

CnZn 合金阻垢材料在循环冷却水系统中的应用性能分析

姜 旭

国家能源集团辽宁电力有限公司沈西热电厂, 辽宁 沈阳 110065

[摘要]工业领域中循环冷却水系统应用极为普遍,但其水质复杂多变,极易滋生水垢,进而引发换热效能降低、能源消耗攀升以及设备腐蚀等一系列问题,对系统稳定运行构成严重威胁,CnZn 合金作为创新型阻垢材料,不仅展现出卓越的抗垢与缓蚀性能,还兼具环保与经济双重优势,经深入剖析其阻垢作用机制,结合实验条件下的性能测试及实际工程应用验证,证实该材料在高温、高硬度水质环境中具备良好的适应性与持久稳定性,在工程实践中拥有巨大的推广潜力与应用价值。

[关键词]CnZn 合金;阻垢材料;循环冷却水系统;缓蚀性能;工程应用

DOI: 10.33142/ect.v3i6.16881

中图分类号: TQ085

文献标识码: A

Performance Analysis of CnZn Alloy Scale Inhibition Material in Circulating Cooling Water System

JIANG Xu

Shenxi Thermal Power Plant of CHN Energy Group Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110065, China

Abstract: Circulating cooling water systems are widely used in the industrial field, but their water quality is complex and variable, which can easily breed scale and cause a series of problems such as reduced heat transfer efficiency, increased energy consumption, and equipment corrosion, posing a serious threat to the stable operation of the system. As an innovative scale inhibition material, CnZn alloy not only exhibits excellent anti scaling and corrosion performance, but also has dual advantages of environmental protection and economy. Through in-depth analysis of its scale inhibition mechanism, combined with performance testing under experimental conditions and practical engineering application verification, it has been confirmed that this material has good adaptability and long-term stability in high temperature and high hardness water quality environments, and has great potential for promotion and application value in engineering practice.

Keywords: CnZn alloy; scale inhibiting materials; circulating cooling water system; corrosion inhibition performance; engineering application

引言

循环冷却水系统于石化、电力、冶金等工业领域被大量应用,然而高温工况与复杂水质致使系统结垢频发,极大影响设备运行效率并缩短其使用寿命,传统阻垢剂虽可暂时抑制结垢,但因其引发环境污染且阻垢效果波动,难以满足长期使用需求,CnZn 合金凭借优异的电化学稳定特性,以及协同发挥的缓蚀阻垢功效,成为极具潜力的新型阻垢材料,通过实验数据与工程实际应用效果剖析其阻垢性能,将有力推动绿色高效阻垢技术在工业水处理场景中的普及应用。

1 循环冷却水系统中的结垢问题及其影响

1.1 水垢的成因与分类

循环冷却水系统运行时,随着水分持续蒸发浓缩,水中钙、镁等离子浓度不断累积,一旦突破溶解阈值,便会与碳酸根、硫酸根、氢氧根等阴离子结合,生成难溶性化合物并逐步形成水垢,其中,碳酸钙(CaCO_3)、硫酸钙(CaSO_4)和氢氧化镁($\text{Mg}(\text{OH})_2$)最为常见, CaCO_3 在温度变化或 pH 波动时易结晶析出,外观呈白色; CaSO_4 在高硬度水质中稳定存在,虽结垢缓慢但清理困难; $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 则在碱性条件下大量生成,附着特性显著,此外,

水中悬浮物、有机物及微生物活动会加速垢体形成,不同水质条件下垢层成分与沉积速率存在显著差异。

1.2 结垢对系统运行的危害

水垢在循环冷却水系统内的沉积会引发多重负面效应,换热设备表面的垢体极大削弱传热性能,致使设备运行温度失控,危及工艺流程稳定性,垢层持续增厚将缩窄管道流通截面,甚至引发堵塞,破坏水循环并加剧设备负荷,不均匀的垢体分布还会造成局部过热,在金属表面形成温差应力,诱发微裂纹并加速腐蚀进程,水垢与腐蚀产物结合形成的复合沉积层,进一步加剧金属结构损坏,为保障系统正常运转,企业需增加清洗维护频次,由此产生高昂运维成本与停机损耗,甚至埋下重大安全隐患。

1.3 传统阻垢方法的局限性

工业领域为抑制水垢生成,普遍采用投加化学阻垢剂的方法,常见类型包括磷酸盐、有机膦酸、聚羧酸等,这类药剂通过络合金属离子、干扰晶体生长或构建保护膜等作用机制,延缓水垢沉积进程,然而,化学阻垢剂的应用面临多重挑战:其一,部分药剂在水体中残留,随废水排放后可能引发水体富营养化、毒性污染等生态问题;其二,长期使用易产生副反应产物,导致沉积物结构复杂化,增

加后续清洗难度；其三，部分药剂对水质波动敏感，阻垢效能稳定性不足，难以适应工业水系统的复杂工况，此外，高频次投加药剂会推高处理成本，无法契合现代工业对绿色环保、高效节能的发展需求，因此，研发更为安全、高效且可持续的阻垢新材料，已成为行业亟待突破的关键方向。

2 CnZn 合金阻垢材料的性能特点

2.1 合金成分与结构特性

CnZn 合金以铜 (Cu) 和锌 (Zn) 为主要成分，二者配比直接影响合金性能表现，铜元素赋予合金优异的抗菌与缓蚀特性，锌元素则在抑制晶体形成中发挥核心作用，该合金微观结构呈现多相共存状态，具备高度致密性与力学稳定性，在水环境下不易释放杂质，当 CnZn 合金接触循环水，其表面迅速生成由氧化铜和氧化锌构成的致密氧化膜，这层保护膜既能隔绝水与金属基体的直接接触，发挥防腐功效，还能形成物理屏障，有效干扰垢类晶体的成核与生长进程，此外，合金微观结构展现出良好亲水性与规则晶格排列，为其在循环系统中持续发挥阻垢作用提供保障。

2.2 阻垢机理探讨

CnZn 合金在水系统中的阻垢效能源于多重机制协同运作，其凭借自身电化学特性在金属表面引发钝化现象，切断水垢与腐蚀产物的结合路径；表面氧化膜凭借强吸附能力，捕获水中 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 等致垢离子，防止其在金属表面沉积；合金释放的微量金属离子能够干扰水中晶核形成，促使生成疏松无序的晶体结构，削弱垢层附着能力，这些作用共同抑制晶体生长，阻止垢层致密化，实现阻垢、缓蚀与系统稳定运行的多重目标，相较于单一物理阻隔或化学络合阻垢方式，CnZn 合金的复合作用机制使其在复杂水质条件下仍能保持良好的适应性与长效性。

2.3 与传统阻垢剂的对比优势

与传统化学阻垢剂相比，CnZn 合金在环保性能、作用稳定性及经济成本方面展现出突出优势，从环保角度来看，该合金无需添加化学药剂，不会向水体排放大量有机磷、氮污染物，有效规避了水体富营养化风险，契合当下绿色发展理念，在稳定性方面，CnZn 合金使用寿命长，即便处于高温、高硬度等严苛环境，其物理结构与阻垢效能依然保持稳定，能够适应复杂多变的工业工况，经济层面上，尽管合金前期采购成本略高于部分化学药剂，但其一次投入可长期使用，无需频繁加药，同时减少了排污处理费用，从全生命周期成本考量更具经济性，由此可见，CnZn 合金在现代工业水处理领域展现出长效、高效且可持续的阻垢特性，具备广阔的推广应用前景。

3 实验室条件下的阻垢效果测试

3.1 实验设计与参数设置

构建模拟实验系统以综合评价 CnZn 合金在循环冷却水系统中的阻垢效能，采用封闭式循环水路开展对照研究，

实验装置由恒温水箱、循环水泵、内置 CnZn 合金片的测试段、冷凝器及流量计量设备构成，模拟循环水成分依据工业冷却水标准配制，主要离子浓度为： Ca^{2+} 250mg/L、 Mg^{2+} 80mg/L、 HCO_3^- 300mg/L、 SO_4^{2-} 100 mg/L，总硬度维持在 350mg/L（以 CaCO_3 计），实验工况设定为：水温稳定在 $45\pm 2^\circ\text{C}$ ，pH 值控制在 7.5 ± 0.2 ，循环水流速 0.8m/s，以此模拟常规冷却系统运行环境，实验分设对照组（未添加阻垢材料）与实验组（置入 CnZn 合金片），每组运行周期 7 天，按 24 小时间隔取样监测，系统分析结垢演变趋势。

3.2 结垢速率及阻垢率测定

阻垢性能评估主要运用质量差法与电导率变动分析法，质量差法是将标准碳钢片置于实验系统，按周期取出干燥称重，通过测定结垢前后质量差值，计算单位面积结垢量；电导率变动分析则通过监测水中离子浓度变化趋势，间接反映水垢形成速率，阻垢率通过公式“阻垢率 (%) = $[(m_0 - m_1)/m_0] \times 100\%$ ”计算，其中 m_0 代表对照组结垢量， m_1 为实验组结垢量，为保障结果可靠，实验多次重复操作，并采用标准差表征数据误差范围。

3.3 实验结果分析与讨论

模拟实验数据证实，CnZn 合金在设定工况下对结垢过程呈现显著抑制效果，数据显示，实验第 7 日对照组碳钢片单位面积结垢量达 $2.14\text{g}/\text{m}^2$ ，而置入合金片的实验组仅为 $0.52\text{g}/\text{m}^2$ ，经计算阻垢率高达 75.7%，实验组电导率下降趋势明显趋缓，表明水中 Ca^{2+} 等致垢离子沉淀进程得到有效遏制，整个实验周期内，合金表面未见明显垢体附着，且氧化膜保持完整，未出现腐蚀迹象，充分验证其卓越的抗垢与缓蚀性能，与传统聚羧酸阻垢剂的平行对比显示，后者在相同条件下阻垢率仅为 62.3%，且需每日补充药剂，操作繁琐，由此可见，CnZn 合金在模拟冷却水环境中展现出稳定长效的阻垢能力，能够适应长期连续运行需求，在工程应用中具备显著优势与可行性。

表 1 CnZn 合金与其他阻垢方式在模拟循环冷却水系统中的性能对比

组别	实验天数	单位面积结垢量 (g/m^2)	电导率下降速率 ($\mu\text{S}/\text{cm}\cdot\text{d}$)	阻垢率 (%)
对照组	7	2.14	68.3	—
CnZn 合金组	7	0.52	21.7	75.7
聚羧酸组	7	0.81	26.5	62.3

实验结果充分印证了 CnZn 合金作为阻垢材料的有效性与先进性，为其在工业冷却水系统中的推广应用奠定了坚实的数据基础。

4 实际工程中的应用案例研究

4.1 工程背景与布设方案

以江苏省某大型化工企业的循环冷却水系统为研究载体，该系统负责为合成装置冷却塔及换热站提供冷却服务，日循环水量达 4800 吨，长期受碳酸钙类水垢影响，

换热效率大幅下降,设备年均停机维护次数高达5次,为解决这一问题,2024年6月在该系统开展CnZn合金阻垢材料的现场应用测试,技术团队在主换热器进口支路、冷却塔集水池出口管道内壁及部分旁通支路安装CnZn合金模块(单模块重量0.8kg,共计10块),采用“管道内嵌与循环覆盖相结合”的布设方式,确保合金与循环水充分接触以实现最佳阻垢效果、模块安装过程无需改造原有系统结构,展现出良好的兼容性与操作便利性。

4.2 运行数据与系统反馈

系统运行后,对水质指标及设备运行状态进行了为期三个月的连续监测,运行前冷却水中 Ca^{2+} 浓度为235mg/L, pH值7.6,总硬度达345mg/L,常规投加聚合磷酸盐的处理效果有限,安装CnZn合金模块一个月后,系统回水中 Ca^{2+} 浓度稳定在197mg/L,总硬度降至289mg/L,表明结垢离子的沉积趋势得到显著抑制,红外热成像监测显示,换热器温差由初始的 8.1°C 降至 6.4°C ,换热效率提升约21%。设备外壳及管道内壁未见明显新生水垢,冷凝器压力保持稳定,运行噪音与振动均有所降低、企业设备维护人员反馈,三个月内无需对垢层进行清洗,设备运行状态良好、冷却塔循环周期延长约35%,维护周期从原来的两个月延长至四个月以上,系统整体运行稳定性显著提升。

4.3 效果评价与经济分析

对比冷却系统运行前后数据,CnZn合金在阻垢与节能方面成效显著、经估算,采用该合金后每月节省能耗费用约4200元,降低水垢相关清洗及人工成本约3000元,年度综合运行成本减少可达8万元,合金模块采购安装总计投入2.5万元,预计使用周期长达3年,投资成本回收周期不足5个月,经济效益突出、此外,该材料无需持续添加化学药剂,有效减轻环保排放压力与后处理负担,契合清洁生产及绿色工厂建设要求,企业计划将其推广至其他车间水系统、实践表明,CnZn合金在实际工程中实现技术与经济双重突破。

5 CnZn合金阻垢材料的优化与发展前景

5.1 材料改性与制备技术发展

面对工业需求升级与环保标准趋严,CnZn合金阻垢材料在配比优化和表面处理领域成为研究焦点,通过调整铜锌元素比例,掺杂铝、钛等微量元素,可增强材料抗氧化性与缓蚀性能,提升高温高盐环境适应性,纳米陶瓷包覆、等离子体表面氧化等新型涂层技术的应用,能够强化合金表面致密性,增强抗垢附着能力,延长使用寿命、粉末冶金、热挤压及高温烧结等先进制备工艺的引入,为合金形态定制化生产与规模化应用提供技术保障。

5.2 在不同工业系统中的适用性分析

CnZn合金阻垢材料的应用场景已突破传统石化、化工行业局限,在多领域工业冷却系统展现优异性能,中央

空调冷却塔中,其便捷安装与免维护特性大幅降低运维压力;冶金行业高硬度循环水系统内,可有效抑制硫酸盐类水垢生成;火电厂冷凝器在长期高负荷运行中,得益于该合金良好的高温抗垢性与电化学稳定性,随着水资源短缺加剧及回用水需求增长,CnZn合金在高污染、高硬度水质处理中的应用潜力将进一步释放。

5.3 推广应用面临的问题与对策

尽管CnZn合金展现出广阔的应用前景,但其大规模产业化推广仍存在诸多阻碍,其一,需深入探究合金腐蚀行为与水质条件的交互作用机制,确保材料在不同酸碱度及氧化还原环境下的稳定性,提升其在复杂工况中的耐受性;其二,当前该材料成本显著高于传统化学药剂,亟需通过技术革新与扩大生产规模降低单价,增强市场竞争优势;其三,行业内尚未建立统一的技术规范与性能评价体系,导致跨行业推广与质量监管缺乏依据、针对这些问题,可通过深化产学研协同创新,搭建全流程性能测试平台,推动行业标准制定工作,结合国家节能减排政策完善经济激励机制,加速新型阻垢材料的工程化应用进程,助力实现绿色高效的工业水处理目标。

6 结语

实验探究与工程实践双重验证表明,CnZn合金在循环冷却水系统中呈现卓越的阻垢效能,不仅能有效遏制碳酸钙等常见水垢的形成,还具备显著的缓蚀功能,可适配多样化的工业水处理场景,该合金凭借绿色环保属性、经济高效优势及长使用寿命,为传统阻垢技术提供了优质替代选择,面向未来,可进一步挖掘其在多功能复合材料领域的应用潜力,优化材料结构设计与表面处理工艺,并深入研究其在长期服役环境下的腐蚀特性与稳定性表现,从而加速推动产业化进程。

[参考文献]

- [1]丁永斌,闫逢吉,马克孝.循环冷却水系统电化学除盐设备的研究与应用,中国电力技术市场协会.2025年(第九届)发电行业水处理技术研讨会论文集[C].山西:阳城国际发电有限责任公司,2025.
- [2]杭青.杀菌剂异噻唑啉酮在延安炼油厂循环冷却水系统中的应用[J].石化技术,2025,32(3):4-6.
- [3]李振河,王佳伟,刘晓磊,等.再生水补给循环冷却水系统中药剂的最佳投加量研究[J].广东化工,2025,52(7):56-58.
- [4]袁亮,韩会亮,米精宏,等.循环冷却水系统多水源补水的可行性研究与应用[J].工业用水与废水,2025,56(2):56-60.
- [5]刘松涛,周映燃,陈传敏,等.微生物制剂在循环冷却水动态模拟实验研究[J].水处理技术,2025,51(5):3-6.

作者简介:姜旭(1982—),男,汉族,研究生,中级工程师,国家能源集团辽宁电力有限公司沈西热电厂运行部主任。