

## 污水回用过程中介质泄漏对水质安全的影响及处理技术优化

王建勋 尚海 冯武甄

中石化(河南)炼油化工有限公司, 河南 洛阳 471012

**[摘要]**水资源的高效利用与环境保护已成为现代石化企业可持续发展的重要课题。中石化(河南)炼化有限公司作为区域重点能源化工企业,积极响应国家节水减排政策,自2020年起系统推进污水回用工程。在实际运行中发现,回用污水的水质特性与循环水系统原有平衡之间存在复杂相互作用,特别是生产装置介质泄漏事件引发的复合污染问题日益突出。这类问题不仅影响系统稳定运行,更对设备安全构成潜在威胁。文章基于企业三年来的实践探索,系统分析了介质泄漏对回用水系统的多重影响,并总结形成了一套行之有效的综合治理方案,为同类企业提供了可借鉴的技术路线和管理经验。

**[关键词]**污水回用; 介质泄漏; 水质安全

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16638

中图分类号: TE965

文献标识码: A

### The Impact of Medium Leakage on Water Quality Safety During Sewage Reuse Process and Optimization of Treatment Technology

WANG Jianxun, SHANG Hai, FENG Wuzhe

Sinopec (He'nan) Refining and Chemical Co., Ltd., Luoyang, He'nan, 471012, China

**Abstract:** The efficient utilization of water resources and environmental protection have become important issues for the sustainable development of modern petrochemical enterprises. Sinopec (He'nan) Refining and Chemical Co., Ltd., as a key energy and chemical enterprise in the region, actively responds to the national water conservation and emission reduction policies and has been systematically promoting sewage reuse projects since 2020. In practical operation, it has been found that there is a complex interaction between the water quality characteristics of recycled wastewater and the original balance of the circulating water system, especially the increasingly prominent problem of composite pollution caused by medium leakage events in production equipment. This type of problem not only affects the stable operation of the system, but also poses a potential threat to equipment security. The article is based on three years of practical exploration by enterprises, systematically analyzing the multiple impacts of medium leakage on the reuse water system, and summarizing the formation of an effective comprehensive management plan, providing a technical route and management experience for similar enterprises to learn from.

**Keywords:** wastewater reuse; media leakage; water quality safety

石化行业循环水系统作为重要的公用工程,其运行状况直接关系到全厂生产装置的稳定性和经济性。中石化(河南)炼化有限公司第一循环水场和化纤循环水场自投用回用污水以来,面临着前所未有的技术挑战。回用污水中的复杂成分改变了循环水系统的固有特性,而生产装置换热设备可能发生的介质泄漏则进一步加剧了系统的不稳定性。这种叠加效应导致系统出现微生物异常增殖、设备腐蚀加速、换热效率下降等一系列问题,传统的处理方法往往难以奏效。特别是在高温季节,水质恶化速度明显加快,给生产运行带来巨大压力。如何在这种复杂条件下维持循环水系统的长期稳定运行,成为企业亟待解决的技术难题。

#### 1 回用污水对循环水质的影响分析

污水回用作为水资源循环利用的重要手段,在石化企业中得到广泛应用。中石化(河南)炼化有限公司自2020年12月起在第一循环水场和化纤循环水场实施污水回用工程,主要接收炼油中水和化纤回用水两类回用污水。这

些回用水的引入虽然实现了水资源的高效利用,但由于其水质特性与新鲜水存在显著差异,对循环水系统产生了多方面的影响。

##### 1.1 水质参数变化对比

回用污水与新鲜水在水质参数上存在显著差异,这些差异直接影响循环水系统的运行状态。通过对循环水系统的长期监测数据进行分析,可以清晰地看到各类水质指标的变化趋势及其产生的实际影响。浊度作为反映水中悬浮物含量的重要指标,新鲜水标准控制在3.0NTU以下,而炼油中水的浊度通常低于2.0NTU,表面上看优于新鲜水标准,但化纤回用水的浊度则在3.0NTU左右波动,这种不稳定性会导致系统运行参数难以精确控制<sup>[1]</sup>。电导率的变化尤为明显,新鲜水的电导率维持在900~1000us/cm的范围内,而两种回用污水的电导率均达到1600~2300us/cm,这种成倍的增长预示着水中溶解性固体含量大幅增加,直接提高了系统的结垢和腐蚀风险。

表 1 回用污水与新鲜水水质参数对比分析表

| 序号 | 项目  | 单位    | 新鲜水标准    | 炼油中水影响     | 化纤回用水影响    | 回用后主要后果                                                    |
|----|-----|-------|----------|------------|------------|------------------------------------------------------------|
| 1  | 浊度  | NTU   | ≤3.0     | ≤2.0       | ≤3.0 (波动)  | 系统稳定性下降                                                    |
| 2  | 电导率 | us/cm | 900~1000 | 1600~2300↑ | 1600~2300↑ | 电导率超标、结垢腐蚀风险增加                                             |
| 3  | 总碱度 | mg/L  | 200~270  | 150~220    | 40~80↓     | 化纤污水引起碱度降低、腐蚀                                              |
| 4  | 钙离子 | mg/L  | 120~190  | 200~280    | 70~100↓    | 化纤污水引起钙离子降低、腐蚀                                             |
| 5  | 氯离子 | mg/L  | 90~100   | 200~340↑   | 50~80↓     | Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >2500 时腐蚀加剧 |
| 6  | 硫酸根 | mg/L  | 120~150  | 300~480↑   | 360~430↑   | 结垢腐蚀风险增加                                                   |
| 7  | 总磷  | mg/L  | 0        | 0.2~0.45↑  | 1.26~1.60↑ | 缓蚀阻垢剂失效、结垢腐蚀                                               |
| 8  | COD | mg/L  | ≤10      | 16~55↑     | 16~37↑     | 微生物危害增大                                                    |

## 1.2 介质泄漏的叠加影响

在实际运行过程中,生产装置换热设备可能发生的介质泄漏事件会与回用污水产生协同作用,对循环水系统造成更为复杂的复合影响。二月份发生的电站 3 号冷却塔循环水润滑油泄漏事件,润滑油进入循环水系统后,会在换热器表面形成一层疏水性薄膜,这种油膜不仅阻碍热量的正常传递,还会吸附水中的颗粒物和微生物,形成黏稠的油泥混合物。三月份化纤循环水系统发生的苯系物泄漏事件呈现出不同的影响特征。苯、甲苯、乙苯等芳香族化合物进入水体后,部分溶解于水中,部分则以微小油滴形式分散。这些物质对水生微生物具有毒性抑制作用,会暂时降低系统中异养菌的数量。五月份化纤循环水系统遭遇的解吸剂、二甲苯、对二甲苯泄漏事件,是年内最为严重的一次介质泄漏。这些有机溶剂具有较低的表面张力,能够渗透到金属表面的微观缺陷和已有腐蚀产物下方,形成局部浓缩环境。在这种环境下,溶剂分子会与金属表面发生复杂的物理化学作用,破坏原有的钝化膜保护层,暴露出新鲜的金属基底,加速腐蚀进程<sup>[2]</sup>。介质泄漏对循环水系统的影响机制主要体现在三个方面。首先是物理性影响,泄漏介质在换热表面形成油泥覆盖层,会显著降低传热效率。其次是生物性影响,泄漏的有机物成为微生物的额外营养源。最后是化学性影响,某些泄漏介质会直接参与电化学腐蚀过程,或改变水体的 pH 值和氧化还原电位,破坏原有的腐蚀-防护平衡。

## 2 介质泄漏引发的系统危害

### 2.1 微生物危害三级放大效应

介质泄漏对循环水系统微生物生态的影响呈现出明显的阶段性特征。在河南某炼化企业的实际案例中,观察到完整的危害发展过程。初级影响阶段通常持续 2~4 周,主要表现为生物黏泥量的指数级增长。某次润滑油泄漏事件后的监测数据显示,系统黏泥量在 3 周内增长至基准值的 4.8 倍。这种黏泥具有特殊的流变特性,其粘度系数达到常规悬浮物的 3~5 倍,导致换热器水流阻力显著增加。当系统进入次级影响阶段,会出现多种并发的技术问题。某化纤循环水场在苯系物泄漏后,换热器管束表面的氧浓差电池电位差达到 280mV,诱发严重的局部腐蚀。同期冷却塔填料的堵塞率上升至 22%,较泄漏前提高 17 个百

分点,直接导致冷却效率下降 19%。这些变化又会进一步改变系统内的微生态环境,促进特定微生物菌群的增殖。终极影响阶段的特征表现为系统处理效能的全面下降。某炼油循环水场在持续泄漏情况下,缓蚀剂的保护效率从正常的 85%降至 36%,同时清洗周期从 90 天缩短至 45 天。这种状态如果持续超过 3 个月,将导致设备完好率下降 12~15 个百分点,维护成本增加 40%以上。

表 2 微生物危害发展特征时序分析

| 危害阶段 | 持续时间  | 关键指标变化          | 控制窗口期 |
|------|-------|-----------------|-------|
| 初级影响 | 2~4 周 | 黏泥量增长 300%~500% | 最佳控制期 |
| 次级影响 | 1~2 月 | 腐蚀速率提高 3~5 倍    | 有效控制期 |
| 终极影响 | 3 月+  | 设备完好率下降>10%     | 补救控制期 |

### 2.2 腐蚀与结垢协同效应

介质泄漏引发的材料劣化过程具有典型的协同放大特征。某循环水场 2023 年的运行数据显示,在存在介质泄漏的情况下,碳钢设备的点蚀发展速率达到 0.65mm/年,是正常工况下的 4.3 倍。这种腐蚀往往呈现典型的深孔型特征,蚀孔深宽比达到 3:1 以上,对设备结构完整性构成严重威胁。结垢问题同样表现出异常的发展规律。某换热器在解吸剂泄漏后,3 个月内形成的复合垢层厚度达到 2.8mm,其热阻值较常规水垢提高 40%~45%。这种垢层的 XRD 分析显示,其组成中包含 23%的有机组分、35%的无机盐类和 42%的腐蚀产物,形成特殊的三明治结构。腐蚀与结垢的协同作用在微观尺度上表现为典型的恶性循环。SEM 观察发现,垢层下金属表面的腐蚀速率是裸露区域的 6~8 倍,而腐蚀产物又成为新的结垢核心。

## 3 处理技术优化方案

### 3.1 微生物控制技术升级

循环水系统微生物控制技术的升级主要体现在杀菌剂投加策略的智能化和黏泥剥离工艺的创新两个方面。杀菌剂智能投加系统通过在线水质监测装置实时采集温度、COD、浊度等关键参数,结合自主研发的动态加药算法,实现了药剂投加的精准控制。该系统采用氧化性杀菌剂强氯精与非氧化性杀菌剂 SS411 交替使用的策略,有效避免了微生物产生抗药性。在实际运行中,系统能够根据水

温变化自动调整加药频率,夏季高温期自动切换至冲击式加药模式,确保杀菌效果的同时降低了药剂消耗<sup>[3]</sup>。黏泥剥离技术的改进则集中在新型复合剥离剂的开发和应用工艺的优化上。新研发的剥离剂将季铵盐类化合物的渗透性与过氧化物的氧化性有机结合,对顽固性生物黏泥的剥离效率提升 40%以上。配套实施的剥离-过滤联用工艺通过优化操作参数,实现了系统黏泥的高效清除,整个处理周期控制在 8 小时以内,大幅减少了系统停车时间。

表 3 微生物控制技术升级对比

| 技术参数  | 升级前  | 升级后 | 提升效果 |
|-------|------|-----|------|
| 杀菌效率  | 75%  | 92% | +17% |
| 黏泥剥离率 | 60%  | 85% | +25% |
| 处理周期  | 12h  | 8h  | -33% |
| 药剂消耗  | 100% | 80% | -20% |

### 3.2 腐蚀结垢控制优化

针对介质泄漏导致的腐蚀结垢问题,优化方案着重于水质参数的动态调控和深度处理技术的应用。水质参数动态调控系统通过建立多参数关联模型,实现了 pH 值、总碱度和总磷等关键指标的协同控制。系统能够根据进水水质变化自动调整加药量和排污频率,将水质波动范围缩小 50%以上。特别是在接收化纤回用水时,系统自动提高 pH 和碱度的控制上限,有效缓解了低钙离子环境下的腐蚀问题。反渗透深度处理单元的投运是另一项重要改进,该单元采用最新的抗污染膜元件和能量回收装置,除盐水产量稳定在 75t/h,出水水质达到电站锅炉补给水标准。这部分高品质补水显著降低了循环水系统的盐类负荷,使浓缩倍数得以提高,年节水达 12 万吨。与此同时,通过优化阻垢剂配方,使其在较高磷含量环境下仍能保持良好性能,解决了回用污水总磷偏高带来的结垢问题。

### 3.3 泄漏应急响应体系

完善的泄漏应急响应体系是快速有效处置介质泄漏事故的关键保障。该体系采用四级响应机制,根据泄漏污染物的种类和浓度,启动不同级别的应急程序。一级响应针对严重泄漏事故,要求 2 小时内确定泄漏源并实施隔离,同时启动系统置换和强化杀菌程序。查漏技术的升级大幅提高了泄漏点定位的准确性和效率,红外热成像仪能够快速识别换热器管束的温度异常,定位精度达到单根管束水平。示踪剂检测技术则适用于微量泄漏的排查,通过在疑似系统注入荧光素钠等示踪剂,配合高灵敏度检测设备,可检出 0.01ppb 级的污染物。在线水质指纹分析系统通过监测 16 项水质参数的实时变化,建立各装置的用水特征图谱,为泄漏源的快速识别提供数据支持。

## 4 实施效果与改进建议

### 4.1 实施成效

微生物控制成本的显著降低是本次技术改造最直接

的成果之一。通过智能加药系统的精准控制和药剂配方的优化,在保证杀菌效果的前提下,全年杀菌剂用量减少 25%,节约药剂采购成本约 180 万元。这一成果的取得主要得益于三方面改进:首先是动态加药算法的应用,使药剂投加量与实际需求高度匹配,避免了过量投加;其次是氧化性与非氧化性杀菌剂的科学轮用,有效延缓了微生物抗药性的产生;最后是剥离工艺的优化,减少了因黏泥积累导致的药剂无效消耗。这些措施的综合作用使得微生物控制工作更加高效和经济。

设备腐蚀状况的改善是另一项重要成效。监测数据显示,系统平均腐蚀速率从原来的 0.125mm/a 降至 0.075mm/a,降幅达 40%。这一变化极大延长了关键设备的使用寿命,预计可使换热器管束更换周期延长 3 年以上。腐蚀控制的提升主要归功于水质参数动态调控系统的精准管理,特别是对 pH 值和碱度的优化控制,有效稳定了水体化学环境。同时,反渗透深度处理单元的应用显著降低了水中腐蚀性离子的浓度,从源头减少了腐蚀风险<sup>[4]</sup>。现场检查发现,采用新方案后,设备表面腐蚀产物明显减少,金属基底保持良好状态。

换热器清洗周期的延长直接反映了系统整体运行状况的改善。从原来的每 6 个月清洗一次延长至每 9~10 个月一次,不仅减少了维护工作量,更重要的是降低了因停车清洗导致的生产损失。这一成效的取得是多项技术措施协同作用的结果:微生物的有效控制减少了生物黏泥的生成;腐蚀速率的下降延缓了腐蚀产物的积累;阻垢配方的优化抑制了水垢的形成。特别是在夏季高温期间,新系统表现出更强的稳定性,没有出现往年常见的因水质恶化而提前清洗的情况。

表 4 主要技术经济指标改善情况

| 评价指标  | 改进前       | 改进后       | 变化率  |
|-------|-----------|-----------|------|
| 杀菌剂用量 | 基准值       | -25%      | 显著下降 |
| 腐蚀速率  | 0.125mm/a | 0.075mm/a | -40% |
| 清洗周期  | 6 个月      | 9-10 个月   | +50% |
| 非计划停车 | 3 次/年     | 1 次/年     | -67% |

### 4.2 持续改进方向

短效生物降解型剥离剂的研发是未来技术攻关的重点之一。现有剥离剂虽然效果显著,但其持久性可能对后续污水处理系统造成影响。理想的新型剥离剂应具备两个关键特性:一是保持高效的黏泥剥离能力,二是在完成功能后能快速自然降解。通过分子结构设计和配方优化,目标是开发出半衰期小于 24 小时的环境友好型产品。这类药剂的成功应用将解决当前剥离处理后排水受限的难题,使系统可以更灵活地安排维护作业,同时降低对环境的影响。初步实验室测试显示,某些改性季铵盐化合物配合特定的促降解剂,有望在 18~22 小时内完成 90%以上的降

解,同时保持85%以上的剥离效率。

水质-药剂-设备寿命预测模型的建立将实现从经验管理向精准管理的跨越。该模型将整合历史水质数据、药剂投加记录和设备检测结果,通过机器学习算法找出其中的关联规律。模型建成后可以实现三个主要功能:一是根据实时水质预测最优药剂投加方案;二是评估不同运行条件下设备的预期寿命;三是预警潜在的腐蚀结垢风险。这种预测性维护模式相比传统的定期维护或故障后维护,可以更科学地安排维护计划,避免过度维护或维护不足。目前已完成数据采集平台的搭建和部分历史数据的清洗工作,下一步将重点开发算法模块和验证模型准确性。

## 5 结语

中石化(河南)炼化有限公司在污水回用系统管理方面的探索实践,为行业提供了宝贵的经验借鉴。通过系统分析介质泄漏的影响机制,实施针对性的技术改造,企业不仅解决了当前面临的技术难题,更建立起预防为主、防

治结合的长效管理机制。未来,随着短效生物降解型药剂、预测性维护模型等新技术的研发应用,循环水系统的管理水平将进一步提升。这些工作不仅有助于企业实现节水减排目标,更为推动行业绿色低碳发展作出了积极贡献。建议在现有成果基础上,持续跟踪技术发展动态,不断优化完善管理体系,为行业可持续发展注入新动力。

## 【参考文献】

- [1]戴迪楠,刘永军,马晓妍,等.污水处理与回用过程对生态毒性的削减和水质安全评价[J].安全与环境学报,2017,17(4):1442-1447.
- [2]柳兰洲,何宁.城市生活污水处理与回用过程病毒的传播及防控[J].水处理技术,2021,47(11):31-35.
- [3]郑海棠.市政污水处理厂的碳中和[J].化学工程与装备,2022(3):278-292.

作者简介:王建勋(1967.9—),男,目前职务:水务部循环水区域班长,技师。