

敞开式循环水系统微生物防控方案优化

魏德娟

连云港石化有限公司 江苏 连云港 222065

摘要: 敞开式循环冷却水由于温度较高、养分丰富、光照充足等原因容易滋生大量微生物而产生生物黏泥、腐蚀管道以及影响传热效果等问题严重影响工业装置的安全稳定生产。本文基于微生物滋生原因及其造成危害进行阐述对目前各种防控方法不足之处进行总结并提出以交替使用氧化性和非氧化性杀菌剂为主辅以物理手段和在线监控的改进措施。防控优化需坚持“协同高效、抑菌持久、适量精确、环保安全”的原则,在药物搭配选择、添加方式改变、旁滤加强以及持续监控方面采取相应的措施来达到目的。此外从管理、水质控制及应急预案等方面给出建议以期更好地控制微生物带来的危害使工业循环水系统正常有序运转。

关键词: 敞开式循环水系统; 微生物防控; 生物黏泥; 杀菌剂; 方案优化

引言

敞开式循环冷却水系统被大量应用于石油化工、电力、钢铁以及中央空调等众多行业,在此系统中,循环水与大气接触,利用冷却塔或者喷淋池进行换热降温,而随着循环水不断蒸发浓缩,其中悬浮物、有机物和无机盐含量不断增加,同时由于水温一般保持在 20-40℃之间并且呈弱碱性,从而给各种微生物(细菌、真菌和藻类)提供良好生长环境。微生物大量繁殖就会产生生物粘泥(又称生物膜),黏附在管道内壁、换热器表面以及填料上,造成传热不良、流体流动受阻等问题,而且还会导致微生物腐蚀(MIC),使管道穿孔或者设备过早损坏,甚至不得不停机检修。所以合理的设计并及时调整微生物控制策略对保证敞开式循环冷却水系统的稳定运行具有重要意义。

1 敞开式循环水系统微生物危害及其成因

1.1 微生物滋生的环境条件

敞开式循环水系统为微生物提供良好的生长条件。而冷却塔在强制通风时会把大量的空气中灰尘、孢子以及微生物带入水中,同时蒸发浓缩使得水中有机碳源、氮源、磷源等营养物质浓度增加若干甚至数十倍^[1]。循环水温一般保持在 25~42℃之间,有利于中温菌群迅速生长;阳光充足的冷却塔池和配水槽为藻类光合作用提供能量。因此,在这些条件下微生物占据系统的竞争优势,当控制不当就会出现微生物数量急剧增长。

1.2 主要微生物类群及其危害形式

循环水系统中存在的一些不良微生物大致可分为三种类型。第一种是黏液异养菌,如假单胞菌属、芽孢杆

菌属以及黄杆菌属等,这些微生物产生大量的胞外聚合物(EPS)形成黏稠的生物膜基质,是导致管道堵塞及污垢热阻升高的主要原因;第二种是铁细菌和硫酸盐还原菌,铁细菌将溶解性的 Fe^{2+} 氧化成难溶性的氢氧化铁而促进锈瘤生成,而硫酸盐还原菌在缺氧区域将硫酸盐还原成 H_2S 进而腐蚀碳钢产生点蚀及氢脆;第三种是丝状蓝细菌及绿藻,这类微生物附着于冷却塔填料或壁面上影响传热效率的同时,当大量死亡并分解时会提高水中有机物含量从而促进异养菌的生长繁殖。

1.3 微生物危害的传导路径

微生物危害具有连锁反应特性:初始阶段为换热器表面生物膜形成,引起热阻上升从而影响冷却效率,在保证生产工艺的前提下需加大循环水量或者减少生产量;中期为垢下局部腐蚀,使得金属壁厚度变薄甚至穿透,加大维护及更换费用;后期严重时会导致设备故障停机,造成重大经济损失。

2 既有微生物防控技术及其局限性分析

2.1 氧化性杀菌剂的主导地位与边际效应递减

以液氯、次氯酸钠、二氧化氯及臭氧等为代表的氧化性杀菌剂是目前使用最为广泛微生物控制方法。它们的作用机理是利用其较强的氧化性能破坏细菌的细胞壁、酶系统以及 DNA,从而迅速杀死水中的游离细菌。但是,如果长期单靠氧化性杀菌剂进行处理,则存在三个问题:一是循环水中含有大量的氨氮、硫化氢以及有机物,这些都会消耗大量的氧化剂造成所谓的“无效投加”,使得有效的余氯不能持续;二是由于微生物受到连续不断的氧化压力而产生抗性的突变体,一些菌

种可以产生过氧化氢酶或者形成更为厚重的胞外聚合物以抵御氧化伤害,因此杀菌的效果越来越差;三是大量氧化剂对于系统的金属设备有加速腐蚀的作用,而且它还会与有机前驱体反应生成诸如三卤甲烷之类的消毒副产品,增加了污水处理的难度及费用。

2.2 非氧化性杀菌剂的使用瓶颈

异噻唑啉酮、季铵盐、戊二醛以及二硫氰基甲烷等非氧化性杀菌剂具有杀菌范围广、不受还原性物质影响的特点,在氧化性杀菌剂失效的情况下可作为补充或者替代品使用。但是也存在以下几点限制因素:一是某些非氧化性杀菌剂(如季铵盐类)容易与循环水中阴离子聚电解质阻垢分散剂结合形成难以溶解的螯合物,不但影响二者作用效果,而且增加沉积倾向;二是非氧化性杀菌剂价格一般都比氯系产品贵得多,经济性成为其在高浓缩倍数、大量水系统中难以大规模推广的原因;三是长时间单一一种类使用也会产生耐药性问题,持续应用异噻唑啉酮六个月以上,其最小抑菌浓度可以提高几倍。

2.3 物理防治与监测手段的配套不足

除了化学加药以外,紫外杀菌、超声波处理、旁路砂滤及磁场处理等物理方法也在一些场合作为辅助措施采用。但是,物理方法在敞开式的大型水体中大规模的应用尚有不足之处:紫外光对于浑浊度较高以及颜色较深的循环冷却水穿透力较差;旁路过滤只能除去悬浮态微生物而不能去除附着在设备壁上的生物膜。更重要的是,在大多数情况下,循环水场没有现成的方法进行微生物监控,仍然采取一种每隔一周进行一次的异养菌平板计数法来判断水质好坏,因此反应迟缓,不能及时指导加药工作,使得控制工作总是处于一种被动的状态。

3 微生物防控方案的优化原则与策略框架

3.1 优化设计的四项基本原则

方案优化要遵循四个原则。一是协同增效原则,在各自不同的作用位点上进行合理的混配或者轮换使用以达到“1+1>2”联合抑菌的效果并且减少单一药剂用量。二是抗性延缓原则,在适当的间隔时间内更换不同的药剂种类以免微生物群体对于某种药剂形成稳定遗传上的耐药性^[2]。三是精准投加原则,根据水体变化情况以及季节变换还有生产负荷的变化来调节用药量不能过多也不能过少。四是环境相容原则,尽可能选择毒性较小易于分解并且不含重金属类物质作为药剂尽量减少出水中有害物质含量满足排放标准。

3.2 防控方案优化的三维框架

本论文提出“药剂体系优化—投加方式优化—辅助系统优化”三方面内容。在药剂体系上,建立氧化性和非氧化性杀菌剂选择库,结合水质情况以及设备材质选取合适的药剂组合,并对不同药剂组合的杀菌效率、腐蚀率及经济性进行比较分析;在投加方式上,采用冲击式投加与连续低剂量投加相结合的方法,在夏季高温以及污染严重时期加大投加次数;在辅助系统上,加强物理去除能力,增设旁路自动反冲洗过滤器并提高换热器反冲洗频率,以尽快清除已经脱落生物粘泥,避免再次附着。

3.3 经济性与效果的综合平衡

优化方案需考虑防控效果与经济效益之间的关系。可以采用单位杀菌成本(元/吨水·天)、杀菌率加权达标率作为主要评价标准对各种方案进行比较。控制要求不是“零菌”,而是达到以保证设备安全为前提的最小限度的微生物含量(如异养菌总数 $<1\times10^5$ CFU/mL、SRB $<10^3$ 个/mL)以上就开始加药,这样的“分层次、灵活应对”的方式既可以保证安全又能防止不必要的浪费以及给环境带来的负担。

4 优化方案的具体实施路径

4.1 药剂组合与交替使用方案

建议使用氧化性杀菌剂及非氧化性杀菌剂“周期间隔交替、季节侧重调整”的投加方法,在一般情况下以二氧化氯或者稳定性二氧化氯为主力氧化剂,因其氧化能力强而且不会产生氯代酚等有异味物质,在一周之内每天冲击投加2~3次,使系统中游离余氯保持在0.1~0.3 mg/L;而在每月第一个星期用异噻唑啉酮和季铵盐混合物连续投加2~3天,彻底消灭已经形成生物膜底层微生物^[3]。夏季高温或者暴雨之后水体发生变化时可以临时加入戊二醛或者二硫氰基甲烷来进行短期冲击,迅速降低突然出现大量微生物数量,在更换之前需要对设备进行清洗以去除上一种药品残留以免影响下一次药品效果。

4.2 投加控制参数的动态优化

投加量需结合补充水水质、浓缩倍率、系统体积以及热负荷等多方面因素综合考虑。推荐使用氧化还原电位(ORP)与pH联控法进行控制,在ORP小于350mV情况下,自动开启氧化性杀菌剂投加,直到ORP达到450~500mV时停止;而非氧化性杀菌剂投加以在线ATP生物发光检测仪数值为依据,在其值大于一定数值即表示存在大量活菌的情况下,进行短时间投加。利用自动

化加药设备及变频计量泵保证加药准确性不超过设定值正负 5%，避免人为操作造成的随意性。

4.3 物理辅助措施的配套升级

在改进化学方案的同时，须同时加强物理方法的应用。一方面加大旁路过滤器的工作量，一般要求其流量达到循环水量的 3%-5%，使用石英砂和无烟煤双层滤料，在线去除悬浮固体以及脱落的生物黏泥碎片等，从而降低水中的悬浮物含量及微生物附着的基质；另一方面对于一些重要的热交换器可以进行在线胶球清洗或者定期反向冲洗，通过外力打断生物膜整体结构，使后续投加的化学品更容易到达底层^[4]。此外，还要给冷却塔水池加盖，防止太阳光直接照射入水中促进藻类生长，从而减少生物量进入系统中。

4.4 在线监测与反馈预警系统建设

建立“实时监测-数据分析-预警决策”闭环管理模式。主要监控内容为：pH、温度、电导率、ORP、浊度以及余氯等在线仪表连续监测；每周增加一次异养菌总数、铁细菌和硫酸盐还原菌计数；每月对生物膜发展情况做一次评价（使用挂片或者生物膜反应器方法）。所有数据汇总到管理系统中，在线趋势分析确定微生物增长临界点，一旦总体指标超标系统会发出报警并且提供解决方案，以实现由“凭经验”到“靠数据”。

5 保障措施与持续改进机制

5.1 制度建设与人员培训

企业应编写《循环水系统微生物控制管理规程》，规定水质标准、加药操作指南、突发情况处理以及记录填写等要求。定期对操作人员进行微生物相关知识、药品使用安全以及突发事件应对培训，使操作人员能够及时发现水质问题并采取相应措施。实施岗位绩效考核制度，把微生物控制合格率作为运行班组的一项重要考核内容，做到人人有责。

5.2 水质管理与腐蚀控制的联动

微生物防治与防腐、防垢是密切相关的。生物膜下垢下腐蚀一般是多方面原因造成的，所以改进措施要兼顾各方面，不能使杀菌剂和阻垢缓蚀剂发生拮抗作用。可以使用多功能组合型产品，或者采取分批投放的方法以降低它们同时存在的时长。定期进行挂片测定腐蚀速

度及点蚀程度，在更换或者增加杀菌剂量之后保证碳钢腐蚀率不超过 0.075 mm/a、铜合金腐蚀率不超过 0.005 mm/a 的情况下达到三者协同的目的。

5.3 周期性评估与动态修订

循环水系统运行情况（例如生产负荷、补水来源、天气状况等）会随着时间发生变化，因此微生物控制措施也不能一成不变。需要定期进行总结分析工作每年一次，总结一年中的水质情况、药品使用量、设备维护及费用开支等情况，评价当前的方法是否合理有效。如果有必要，针对不同的药品种类以及添加比例和更换频次进行适当的调整；在有新的补给水源接入、装置扩建或者环保要求提升的情况下要及时开展专项方案审查以保证防控工作的及时性和有效性。

6 结语

本文在系统梳理微生物危害特征和现有技术局限的基础上，提出了以药剂协同增效、投加精准调控、物理辅助强化和监测预警闭环为支柱的优化防控方案。优化核心在于突破传统“高浓度、单一化、固定周期”的粗放模式，转向“低剂量、组合化、动态响应”的精细模式，实现防控效果、运行成本与环境保护的三元平衡。未来，随着生物传感技术、大数据分析和人工智能在工业水处理领域的深入应用，循环水系统微生物防控有望向实时智能化、预测自适应方向持续演进，为工业水系统的高效低碳运行提供更强支撑。

参考文献

- [1] 刘宏宇, 陈志刚, 王晓东. 工业循环冷却水系统微生物群落特征与控制策略研究进展 [J]. 工业水处理, 2024, 44(2): 1-8.
- [2] 张伟, 李建民, 赵芳. 氧化性与非氧化性杀菌剂协同控制循环水生物膜的效果评价 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2023, 40(4): 23-28.
- [3] 陈丽华, 孙德荣, 周明. 敞开式循环水系统生物黏泥形成机理及防治技术综述 [J]. 给水排水, 2025, 51(1): 78-85.
- [4] 王振宇, 徐海峰, 杨静. ATP 生物发光法在循环水微生物快速检测中的应用研究 [J]. 环境工程学报, 2024, 18(3): 721-729.