

锯齿板状阴极电化学除垢工艺优化及机理研究

黄亚鹏¹, 赵世鑫¹, 王立达¹, 刘贵昌¹, 贺永鹏², 邓海涛², 刘锦程², 孙文^{1*}

(1.大连理工大学化工学院, 辽宁大连 116024; 2.山东京博控股集团有限公司, 山东滨州 256500)

摘要:针对电化学除垢系统处理工业循环冷却水时能耗高的问题,采用锯齿板状阴极使系统能耗低至 6.82 kW·h/(kg CaCO₃)。实验和数值模拟结果表明,系统能耗降低是因为锯齿板状阴极的尖端区域水垢的沉积速率快、垢层与阴极结合力弱,使得垢层容易脱落;同时垢层覆盖锯齿状阴极尖端区域后,垢层沉积反应逐渐由尖端区域向平缓区域转移,大大延长了阴极失活时间,使得电化学除垢系统能耗降低。因此,通过尖端区域和平缓区域的协同作用,可以有效缓解阴极失活导致的高能耗问题。

关键词:阴极;电化学除垢;能源消耗;循环冷却水

中图分类号:O646.54

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)02-0110-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.02.022

Mechanism and process optimization of serrated plate cathode for electrochemical descaling

HUANG Ya-peng¹, ZHAO Shi-xin¹, WANG Li-da¹, LIU Gui-chang¹, HE Yong-peng²,
DENG Hai-tao², LIU Jin-cheng², SUN Wen^{1*}

(1.School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2.Shandong Chambroad Holding Group Co., Ltd., Binzhou 256500, China)

Abstract:High energy consumption is a main problem in using electrochemical descaling system to treat with industrial circulating cooling water. A serrated cathode can help the system to reduce the energy consumption to as low as 6.82 kW·h/kg CaCO₃. Experimental and numerical simulation results show that the decrease of energy consumption of the system is due to high scale deposition reaction rate at the tip of the serrated cathode, which reduce the adhesion between scale layer and cathode. The scale layer easily falls off from cathode surface, which is beneficial to cathode regeneration. In addition, after the scale layer covers tip area, the deposition reaction of the scale layer gradually shifts from tip area to flat area, which greatly delays cathode's deactivation and reduces the energy consumption of the electrochemical descaling system. The high energy consumption problem caused by cathode deactivation can be effectively solved through the synergy of tip region and flat area.

Key words: cathode; electrochemical descaling; energy consumption; circulating cooling water

工业循环冷却水系统作为工业生产的重要组成部分,对于水资源的合理利用具有重大意义^[1]。然而浓缩后的工业循环冷却水在换热器壁面的结垢问题不仅会降低换热效率,还会导致垢下腐蚀甚至非计划停车,为工业生产带来安全隐患^[2]。近年来,电化学除垢能够直接从循环水主体去除成垢离子、有效提高浓缩倍数、减少排放量,被誉为环境友好型技术^[3-4]。

由于除垢过程中垢层在阴极表面沉积,使得阴极容易失活,导致除垢速率降低、能耗增加。因此,很多学者从提高除垢速率和缓解阴极失活两个方面进行了大量的研究。Hasson 等^[5-6]开发的新型电化

学种子结晶系统,通过将沉淀发生反应由阴极表面转移到结晶器的种子表面,有效降低了阴极面积需求。Zhi 等^[7]将传统电絮凝与电化学除垢相结合,构造了一种新型除垢体系。在此体系中,电絮凝池中形成的 Al 絮体为沉淀反应提供了额外的表面积,从而有效减少了阴极表面垢层附着,延长了阴极寿命。Zaslavski 等^[8]采用双极膜的新型种子结晶系统,通过阳离子交换膜分离阴阳极,有效提高了除垢速率和降低了能耗。然而这几种方法除垢体系较为复杂、能耗较高,不利于电化学除垢系统工业化。Yang 等^[9]通过采用气体吹扫与镜面不锈钢阴极相结合的方法,证明镜面不锈钢阴极能够起到减少水

收稿日期:2022-02-24;修回日期:2022-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(21978036)

作者简介:黄亚鹏(1997-),男,硕士研究生,研究方向为电化学除垢, hyp20192020@163.com;孙文(1988-),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为工业电化学与水处理,通讯联系人, sunw@dlut.edu.cn。

垢附着、延长阴极失活时间的作用,并且不断更新的表面能够提高除垢速率,但镜面不锈钢除垢速率较低,因此系统能耗较高。Sanjuán 等^[10]提出了一种 3D 不锈钢阴极,克服了传统电化学水软化技术对阴极面积要求高的限制。实验结果表明,3D 不锈钢阴极在所有实验中硬度去除率均比 2D 钛网高 20%,且具有较低的能耗,但是阴极结垢之后清洗困难,不利于长时间多次循环运行。虽然近几年电化学除垢技术有了很大的进展,但是仍存在能耗较高、阴极结垢后不易脱落的问题。

为了缓解垢层在阴极附着之后不易脱落导致能耗上升的问题,笔者设计了一种新颖的锯齿板状阴极,该阴极能够使得表面垢层与基体结合力减弱,使得垢层容易脱落,缓解运行过程中能耗上升的问题,为电化学除垢技术领域提供了一种有效的新技术。

1 实验方法

1.1 锯齿板状阴极的结构

电化学除垢系统的阴极选用锯齿板状阴极,结构和尺寸如图 1 所示。该阴极由厚度为 0.1 mm 的不锈钢板用磨具挤压而成。其中锯齿长度变化范围为 10~30 mm,锯齿角度变化范围为 30~180°,而且保持整个不锈钢板阴极的投影长度为 60 mm,宽度为 70 mm。

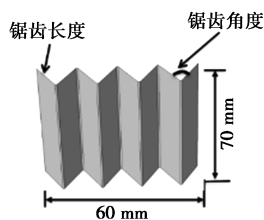


图 1 阴极结构示意图

1.2 实验装置

实验装置由电化学除垢器、离心泵、加热器、水槽、进口阀、出口阀组成,如图 2 所示。模拟工业循环水盛装在 15 L 的水槽里,通过加热器维持在 25℃。除垢装置运行时,模拟工业循环水从水槽泵出之后由电化学除垢器下部入口进入电化学除垢器,平行流过阴极和阳极表面之后从电化学除垢器上部出口流出,并最终流入水槽。电化学除垢器体积为 200 mL,其中平行排列 2 个 60 mm×70 mm 的形稳阳极(DSA)和 1 个相同尺寸的阴极,阴阳极中心间距为 15~30 mm。15 L 模拟循环水溶液由一定质量的 CaCl₂(分析纯)、MgSO₄·7H₂O(分析纯)、

NaHCO₃(分析纯)和 NaCl(分析纯)溶解于去离子水中制备而成,水质的硬度为 700 mg/L,碱度为 350 mg/L,pH 为 8.2,电导率为 2.5 mS/cm。

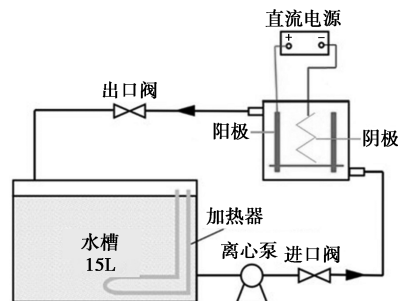


图 2 电化学除垢系统示意图

1.3 分析方法

通过测定水槽中水质硬度的变化和电源电压的变化来评估能耗。溶液硬度遵照国标采用 EDTA 滴定;总碱度采用盐酸滴定;电导率使用电导率仪(FiveEasy FE30, Mettler Toledo, 分辨率 0.01 μS/cm)进行测量;pH 用 pH/ISE 测量仪(PXSJ-216, Inesa, China)进行测量。以上指标的检测均进行重复实验至少 3 次,以确保结果的准确性和可重复性。

在进行电化学除垢过程中影响因素的实验探究时,每个因素每个水平均进行 3 组平行实验,以确保实验的可重复性和准确性。每隔 30 min 记录 1 次电源电压和电流值,并计算 30 min 内的平均能耗比:

$$\eta = \{[(U_1 + U_2)/2]I t \times 10^{-3}\} / [(c_1 - c_2)V \times 10^{-6}] \quad (1)$$

式中: η 为平均能耗比, kW·h/(kg CaCO₃); U_1 为初始电源电压, V; U_2 为结束电源电压, V; I 为电源电流, A; t 为时间, h; c_1 为初始质量浓度, mg/(L CaCO₃); c_2 为结束质量浓度, mg/(L CaCO₃); V 为循环水体积, L。

除垢速率计算式为:

$$\omega = [(c_1 - c_2)V \times 10^{-3}] / 2abt \quad (2)$$

式中: ω 为除垢速率, g/(m²·h); a 为锯齿展开成平板总长度, m; b 为锯齿宽度, m。

1.4 数值模拟

采用 COMSOL Multiphysics 软件构建锯齿板状阴极的电化学除垢系统模型,如图 3 所示。其中锯齿长度为 20 mm,锯齿角度为 60°,阴阳极中心间距为 20 mm,锯齿投影长度为 60 mm,投影宽度为 70 mm,计算了电流为 0.3 A 时的电极电位、电流密度、离子浓度和 pH 分布。模拟采用了二次电流分布和稀物质传递物理场,并通过电极表面耦合计算

阴极电化学反应产生的 OH⁻ 的分布。

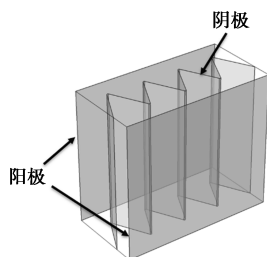


图 3 锯齿板状阴极的电化学除垢系统模型

模型中的基本方程包括欧姆定律:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

连续性方程:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4)$$

高斯定律:

$$\nabla \cdot (\partial \mathbf{E}) = \rho \quad (5)$$

其中,阴极极化表面边界条件为:

$$-\sigma (\partial \phi / \partial \mathbf{n}) |_{r_c} = f_c(\phi) \quad (6)$$

其中,主体溶液界面边界条件为:

$$\phi |_{r_b} = 0 \quad (7)$$

模型中考虑了 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 OH⁻ 离子的浓度。

在电解质溶液中,物种 *i* 的物质平衡方程为:

$$\partial c_i / \partial t + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i - z_i u_{mi} F_{c_i} \nabla \phi) = 0 \quad (8)$$

阴极表面产生 OH⁻ 的速率方程为:

$$\mathbf{N}_{\text{OH}^-} \cdot \mathbf{n} |_{r_c} = [\nu_{\text{OH}^-} f_c(\phi)] / (n_{\text{OH}^-} F) \quad (9)$$

对于其他不参与电化学反应的物质 *i*, 阴极表面的边界条件为:

$$\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{n} |_{r_c} = 0 \quad (10)$$

利用极化曲线测得的数据作为数值模拟的阴极电极动力学边界条件,如图 4 所示。采用三电极体系进行电化学实验。采用 304 不锈钢电极作为工作电极,分别以铂片和饱和甘汞电极(SCE)作为对电极和参比电极。所有电化学实验均在 25℃ 的模拟循环水中进行,工作电极面积用环氧树脂保持在 1 cm²。

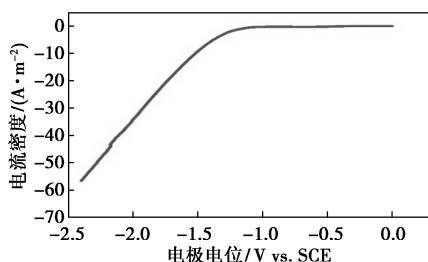


图 4 304 不锈钢在模拟循环水溶液中的极化曲线

电化学和传质涉及的参数如表 1 所示。

表 1 模型中涉及的电化学和传质参数

参数	数值	参数	数值
$\sigma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	0.25	$R / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	8.3145
ϑ	80	T / K	303.15
ν_{OH^-}	4	$F / (\text{C} \cdot \text{mol}^{-1})$	96,487
n_{OH^-}	4		

扩散系数和主体溶液离子浓度如表 2 所示^[11-12]。

表 2 模型中涉及各离子扩散系数和主体溶液浓度

离子	扩散系数 $D_i / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	主体溶液浓度 $C_{i,\text{bulk}} / (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$
OH ⁻	5.27×10^{-9}	1.58×10^{-6}
Ca ²⁺	9.55×10^{-10}	3.50×10^{-3}
Mg ²⁺	7.05×10^{-10}	3.50×10^{-3}

1.5 材料表征

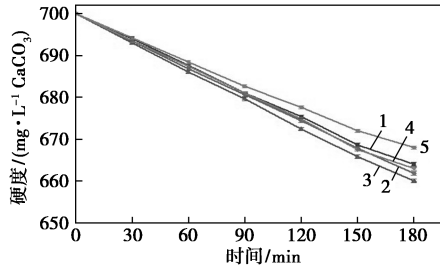
利用 ZEISS Ultra 55 场发射扫描电镜(FE-SEM,德国卡尔蔡司公司生产)对锯齿尖端和远离尖端平缓处的微观形貌进行表征。该电镜配套有能量散射 X 射线光谱分析仪(EDS),可对垢层元素进行成分分析。

2 结果与讨论

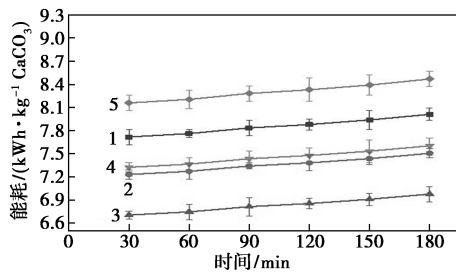
2.1 锯齿长度对电化学除垢过程的影响

在锯齿角度为 60°、阴阳极中心间距为 20 mm、电流为 0.3 A 时,不同锯齿长度下硬度和能耗随时间的变化情况如图 5 所示。由图 5 可以看出,锯齿长度分别为 12、15、20、25 mm 和 30 mm 的锯齿板状阴极经过 3 h 的电化学除垢后,对应的模拟循环水溶液硬度分别为 664、661.8、660、663 mg/L 和 668 mg/L,说明除垢速率随着锯齿长度的增加先增大后减小,而能耗则分别由初始的 7.72、7.23、6.70、7.32₃、8.16 kW·h/(kg CaCO₃) 达到 8.01、7.50、6.97、7.60、8.47 kW·h/(kg CaCO₃),说明能耗随着锯齿长度的增加先减小后增大,在锯齿长度为 20 mm 时硬度下降速率最快,能耗最低。这是因为锯齿长度为 12、15、20、25、30 mm 时,阴极尖端到阳极面的距离分别为 14.80、13.51、11.34、9.18、7.01 mm,而阴极尖端到阳极面的距离增加会导致槽压升高、能耗增大,而阴极尖端到阳极面的距离太短又会导致阴极尖端产生的 OH⁻ 与阳极附近的 H⁺ 发生中和,达不到除去溶液中钙镁离子的作用,同时会增大锯齿之间的“屏蔽作用”,即在电化学除垢过程中,由于锯齿尖端处的两边直线距离较近,使得从

远离尖端一侧的阳极出发的电力线难以到达阴极尖端处,从而导致此处电力线稀疏,除垢速率降低,能耗增大。



(a) 对溶液硬度的影响



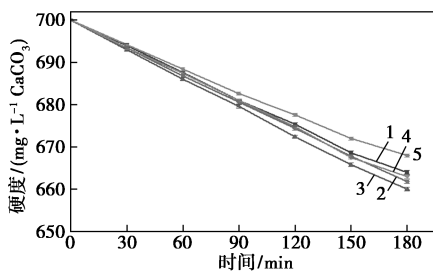
(b) 对能耗的影响

1—12 mm; 2—15 mm; 3—20 mm; 4—25 mm; 5—30 mm

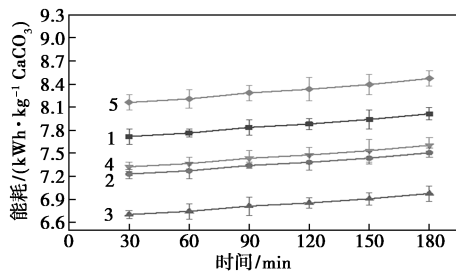
图5 不同锯齿长度对溶液硬度和能耗的影响

2.2 锯齿角度对电化学除垢过程的影响

在锯齿长度为20 mm、阴阳极中心间距为20 mm、电流为0.3 A时,不同锯齿角度下硬度和能耗随时间的变化情况如图6所示。由图6可以看出,锯齿角度分别为180°、90°、60°和30°的锯齿板状



(a) 对溶液硬度的影响



(b) 对能耗的影响

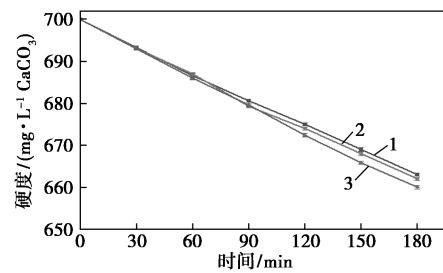
1—30°; 2—60°; 3—90°; 4—180°

图6 不同锯齿角度对溶液硬度和能耗的影响

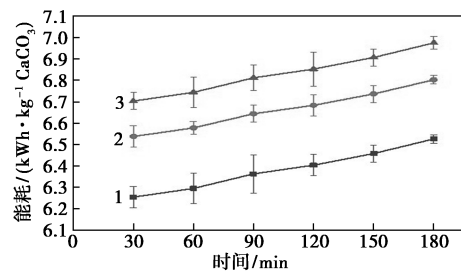
阴极经过3 h 电化学除垢后,对应的模拟循环水溶液硬度下降至666.662、660 mg/L 和657 mg/L,而能耗分别由初始的7.94、7.08、6.70、5.91 kWh/(kg CaCO₃) 上升至8.14、7.35、6.97 kWh/(kg CaCO₃) 和6.14 kWh/(kg CaCO₃),说明随着锯齿角度的减小,硬度的下降速率加快,能耗降低。这是因为锯齿角度减小会增加阴极的反应面积,同时也会使得阴极尖端部分更多,尖端部分的电流密度较大,反应速率较快,析氢反应也更加剧烈,使得在阴极生长的垢层在氢气冲刷作用下从阴极表面脱离,促进阴极表面更新,这种现象称为尖端效应。掉落在溶液中的水垢会随着模拟循环水溶液的流动带出除垢器进入水槽,并最终逐渐沉降到水槽底部,从而起到除去溶液中钙镁离子和延缓阴极失活的目的。锯齿角度越小,在投影长度不变的情况下,锯齿尖的数目越多,尖端效应越明显,表面更新越快,使得除垢速率提升,从而有效降低能耗。

2.3 阴阳极中心间距对电化学除垢过程的影响

阴阳极间距是影响电化学除垢电压的重要因素。选择锯齿阴极板的中心线到阳极板的距离为阴阳极中心间距来探究其对除垢过程的影响。在锯齿长度为20 mm、锯齿角度为60°、电流为0.3 A时,不同阴阳极中心间距下硬度和能耗随时间的变化情况如图7所示。从图7中可以看出,在阴阳极中心间距分别为15、17.5 mm和20 mm时,经过3 h 的电化学除垢之后,模拟循环水溶液硬度分别为663、



(a) 对溶液硬度的影响



(b) 对能耗的影响

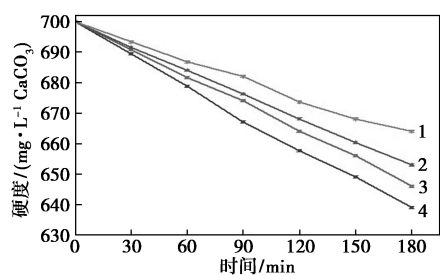
1—15 mm; 2—17.5 mm; 3—20 mm

图7 不同阴阳极间距对溶液硬度和能耗的影响

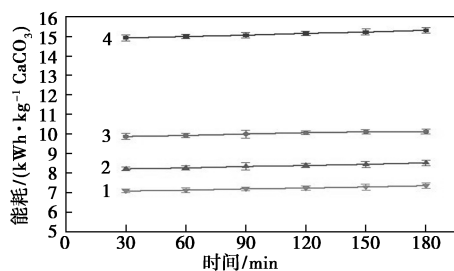
662 mg/L 和 660 mg/L, 而能耗则分别由 6.25、6.54、6.70 kW·h/(kg CaCO₃) 上升至 6.53、6.80、6.97 kW·h/(kg CaCO₃), 硬度的下降速率随着阴极中心间距的增大略有增大, 但是能耗随着阴阳极中心间距的增大大幅升高。这是因为间距的增加使得在阴极附近的 OH⁻ 能够一定程度上较少地迁移到阳极与阳极附近的 H⁺ 结合而造成 OH⁻ 的消耗, 从而提升除垢速率, 但是间距的增加对于电压的增加影响更为明显, 因此最终使得能耗增大。

2.4 电流对电化学除垢过程的影响

电流是影响电化学除垢系统效果的重要因素。在锯齿长度为 20 mm、锯齿角度为 60°、阴阳极中心间距为 20 mm 时, 不同电流下硬度和能耗随时间的变化情况如图 8 所示。由图 8 可以看出, 电流分别为 0.8、0.5、0.4 A 和 0.3 A 时, 电化学除垢 3 h 之后模拟循环水硬度分别达到 639、646、653 mg/L 和 664 mg/L, 能耗由 14.93、9.87、8.22、6.70 kW·h/(kg CaCO₃) 上升至 15.32、10.13、8.52 kW·h/(kg CaCO₃) 和 6.97 kW·h/(kg CaCO₃), 说明随着电流的增大, 硬度的下降速率增大。然而随着电流的增大, 硬度的下降速率并未随着电流成比例增大, 这是由于尽管电流增大产生了足够多的 OH⁻, 但是由于钙离子、镁离子和碳酸氢根离子无法及时通过扩散补充到阴极表面, 限制了除垢速率的进一步提升, 同时, 随着电流的增大, 电压也随之增大, 进而导致能耗大幅升高。



(a) 对溶液硬度的影响



(b) 对能耗的影响

1—0.3 A; 2—0.4 A; 3—0.5 A; 4—0.8 A

图 8 不同电流对溶液硬度和能耗的影响

本系统水软化性能与其他文献的比较结果如表 3 所示。由表 3 中可以看出, 本系统具有更好的水软化性能, 除垢速率达到 11.23 g/(m²·h), 能耗只有 6.82 kW·h/(kg CaCO₃), 能耗在水质硬度低于 1 200 mg/L 时远低于其他文献的结果。

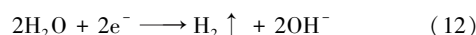
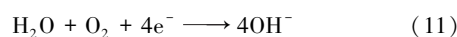
表 3 本系统水软化性能与其他论文的比较

硬度/ (mg·L ⁻¹)	电流密度/ (A·m ⁻²)	除垢速率/ (g·m ⁻² ·h ⁻¹)	能量消耗/ (kWh·kg ⁻¹ CaCO ₃)	参考 文献
305	10.9	2.5~5.0	8~16	[5]
295	22	3.2~5.5	~20	[5]
254	~30	2.5	21	[5]
250	20	2.6	20	[6]
1180	108	22.8	16	[6]
300	100	10	118	[7]
6540	250	530~570	1.7	[8]
1600	100	460	2.8~3.0	[8]
350	100	25.5~34.3	17.6~22.3	[9]
700	13.5	11.23	6.82	本系统

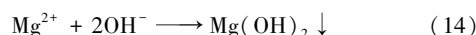
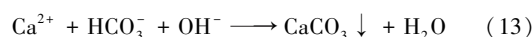
2.5 锯齿板状阴极工作原理

电化学除垢的核心是通过电解在阴极表面析出氢气在阴极附近构建强碱性区域, 工业循环冷却水中的钙镁离子在该区域内发生沉积。

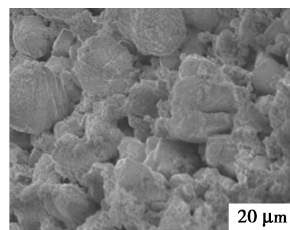
阴极表面发生析氢反应:



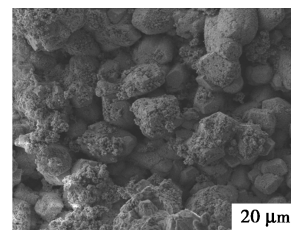
钙镁离子发生沉积反应:



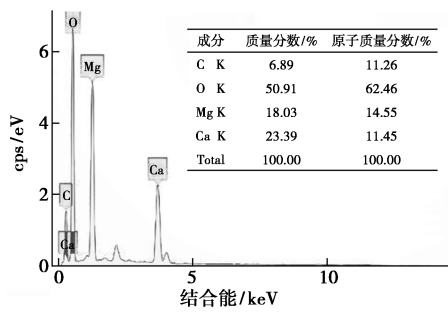
通过对锯齿板状阴极锯齿尖端和远离尖端的平缓部位的垢层形貌进行表征和元素分析, 结果如图 9 所示。由图 9 中可以看出, 不同位置的垢层性质有较大的差异, 在锯齿平缓处垢层较为平整, 尖端处垢层呈多孔状, 而且钙镁物质的量比小于平缓处的钙镁比。表明在电化学除垢过程中锯齿不同位置所起作用不同。相比于平缓处, 锯齿尖端由于产生的垢层中镁质沉积层更多, 因此其与阴极表面结合力



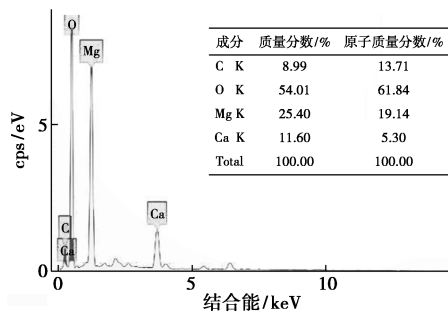
(a) 阴极平缓处表面形貌



(b) 尖端处表面形貌



(c) 阴极平缓处成分分析

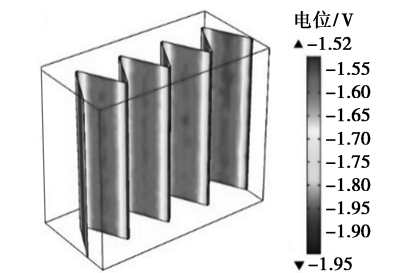


(d) 尖端处成分分析

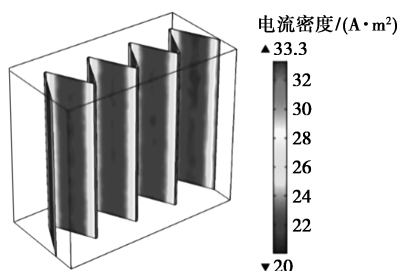
图9 锯齿阴极平缓处和尖端处表面形貌和成分分析

较弱,更容易脱落到主体溶液中,进而能有效促进阴极表面更新,延长阴极失活时间。而阴极平缓处由于面积较大,阴极尖端处垢层被覆盖,为后续的电化学除垢反应提供场所。

为探究电化学除垢过程中的工作机理,采用COMSOL Multiphysics 模拟软件对于0.3 A 电流条件下锯齿不同位置的电流密度、电极电位、离子浓度和pH进行模拟,结果如图10和图11所示。

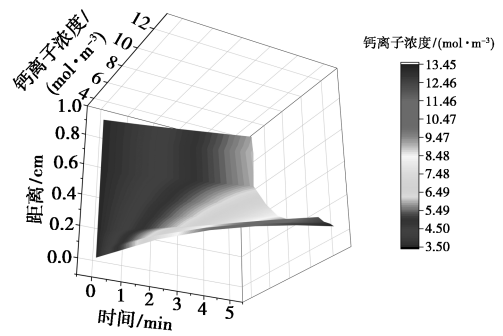


(a) 电极电位

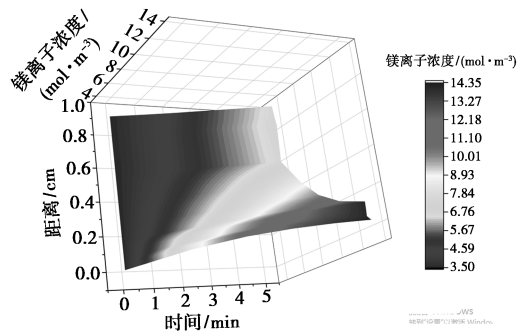


(b) 电流密度分布

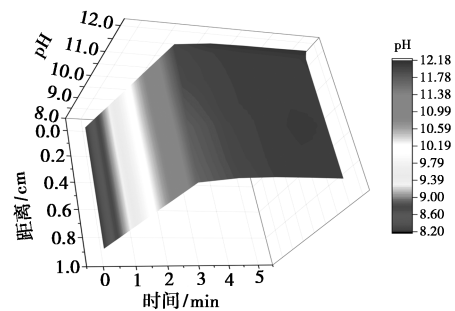
图10 锯齿阴极表面电极电位与电流密度分布



(a) 钙离子浓度



(b) 镁离子浓度



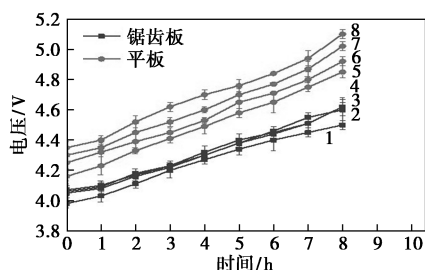
(c) pH分布

图11 锯齿阴极表面Ca²⁺、Mg²⁺和pH分布图

从图10中可以看出,在阴极尖端电流密度最大(31.2 A/m²),表面电位最低(-1.92 V),而在阴极平缓部位电流密度最小(20.73 A/m²),表面电位最高(-1.58 V),意味着在尖端发生的析氢反应更剧烈,同时较大的电流密度也意味着局部pH较大,生长的垢层中镁的浓度更高,与阴极结合力更弱,这与实验观察到的现象一致^[11-14]。同时从图11中可以看出,在尖端的钙镁离子浓度更多、pH更高,说明在尖端更容易发生水垢沉积反应。

总电流不变的情况下,尖端区域电流密度大,意味着平缓部位电流密度小,会造成平缓部位垢层不易脱除,导致电压升高、能耗增大。因此,为了评价锯齿板阴极生长的垢层与基材的结合力,通过在0.3 A的条件下对阴极分别为锯齿板和平板结构的电化学除垢器电压进行监测,并且在电化学除垢8 h后对覆盖垢层的阴极在超声清洗机中清洗30 min,

通过这种方法达到去除表面结合力较弱的垢层的目的,之后进行下一次循环实验,4次循环实验结果如图 12 所示^[15-17]。从图 12 中可以看出,在电化学除垢过程中电压因为阴极覆盖垢层均会上升,但是锯齿板阴极电压一直都低于平板电压 4% 以上。同时平板阴极在 4 次循环实验结束后电压分别达到了 4.85、4.92、5.02、5.10 V,比初始电压 4.16 V 升高了 0.69、0.76、0.86、0.94 V,而锯齿阴极在第 2、3、4 次循环实验结束后,电压基本稳定在 4.62 V,仅比初始电压 3.98 V 高 0.72 V。在超声清洗后电压会降低至 (4.06 ± 0.02) V,仅比初始电压高 (0.08 ± 0.02) V,说明生长在锯齿板阴极的垢层与基材结合力弱,容易从阴极表面脱除,促进阴极表面更新,能够有效延长阴极失活时间,降低能耗。



1—锯齿板第 1 次循环;2—锯齿板第 2 次循环;
3—锯齿板第 4 次循环;4—锯齿板第 4 次循环;
5—平板第 1 次循环;6—平板第 2 次循环;
7—平板第 3 次循环;8—平板第 4 次循环

图 12 电流为 0.3 A 时锯齿板和平板
4 次循环实验电压变化情况

锯齿板状阴极的工作原理:锯齿阴极的尖端部分相比于平滑部位具有更低的表面电位和更高的电流密度,发生的阴极析氢反应更加剧烈,从而使得在所述阴极的尖端附近形成一个局部强碱性的环境,更容易生成钙镁沉积层,使得其除垢速率提升,而且尖端部分垢层更容易脱落,促进了阴极表面的更新。同时由于锯齿阴极的阴极表面积相比于平板更大,在锯齿尖端区域被覆盖垢层之后,平缓区域可为后续反应提供场所。所以在相同电流下其电压更低,最终使得锯齿阴极能耗更低。

3 结论

(1) 相较于传统的平板阴极,锯齿板状阴极极大地降低了电化学除垢系统的能耗,能量消耗低至 $6.82 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{kg CaCO}_3)$ 。

(2) 锯齿板状阴极由于具有尖端效应,大大增加了局部碱度和水垢的沉积速率,促进了阴极表面

不断更新,平缓部位也能在尖端被垢层覆盖,为后续的阴极反应提供场所。同时锯齿形式有效增加了阴极面积,通过尖端区域和平坦区域的协同作用,促进阴极表面更新,使得电化学除垢系统能耗大幅降低。

参考文献

- [1] Liao Zhaohui, Gu Z, Schulz M C, *et al.* Treatment of cooling tower blowdown water containing silica, calcium and magnesium by electrocoagulation[J]. *Water Science & Technology*, 2009, 60(9): 2345-2352.
- [2] 徐浩,雷佳妮,杨鸿辉,等.电化学水垢去除技术处理能力核算及技术改进[J].*工业水处理*, 2019, 39(2): 17-20.
- [3] 林保华,高勇,雷亮.多效蒸发+MBR 工艺在废乳化液处理中的应用[J].*化工时刊*, 2016, 30(10): 4.
- [4] 钱凯凯,胡将军.电解参数对循环冷却水处理及倒极除垢效果的影响[J].*工业水处理*, 2020, 40(1): 83-86.
- [5] Hasson D, Sidorenko G, Semiat R. Low electrode area electrochemical scale removal system[J]. *Desalin Water Treat*, 2011, 31(1-3): 35-41.
- [6] Hasson D, Lumelsky V, Greenberg G, *et al.* Development of the electrochemical scale removal technique for desalination applications[J]. *Desalination*, 2008, 230(1-3): 329-342.
- [7] Zhi Suli, Zhang Shuting. A novel combined electrochemical system for hardness removal[J]. *Desalination*, 2014, 349: 68-72.
- [8] Zaslavski I, Shemer H, Hasson D, *et al.* Electrochemical CaCO_3 scale removal with a bipolar membrane system[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 445: 88-95.
- [9] Yu Yang, Jin Huachang, Meng Pengjun, *et al.* Electrochemical water softening using air-scoured washing for scale detachment[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 191: 216-224.
- [10] Sanjuán I, Benavente D, García-García V, *et al.* Electrochemical softening of concentrates from an electrodialysis brackish water desalination plant: Efficiency enhancement using a three-dimensional cathode[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 208: 217-226.
- [11] Sun Wen, Liu Guichang, Wang Lida, *et al.* A mathematical model for modeling the formation of calcareous deposits on cathodically protected steel in seawater[J]. *Electrochim Acta*, 2012, 78: 597-608.
- [12] Barchiche C, Deslouis C, Gil O, *et al.* Role of sulphate ions on the formation of calcareous deposits on steel in artificial seawater: the formation of Green Rust compounds during cathodic protection[J]. *Electrochim Acta*, 2009, 54(13): 3580-3588.
- [13] Li C J, Du M, Qiu J, *et al.* Influence of temperature on the protectiveness and morphological characteristics of calcareous deposits polarized by galvanostatic mode[J]. *Acta Metall Sin-Engl*, 2014, 27(1): 131-139.
- [14] Zamanzade M, Shahrabi T, Gharacheh E A. Application of Taguchi method for the characterization of calcareous deposits formed by pulse cathodic protection[J]. *Mater Corros*, 2007, 58(9): 690-695.
- [15] Kraft A, Blaschke M, Kreysig D, *et al.* Electrochemical water disinfection Part III: Hypochlorite production from potable water with ultrasound assisted cathode cleaning[J]. *J Appl Electrochem*, 2002, 32(6): 597-601.
- [16] Niemczewski B. Observations of water cavitation intensity under practical ultrasonic cleaning conditions[J]. *Ultrason Sonochem*, 2007, 14(1): 13-18.
- [17] Mazue G, Viennet R, Hihn J Y, *et al.* Large-scale ultrasonic cleaning system: Design of a multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz)[J]. *Ultrason Sonochem*, 2011, 18(4): 895-900. ■