_3)的比例,指导阻垢剂选型^[3]。

3.3 模拟实验平台

模拟实验平台通过可控条件复现微生物污垢形成过程,为机理研究与防控策略提供验证环境。动态模拟试验装置采用透明有机玻璃管束,内置可调节流速(0.1–2m/s)、温度(20–60℃)与pH(7–9.5)的循环水系统,结合激光粒度仪实时监测污垢颗粒分布;静态腐蚀试验罐模拟垢下缺氧环境,通过控制DO(0.01–2mg/L)与SRB接种量(10^3 – 10^6CFU/mL),研究生物–化学协同腐蚀机制;旋转圆柱电极(RCE)系统可模拟不同材质(碳钢、铜合金)在污垢覆盖下的电化学反应,发现铜合金表面因 Cu_2O 钝化膜致密,其污垢诱导腐蚀速率仅为碳钢的1/3。计算流体力学(CFD)耦合微生物生长模型,可预测复杂流场中污垢分布规律,研究通过CFD模拟发现,凝汽器入口段因流速突变导致污垢厚度比出口段厚40%,为优化管束设计提供理论依据。

4 微生物污垢抑制策略研究

4.1 物理抑垢技术

物理抑垢技术通过改变流体动力学条件或破坏微生物附着环境来抑制污垢形成。高频电磁场处理(频率1–50kHz)通过诱导水分子极化,抑制 CaCO_3 晶核形成,同时使微生物细胞膜通透性改变,导致代谢产物泄漏,某电厂应用后污垢热阻降低35%,维持周期延长至90天。超声波防垢技术(20–40kHz)利用空化效应产生的微射流冲击污垢层,实验表明,在循环水流速1.5m/s时,超声波处理可使凝汽器端差下降2℃,年节煤效益达80万元。另外,反冲洗技术通过周期性改变水流方向(流速 $> 2\text{m/s}$),剥离已附着的生物黏泥,结合螺旋纽带等扰流装置,可减少换热器死角区污垢沉积。表面改性技术通过在金属基体涂覆超疏水涂层(接触角 $> 150^\circ$),使污垢附着力降低70%,但长期运行需解决涂层耐磨性问题。

4.2 化学抑垢技术

化学抑垢技术通过投加阻垢剂、杀菌剂等药剂破坏污垢形成链式反应。聚羧酸类阻垢剂（如PAA）通过螯合 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子，抑制碳酸钙结晶生长，在浓缩倍数5倍的循环水中，0.5mg/L的PAA可使污垢热阻增长速率下降60%。针对微生物污垢，氧化性杀菌剂（如 ClO_2 、溴化物）通过破坏细胞膜结构实现快速灭杀，非氧化性杀菌剂（如异噻唑啉酮）则通过抑制酶活性阻断代谢途径，两者交替使用可延缓微生物耐药性。此外，缓蚀阻垢二合一药剂（如锌盐-聚磷酸盐复合物）可在金属表面形成保护膜，同步抑制腐蚀与污垢，但需严格控制pH（8.0–8.5）以避免锌离子沉淀。化学药剂的智能投加系统结合水质在线监测数据，可实现剂量动态优化，减少20%的药剂消耗。

4.3 生物抑垢技术

生物抑垢技术利用天然或工程微生物竞争抑制污垢形成菌。硝化细菌通过将氨氮氧化为硝酸盐，降低循环水中异养菌营养源，实验表明，当 NO_3^- 浓度 > 50mg/L时，生物黏泥量减少45%。反硝化菌在缺氧区将 NO_3^- 还原为 N_2 ，同步去除腐蚀性硫化物，某电厂应用后垢下 H_2S 浓度从2.1mg/L降至0.3mg/L。噬菌体技术通过特异性裂解目标菌（如SRB），在模拟系统中可使SRB数量在24小时内下降4个数量级，且无化学药剂残留风险。另外，生物表面活性剂（如鼠李糖脂）可降低微生物与金属表面的附着力，其临界胶束浓度（CMC）低至20mg/L时，污垢剥离效率达78%。生物抑垢技术的挑战在于微生物群落稳定性控制，需结合流场优化（如增加湍流度）维持功能菌优势地位，避免被土著菌竞争淘汰。

4.4 复合抑垢策略工程应用

复合抑垢策略通过物理-化学-生物协同作用实现长效防控。某600MW机组采用“高频电磁场+低磷阻垢剂+

硝化菌”组合方案：电磁场抑制结晶核形成，阻垢剂控制无机垢生长，硝化菌削减异养菌营养源，三者协同使污垢热阻稳定在 $0.0005\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ 以下，运行周期延长至180天。针对垢下腐蚀问题，电厂开发“超声波+锌盐+噬菌体”复合技术：超声波剥离已形成污垢，锌盐在金属表面形成保护膜，噬菌体持续抑制SRB，使铜管腐蚀速率从0.12mm/a降至0.03mm/a。智能监测系统集成多参数传感器与AI算法，可实时评估不同抑垢策略的效果，动态调整物理场强度、药剂投加量及微生物接种比例，实现抑垢成本与效益的最优平衡^[4]。工程应用表明，复合策略较单一技术可降低30%的运维成本，同时减少50%的化学药剂排放，符合绿色电厂发展要求。

结束语

本文系统研究了电厂循环冷却水微生物污垢的形成机制、影响、监测分析方法及抑制策略。微生物污垢形成受多因素影响，对系统危害显著。通过在线监测、离线分析及模拟实验可有效掌握污垢情况。物理、化学、生物抑垢技术各有优劣，复合抑垢策略通过协同作用实现长效防控，降低运维成本与药剂排放。未来需进一步优化复合策略，探索新型抑垢技术，为电厂循环冷却水系统的高效稳定运行提供更有有力支持。

参考文献

- [1]卢小方.工业循环冷却水处理技术优化及运行管理分析[J].石化技术,2025,32(7):45–47.
- [2]王铮,雷宏飞,赵航,等.工业循环冷却水处理技术优化[J].张江科技评论,2024(1):123–125.
- [3]韦智三.工业循环冷却水中异养菌检测方法的影响因素分析[J].科技创新与应用,2023,13(16):66–70.
- [4]王志勇,高树仁,胡彪.工业循环冷却水中细菌的危害性与有效管理措施[J].化工管理,2023(23):48–51.