

工业循环水系统水质稳定控制技术研究

丛明

中国电子系统工程第四建设有限公司，河北 石家庄 050000

[摘要]工业循环水系统对工业生产至关重要，其水质稳定性影响设备运行、寿命及安全。文中针对系统存在的腐蚀、结垢、微生物滋生问题，阐述了水质稳定控制理论，分析了多种控制技术特点与适用场景。研究表明单一技术难满足需求，“源头+过程+智能监测”的复合技术体系是关键，研究成果可为系统优化设计与工程应用提供支撑与参考。

[关键词]工业循环水；水质稳定；腐蚀控制；微生物处理；智能监测

DOI: 10.33142/sca.v8i11.18686

中图分类号：

文献标识码：A

Research on Water Quality Stability Control Technology for Industrial Circulating Water System

CONG Ming

The Fourth Construction Co., Ltd. of China Electronics System Engineering, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Industrial circulating water systems are crucial for industrial production, as their water quality stability affects equipment operation, lifespan, and safety. The article elaborates on the theory of water quality stability control and analyzes the characteristics and applicable scenarios of various control technologies to address the problems of corrosion, scaling, and microbial growth in the system. Research has shown that a single technology is difficult to meet the needs, and the composite technology system of "source+process+intelligent monitoring" is key. The research results can provide support and reference for system optimization design and engineering applications.

Keywords: industrial circulating water; stable water quality; corrosion control; microbial treatment; intelligent monitoring

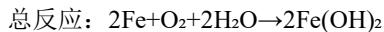
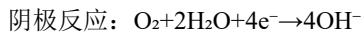
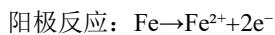
引言

我国人均水资源比较匮乏，因此节约用水和高效利用水资源刻不容缓，而工业循环水处理不仅能实现水资源的重复利用，还能降低生产成本，提高企业生产效益。工业循环水处理主要是通过去除水中悬浮物、溶解物及微生物等杂质后进行再次利用。但目前部分工业企业生产当中，水分蒸发使水中盐类、杂质富集，易引发腐蚀、结垢、微生物滋生三大问题：腐蚀问题会损伤设备，严重时可增加泄漏事故的发生风险；结垢问题会增加传热阻力、降低换热效率，造成能源的浪费；微生物滋生问题会堵塞管道、加速腐蚀。相关数据显示，水质不稳定使企业成本增加。因此，为了降低能耗、提升工业生产的稳定性、减少环境污染，开展工业循环水系统水质稳定控制技术研究，开发高效、经济、环保的方案意义重大。

1 工业循环水水质稳定控制理论基础

1.1 腐蚀机理与影响因素

腐蚀是工业循环水系统设备损坏的主因之一，本质是金属与水中电解质电化学反应所致金属离子溶解。按机理分多种类型，在中性或弱碱性循环水中，吸氧腐蚀为主，反应过程如下：



Fe(OH)_2 进一步氧化生成 Fe(OH)_3 ，脱水后形成 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，即铁锈。

循环水系统腐蚀受水质参数（如 pH、溶解氧、氯离子浓度等，氯离子升高破坏钝化膜导致点蚀、pH 降低加速析氢腐蚀）、工况条件（水温升高加快电化学反应、流速高导致冲刷腐蚀、流速低易形成氧浓差电池）、设备材质（不同材质的耐蚀性差异较大，如不锈钢对氯离子敏感，容易导致点蚀）影响。

1.2 结垢机理与影响因素

结垢是由于循环水经过高温过程不断蒸发，导致水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 等浓度增加，超过其溶解度而最终形成沉淀，这和家里水壶的水垢形成原理相似。水垢特点是质地坚硬，降低导热性能，严重时还会引起管道爆裂。工业中常见的水垢有碳酸钙、磷酸钙和硅酸镁，其中碳酸钙结垢是工业循环冷却水中最常见的水垢。结垢的本质是水中盐类的过饱和度超过其溶度积，导致结晶析出并附着在设备表面。碳酸钙结垢与水中碳酸氢根离子分解相关： $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$ 。

循环水蒸发浓缩使钙离子等浓度升高，生成的碳酸钙结晶在高温部位沉积形成水垢。影响结垢因素较多，主要涵盖水质参数、水流状态以及工况条件。其中在水质参数方面硬度、碱度越高、浓缩倍数越大，pH 值升高，结垢的发生概率较高；在工况条件中，水温升高、设备表面温

度不均，均会导致结垢；在水流状态方面，流速高则可能冲刷掉初期形成的结晶，抑制结垢，流速低导致结晶颗粒在设备表面停留时间过长，易附着。

1.3 微生物滋生机理与影响因素

工业循环水系统中的微生物（细菌、真菌、藻类等）滋生会形成生物黏泥，进而引发生物腐蚀和堵塞。因循环水为微生物提供了营养物质、适宜温湿度、pH值和溶解氧等生存环境，微生物在生长繁殖过程中会分泌蛋白质、多糖类等物质，形成生物膜，不仅会堵塞管道、降低换热效率、引发厌氧腐蚀、加速设备损坏，藻类繁殖还会恶化水质。影响微生物滋生的因素有营养物质、水温（25~40°C 生长最快）、pH值（中性或弱碱性适宜）、溶解氧（影响微生物种类）和光照（促进藻类滋生）。

1.4 水质稳定判断指标

为准确判断工业循环水的水质稳定性，需采用一系列指标进行评估，主要包括腐蚀速率、结垢倾向指标和微生物指标。腐蚀速率是评估设备腐蚀程度的核心指标，常用的测定方法有挂片失重法、电化学测试法等，单位为 mm/a。不同行业对腐蚀速率的要求不同，一般工业循环水系统中，碳钢的腐蚀速率应控制在 0.075mm/a 以下。结垢倾向指标有朗格利尔饱和指数（LSI）、雷兹纳稳定指数（RSI）和帕科拉兹结垢指数（PSI）。LSI 以水中碳酸钙实际 pH 值与饱和 pH 值差值判断，大于 0 说明水质存在结垢的倾向、小于 0 时说明有腐蚀的倾向、等于 0 时说明水质稳定；RSI 是 LSI 修正值， $RSI < 6$ 时说明水质发生结垢趋向、 $RSI > 7$ 时说明水质腐蚀、LSI 值在 6~7 间，说明水质稳定。微生物指标含藻类数量、异养菌总数等，按规范，硫酸盐还原菌数应≤10 CFU/mL，循环水中异养菌总数应≤ 1×10^5 CFU/mL。

2 工业循环水水质稳定控制技术分类及原理

2.1 物理控制技术

(1) 电磁防垢除垢技术。电磁防垢除垢技术利用磁场改变循环水中的水分子与离子性质，从而抑制结垢并除垢。从技术参数看，电磁场类型、强度、作用时间及水流速度均会对电磁的防垢除垢效果造成影响。一般在影响防垢除垢效果方面，交变磁场要优于恒定磁场，工业应用磁场强度多在 3000~8000Gs，水流速度 1~3m/s 为宜，能充分作用于水体且避免不良影响。该技术具备诸多优势，无需添加药剂、环保、操作简单、成本低，尤其适用于中低硬度 ($\text{CaCO}_3 \leq 400\text{mg/L}$)、低浊度 ($\text{NTU} \leq 10$) 的循环水系统，如空调、小型化工系统。但处理效果受水流速度、水质参数等多因素影响大，对高硬度、高浊度水质效果有限，无防腐作用，在应用过程中需与其他防腐技术协同。

(2) 超声波防垢除垢技术。超声波防垢除垢技术通过超声波发生器产生 20~100kHz 高频声波作用于循环水系统，既可实现防垢的效果，而且具备除垢和杀菌的作用，产生的效果主要与超声波的频率、功率、作用时间及水体特性相关。其作用机理有三大核心效应：超声波的空化效应会破坏盐类

结晶成核、击碎结晶颗粒；冲击波与微射流可剥离设备表面已形成的水垢，射流速度超 100m/s；声波振动破坏微生物细胞膜致内物质泄漏，空化效应的高温高压环境可直接杀灭微生物，对异养菌、藻类等抑制效果良好。

该技术分外置式和内置式，外置式安装便捷，适合现有系统改造；内置式作用效率高，但要考虑设备防腐与密封。其具有多种优势，不仅环保无二次污染，且对设备无腐蚀，适用于各类循环水系统，尤其对高硬度、高温工况结垢的控制效果好，如电力行业凝汽器系统。但设备投资高（数万至十几万元）、传播距离有限（有效半径 1~3m）、大型系统需多点布置且运行有噪音，需结合系统规模优化设计。

（3）过滤与吸附技术

过滤与吸附技术通过物理截留、吸附去除循环水中悬浮杂质等，降低水质浊度，减少结垢和腐蚀诱因。过滤技术通过利用过滤介质孔隙截留杂质，按精度分粗过滤（去除粒径≥10μm 的杂质）、精过滤（去除粒径≥1μm 的杂质）和超精过滤（去除粒径≥0.1μm 的杂质），常用设备有石英砂、活性炭等过滤器。吸附技术借助吸附剂多孔结构与表面活性吸附水中污染物，常用吸附剂有活性炭、沸石等。活性炭最常用，比表面积 500~1500m²/g，吸附力强，能除有机物、余氯、重金属离子及异味物质。活性炭分颗粒（GAC）和粉末（PAC）两种，其中粉末活性炭直接投加水体后沉淀过滤去除，颗粒活性炭用于固定床过滤吸附。此外，精密过滤器（保安过滤器）适用于高精度过滤场合，滤膜材质有聚丙烯等，过滤精度 0.1~10μm，能去除微小悬浮颗粒等，保护膜处理设备、换热器。自清洗过滤器靠压差控制自动完成过滤与反冲洗，无需人工，适用于水质波动大的循环水系统。过滤与吸附技术操作简单、效果稳定、无设备腐蚀，但过滤介质和吸附剂需定期更换或再生，运行成本高，难以去除溶解盐类，常需与其他技术协同。

2.2 化学控制技术

(1) 阻垢缓蚀剂技术。阻垢缓蚀剂是化学控制技术中应用最广泛的药剂，可分为阻垢剂、缓蚀剂和复合阻垢缓蚀剂三类，其作用是同时抑制结垢和腐蚀。

阻垢剂作用机理：一是螯合，与金属离子形成稳定螯合物防垢；二是分散，吸附在盐类结晶颗粒表面，使结晶颗粒分散在水中，避免其聚集附着；三是晶格畸变，进入晶格破坏晶格的规整性，阻碍结晶生长。常用阻垢剂：有机膦酸盐（如 ATMP、HEDP）、膦羧酸类、聚羧酸类（如 PAA、HPMA）等。缓蚀剂机理：一是钝化，在金属表面形成钝化膜隔绝腐蚀介质；二是吸附，覆盖金属腐蚀活性位点降速；三是沉淀，与水中离子反应形成沉淀膜保护。常用缓蚀剂有钼酸盐、铬酸盐等。复合阻垢缓蚀剂由不同类型阻垢剂、缓蚀剂及辅助药剂复配而成，能协同增效，适用于复杂工况的循环水系统，具有使用方便、处理效果稳定等优点，但需精准复配。

(2) 杀生剂技术。杀生剂用于抑制/杀灭循环水中微生物，分氧化性和非氧化性两类。氧化性杀生剂通过释放

氧原子或氧化性物质破坏微生物细胞结构实现杀菌，氧化性杀生剂释放氧原子等氧化物质，破坏微生物细胞结构来杀菌。常用有氯气、二氧化氯、次氯酸钠、臭氧等。氯气杀菌强且价廉，但易生成致癌副产物污染环境；二氧化氯杀菌更优且无此类副产物，环保好；臭氧氧化性强、杀菌快好无残留，但成本高。

非氧化性杀生剂干扰微生物代谢或破坏其结构来抑菌，常用季铵盐类、异噻唑啉酮类、醛类等。季铵盐类杀菌广、毒性低但易致微生物抗药；异噻唑啉酮类杀菌强、适用广且环保，应用较多；醛类（如甲醛）杀菌好但有刺激气味、有害健康，使用受限。杀生剂使用应交替、合理搭配，控制用量，以减少抗药性与环境污染。

(3)水质调整剂技术。水质调整剂可调节循环水 pH、碱度、硬度等参数至稳定范围，以抑制腐蚀与结垢，常用有酸、碱、石灰等。酸类（如硫酸、盐酸）用于降低碱性水质 pH 值，中和碳酸氢根离子，降低碳酸钙过饱和度来抑垢，但需严控加酸量，防止设备腐蚀。碱类调整剂（如氢氧化钠、碳酸钠）可提升酸性循环水 pH 值，促进金属钝化膜形成以抑制腐蚀；石灰调整剂通过投加石灰乳降低高硬度循环水的硬度和碱度，使钙镁离子生成沉淀，但会产生大量污泥，需要进行后续处理。

2.3 生物化学控制技术

生物酶技术利用蛋白酶、脂肪酶等催化分解循环水中有机物和微生物分泌物，抑制生物黏泥形成，控制微生物滋生与腐蚀。其机理包括：分解多糖/蛋白质破坏生物膜结构、减少有机物营养源抑制微生物繁殖、降低 COD/BOD 改善水质。该技术环保无污染、无腐蚀且可协同处理，适用于高环保要求系统，但受温湿度、pH 值影响大且成本较高。

益生菌技术通过向循环水中投加芽孢杆菌、乳酸菌、光合细菌等有益微生物，利用其竞争优势抑制有害微生物生长繁殖。其作用机理包括：竞争营养物质和生存空间、分泌抗菌物质、分解有机物和有毒物质以改善水质。该技术环保安全、无二次污染，可长期稳定控制微生物污染，但存在培养难度大、处理效果易受水质和工况影响等缺点。

2.4 新型复合控制技术

(1) 化学-物理复合技术。化学-物理复合技术融合化学药剂与物理处理，通过协同增效提升水质控制效果，减少药剂用量及二次污染。其原理为物理处理改变污染物形态或设备表面状态，强化化学药剂作用；化学药剂则弥补物理处理对溶解盐、微生物等处理的不足。电磁防垢技术与阻垢缓蚀剂联用，可减量药剂、降低成本；超声波技术与杀生剂协同，能增效杀菌、减少投加量，并降低环境污染。该技术适用于高硬度、高浊度、高微生物含量等复杂工况，具有处理稳定、成本低、环保等优点，但系统设计和操作复杂，需根据水质和工况优化参数。

(2) 智能化控制技术。智能化控制技术融合物联网、

大数据、AI 等技术，实现循环水水质实时监测、精准调控与智能优化，是未来水质控制的核心方向。其核心由水质在线监测、智能控制、药剂精准投加三系统构成：

水质在线监测系统：在关键节点安装高精度仪表（如 pH、电导率、腐蚀速率监测仪），实时采集水质（pH、硬度、微生物等）及设备参数（水温、压力等），数据通过物联网传输至智能控制系统。

智能控制系统：基于机器学习算法分析历史数据，建立预测模型，预判水质变化趋势（如结垢、微生物滋生），提前调整控制策略，实现多参数协同调控，避免单一参数调整引发其他问题。

药剂精准投加系统：根据智能系统指令，通过计量泵等设备精准投加药剂，采用闭环控制实时反馈投加效果，自动切换或交替投加药剂以防止微生物抗药性。该技术具有监测精准、调控及时、效率高、可无人值守等优点，可降低人工及药剂成本，提升系统稳定性与经济性。目前已初步应用于电力、化工等行业，是未来水质稳定控制技术的发展方向。

3 结论

工业循环水处理技术具有体系复杂、应用场景多变等特征，工业企业在应用工业循环水处理技术时，需要选择科学的处理方法和技术，坚持环保、生态化发展的原则，要熟悉掌握处理技术的原理和应用方法，充分发挥处理技术的应用价值，并提升工业用水的处理质量。

[参考文献]

- [1]任静,杨延雄,吴浩,等.工业循环水常见问题分析与处理措施[J].清洗世界,2024,7(40):10-12.
 - [2]宋兆函.面向水质检测的多传感器数据融合技术研究[D].石家庄:河北地质大学,2022.
 - [3]赵新合,段付岗.陕西润中洁清能源有限公司循环水站换热器腐蚀泄漏原因分析及防范措施[J].煤炭加工与综合利用,2019(3):64-67.
 - [4]林上青.工业循环水常见问题分析与处理措施[J].清洗世界,2017,8(33):35-38.
 - [5]张红.工业循环水处理技术改进措施[J].化工设计通讯,2020,10(46):181-182.
 - [6]李亚东,弓志定,高晶,等.工业循环水处理技术改进措施[J].清洗世界,2019,35(9):45-46.
 - [7]王小军.工业循环冷却水旁流水处理工艺探索[J].产业与科技论坛,2015,15(14):57-58.
 - [8]陈岭.工业循环水处理技术改进措施探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2019,11(15):109.
 - [9]延永康.工业循环水处理技术改进措施探讨[J].技术与市场,2019,13(1):135-137.
- 作者简介：丛明（1994.8—），毕业院校：华北理工大学轻工学院，所学专业：给水排水工程，当前就职单位：中国电子系统工程第四建设有限公司，职务：给排水工程师，职称级别：中级工程师。