

工业循环水电化学法处理工艺的原理与经济效益评价研究

张卫华（中韩（武汉）石油化工有限公司，湖北 武汉 430080）

摘 要：为研究工业循环水电化学法处理工艺的原理与经济效益，文章阐述了电化学技术在控制工业循环水系统中结垢、腐蚀和微生物滋生方面的工作原理。通过在某炼化企业 I 循环水系统中的试验应用，分析了电化学处理在阻垢除垢、缓解腐蚀和杀菌灭藻等方面的性能。结果指出，该工艺有效将循环水系统的浓缩倍数提高至 15 倍以上，化学药剂使用量减少约 80%，维护和设备更换费用显著降低，经济效益突出。说明电化学处理工艺不仅提升了水处理效率，还带来了显著的成本节约，特别适用于零排放系统，具有广阔的应用前景。

关键词：工业循环水；电化学处理；经济效益

0 引言

随着工业生产规模的扩大，循环冷却水系统在石油化工等行业中得到了广泛应用。然而，循环水系统普遍存在结垢、腐蚀和微生物滋生等问题，影响了设备的运行效率和使用寿命。传统的化学药剂处理方法虽然有效，但存在药剂成本高、环境污染和二次处理问题。近年来，电化学处理技术因其环保、高效、可减少化学药剂使用等优点，受到了广泛关注。本文旨在研究工业循环水电化学法处理工艺的原理与经济效益，通过试验分析，探讨该工艺在阻垢、防腐和杀菌灭藻方面的应用效果，并评价其经济效益，为工业循环水处理技术的优化提供参考。

1 工业循环水电化学法处理工艺的原理

工业循环水电化学法处理工艺是一种通过电化学反应控制水中结垢、腐蚀和微生物滋生的先进技术。其原理主要依赖于电化学反应中阳极和阴极所引发的氧化还原作用，以有效去除水体中的金属离子和有机物。通过在循环水中实施电流，以控制和调整电极反应及电解条件，促进水体中溶解性无机盐类如钙、镁的沉淀，从而达到阻垢的目的。该工艺中使用的撬

装式电化学设备采用专利的窄极板间距和大电流密度设计，使得反应过程更为高效。电极上会产生不同的电解质：阳极会生成氧气和氯气，氯气进一步在水体中生成次氯酸，具备强效的灭菌作用；而在阴极，水的还原反应产生氢气，反应消耗氢氧根离子，促使 CaCO_3 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的形成及沉积^[1]。由此，阴、阳极的综合作用使得系统在不依赖化学药剂的前提下能够实现对循环水的降垢、除菌及防腐。除此之外，电化学过程还能有效降解水体中的有机物，通过去除微生物的营养来源抑制其生长，进而减少生物黏泥的形成。此工艺的显著特点是维护简单且对环境友好，尤其适合在零排放系统中应用，以减少化学药剂的使用和水资源的浪费。

2 工业循环水电化学法处理工艺的试验

2.1 试验设计

2.1.1 循环水系统简介

在此次试验中，循环水系统的选型和水质特性对电化学处理效果具有重大影响。本试验应用于一个炼化企业的 I 循环水系统，系统的设计参数及水质特性如表 1 所示。该系统由多个炼油加工装置组成，

表 1 系统的设计参数及水质特性

水质指标	单位	生产给水	含油污水回用水	I 循环水
浊度	NTU	2.32	3.24	5.97
pH 值	—	6.87	7.28	8.12
电导率	$\mu\text{S}/\text{cm}$	70.40	755.60	3094.60
总硬度（以 CaCO_3 计）	mg/L	23.90	44.4	202.58
总碱度（以 CaCO_3 计）	mg/L	27.50	91.44	268.78
氯离子	mg/L	12.16	78.57	362.56
总铁	mg/L	0.14	0.16	0.83
CODCr	mg/L	8.3	21.40	94.30
异养菌数量	CFU/mL	—	—	78400

循环水量为 $18000 \text{ m}^3/\text{h}$ ，初始浓缩倍数为 5–6。水质中主要指标如浊度、电导率、pH 值、总硬度和 COD_{Cr} 均经过仔细监测，以保障电化学设备的科学投运。由于厂区临近海边，气温较高，蒸发损失显著，需不断补充水量，补水主要为含油污水回用水和自产生用水，二者在水质上的差异性也为电化学处理工艺带来了挑战。

试验设计从系统运行条件及季节变化等多方面考虑，通过引入电化学设备进行循环水的旁流处理，该系统的旁流处理量设置为循环水量的 5% 至 10%，目的是在保证系统稳定运行的情况下，优化结垢及腐蚀控制效果^[2]。

2.1.2 电化学设备简介

本次试验中使用的撬装式电化学设备是由某循环水处理公司自主研发，结构上分为上下两部分。上箱体包含电源、电化学控制系统和监测换热器等，负责设备的控制与监测，下箱体则具备电化学单元和支撑结构，主要进行电化学处理过程。单台设备的处理能力为 0 至 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ，支持自动刮垢功能。设备采用专利技术的窄极板间距设计，电流密度可灵活调节，阴阳极材料为平板式电极，每个电极面积为 18 m^2 ，电流范围在 200 A 至 2000 A 之间。电压调整范围为 5 V，以根据电压变化调整刮垢频次。设备的设计旨在通过大电流密度短时间内实现高效反应过程，对结垢、微生物滋生和腐蚀问题进行有效抑制^[3]。

2.2 试验过程及结果

2.2.1 阻垢除垢

在试验过程中，电化学装置通过调节电流密度及反应时间达到阻垢的目的。此工艺通过电解反应，使钙、镁等离子在阴极生成不溶性碳酸盐和氢氧化物，这些沉积物会被刮垢装置自动刮除，从而减少潜在的垢积聚现象。实验数据显示，经过长达 60 天的运行，循环水的浓缩倍数增加至 15 倍左右，最大达到 15.46 倍。而总硬度和总碱度在波动中呈现上升趋势，但实测数值始终维持在 500 mg/L 和 400 mg/L 以下，低于预计值，这表明电化学工艺在维持零排放的同时有效降低了钙镁离子浓度，并控制了垢层的形成。在每次刮垢周期结束时，形成的浮垢和污泥通过连续收集和检测进一步证实了设备的除垢效能。

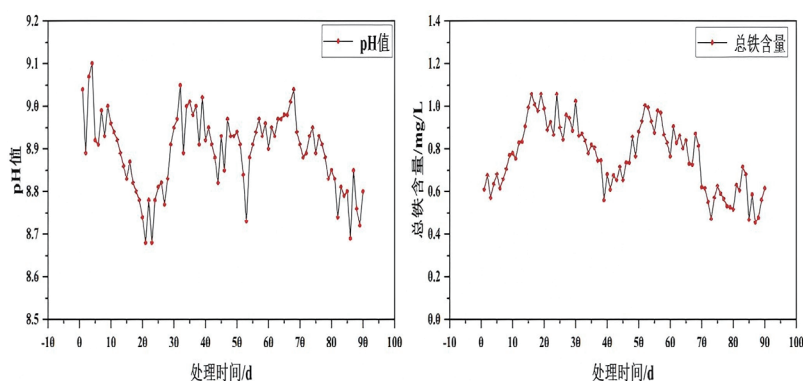


图1 试验期间循环水 pH 值变化曲线

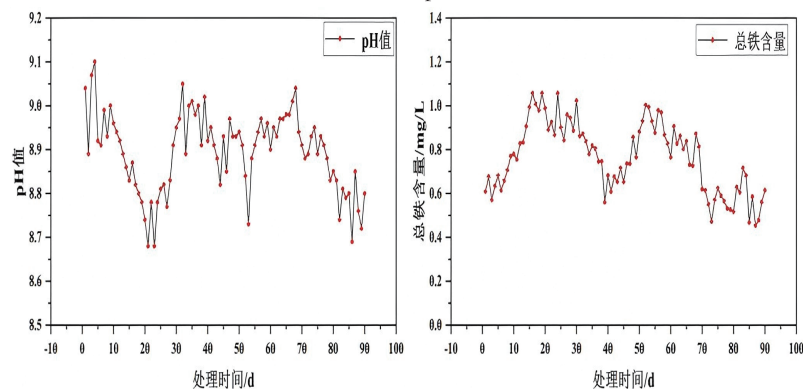


图2 试验期间循环水总铁含量变化曲线

2.2.2 缓解腐蚀

电化学装置在防腐中的应用尤为显著，主要通过调整水体的 pH 值并减少铁离子溶出量达成。在试验期间，通过挂片法检测腐蚀速率，显示出碳钢样片腐蚀速率逐步下降，而不锈钢样片在各运作周期内的腐蚀速率则稳定在国标限值以下。尽管碳钢腐蚀速率未完全满足国标，但已明显低于试验之初的水平。同时，通过调控电化学参数，使水体 pH 由 8.12 上升至 9.1，有效降低了酸腐蚀的风险，并创造了一个较为稳定的中性环境，在长期运行中缓解了设备的腐蚀问题，如图 1、2 中所示的总铁含量变化便佐证了此工艺的效果。电化学装置通过其作用机理，有效减小了腐蚀产物在换热器表面的沉积，大大降低了泄漏风险和维护成本。

2.2.3 杀菌灭藻

试验采用电化学与非氧化性杀菌剂协同的方式实现水体微生物污染的控制。电化学系统在高电流密度下对生物黏泥进行解离，同时通过对有机物的降解减少微生物生长所需的营养源。每周冲击投加的异噻唑啉酮能有效剥离换热设备中的生物膜，与电化学技术协同作用后实现了对异养菌数量的显著控制。实验结果显示，循环水中的异养菌数量始终低于国标上限，

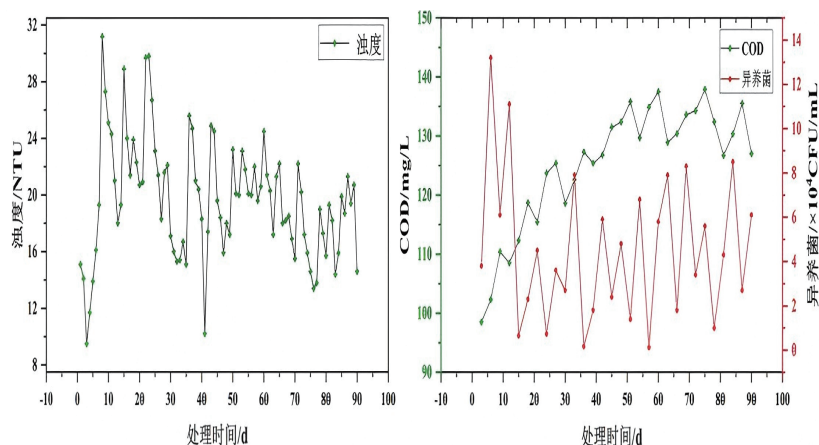


图3 试验期间循环水浊度变化曲线

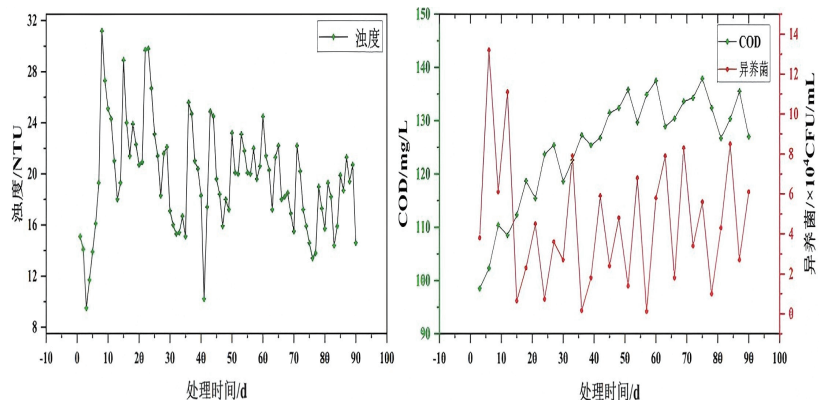


图4 试验期间 COD 及异养菌数量变化曲线

水体浊度和 COD 保持在可控范围内,如图 3、4 所示。同时,硫酸盐还原菌和铁细菌数量均处于低水平,表明电化学法在限制生物腐蚀、提升水质方面成效显著。通过对藻类滋生状况的监测,也发现循环水系统中的藻类活性显著降低。这一试验为后续工业应用提供了有效的技术方案支持。

2.3 经济效益评价

在循环水系统中应用电化学处理工艺,不仅在技术上取得了卓越效果,也带来了显著的经济效益。首先,电化学法大幅减少了化学药剂的使用量。传统循环水处理需大量投加阻垢剂、缓蚀剂和杀菌剂,药剂成本约为每吨水 1.5 元。而电化学工艺具备阻垢、防腐和杀菌的综合功能,仅需间歇投加少量非氧化性杀菌剂,化学药剂成本降低约 80%。以 I 循环水系统每日处理量 $18000 \text{ m}^3/\text{h}$ 计算,年可节省药剂费用约 950 万元。

其次,虽然电化学装置的运行增加了电耗,但整体能耗成本可控。设备电耗约为 $0.5 \text{ kWh}/\text{m}^3$,年耗电量约 7884 万 kWh,按工业电价 0.6 元/kWh 计算,年电费约 473 万元。相比于节省的化学药剂费用,电费增加仅占节省额的 50%,总体而言,仍实现了显著的

成本节约。

再次,设备维护和更换费用大幅减少。传统化学处理因药剂的腐蚀性和结垢问题,导致设备和管道磨损加剧,需频繁清洗和更换,增加了维护成本。采用电化学处理后,设备腐蚀速率显著降低,碳钢腐蚀速率降至 0.085 mm/a ,不锈钢降至 0.005 mm/a ,大大延长了设备的使用寿命。每年可减少设备维护和更换费用约 200 万元。

最后,电化学处理提高了循环水系统的浓缩倍数,降低了补水量和排污水量。实验中,浓缩倍数由原来的 5~6 倍提高至最高 15.46 倍,平均节水率达 60% 以上。减少的补水和排污不仅节约了水资源,还降低了污水处理费用。按每吨水处理成本 2 元计算,全年可节省水处理费用约 400 万元。

3 结语

研究表明,工业循环水电化学法处理工艺能够在不依赖传统化学药剂的前提下,有效控制循环水系统的结垢、腐

蚀和微生物滋生。通过在 I 循环水系统的试验应用,浓缩倍数提高至 15 倍以上,化学药剂使用量减少约 80%,设备维护和更换费用大幅降低,体现了显著的经济效益。该工艺不仅提高了水处理效率,降低了水资源消耗和环境污染,还符合可持续发展的要求。电化学处理设备维护简单、环保友好,尤其适用于零排放系统,具有广阔的推广价值和应用前景。

参考文献:

- [1] 穆道彬,杨军,张程蕾,等. 电化学与药剂联合处理循环水控制节水技术应用研究 [J]. 工业水处理, 2023, 43(5): 188-193.
- [2] 何小玉,高磊,徐伟康,等. 电化学处理技术在循环水旁滤系统中的应用 [J]. 工程技术研究, 2023, 5(1): 71-73.
- [3] 刘程发,刘锦阳,刘璐,等. 电化学处理炼油企业循环水的工业试验研究 [J]. 化工技术与开发, 2024, 53(3): 80-86.

作者简介:

张卫华 (1992-), 男, 汉族, 河南信阳人, 学历: 本科学士学位, 职称: 助理工程师, 主要研究方向或者从事工作: 工业循环水处理。