

三种常用杀菌剂在工业循环水中的应用技术研究

侯健

国能包头煤化工有限责任公司, 中国·内蒙古 包头 014010

摘要: 杀菌剂是循环水水质调控、微生物抑制的关键药剂。现阶段工业循环水领域应用最为普遍的药剂主要包含三氯异氰尿酸、季铵盐、异噻唑啉酮三大类。三种药剂分别归属于氧化型杀菌剂、阳离子表面活性剂杀菌剂与有机非氧化型杀菌剂, 杀菌原理、水质适配条件、投加工艺及应用优缺点存在显著差异。本文结合工业水处理现场运行经验, 系统阐述三种杀菌剂的理化特性、杀菌机制、适用工况与投加技术要点, 对比分析单剂使用弊端与组合投加优势, 总结科学、高效的循环水微生物防控工艺方案, 可为工业循环水系统日常运维与药剂优化提供技术参考。

关键词: 循环冷却水; 杀菌剂; 三氯异氰尿酸; 季铵盐; 异噻唑啉酮

Research on the Application Technology of Three Commonly Used Biocides in Industrial Circulating Water

Hou Jian

Guoneng Baotou Coal Chemical Co., Ltd., China Inner Mongolia Baotou 014010

Abstract: Biocides are critical agents for water quality regulation and microbial inhibition in circulating water systems. Currently, the most widely used biocides in industrial circulating water applications primarily include trichloroisocyanuric acid, quaternary ammonium salts, and isothiazolinone, which are categorized as oxidizing biocides, cationic surfactant biocides, and organic non-oxidizing biocides, respectively. These three types differ significantly in their biocidal mechanisms, water quality compatibility conditions, dosing processes, and application advantages and disadvantages. Based on field operational experience in industrial water treatment, this paper systematically elaborates on the physicochemical properties, biocidal mechanisms, applicable conditions, and dosing key points of the three biocides, compares the drawbacks of single-agent usage with the advantages of combined dosing, and summarizes a scientific and efficient microbial control process for circulating water systems. The findings provide technical references for daily operation and biocide optimization in industrial circulating water systems.

Keywords: Circulating cooling water; Bactericide; Trichloroisocyanuric acid; Quaternary ammonium salt; Isothiazolinone

0 引言

工业循环冷却水系统具有水体循环复用、温度恒定、光照充足、杂质富集等特征, 为微生物繁殖提供了良好环境。微生物大量增殖后, 会在换热器管壁、冷却塔填料及管道内壁附着堆积, 形成黏性生物沉积物。生物垢的导热性能极差, 会大幅降低换热设备工作效率, 导致机组能耗升高; 同时, 微生物代谢产生的酸性物质及厌氧环境, 极易诱发金属设备垢下腐蚀与点蚀问题, 严重时会造成设备渗漏、停机检修, 给企业带来经济损失。

为有效控制水体微生物数量、抑制菌藻爆发、减少生物黏泥沉积, 工业生产中普遍采用杀菌剂投加技术进行水质管控。在众多水处理药剂中, 三氯异氰尿酸、季铵盐、异噻唑啉酮凭借杀菌效率稳定、适配性强、运行成本可控、环境影响较小等优势, 成为循环水系统主流杀菌药剂。

实际工程应用表明, 长期单一使用某一种杀菌剂, 会使水体微生物产生耐药性, 造成杀菌效果衰减、水质波动

异常。因此, 掌握三种杀菌剂的应用特性, 制定交替投加、复配使用的科学工艺, 对提升循环水系统运行稳定性、延长设备使用寿命具有重要现实意义。

1 循环水微生物危害及杀菌剂选用原则

1.1 循环水微生物主要危害

循环水体中主要存在异养菌、铁细菌、硫酸盐还原菌、藻类及真菌等微生物, 各类微生物协同繁殖会引发多重水质与设备问题。其一, 微生物聚集形成的生物黏泥会堵塞冷却塔填料与输水管道, 降低水循环流量, 影响系统冷却效果; 其二, 生物垢附着在换热表面, 形成隔热层, 显著降低换热效率, 增加企业生产能耗; 其三, 厌氧微生物繁殖形成局部酸性腐蚀环境, 诱发设备局部点蚀、缝隙腐蚀, 加速管道与设备老化损坏。

1.2 工业杀菌剂选用基本原则

结合循环水系统运行特点与水质管控要求, 工业杀菌剂选用需满足多项技术标准: 具备广谱杀菌能力, 可同时

抑制细菌、藻类及真菌繁殖；杀菌起效速度快、抑菌持续时间长；药剂腐蚀性低，不会对碳钢、不锈钢等设备材质造成损伤；与缓蚀剂、阻垢剂等水处理药剂配伍性良好；药剂残留低、易降解，无严重二次污染，且综合运行成本经济合理。

2 三种杀菌剂的理化特性与杀菌机理

2.1 三氯异氰尿酸 (TCCA)

三氯异氰尿酸工业俗称强氯精，是一种高效固体氧化型杀菌灭藻剂，产品有效氯含量最高可达 90% 以上，远优于传统次氯酸钠等氯系药剂。该药剂化学稳定性优异，常温储存损耗低，固体颗粒、片剂形态便于储存与现场投加。

其杀菌核心机理为：药剂溶于水后缓慢发生水解反应，持续释放次氯酸活性成分。次氯酸具备强氧化性，可快速破坏微生物的细胞膜结构、蛋白质体系与活性酶系统，阻断微生物代谢与繁殖过程，对水体细菌、藻类、孢子及芽孢均具备极强的灭杀效果，是工业系统主流的强力灭藻杀菌剂。

2.2 季铵盐类杀菌剂

季铵盐属于典型的阳离子表面活性非氧化型杀菌剂，工业常用品类以苯扎氯铵、聚季铵盐为主，是循环水系统长效抑菌的常用药剂。

该药剂杀菌原理区别于氧化型药剂：季铵盐阳离子基团可主动吸附水体中带负电荷的微生物细胞膜，改变细胞膜表面张力，破坏细胞膜渗透平衡，造成细胞内部营养物质外泄，最终导致微生物失活死亡。同时，季铵盐具备优异的分散、剥离性能，可有效剥离设备表面老化生物黏泥，兼具杀菌与清洁管壁的双重作用。

2.3 异噻唑啉酮杀菌剂

异噻唑啉酮是环保型有机非氧化杀菌剂，工业常用复配体系由 5-氯-2-甲基异噻唑啉酮与 2-甲基异噻唑啉酮组成，具备用量低、效率高、广谱抑菌的特点。

其作用机制为：药剂分子可直接侵入微生物细胞内部，抑制蛋白质合成与酶活性，阻断细胞分裂与增殖路径，从根源上抑制细菌、真菌、藻类的生长繁殖。该药剂不含氯离子，水体残留低、自然降解速度快，对精密设备、密闭循环水系统适配性极强。

3 三种杀菌剂在循环水中的具体应用技术

3.1 三氯异氰尿酸应用工艺技术

3.1.1 适用工况

三氯异氰尿酸灭藻能力突出、杀菌速度快，主要适用于夏季高温高湿、光照充足、藻类爆发频繁、水体浊度

偏高的循环水系统，多用于系统冲击杀菌、藻菌爆发应急治理。

3.1.2 投加控制标准

日常稳态运行阶段，采用低剂量维持投加方式，控制水体有效氯含量在 0.3~0.8mg/L，持续抑制浮游微生物繁殖。当出现水体发绿、藻类滋生、黏泥增多等水质恶化现象时，采用冲击投加工艺，将水体有效氯提升至 1.0~2.0mg/L，持续维持 4~8 小时，彻底灭杀水体菌藻、清除表层生物污垢。药剂以缓释片剂、颗粒投加为主，运维操作简便，适合大型工业循环水系统。

3.1.3 优缺点分析

该药剂优势为杀菌灭藻广谱高效、起效迅速、采购与运行成本低廉、储存稳定性好，适合大规模水质治理。存在的短板为长期连续投加会造成水体氯离子累积，对不锈钢设备存在轻微腐蚀风险，不适宜作为单一药剂长期连续使用。

3.2 季铵盐杀菌剂应用工艺技术

3.2.1 适用工况

季铵盐腐蚀性极低、抑菌周期长、水质稳定性好，适配各类常规工业循环水系统，尤其适合设备精密、低腐蚀要求、需要长期稳定抑菌的工况，是循环水日常维持抑菌的核心药剂。

3.2.2 投加控制标准

系统正常运行时，水体药剂浓度稳定控制在 2~10mg/L，可长效抑制异养菌滋生。每月可配合一次冲击投加，利用药剂的黏泥剥离性能，清除管道、填料附着的老化生物黏泥，保持换热界面清洁，保障设备换热效率。

3.2.3 优缺点分析

其核心优势是设备腐蚀性小、水处理配伍性优异，兼具杀菌、剥泥、分散水质杂质的多重效果，长期运行水质稳定。主要缺陷为在高硬度、高悬浮物水体中易产生泡沫，过量投加会影响水体通透度，且长期单一使用易导致微生物产生耐药性。

3.3 异噻唑啉酮杀菌剂应用工艺技术

3.3.1 适用工况

异噻唑啉酮环保性优异、无氯残留、对真菌抑制效果突出，适用于水质清澈、设备精密、对氯离子含量严格限制的循环水系统，广泛应用于精细化工、中央空调密闭循环水等高端工况。

3.3.2 投加控制日常

日常投加浓度控制在 5~15mg/L，少剂量即可实现

长效抑菌过程。水质变化、微生物数量超标的时候,可增大浓度至 20~30mg/L 进行冲击杀菌,达到快速恢复水质稳定。

3.3.3 优缺点分析

药剂优势为用量少、杀菌精准、无残留、对真菌灭杀效果优于氯系药剂,不会造成氯离子腐蚀。缺点是药剂成本相对较高,水体有机物高,增加浊度,环境会大幅削弱药效,抗污染能力较弱。

4 三种杀菌剂的综合性能对比

通过杀菌效率、抑菌时长、设备腐蚀、水质适配性、运行成本及耐药风险六个方面,可总结三类药剂的差异化优势:

(1) 杀菌速率比较:三氯异氰尿酸最快,能够快速处理藻菌爆发问题,异噻唑啉酮次之,季铵盐起效相对缓慢;

(2) 长效抑菌比较:季铵盐与异噻唑啉酮优势较明显,比较适合日常稳定维持,氯系药剂长效性较差;

(3) 腐蚀性能比较:季铵盐、异噻唑啉酮几乎无腐蚀,三氯异氰尿酸存在轻微氯离子,有腐蚀风险;

(4) 灭藻能力比较:三氯异氰尿酸为三类药剂中灭藻能力最强,是控藻首选药剂;

(5) 耐药风险比较:单一药剂长期使用都会产生微生物耐药性,必须交替投加;

(6) 经济成本比较:三氯异氰尿酸成本最低,季铵盐适中,异噻唑啉酮成本比较高。

5 优化组合应用工艺

通过现场实践证实,单一的杀菌剂长期投加无法满足循环水长效稳定的管控需求,通过氧化型与非氧化型杀菌剂交替搭配使用是目前行业通用的最优工艺。

5.1 标准化交替投加工艺方案

(1) 日常工况稳定运行阶段:采用低浓度季铵盐连续投加运行方式,利用其持续抑菌、剥离系统黏泥的特性,稳定控制循环水体系内微生物量。

(2) 周期性冲击杀菌处理:每周或定期交替投加三氯异氰尿酸与异噻唑啉酮,干扰微生物增殖周期,避免长期使用单一药剂使微生物产生抗药性。

(3) 夏季高温微生物活跃阶段:优先投加三氯异氰尿酸,强化水体藻类杀灭与抑制作用,搭配异噻唑啉酮协同管控真菌滋生问题。

(4) 冬季低温运行阶段:减少氯类氧化性杀菌剂投加频次与用量,主要依靠季铵盐、异噻唑啉酮实现长效抑菌,减轻氯离子对金属设备的腐蚀,优化药剂运行成本。

5.2 组合投加工艺技术优势

本工艺结合长效抑菌药剂与速效氧化性药剂轮换协同使用,氧化性杀菌剂与非氧化性杀菌剂相互搭配,从根源抑制微生物耐药性形成。兼具瞬时杀菌、长期抑菌、黏泥剥离、控藻、抑制真菌等多重功能。有效克服单一药剂存在的氯离子积聚引发设备腐蚀、水体泡沫富集、药剂作用效率下降等各类问题,持续维持循环冷却水水质指标稳定,兼顾水处理运行效果与药剂使用经济性。

6 现场应用安全与运维注意事项

第一,三氯异氰尿酸属于强氧化药剂,严禁与氨类物质、还原剂、有机物混合存放与投加,避免发生化学反应产生有毒气体,引发安全隐患;第二,季铵盐需严格控制投加量,避免过量投加造成水体起泡,影响冷却塔通风散热;第三,异噻唑啉酮投加需结合水体浊度、有机物含量动态调整剂量,高污染水体需提前预处理;第四,三类高浓度药剂禁止同步冲击投加,需错峰操作,避免药剂拮抗失效;第五,日常需定期监测水体有效氯、浊度、异养菌数量、黏泥量,根据水质数据动态优化药剂投加方案。

7 结语

三氯异氰尿酸、季铵盐、异噻唑啉酮是工业循环水系统不可或缺的核心杀菌药剂,三者性能互补、各有侧重。三氯异氰尿酸杀菌灭藻速度快、性价比高,适用于水质恶化、藻菌爆发的冲击治理场景;季铵盐低腐蚀、长效稳定、可剥离生物黏泥,是系统日常抑菌维稳的优选药剂;异噻唑啉酮环保低残留、抑真菌效果优异,适配精密设备与高标准水质工况。

在实际工业运维中,摒弃单一药剂长期投加模式,采用氧化型与非氧化型交替、长短效药剂复配的综合工艺,能够有效解决循环水微生物超标、生物黏泥沉积、设备腐蚀等常见问题,大幅提升循环水系统运行稳定性与经济性,具备极高的工程推广应用价值。

参考文献:

- [1] 李刚. 工业循环冷却水微生物控制技术研究[J]. 工业用水与废水, 2024,55 (03):7883.
- [2] 张建军. 三氯异氰尿酸在循环水系统中的应用及优化[J]. 水处理技术, 2025,51 (07):112116.
- [3] 王浩. 季铵盐类杀菌剂的性能及在循环水中的应用[J]. 化工设计通讯, 2025,51 (09):154156.

作者简介:侯健(1989.11-),男,汉族,甘肃庆阳人,本科,助理工程师,研究方向:从事水处理研究。