

工业化工循环冷却水微生物滋生危害及杀菌处理工艺研究

惠劼锋，杨丽莉，张治国

单位 兰州石化公司

邮编 730060

摘要：工业化工循环冷却水系统是化工生产节水降耗、保障换热设备稳定运行的核心单元，运行过程中微生物滋生引发的腐蚀、结垢、换热效率下降等问题，是制约系统长周期稳定运行的关键痛点。本文结合化工企业循环水系统运维实际，梳理了微生物滋生的三类核心危害，分析了水质、工况、运维三类影响因素，构建了“氧化性杀菌精准投加+非氧化性杀菌协同适配+源头防控优化”的复合处理工艺，明确了工艺应用的核心参数与管控要点。实践表明，该工艺可有效控制循环水系统微生物繁殖速率，降低设备腐蚀风险，提升换热效率，为化工企业循环水系统的精细化运维提供参考。

关键词：循环冷却水；微生物危害；杀菌处理；粘泥剥离；精细化运维

引言

化工生产过程中 90% 以上的换热需求依托循环冷却水系统实现，该系统的稳定运行直接关系到生产装置的能耗水平与安全系数。随着化工行业节水要求不断提升，循环水浓缩倍数持续提高，系统内营养物质富集、微生物滋生的问题愈发突出，部分企业甚至出现因微生物粘泥堵塞换热器导致的非计划停车，造成较大经济损失。传统杀菌工艺存在药剂投加粗放、抗药性明显、运维成本偏高等不足，难以适配高浓缩倍数下的循环水管控需求。本文基于多家化工企业循环水系统的运维实践，对微生物滋生的危害、影响因素及杀菌处理工艺展开系统研究，旨在为同类企业提供可复制的管控方案。

1 循环冷却水系统微生物滋生的核心危害

1.1 加剧换热设备腐蚀速率

循环水系统滋生的微生物主要包括异养菌、硫酸盐还原菌（SRB）、真菌及藻类等，其中 SRB 在厌氧环境下可将水中的硫酸盐还原为硫化氢，与换热设备管壁的铁元素反应生成硫化亚铁沉积物，加剧管壁的电化学腐蚀；异养菌代谢产生的粘泥附着在设备表面，会形成粘泥下的氧浓差电池，引发局部坑蚀。实际生产中微生物引发的腐蚀速率通常是单纯化学腐蚀的 3-5 倍，严重时可导致换热管束在 1-2 年内出现泄漏，大幅缩短设备使用寿命。

1.2 降低系统换热运行效率

微生物代谢产生的粘泥导热系数仅为碳钢的千分之一左右，远低于碳酸钙水垢的导热性能，当换热表面附着 1mm 厚的微生物粘泥时，换热效率可下降 15% 以上。为保障生产换热需求，企业需要提升循环水流量或降低供水温度，直接导致循环泵能耗、冷却塔制冷能耗上升。部分工况严苛的反应装置换热系统若出现粘泥大面积附着，还会出现反应物料超温问题，触发生产联锁停机，影响整个生产线的运行稳定性。

1.3 削弱水处理药剂效用

当前化工企业循环水系统普遍投加有机膦类、聚羧酸盐类缓蚀阻垢剂，这类药剂的有机成分可被异养菌作为碳源分解消耗，导致药剂有效浓度快速下降。为保障缓蚀阻垢效果，企业往往需要提升药剂投加量，部分企业甚至出现药耗翻倍仍无法达标的情况。此外微生物代谢产生的酸性物质还会降低循环水 pH 值，进一步削弱缓蚀阻垢剂的作用阈值，甚至出现水垢与粘泥共生的问题，进一步加剧系统运行风险。

2 循环冷却水微生物滋生的核心影响因素

2.1 水质本底条件

补充水的水质是影响微生物滋生的基础条件，若补充水中 COD、氨氮、总磷含量偏高，会为微生物提供充足的营养源；循环水浓缩倍数提升后，各类营养物质进一步富集，会加速微生物繁殖速率。此外循环水 pH 值维持在 7.0-9.2 的中性偏碱区间时，恰好契合异养菌、藻类的最适生长环境，若未进行针对性调控，微生物总数会在 3-5 天内出现数量级增长，大幅提升管控难度。

2.2 系统运行工况

系统运行工况直接决定微生物的附着繁殖效率，循环水流速低于 0.5m/s 的区域，比如换热器壳程、集水池死角、管网弯头等位置，微生物悬浮颗粒易附着沉积，形成生物膜后持续繁殖。若系统旁滤装置配置不足或滤料失效，无法有效截留水中的微生物代谢产物与悬浮物，会形成“悬浮物富集-微生物繁殖-粘泥脱落-悬浮物进一步升高”的恶性循环，进一步加快微生物扩散速率。

2.3 运维管理水平

运维管理漏洞是微生物滋生的重要诱因，部分企业为降低运维成本，长期仅投加单一类型的杀菌剂，导致微生物逐渐产生抗药性，杀菌效果逐年下降；部分企业未定期开展粘泥剥离作业，系统内部积存的老垢成为微生物的繁殖载体。若生产装置出现物料泄漏，有机物料进入循环水系统后会为微生物提供大量碳源，短时间内即可引发微生物爆发式增长，还有部分企业杀菌剂投加量仅参考经验值，未根据水质变化动态调整，也容易导致微生物管控失效。

3 复合式杀菌处理工艺的构建与应用要点

3.1 氧化性杀菌剂精准投加机制

氧化性杀菌剂是微生物管控的基础，常用药剂包括次氯酸钠、二氧化氯等，采用“连续低剂量投加+定期冲击投加”的组合模式可有效提升杀菌效率。正常运行阶段，连续投加氧化性杀菌剂，控制循环水回水余氯在 0.1-0.3mg/L，既能抑制微生物繁殖，又可避免过量投加导致的缓蚀阻垢剂降解与设备腐蚀。当监测到异养菌总数超过 10^4 个/mL 时，开展冲击投加，将余氯提升至 0.8-1.0mg/L 并维持 2-4 小时，可快速灭杀浮游态微生物。投加时段需避开缓蚀阻垢剂投加后的 2 小时窗口，减少药剂间的相互干扰；对于采用二氧化氯作为杀菌剂的系统，需注意控制药剂中的副产物含量，避免对循环水水质造成二次影响。

3.2 非氧化性杀菌剂协同适配方案

非氧化性杀菌剂与氧化性杀菌剂交替使用，可避免微生物产生抗药性，同时兼具粘泥剥离效果。常用非氧化性杀菌剂包括季铵盐类、异噻唑啉酮、戊二醛等，正常运行时每 10-15 天投加一次，投加浓度根据微生物总数控制在 50-100mg/L。针对粘泥附着严重的系统，可选择季铵盐类杀菌剂与少量剥离助剂配合投加，使附着在设备表面的生物膜松动脱落，之后通过旁滤、排污排出系统。投加非氧化性杀菌剂后 24 小时内暂停氧化性杀菌剂投加，避免药剂发生氧化还原反应导致失效。

3.3 源头防控配套优化措施

源头防控是降低微生物管控成本的核心，首先优化旁滤系统，采用纤维球或改性纤维滤料，将旁滤量控制在循环总水量的 2%-5%，定期对滤料进行反冲洗，保障悬浮物去除率稳定在 60%以上，及时排出微生物代谢产物；其次做好补充水预处理，通过混凝沉淀、过滤等工艺降低补充水中的 COD、氨氮含量，从源头减少微生物营养源；另外在冷却塔进风面加装遮阳板，抑制藻类光合作用，定期清理集水池淤泥，减少微生物附着载体，从运行环境上压缩微生物的繁殖空间。

结束语

本文提出的复合式杀菌处理工艺，兼顾了微生物灭杀、粘泥剥离与源头防控三类需求，

在多家化工企业的应用实践表明，该工艺可将循环水异养菌总数稳定控制在 10^3 个/mL 以内，设备腐蚀速率低于 0.075mm/a 的行业标准，换热效率较传统工艺提升 10% 以上，运维成本可降低 15% 左右，具有较高的推广应用价值。未来随着循环水系统在线监测技术的普及，可进一步构建基于微生物总数、余氯、pH 值等参数的智能投加模型，实现杀菌药剂的精准动态调控，进一步提升循环水系统的运行稳定性与经济性，为化工行业的节水降耗、安全生产提供支撑。

参考文献：

[1]杨春艳,刘世念,林理量.燃气机组循环冷却水杀菌剂筛选与现场应用[J].科技创新与应用,2024,14(29):81-85.

[2]侯艳宏,王皓,朱明磊,等.微生物膜活性监测技术在炼化循环水腐蚀治理上的应用[J].化学工程与装备,2024,(4):128-131.

[3]董锐锋,李夏,伍阳雪,等.微电解技术对调相机站循环冷却水降垢杀菌作用的试验研究[J].工业用水与废水,2024,55(2):56-60.