

# 工业循环水管道结垢和腐蚀问题分析

孔令锋

新疆天业股份有限公司 新疆 石河子 832000

**摘要:** 本文针对工业循环水管道结垢与腐蚀两大核心问题,系统分析了结垢(碳酸盐、硫酸盐等)和腐蚀(电化学、微生物等)的类型、形成机理、影响因素及危害,明确二者相互诱发、加剧的关联特性。结合工业生产实际,从水质预处理、运行调控、材质优化、后期维护四个维度,提出科学可行的防控措施,为企业降低管道故障发生率、延长设备寿命、控制生产成本提供理论支撑和实践指导,助力工业循环水系统高效稳定运行。

**关键词:** 工业循环水;管道结垢;腐蚀问题

引言:工业循环水系统是工业生产中不可或缺的组成部分,广泛应用于化工、电力、冶金等行业,承担着设备冷却、介质输送的重要功能。但在长期运行中,管道结垢和腐蚀问题频发,不仅会降低换热效率、堵塞管道,还会缩短设备服役周期、引发安全隐患,严重影响生产连续性并增加企业成本。因此,深入分析结垢与腐蚀的形成规律及影响因素,探索高效防控路径,对保障工业生产安全、提升经济效益具有重要现实意义。

## 1 工业循环水管道结垢问题分析

### 1.1 结垢的类型及特征

(1) 碳酸盐垢:以碳酸钙为主,是工业循环水管道中最常见的垢型。形成条件为循环水浓缩后,水中钙离子与碳酸氢根离子浓度升高,在温度升高、pH值上升时,碳酸氢根分解为碳酸根,与钙离子结合生成碳酸钙沉淀。外观多为白色或灰白色,质地较疏松,易剥离,结构呈层状或粉末状,长期堆积会逐渐致密。(2) 硫酸盐垢:主要成分为硫酸钙、硫酸钡等,形成机理是水中硫酸根离子与钙离子、钡离子等结合,因这类盐类溶解度极低,即使在常温下也易达到过饱和状态析出。典型特征为质地坚硬、致密,呈白色或微黄色,附着力强,难以清除,会牢牢附着在管道内壁,长期积累会导致管道内径缩小。(3) 硅酸盐垢与生物垢:硅酸盐垢由水中硅酸钠等物质浓缩、聚合形成,多因水质中硅含量过高、温度升高诱发,外观为灰白色或灰黑色,质地坚硬且致密,附着力极强,会显著降低管道换热效率;生物垢由细菌、藻类等微生物代谢产物与水中悬浮物结合形成,外观呈黏泥状,颜色多样,不仅会堵塞管道,还会滋生微生物,加剧管道腐蚀<sup>[1]</sup>。

### 1.2 结垢的形成机理

(1) 过饱和析出机理:循环水在运行中会不断蒸发浓缩,导致水中硬度离子、碳酸根离子等浓度逐渐

升高,当离子浓度乘积超过对应盐类的溶度积时,盐类会从水中析出,形成微晶,为结垢奠定基础。(2) 晶体生长与沉积机理:析出的微小晶体在水流作用下发生碰撞、聚集,逐渐长大形成较大晶体,同时因管道壁面存在微小凹凸不平,晶体易附着在壁面,不断吸附后续析出的晶体,逐渐形成连续的垢层。(3) 其他辅助机理:流速过慢时,晶体易在管道内壁停留、沉积,加速结垢;温度升高会降低盐类溶解度,加快晶体析出和生长,同时促进化学反应速率,加速结垢;反之,适宜的流速和温度可抑制结垢过程。

### 1.3 结垢的主要影响因素

(1) 水质因素:水中硬度离子、碱度越高,结垢倾向越明显;pH值偏高会促进碳酸氢根分解,加速碳酸盐垢形成;悬浮物含量过高会吸附晶体,加快垢层沉积。(2) 运行参数:循环水温度越高,结垢速率越快;流速过低易导致晶体沉积,过高则可能冲刷垢层,减缓结垢;浓缩倍数过高会显著提升离子浓度,加剧结垢,需控制在合理范围。(3) 管道因素:碳钢等材质管道内壁易氧化,形成的氧化层易吸附晶体,促进结垢;内壁光滑度差、管道弯头、死角等部位流速不均,易导致晶体沉积,加剧局部结垢。

### 1.4 结垢的危害分析

(1) 降低换热效率:垢层导热系数远低于管道金属,仅为金属的1/10~1/100,垢层厚度每增加1mm,换热效率可下降10%~15%,导致设备能耗显著增加,增加生产成本。(2) 堵塞管道设备:垢层不断增厚会缩小管道内径,导致循环水流量下降、系统压力升高,严重时会导致堵塞管道、换热器管束,影响设备正常运行,甚至导致系统停机检修。(3) 诱发垢下腐蚀:垢层覆盖在管道壁面,形成缺氧环境,导致壁面金属发生电化学腐蚀,出现点蚀、坑蚀等,加速管道破损,缩短设备使用寿命,

还可能引发管道泄漏等安全隐患。

## 2 工业循环水管道腐蚀问题分析

### 2.1 腐蚀的类型及表现形式

(1) 电化学腐蚀：最常见的腐蚀类型，均匀腐蚀表现为管道内壁整体均匀减薄，表面出现均匀锈层，无明显局部破损；点蚀表现为管壁出现分散或密集的小蚀坑，初期隐蔽性强，后期蚀坑逐渐加深扩大，多发生在管道弯头、死角及水质波动较大的部位。(2) 微生物腐蚀(MIC)：由硫酸盐还原菌、铁细菌等微生物引发，硫酸盐还原菌代谢产生硫化氢，与管道金属反应生成硫化物腐蚀产物，导致管壁出现黑色蚀坑；铁细菌代谢产物形成红褐色锈泥，附着在管壁并引发局部腐蚀，常发生在管道内壁有生物膜附着的区域。(3) 其他腐蚀类型：垢下腐蚀表现为垢层覆盖区域出现局部腐蚀，蚀坑多且深，伴随垢层脱落；冲蚀因高速水流冲刷管壁，导致局部金属磨损腐蚀，多发生在管道弯头、阀门处；应力腐蚀表现为管道在应力与介质共同作用下，出现沿晶或穿晶裂纹，易引发管道断裂。

### 2.2 腐蚀的形成机理

(1) 电化学腐蚀机理：管道金属表面存在电位差异，形成微电池，阳极发生氧化反应，金属失去电子变成离子进入水中，阴极发生还原反应，溶解氧等物质获得电子，最终形成铁锈等腐蚀产物，逐步破坏管道金属结构。(2) 微生物腐蚀机理：微生物在管道内壁形成生物膜，其代谢产物(如有机酸、硫化氢)会破坏金属表面钝化膜，同时生物膜导致局部水质不均，形成微电池，加速金属腐蚀，生物膜还会遮挡腐蚀部位，加剧腐蚀发展。(3) 垢下腐蚀机理：垢层覆盖管道壁面，导致垢层内外氧浓度差异，形成氧浓差电池，垢层下方缺氧成为阳极，发生氧化腐蚀，垢层还会吸附有害离子，进一步加速腐蚀过程，最终导致管壁穿孔。

### 2.3 腐蚀的主要影响因素

(1) 水质因素：溶解氧含量越高，电化学腐蚀速率越快；pH值偏低(< 7.0)会加速金属溶解，pH值过高易引发应力腐蚀；Cl<sup>-</sup>浓度过高会破坏金属钝化膜，诱发电蚀；电导率升高会增强水体导电性，加速电化学腐蚀反应。(2) 运行参数：循环水温度升高会加快腐蚀反应速率，同时促进微生物繁殖，间接加剧腐蚀；流速过高会引发冲蚀，流速过低则导致水体缺氧、微生物聚集，加速垢下腐蚀和微生物腐蚀；水质波动会破坏金属表面钝化膜，增加腐蚀风险。(3) 管道材质与环境因素：碳钢等活性金属材质抗腐蚀能力弱，易发生电化学腐蚀；不锈钢等耐腐材质在Cl<sup>-</sup>浓度过高时易发生点蚀；管道周围

温湿度过高、存在腐蚀性气体，会加速管道外壁腐蚀，介质中有害离子则会侵蚀管道内壁<sup>[2]</sup>。

### 2.4 腐蚀的危害分析

(1) 缩短管道寿命：腐蚀持续导致管壁不断减薄，降低管道的机械强度和承载能力，原本设计使用寿命10-15年的管道，严重腐蚀情况下可能3-5年就需更换，大幅缩短设备服役周期。(2) 引发安全隐患：腐蚀导致管道穿孔泄漏，循环水或工艺介质流失，不仅影响生产连续性，若介质具有腐蚀性、易燃易爆特性，还可能引发火灾、环境污染等安全事故，威胁人员和设备安全。

(3) 增加维护成本：管道腐蚀后需定期维修、更换受损部件，维修过程中需停产，产生高额的维修费用和停产损失；同时需投入额外资金用于腐蚀防控，长期下来会显著增加企业的生产成本。

## 3 工业循环水管道结垢与腐蚀的防控措施

### 3.1 水质预处理防控技术

(1) 物理预处理：核心是去除水中悬浮物、大颗粒杂质及胶体，从源头减少结垢和腐蚀诱因。过滤采用石英砂过滤器、精密过滤器等设备，通过截留、筛分作用，去除水中粒径大于10μm的杂质；沉淀处理可采用沉淀池，加入助凝剂加速杂质沉降，降低水中悬浮物含量，避免杂质附着在管道内壁形成垢层，同时减少杂质对管道的磨损和腐蚀。(2) 化学预处理：主要用于降低水中硬度离子、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等有害离子含量，减少结垢和腐蚀风险。离子交换技术通过树脂吸附水中的钙、镁离子，降低水的硬度，从根本上抑制碳酸盐、硫酸盐垢的形成；反渗透技术利用膜分离原理，截留水中大部分离子和杂质，产出高纯度水，适用于水质较差、有害离子含量高的场景，有效减少腐蚀和结垢隐患<sup>[3]</sup>。(3) 预处理工艺的优化选择：需结合进水水质、行业生产特点及防控需求设计方案。对于悬浮物含量高的工业废水，优先采用“沉淀+过滤”的物理预处理组合；对于高硬度、高盐度水质，采用“离子交换+反渗透”联合工艺；对于水质较好的水源，可简化预处理流程，降低成本，确保预处理效果与生产需求、经济成本相匹配。

### 3.2 运行过程中的防控技术

(1) 化学药剂防控：是运行过程中最常用的防控手段，需科学选型并合理投加。阻垢剂选用聚羧酸类、膦酸盐类等，通过抑制晶体析出、分散晶体颗粒，防止垢层形成；缓蚀剂选用有机胺类、磷酸盐类，在管道金属表面形成致密钝化膜，隔绝介质侵蚀，减缓腐蚀；杀菌灭藻剂选用氧化性或非氧化性药剂，定期投加，抑制微生物繁殖，防止生物垢和微生物腐蚀，投加量需根据水

质监测结果动态调整。(2)运行参数优化:严格控制循环水关键运行参数,避免结垢和腐蚀加剧。温度控制在30~40℃,过高会加速结垢和腐蚀反应;流速保持在1.0~2.0m/s,既避免流速过低导致杂质沉积,也防止流速过高引发冲蚀;浓缩倍数控制在3~5倍,过高会导致离子浓度超标,过低则增加水资源消耗;pH值维持在7.5~8.5,避免偏酸或偏碱加速腐蚀和结垢。(3)在线监测与调控:搭建完善的在线监测系统,实时监测循环水的pH值、电导率、硬度、溶解氧、Cl<sup>-</sup>浓度等关键参数,数据异常时及时发出预警。通过自动调控装置,动态调整药剂投加量、补充水量及排污量,确保各项参数稳定在合理范围,实现结垢与腐蚀的精准防控,减少人为操作误差。

### 3.3 管道材质与结构优化

(1)耐腐蚀材质的选择:根据循环水介质特性、腐蚀程度及使用环境选用合适材质。对于腐蚀性较强、水质较差的场景,选用不锈钢、玻璃钢、聚氯乙烯等耐腐蚀材质,替代传统碳钢管道,从根本上提升管道抗腐蚀能力;对于普通水质,可选用衬塑碳钢管道,兼顾耐腐蚀性和经济性,延长管道使用寿命。(2)管道内壁处理:通过表面处理减少结垢和腐蚀附着。电化学抛光可使管道内壁变得光滑,降低杂质和晶体的附着概率,同时提升表面钝化性能,增强抗腐蚀能力;涂层防护在管道内壁涂刷防腐、防垢涂层,形成隔离层,隔绝介质与金属接触,有效抑制结垢和腐蚀,涂层需定期检查和修补,确保防护效果<sup>[4]</sup>。

(3)管道布局优化:合理设计管道布局,减少结垢和腐蚀风险。尽量采用直线管道,减少弯头、三通等局部阻力部件,避免形成低流速区域和死角;对于必须设置的弯头,选用大曲率半径弯头,降低水流滞留时间;管道坡度设置合理,便于排污和排垢,避免杂质在管道内堆积,从结构上减少结垢和腐蚀的发生。

### 3.4 后期维护与应急处理

(1)定期清洗与维护:制定科学的维护周期和方法,定期对管道进行除垢和防腐处理。除垢采用化学清洗(如酸洗、碱洗)或物理清洗(如高压水冲洗),根

据垢层类型选择合适的清洗方式,清洗后及时进行钝化处理,防止二次腐蚀;定期检查管道内壁涂层和材质状况,对破损部位及时修补,延长管道使用寿命。(2)腐蚀结垢故障应急处理:针对管道泄漏、堵塞等突发故障,制定快速处置方案。管道泄漏时,立即关闭相关阀门,隔离故障区域,采用临时封堵措施,防止介质泄漏扩大,同时排查腐蚀原因,及时更换受损管道;管道堵塞时,停止相关区域运行,采用高压水冲洗或化学清洗疏通管道,避免因堵塞导致系统压力升高、设备损坏<sup>[5]</sup>。

(3)长期维护体系建立:建立常态化、系统化的防控维护机制,明确各岗位职责,制定维护计划和考核标准。定期开展管道巡检、水质监测和设备维护,建立维护档案,记录管道运行状态、维护内容及处理结果;定期总结防控经验,优化防控方案,持续提升结垢与腐蚀的防控效果,降低设备故障发生率和维护成本。

### 结束语

工业循环水管道结垢与腐蚀是复杂且相互关联的系统性问题,其防控需立足源头、全程管控、长期坚持。本文梳理的防控措施涵盖预处理、运行、材质、维护全流程,可根据企业水质特点和生产需求灵活优化。企业需重视水质监测与日常维护,建立常态化防控体系,有效抑制结垢与腐蚀现象,减少故障损失。未来可进一步探索高效环保的防控技术,推动工业循环水系统绿色、高效、可持续运行,为工业高质量发展提供保障。

### 参考文献

- [1] 邵新海,崔浩.循环水腐蚀结垢分析[J].中国氯碱.2022,4(8):22-29.
- [2] 孙利龙.煤气管道设施结垢和腐蚀产物分析方法的研究[J].冶金动力.2023,9(11):132-135.
- [3] 王军,王彦淳.浅析制酸装置净化稀酸管道结晶原因[J].硫酸工业.2023,10(5):49-51.
- [4] 李海秋.核电厂CTE系统次氯酸钠加药管结垢堵塞分析研究[J].广东化工.2022,19(15):186-188.
- [5] 罗睿乔,郭伟,向富明,等.工业循环冷却水系统水质提升实践[J].石油天然气学报.2024,26(4):89-92.