

# 循环冷却水系统阻垢缓蚀剂性能评价与优化

张峻淇

惠生工程(中国)有限公司郑州分公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 循环冷却水系统易发生结垢与腐蚀,导致设备寿命缩短、能耗增加,阻垢缓蚀剂是解决该问题的关键。本文先阐述结垢腐蚀机理及阻垢缓蚀剂作用原理,通过静态与动态实验、失重法与电化学测试,评价有机膦酸盐类、聚羧酸类等药剂的阻垢缓蚀性能,建立综合评价体系。基于实验结果,优化药剂复配比例与运行参数,验证表明优化后阻垢率达93%、缓蚀率达96%,成本降低12%,为系统药剂选型与高效运行提供科学支撑。

**关键词:** 循环冷却水系统;阻垢缓蚀剂;性能评价;优化

引言:工业循环冷却水系统广泛应用于化工、电力等领域,结垢与腐蚀是制约其稳定运行的核心难题,不仅降低换热效率、增加运维成本,还可能引发设备泄漏等安全隐患。当前单一阻垢缓蚀剂存在性能偏科问题,复合药剂选型与参数匹配缺乏系统评价。因此,开展阻垢缓蚀剂性能评价与优化研究,明确药剂作用规律、筛选最优方案,对提升系统运行稳定性、延长设备寿命、实现节能降耗具有重要现实意义。

## 1 循环冷却水系统结垢与腐蚀机理及阻垢缓蚀剂作用原理

### 1.1 循环冷却水系统结垢机理

(1) 常见结垢类型及形成条件:主要有碳酸钙、硫酸钙结垢,另有磷酸钙、硅垢等。碳酸钙最为常见,水中钙离子与碳酸氢根离子浓度过高时,受热分解生成碳酸钙沉淀附着于设备表面;硫酸钙结垢多见于高硬度、高硫酸盐水质,当离子浓度乘积超过溶度积,即形成难溶性沉淀。(2) 影响结垢的主要因素:水质中钙、镁及碳酸氢根、硫酸根离子浓度越高,结垢倾向越强;温度升高会降低盐类溶解度,pH值升高会促进碳酸氢根分解,均加速结垢;水流过慢、停留时间过长也会加剧结垢。(3) 结垢的影响:降低换热效率、增加能耗,堵塞管道和换热器通道导致水流不畅、压力升高,还会掩盖设备表面引发局部腐蚀,缩短设备使用寿命。

### 1.2 循环冷却水系统腐蚀机理

(1) 常见腐蚀类型及特征:电化学腐蚀最为普遍,设备金属表面形成微电池,阳极发生氧化反应导致金属溶解;吸氧腐蚀是中性或碱性水中主要形式,阴极消耗氧气生成氢氧根离子,导致金属表面生锈。此外还有缝隙腐蚀、点蚀等,特征是局部腐蚀严重,易造成设备穿孔。(2) 影响腐蚀的主要因素:水质中氯离子、硫离子会破坏金属钝化膜,加速腐蚀;水流速度过快会冲刷金属表

面,过慢则易形成腐蚀介质滞留;微生物代谢产生酸性物质,也会加剧腐蚀。(3) 腐蚀对系统设备寿命的影响:腐蚀会使金属设备壁厚减薄、强度下降,引发泄漏事故;腐蚀产物会污染水质,加剧结垢与腐蚀的恶性循环,大幅缩短设备检修周期和使用寿命<sup>[1]</sup>。

### 1.3 阻垢缓蚀剂的作用原理

(1) 阻垢作用原理:螯合作用是与水中钙、镁离子结合形成稳定螯合物,阻止其形成沉淀;分散作用是将微小结晶颗粒分散在水中,避免聚集附着;晶格畸变作用是干扰晶体正常生长,形成松散易脱落的沉淀。(2) 缓蚀作用原理:钝化作用是在金属表面形成致密钝化膜,隔绝腐蚀介质;吸附作用是吸附在金属表面,阻挡腐蚀反应发生;阴极保护是通过抑制阴极反应,减缓金属溶解速度。(3) 不同类型阻垢缓蚀剂的作用差异:有机膦酸盐类兼具阻垢与缓蚀效果,适用于高硬度水质;聚羧酸类主要侧重阻垢,分散性强;唑类主要针对铜及铜合金,缓蚀效果突出,针对性不同适配不同系统需求。

## 2 循环冷却水系统阻垢缓蚀剂性能评价实验设计与结果分析

### 2.1 实验材料与仪器

(1) 实验试剂:选取3种不同类型阻垢缓蚀剂样品(有机膦酸盐类、聚羧酸类、复合类)作为测试对象;模拟循环冷却水电解质包括氯化钙、碳酸氢钠、硫酸镁、氯化钠等,用于配制与实际循环冷却水水质匹配的模拟水样;辅助试剂有盐酸、氢氧化钠(调节pH值)、铬黑T指示剂、EDTA标准溶液等,用于实验过程中的水质调节与分析。(2) 实验仪器:核心仪器包括腐蚀速率测定仪(用于精准测定金属腐蚀速率)、污垢热阻测定仪(评价结垢程度)、电子天平(精度0.1mg,用于失重法测试)、电化学工作站(用于电化学测试法)、恒温水浴锅(控制实验温度)、pH计(调节并监测水样pH值)、磁力搅拌器

(保证试剂混合均匀)及容量瓶、烧杯等常规玻璃器皿,所有仪器均提前校准,确保实验数据准确<sup>[2]</sup>。(3)实验用水与实验条件控制:实验用水采用去离子水,避免杂质干扰实验结果;实验条件严格模拟实际循环冷却水系统,温度控制在30~50℃(梯度设置),pH值调节为6.5~8.5,水流速度(动态实验)控制在0.5~2.0m/s,实验周期设定为72h,每组实验设置3个平行样,减少实验误差。

## 2.2 阻垢性能评价实验

(1)阻垢率测定方法设计:采用静态阻垢法与动态阻垢法结合,静态阻垢法操作简便,适用于初步筛选,通过配制含特定离子的模拟水样,加入不同浓度阻垢缓蚀剂,恒温静置72h后,测定水样中剩余钙离子浓度,计算阻垢率;动态阻垢法更贴近实际运行工况,利用污垢热阻测定仪,监测不同时间内换热器表面污垢热阻值,结合钙离子浓度变化,综合评价阻垢性能。(2)不同条件下阻垢性能测试:分别探究阻垢缓蚀剂浓度(50~250mg/L)、实验温度(30℃、40℃、50℃)、水样pH值(6.5、7.5、8.5)对阻垢性能的影响,其他条件保持不变,每组实验重复3次,记录实验数据并计算平均阻垢率。(3)阻垢性能实验结果分析与讨论:实验结果表明,阻垢率随阻垢缓蚀剂浓度升高先显著上升,当浓度达到150mg/L后,阻垢率趋于稳定,过高浓度不会明显提升阻垢效果,反而增加成本;温度升高会降低阻垢率,50℃时阻垢效果较30℃下降15%~20%,因高温加速盐类结晶;pH值在7.5左右时阻垢效果最佳,偏酸或偏碱都会削弱阻垢作用,其中复合类阻垢缓蚀剂的阻垢性能优于单一类型。

## 2.3 缓蚀性能评价实验

(1)缓蚀率测定方法设计:采用失重法与电化学测试法互补,失重法通过测定实验前后金属试片(选用20#碳钢,模拟设备材质)的质量变化,计算腐蚀速率与缓蚀率,操作直观;电化学测试法利用电化学工作站,测定极化曲线与交流阻抗谱,通过分析腐蚀电流密度、阻抗值,量化缓蚀剂的缓蚀效果,精准反映缓蚀机理。(2)不同条件下缓蚀性能测试:探究阻垢缓蚀剂浓度(50~250mg/L)、水流速度(0.5m/s、1.0m/s、2.0m/s)、实验时间(24h、48h、72h)对缓蚀性能的影响,金属试片提前打磨、除锈、称重,实验后清洗、干燥、再次称重,电化学测试同步记录相关参数<sup>[3]</sup>。(3)缓蚀性能实验结果分析与讨论:缓蚀率随阻垢缓蚀剂浓度升高而上升,浓度达到200mg/L时缓蚀率稳定在90%以上;水流速度适中(1.0m/s)时缓蚀效果最佳,流速过慢易形成腐蚀介质滞留,过快则冲刷金属表面钝化膜;实验时间延长,缓蚀率略有下降,72h时缓蚀率较24h下降3%~5%,有机磷

酸盐类缓蚀剂的缓蚀效果优于聚羧酸类,且能有效抑制点蚀。

## 2.4 综合性能评价

(1)阻垢与缓蚀性能协同性分析:通过对比不同类型阻垢缓蚀剂的阻垢率与缓蚀率数据,发现复合类阻垢缓蚀剂具有最佳协同效果,既能保证阻垢率在85%以上,又能使缓蚀率维持在90%以上,单一类型阻垢缓蚀剂往往存在偏科现象,如聚羧酸类阻垢效果好但缓蚀不足,有机膦酸盐类缓蚀突出但阻垢性能有限。(2)评价指标体系建立与综合评分:建立包含阻垢率(权重40%)、缓蚀率(权重40%)、稳定性(权重10%)、经济性(权重10%)的综合评价指标体系,采用百分制评分,结合实验数据计算综合得分。结果显示,复合类阻垢缓蚀剂综合得分最高(88分),有机膦酸盐类次之(79分),聚羧酸类最低(72分),为循环冷却水系统阻垢缓蚀剂的选型提供科学依据。

## 3 循环冷却水系统阻垢缓蚀剂性能优化研究

### 3.1 优化目标与影响因素确定

(1)性能优化目标:基于前期性能评价结果,明确优化核心目标,使阻垢缓蚀剂的阻垢率提升至90%以上,缓蚀率提升至95%以上,同时降低药剂使用成本,确保优化后体系在实际工况中稳定运行,有效解决系统结垢与腐蚀问题,延长设备使用寿命。(2)主要影响因素筛选:通过单因素实验与正交实验初步筛选,确定三大核心影响因素:药剂浓度(直接影响作用效果与成本)、复配比例(复合体系各组分协同作用的关键)、运行参数(pH值、温度、流速,贴合实际系统运行工况),排除次要干扰因素,聚焦核心优化方向<sup>[4]</sup>。(3)因素水平设计与优化方案制定:采用正交实验设计,设定各因素水平:药剂浓度50~200mg/L(4个梯度),复配比例(有机膦酸盐:聚羧酸类)1:3~3:1(4个梯度),运行参数中pH值6.5~8.5(3个梯度)、温度35~45℃(3个梯度)、流速0.8~1.6m/s(3个梯度),制定多组正交实验方案,确保全面覆盖各因素交互影响,高效筛选最优组合。

### 3.2 阻垢缓蚀剂复配优化

(1)复配组分选择与配比设计:结合前期性能评价,选择阻垢性优的聚羧酸类与缓蚀性强的有机膦酸盐类作为复配组分,利用两者协同效应提升综合性能;设计4组不同复配比例(1:3、1:2、2:1、3:1),固定总药剂浓度为150mg/L,其余条件保持一致,开展复配体系性能测试。(2)复配体系性能测试与筛选:采用静态阻垢法、失重法分别测定各复配体系的阻垢率与缓蚀率,每组实验设置3个平行样,计算平均值。结果显示,复配比例为2:1时,

体系协同效果最佳,阻垢率达88%、缓蚀率达92%,显著优于单一组分,其余比例协同效应较弱。(3)最优复配方案确定与验证:确定有机膦酸盐与聚羧酸类复配比例2:1为最优复配方案,总药剂浓度暂定为150mg/L;通过重复实验验证,该方案阻垢率稳定在87%~89%,缓蚀率稳定在91%~93%,重复性良好,满足初步优化要求,为后续运行参数优化奠定基础。

### 3.3 运行参数优化

(1) pH值、温度、流速等参数优化实验:以最优复配方案为基础,采用单因素变量法,分别探究pH值(6.5、7.0、7.5、8.0、8.5)、温度(35°C、40°C、45°C)、流速(0.8m/s、1.2m/s、1.6m/s)对阻垢缓蚀性能的影响,其余条件固定,测定各组阻垢率与缓蚀率。(2)优化参数对阻垢缓蚀性能的影响规律:实验表明,pH值为7.5时,阻垢缓蚀效果最佳,偏酸会削弱缓蚀作用,偏碱会降低阻垢效果;温度升高会显著降低性能,45°C时阻垢率、缓蚀率较35°C分别下降8%、6%;流速为1.2m/s时性能最优,流速过低易滋生腐蚀,过高会破坏钝化膜。(3)最优运行参数组合确定:结合单因素实验结果,确定最优运行参数组合为:pH值7.5、温度35~40°C、流速1.2m/s,此时复配体系阻垢率达92%,缓蚀率达96%,完全达到优化目标<sup>[5]</sup>。

### 3.4 优化后性能验证实验

(1)验证实验设计与实施:按照最优复配方案(有机膦酸盐:聚羧酸类=2:1,总浓度150mg/L)与最优运行参数,模拟实际循环冷却水系统工况,开展72h连续运行验证实验,设置3个平行样,同时设置优化前体系作为对

照组,严格控制实验条件,记录相关数据。(2)优化前后性能对比分析:验证结果显示,优化后体系阻垢率从优化前的82%提升至93%,缓蚀率从88%提升至96%,均达到优化目标;与优化前相比,药剂使用成本降低12%,体系稳定性显著提升,有效解决了单一药剂与不合理运行参数导致的性能不足问题,为实际应用提供了可靠依据。

### 结束语

本文围绕循环冷却水系统阻垢缓蚀剂性能展开系统研究,通过机理分析、实验评价与优化验证,明确了不同类型药剂的性能差异,确定了有机膦酸盐与聚羧酸类复配最优比例及运行参数。优化方案有效解决了单一药剂性能不足的问题,兼顾了处理效果与经济性。后续可进一步探究环保型药剂复配及动态工况下的长效稳定性,为工业循环冷却水系统水处理技术的升级完善提供更多参考。

### 参考文献

- [1]高坚.大型机组循环水阻垢剂性能评价及研究[J].山东电力技术,2023,50(7):74-80.
- [2]陈志刚.循环冷却水中结垢与腐蚀的联合控制技术研究进展[J].工业水处理,2023,43(5):12-17.
- [3]刘文斌.电厂循环冷却水系统防腐防垢药剂筛选与性能评价[J].热力发电,2022,51(8):66-71.
- [4]高翔宇.冷却水系统动态模拟与结垢腐蚀预测模型构建[J].水处理技术,2024,50(3):45-50.
- [5]刘芳芳.循环冷却水系统运行方法的改进研究[J].中国资源综合利用,2023,41(5):183-185.