

电解诱导硬度变化优化电化学水软化工艺研究

郑国鹏¹, 王立达¹, 孙文¹, 鲍学伟², 郝安峰², 赵津², 李河金², 刘贵昌^{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:针对不同结垢倾向的水质会影响电化学水软化性能的问题,从水质稳定性角度出发,提出电解诱导水质硬度变化优化水软化工艺的方法。将硬度变化与RSI指数建立联系,并通过循环水动态模拟实验建立基于不同水质结垢倾向的评价体系。结果表明,该工艺为不同结垢倾向的水质提供了一种除垢方式的性能评估方法,实现了电化学水软化技术的工艺优化。

关键词:循环水;电解诱导;电化学水软化;结垢倾向;评价体系

中图分类号:O646.54

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)12-0123-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.12.024

Optimization of electrochemical water softening process by electrolysis-induced hardness variation

ZHENG Guo-peng¹, WANG Li-da¹, SUN Wen¹, BAO Xue-wei², HAO An-feng², ZHAO Jin², LI He-jin², LIU Gui-chang^{1*}

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

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

Abstract:The performance of electrochemical water softening operation will be affected by water quality with different scaling tendency.A method to optimize water softening process by electrolysis-induced water hardness variation is proposed from the perspective of water quality stability.A link between water hardness variation and RSI is established. Then,an evaluation system based on different water quality scaling tendencies is established through the dynamic simulation experiments for circulating water.This method provides a performance evaluation method for descaling water quality with different scaling tendencies, and achieves the process optimization of electrochemical water softening technology.

Key words: circulating water; electrolysis inducing; electrochemical water softening; scaling tendency; evaluation system

敞开式循环冷却水系统由于冷却效率高、价格低廉而被广泛应用^[1]。然而,敞开式循环冷却水系统是暴露在大气中进行对流换热的,冷却过程中会导致部分水分被蒸发,水体中的离子及矿物质被不断浓缩累积,最终在高温的换热器壁面析出造成结垢^[2]。电化学水软化技术由于操作简单、环境友好性和解决结垢问题治标又治本等优点,受到越来越多的学者的关注。

国内外的学者的研究主要集中于电化学水软化机理、运行参数、阴阳极材料和结构的设计等方面^[3-5],Guo等^[6]详细比较了不同阳极材料对电化学水软化性能的影响,同时采用水质除垢前后饱和指数LSI和稳定指数RSI的变化证明了电化学水软化技术能有效缓解水质的结垢趋势。Zhang等^[7]基于Box-Behnken设计(BBD)的响应面分析法

(RSM)对影响电化学水软化性能的运行参数进行优化,同时以RSI指数作为评价指标之一进行了化学法阻垢和电化学法水软化2种方法的对比,从而突出电化学水软化技术的优势。但在这些工作中仅针对某种特定水质研究了不同条件下的水软化性能,而实际情况下循环水变化多样,且在水软化过程中水质结垢倾向也不断发生变化,采用一成不变的电化学水软化运行参数,如固定的电流密度等,明显具有一定的盲目性和不合理性。此外,针对不同结垢倾向的水质只通过除垢速率和能耗评价电化学水软化性能也具有片面性。

因此,笔者从水质稳定性角度出发,提出一种电解诱导水质硬度变化的方法,用于优化电化学水软化工艺。建立了完整的评价水质结垢倾向的体系,为不同结垢倾向的水质选用不同的软化工艺提供参

收稿日期:2023-03-06;修回日期:2023-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(21978036)

作者简介:郑国鹏(1998-),男,硕士生,研究方向为循环水结垢倾向评估,guopeng0717@126.com;刘贵昌(1962-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为先进电化学防腐及防垢工程技术与装备,通讯联系人,gchliu@dlut.edu.cn。

考,同时也进一步完善了电化学水软化性能的评价参数。

1 材料与方 法

1.1 试剂与仪器

无水氯化钙(分析纯)、氯化铵(优级纯)、铬黑 T(分析纯)、无水乙醇(分析纯),天津大茂化学试剂厂生产;碳酸氢钠(分析纯)、氨水(分析纯),天津科密欧化学试剂有限公司生产;乙二胺四乙酸二钠(分析纯),天津市北方天医化学试剂厂生产;去离子水($>17 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$); DSA 阳极(700 mm \times 700 mm \times 1.5 mm); 304 不锈钢板(700 mm \times 700 mm \times 0.5 mm),上海旷扬钢铁贸易有限公司生产; 304 不锈钢试片($\Phi 30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$),上海浩瑞金属科技有限公司生产;加热棒(220 3 mm \times 95 mm),泰州市瑞科电热器有限公司生产;转子流量计(DN15 1 000 L/H),宜兴市高胜镇源佳环保设备经营部。

电子天平(AL104),梅特勒-托利多仪器上海有限公司生产;pH 计(PHS-3C),上海雷磁仪器厂生产;电导率仪(FE30),上海梅特勒-托利多仪器有限公司生产;恒流电源(WKZ-2405),大连金州真空电器研究所。

1.2 实验装置及实验用水

所用电化学除垢装置为本实验室设计^[8],阴极为 20 目的不锈钢平网折成长为 8.5 cm、宽为 1.5 cm 的锯齿状波纹网,波纹网最后将其投影宽度折为 6 cm,浸入水中深度为 6 cm,阴极两侧各平行放置 1 片 DSA 平板作为阳极,两阳极板间距为 3 cm。

实验用水为根据山东某化工厂循环水的硬碱比波动的范围所配制的循环水模拟液,详细水质情况如表 1 所示。

表 1 实验用水指标

水质记法 (硬度/碱度)	硬度/ ($\text{CaCO}_3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	碱度/ ($\text{CaCO}_3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	电导率/ ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH
1000/100	1000	100	2330	8.24
1000/80	1000	80	2310	8.02
1000/60	1000	60	2300	7.98
1000/40	1000	40	2280	7.92
1000/30	1000	30	2260	7.78
1000/20	1000	20	2240	7.65
900/250	900	250	2330	8.04
900/200	900	200	2250	8.03
900/150	900	150	2180	8.02

900/100	900	100	2110	8.01
900/50	900	50	2030	7.96
900/20	900	20	1988	7.82
800/350	800	350	2270	8.14
800/250	800	250	2130	8.13
800/150	800	150	1969	8.10
800/100	800	100	1903	8.06
800/50	800	50	1834	8.01
800/20	800	20	1792	7.81
700/350	700	350	2050	7.95
700/250	700	250	1898	7.92
700/150	700	150	1756	7.91
700/100	700	100	1685	7.88
700/50	700	50	1609	7.80
700/20	700	20	1594	7.70
600/350	600	350	1874	8.16
600/250	600	250	1718	8.15
600/150	600	150	1564	8.12
600/100	600	100	1487	8.10
600/50	600	50	1415	7.99
600/20	600	20	1374	7.72
500/250	500	250	1506	8.12
500/200	500	200	1430	8.11
500/150	500	150	1357	8.08
500/100	500	100	1282	8.03
500/50	500	50	1208	7.91
500/20	500	20	1149	7.65
400/400	400	400	1527	8.07
400/250	400	250	1298	8.02
400/150	400	150	1140	7.98
400/100	400	100	1060	7.96
400/50	400	50	984	7.94
400/20	400	20	937	7.93
300/250	300	250	1097	8.30
300/200	300	200	1017	8.25
300/150	300	150	939	8.23
300/100	300	100	855	8.19
300/50	300	50	774	8.05
300/20	300	20	736	7.77
200/100	200	100	634	8.21
200/80	200	80	612	8.18
200/60	200	60	575	8.09
200/40	200	40	545	7.97
200/30	200	20	530	7.91
200/20	200	30	498	7.55

1.3 实验步骤

1.3.1 电解诱导硬度变化评价体系的建立

评价体系的建立包括两部分实验,首先通过电解诱导实验建立实验用水硬度变化与其 *RSI* 指数的函数关系,然后通过循环水动态模拟实验建立实验用水结垢速率与其 *RSI* 指数的函数关系,根据国标中对结垢速率的规定^[10],进一步确定满足实际用水要求的硬度变化值。

(1) 电解诱导硬度变化实验

选用有效正对面积为 $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ 的电极体系进行电解诱导实验,其中阴极为不锈钢平板,阳极为 DSA 平网,阴阳极间距为 2 cm ,将其置于 1 L 的上述溶液中,在 60°C 的水浴条件下以筛选出的电流密度和电解时间作为电解诱导的最佳工作参数进行电解实验,每次使用前对阴极不锈钢板进行表面醋酸清洗处理,以保证阴极的表面状态一致,待溶液冷却后用去离子水将其补到初始体积后进行硬度滴定得到溶液电解前后的硬度变化。进一步建立实验用水硬度变化与其 *RSI* 指数的关系。

(2) 循环水动态模拟实验

选用直径为 30 mm 、厚度为 1 mm 的不锈钢试片模拟换热器壁面(与溶液接触表面积为 5.72 cm^2),通过亚克力圆环片固定在电加热装置上,其下部压装热电偶与温控器相连,以实现换热器壁面温度的模拟与控制。通过转子流量计实现循环水流速的模拟与控制,循环水动态模拟装置如图 1 所示。对每次使用的金属试片选用 $1\ 000$ 目的砂纸进行打磨以保证每次实验的试片表面粗糙度一致,在乙醇溶液中超声 10 min 以清洗表面残留物,吹干称重并记录试片结垢前质量。通过水泵将 5 L 上述溶液以 1 m/s 的流速循环经过恒温 60°C 的圆片壁面,循环工作 12 h ,实验结束后取下试片干燥称重并记录试片结垢后质量。计算结垢速率,进一步建立实验用水结垢速率与其 *RSI* 指数的关系。

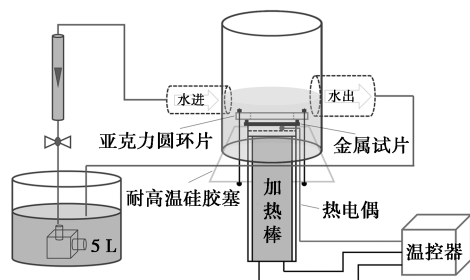


图 1 循环水动态模拟实验装置

1.3.2 电化学水软化工艺优化

选用 $1000/100$ 、 $700/350$ 、 $400/400$ 三种水质作为电化学水软化工艺优化实验用水,研究大电流密度除垢和补碱电解除垢 2 种水软化方式对软化性能的影响。每次除垢前将阴极置于 2 L 循环水溶液中以 36 A/m^2 的电流密度沉积 2 h ,保证阴极表面有薄垢覆盖,以避免除垢初阴极存在诱导成核期的问题,可准备多个沉积阴极备用。

大电流密度除垢实验:取 2 L 上述溶液用沉积阴极在不同电流密度下电解除垢 1 h ,滴定得到除垢后溶液的硬度并计算除垢速率。再取 1 L 除垢后溶液进行电解诱导实验,滴定得到电解诱导后溶液的硬度,计算硬度变化用于电化学水软化性能评价。

补碱电解除垢实验:取不同质量的碳酸氢钠溶于 100 mL 去离子水中用作补充碱度并置于分液漏斗,控制滴速相同,每次在电解除垢 1 h 的前 30 min 左右滴完,保证每次电解除垢结束时溶液的体积为 2 L 。

1.4 分析方法

水质硬度的测定方法按照《GB/T 6909—2018 锅炉用水和冷却水分析方法 硬度的测定》,硬度变化记为 H , ppm CaCO_3 。结垢速率的计算方法按照《GB/T 50050—2017 工业循环冷却水处理设计规范》,计算式为:

$$Y = (C \times \Delta W) / (A \times T) \quad (1)$$

式中: Y 为结垢速率, $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{月})$; C 为计算常数, 7.2×10^5 ; ΔW 为试片结垢前后的质量变化, g ; T 为实验时间, h 。

RSI 指数的计算式为^[9]:

$$RSI = 2\text{pH}_s - \text{pH} \quad (2)$$

$$\text{pH}_s = 9.3 + A + B - C - D \quad (3)$$

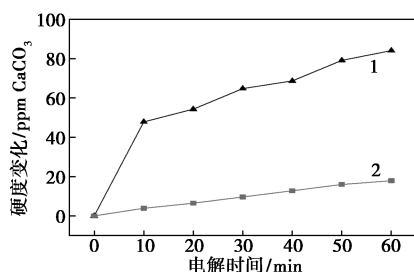
式中: pH_s 为碳酸钙处于平衡时的 pH ; A 为总固溶物系数,与总固溶物有关,总固溶物一般通过电导率来计算; B 为温度系数,与温度有关; C 为钙硬度系数,与钙硬度有关; D 为碱度系数,与总碱度有关。

2 结果与讨论

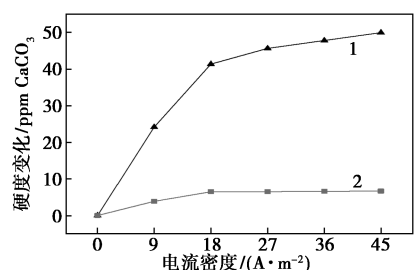
2.1 电解诱导硬度变化评价体系的建立

选用 1000 系列高硬低碱的 2 个边界结垢倾向的水质 ($1000/100$ 和 $1000/20$) 进行电解诱导参数优化,以保证筛选出的电解参数能够适用于其他系列水质,优化过程如图 2 所示。以实际除垢工作电流密度 36 A/m^2 筛选电解时间,从图 2(a) 中可以看

出,1000/100 的水质电解 10 min 后硬度变化明显变缓,而 1000/20 的水质硬度变化几乎始终以较缓平稳的速度增加。而且当电解 10 min 时,2 种结垢倾向水质的硬度变化区分度已足够明显,并且遵循快速高效的原则,选用 10 min 作为电解时间的最优参数。再以 10 min 的电解时间筛选电流密度,从图 2 (b)中可以看出,2 种水质在电流密度为 18 A/m² 时硬度变化曲线均出现较为明显的转折点,之后则趋于平缓。而且电流密度为 18 A/m² 时,2 种结垢倾向水质的硬度变化区分度已足够明显,并且遵循能耗越小越好原则,选用 18 A/m² 作为电流密度的最优参数。



(a) 硬度变化-电解时间曲线



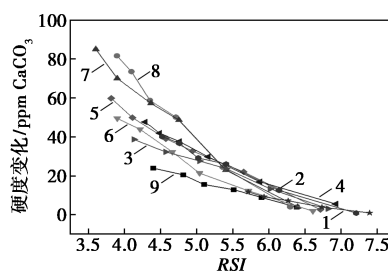
(b) 硬度变化-电流密度曲线

1—1000/100; 2—1000/20

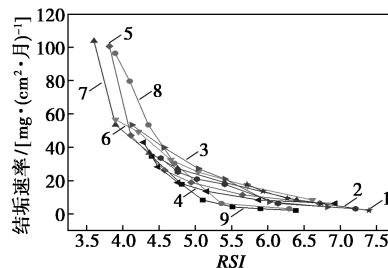
图 2 电解诱导参数优化过程

通过筛选出的最优电解操作参数对实验用水进行电解诱导实验,得到不同结垢倾向水质的硬度变化与 *RSI* 指数的关系,如图 3 (a) 所示;对实验用水进行循环水动态模拟实验,得到不同结垢倾向水质的结垢速率与 *RSI* 指数的关系,如图 3 (b) 所示。通过对实验数据拟合分析,得到电解诱导各系列水质硬度变化和动态模拟各系列水质结垢速率分别与 *RSI* 指数的函数关系如表 2 所示。拟合结果表明,电解诱导的硬度变化与 *RSI* 指数呈较好的线性函数关系,动态模拟的结垢速率与 *RSI* 指数呈较好的指数函数关系,这为最终水质结垢倾向评价体系的建立提供了有力的理论保障。

根据国标中对换热管道结垢速率 ≤ 15 mg/(cm²·月)的规定,将 15 代入表 2 动态模拟的拟



(a) 电解诱导各系列水质硬度变化与 *RSI* 曲线



(b) 动态模拟各系列水质结垢速率与 *RSI* 曲线

1—200 系列; 2—300 系列; 3—400 系列; 4—500 系列; 5—600 系列; 6—700 系列; 7—800 系列; 8—900 系列; 9—1000 系列

图 3 实验法中关键指标与 *RSI* 指数关系曲线

表 2 各系列水质与 *RSI* 指数拟合函数式

水质系列	电解诱导法	动态模拟法
1000 系列	$H=68.30585-10.09848 * RSI, R^2=0.98932$	$Y=350466.64688 * e^{(-RSI/0.47571)} + 1.57052, R^2=0.98523$
900 系列	$H=204.26723-32.49425 * RSI, R^2=0.97464$	$Y=16921.06619 * e^{(-RSI/0.76512)} - 4.51321, R^2=0.98685$
800 系列	$H=184.45881-28.80448 * RSI, R^2=0.97872$	$Y=159307.93382 * e^{(-RSI/0.47931)} + 14.65951, R^2=0.95521$
700 系列	$H=112.36945-16.89938 * RSI, R^2=0.97023$	$Y=878.69679 * e^{(-RSI/1.43829)} - 0.44958, R^2=0.98299$
600 系列	$H=128.19487-18.89022 * RSI, R^2=0.98308$	$Y=2131790 * e^{(-RSI/0.37842)} + 10.69657, R^2=0.98221$
500 系列	$H=113.5061-15.92901 * RSI, R^2=0.97792$	$Y=618632.07715 * e^{(-RSI/0.43867)} + 7.2079, R^2=0.99033$
400 系列	$H=93.43027-13.1945 * RSI, R^2=0.9935$	$Y=1076.37542 * e^{(-RSI/1.43095)} - 5.61624, R^2=0.97968$
300 系列	$H=105.39497-14.72761 * RSI, R^2=0.98043$	$Y=1343.66617 * e^{(-RSI/1.2286)} - 1.10327, R^2=0.96829$
200 系列	$H=45.93645-6.12936 * RSI, R^2=0.97884$	$Y=4045.91171 * e^{(-RSI/1.06928)} - 1.78206, R^2=0.99419$

合函数式中,得到满足实际工业用水要求的 *RSI* 指数值,再将实际 *RSI* 值带入电解诱导的拟合函数式中,得到各系列水质满足实际用水要求的硬度变化值,如表 3 所示。

表 3 各系列水质满足用水要求所对应 *RSI* 和硬度变化值

水质系列	满足工业用水要求的 <i>RSI</i>	对应电解诱导的硬度变化/ [$\mu\text{g}\cdot(\text{g CaCO}_3)^{-1}$]
1000 系列	4.84	19.43
900 系列	5.18	35.95
800 系列	6.26	4.14
700 系列	5.81	14.18
600 系列	4.96	34.50
500 系列	4.95	34.66
400 系列	5.66	18.75
300 系列	5.44	25.28
200 系列	5.87	9.96

绘制各系列水质与其满足用水需求的硬度变化曲线如图 4 所示,至此,评价标准建立完毕。从图 4 可知,当不同硬度的水质经电解诱导发生的硬度变化处于该曲线下方时,则该水质可以满足实际用水要求;而当硬度变化处于曲线上方时,则说明该水质不能满足实际用水要求。因此,定义评价方式为:

$$S = H_s - H \quad (4)$$

式中:*S* 为评价得分,其数值越大,说明水质的结垢倾向越小,其值越负,说明水质距离满足实际用水的要求越远,水质结垢倾向越大;*H_s* 为电解诱导硬度变化评价曲线上的点,即为不同硬度水质所对应满足实际用水需求的硬度变化值;*H* 为水质经电解诱导后的硬度变化值。

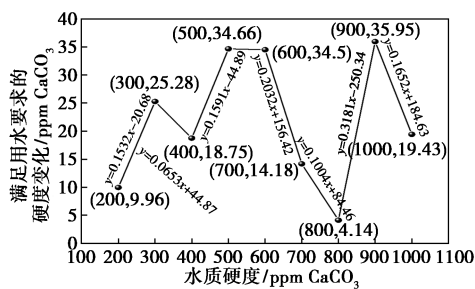
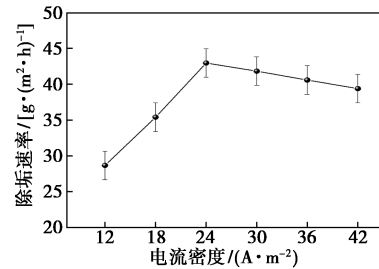


图 4 电解诱导硬度变化评价曲线

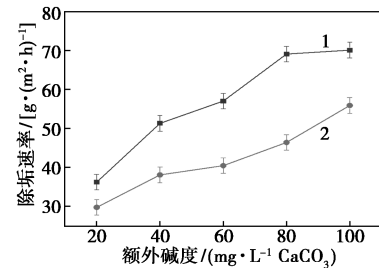
2.2 电化学水软化工艺优化

除垢速率和能耗是评价电化学水软化性能的主要参数^[11],但通过以上参数并不能直观看出经电化学水软化后水质的稳定性。针对 1000/100 水质不同电流密度和不同补碱电解方式对电化学水软化性能的影响如图 5、表 4 所示。从图 5(a)、表 4 中可以看出,随着电流密度的增加除垢速率先升高后下降,水质稳定性得分也先变大后减小,在电流密度为 24 A/m² 时,除垢速率达到最高,但水质稳定性得分

并不是最高,继续增大电流时尽管除垢速率没有上升但却加快了碱度消耗,在一定程度上也降低了水质的结垢倾向。不同补碱量对除垢性能的影响如图 5(b)、表 5 所示,选用次优的电流密度 18 A/m² 进行除垢实验,其中通过分液漏斗在除垢过程中缓慢滴加补入的碱度,初始碱度为在除垢前便将额外碱度和 100 碱度一并配制作作为补充碱度的对照组,即为直接对 1000/120、1000/140、...、1000/200 的水质进行电化学水软化。从图 5(b)、表 5 中可以看出,不论是从除垢速率角度,还是从水质稳定性得分角度,补充碱度的除垢方式性能更为优异,且在补充碱度量大于 80 mg/L CaCO₃ 时,除垢速率只有略微的升高,而水质稳定性得分却明显减少,说明此时额外补充的碱度并没有完全用于除垢,反而由于碱度的增加导致了水质结垢倾向的增加。因此,针对 1000/100 水质进行电化学除垢,在电流密度为 18 A/m²、补充碱度量为 80 mg/L CaCO₃ 时,水软化性能比起大电流除垢的方式更为优异。



(a) 电流密度对除垢速率的影响



1—补充碱度;2—初始碱度

(b) 额外碱度的加入方式和量对除垢速率的影响

图 5 1000/100 水质电化学水软化工艺优化过程

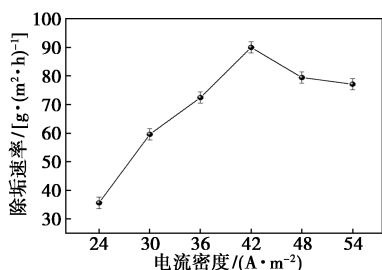
表 4 1000/100 水质不同电流密度除垢后水质得分

电流密度/(A·m ⁻²)	12	18	24	30	36	42
得分	18.16	19.21	20.42	20.75	20.94	20.17

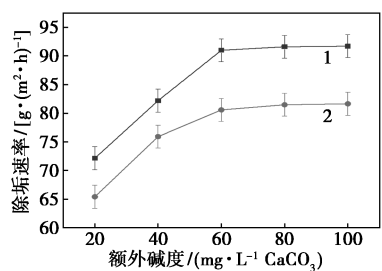
表 5 1000/100 水质不同补碱方式和量除垢后水质得分

额外碱度/[mg·(L CaCO ₃) ⁻¹]	20	40	60	80	100
补充碱度得分	18.78	19.29	20.63	21.05	20.14
初始碱度得分	16.16	17.48	17.63	17.83	17.33

同理,评价分析 700/350 水质的电学水软化性能,结果如图 6、表 6、表 7 所示。从图 6(a)、表 6 中可以看出,在电流密度为 42 A/m² 时,除垢速率达到最高,此时水质稳定性得分也为最高。选用次优电流密度 36 A/m² 进行补碱除垢,从图 6(b)、表 7 中可以看出,当补碱量大于 60 mg/L CaCO₃ 时,除垢速率并未有明显的上升,而水质稳定性得分却明显减少,说明此时额外补充的碱度导致了水质结垢倾向的增加。因此,针对 700/350 水质进行电学水软化,在电流密度为 36 A/m²、补充碱度量为 60 mg/L CaCO₃ 时,水软化性能比起大电流除垢的方式更为优异。



(a) 电流密度对除垢速率的影响



1—补充碱度;2—初始碱度

(b) 额外碱度的加入方式和量对除垢速率的影响

图 6 700/350 水质电学水软化工艺优化过程

表 6 700/350 水质不同电流密度除垢后水质得分

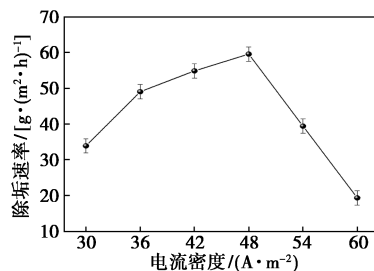
电流密度/(A·m ⁻²)	24	30	36	42	48	54
得分	-8.73	-3.77	-1.25	5.71	1.95	1.05

表 7 700/350 水质不同补碱方式和量除垢后水质得分

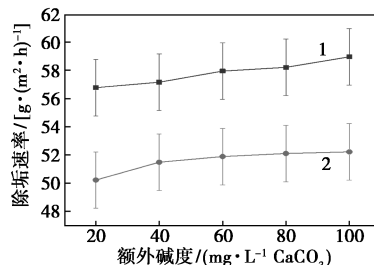
额外碱度/[mg·(L CaCO ₃) ⁻¹]	20	40	60	80	100
补充碱度得分	-0.97	2.32	6.72	3.68	3.14
初始碱度得分	-2.25	-1.56	-2.18	-2.53	-3.54

对于 400/400 水质不同除垢方式的性能评价过程如图 7、表 8、表 9 所示。从图 7(a)、表 8 中可以看出,在电流密度为 48 A/m² 时,除垢速率达到最高,此时水质稳定性得分也为最高。从图 7(b)、表 9 中可以看出,选用次优电流密度 42 A/m² 进行

补碱除垢,补充碱量并没有显著提高除垢速率,反而造成了水质稳定性得分减少。这是因为 400/400 水质硬度碱度一致,碱度相对更为充足,并不是决定除垢速率的关键因素。因此,针对 400/400 水质进行电学除垢,以大电流密度 42 A/m² 正常电解除垢的方式性能更为优异。



(a) 电流密度对除垢速率的影响



1—补充碱度;2—初始碱度

(b) 额外碱度的加入方式和量对除垢速率的影响

图 7 400/400 水质电学水软化工艺优化过程

表 8 400/400 水质不同电流密度除垢后水质得分

电流密度/(A·m ⁻²)	30	36	42	48	54	60
得分	-17.29	-9.88	-5.41	-0.98	-15.26	-23.04

表 9 400/400 水质不同补碱方式和量除垢后水质得分

额外碱度/[mg·(L CaCO ₃) ⁻¹]	20	40	60	80	100
补充碱度得分	-4.73	-6.77	-8.95	-10.47	-12.17
初始碱度得分	-7.51	-9.52	-11.19	-13.18	-14.84

根据上述实验结果分析可知,不同结垢倾向的水质对应的最优电学水软化方式和电解参数并不相同。对于大电流除垢和补碱电解除垢 2 种水软化方式性能的评价比较,首先要确定什么样的电流密度对于除垢水质而言可以称之为大电流,应该是除垢速率达到最高所对应的电流密度,再继续增加电流,除垢速率明显下降,研究之后的大电流则没有意义。补碱电解除垢的方式明显能够提升水软化性能,这是因为补充滴加的碱度能够迅速在阴极附近发生除垢反应,而不受电解产生的碱度所控制,但是补碱过多会导致水体碱度过剩,这时除垢反应的速

控步已经不是碱度的量,反而会造成水质结垢倾向增大。对于高硬低碱的水质,碱度越接近硬度,碱度扮演除垢速控步的角色越弱,反而大电流除垢的方式性能更为优异。

3 结论

(1) 电解诱导硬度变化评价体系能够对水质的结垢倾向做出定量评估,同时也能够从水质稳定性角度对电化学水软化的性能做出评价,为不同结垢倾向的水质选用不同除垢方式提供了评价方法,优化了电化学水软化标准。

(2) 对于高硬低碱的水质,硬碱比越大的水质所对应的最优除垢电流密度越小,其更适合采用补碱电解的方式进行除垢,而硬度与碱度相近的水质则更适合采用大电流的方式进行除垢,优化了电化学水软化过程。

参考文献

- [1] Rahmani K, Jadidian R, Haghtalab S. Evaluation of inhibitors and biocides on the corrosion, scaling and biofouling control of carbon steel and copper-nickel alloys in a power plant cooling water system [J]. *Desalination*, 2016, 393: 174-185.
- [2] Rahmani K, Jadidian R, Haghtalab S. Evaluation of inhibitors and biocides on the corrosion, scaling and biofouling control of carbon steel and copper-nickel alloys in a power plant cooling water system [J]. *Desalination*, 2016, 393: 174-185.
- [3] Clauwaert P, De Paep J, Jiang F, *et al.* Electrochemical tap water softening: A zero chemical input approach [J]. *Water Research*, 2020, 169: 115263.
- [4] Li X, Wang L, Sun W, *et al.* Study on electrochemical water softening mechanism of high-efficient multi-layer mesh coupled cathode [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 247: 117001.
- [5] 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.
- [6] Guo Y, Xu Z, Guo S, *et al.* Selection of anode materials and optimization of operating parameters for electrochemical water descaling [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 261: 118304.
- [7] Zhang C, Tang J, Zhao G, *et al.* Investigation on an electrochemical pilot equipment for water softening with an automatic descaling system: Parameter optimization and energy consumption analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123178.
- [8] 黄亚鹏, 赵世鑫, 王立达, 等. 锯齿板状阴极电化学除垢工艺优化及机理研究 [J]. *现代化工*, 2023, 43(2): 110-116.
- [9] Li C, Liu C, Xu W, *et al.* Formation mechanisms and supervisory prediction of scaling in water supply pipelines: A review [J]. *Water Research*, 2022, 222: 118922.
- [10] 中国寰球工程有限公司. GBT 50050—2017 工业循环冷却水处理设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017-05-27.
- [11] 栾谨鑫, 李鑫浩, 王立达, 等. 复合网状阴极增强电化学水软化系统性能研究 [J]. *工业水处理*, 2020, 40(2): 67-70. ■
- [12] (上接第 122 页)
- [31] Lee S, Jorgensen M, Hartwig F. Palladium-catalyzed synthesis of arylamines from aryl halides and lithium bis(trimethylsilyl)amide as an ammonia equivalent [J]. *Organic Letters*, 2001, 3(17): 2729-2732.
- [32] Lang F, Zewge D, Houppis L N, *et al.* Amination of aryl halides using copper catalysis [J]. *Tetrahedron Letters*, 2001, 42(19): 3251-3254.
- [33] 李晓娟. 氨基吡啶类化合物合成的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [34] Pang J H, Kaga A, Roediger S, *et al.* Revisiting the chichibabin reaction: C₂ amination of pyridines with a NaH-iodide composite [J]. *Asian Journal of Organic Chemistry*, 2019, 8: 1058.
- [35] 李向阳, 王浩亮, 冯鑫, 等. 多相反应器的非均相特性测量技术进展 [J]. *化工进展*, 2019, 38(1): 45-71.
- [36] Frisch M J, Trucks G W, Schlegel H B, *et al.* Gaussian 09 [C]. Gaussian, Inc, Wallingford, CT, 2009.
- [37] Kerrick D M, Lasaga A C, Raeburn S P. Kinetics of heterogeneous reactions [J]. *Contact Metamorphism Rev in Mineral*, 1991, 26(244): 3-6.
- [38] Zhao Y, Truhlar D G. Improved description of nuclear magnetic resonance chemical shielding constants using the M06-L meta-generalized-gradient-approximation density functional [J]. *Journal of Physical Chemistry A*, 2008, 112(30): 6794-6799.
- [39] 杜恒星, 曹丽霞, 李蕾, 等. 重质油中杂原子相转移脱除研究进展 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2021, 37(2): 458-468.
- [40] Huang M, Jia Z, Luo S, *et al.* Quantitative thermodynamic and kinetic parameters of radical [J]. *Chinese Chemical Society & SIOC, CAS*, 2021, 41(10): 3892-3902.
- [41] Jia Z, Xia Y, Pang X, *et al.* Tribological behaviors of different diamond-like carbon coatings on nitrided mild steel lubricated with benzotriazole-containing borate esters [J]. *Tribology Letters*, 2011, 41(1): 247-256.
- [42] Falivene L, Kozlov S M, Cavallo L. Constructing bridges between computational tools in heterogeneous and homogeneous catalysis [J]. *ACS Catalysis*, 2018, 8(6): 5637-5656.
- [43] Papp D, Czako G. Facilitated inversion complicates the stereodynamics of an S_N2 reaction at nitrogen center [J]. *Chemical Science*, 2021, 12(15): 5410-5418.
- [44] 化学工业出版社组织. 中国化工产品大全 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000, 02.
- [45] Guliasvili T, Percec V. A Comparative computational study of the homolytic and heterolytic bond dissociation energies involved in the activation step of ATRP and SET-LRP of vinyl monomers [J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2007, 45(9): 1607-1618.
- [46] 郑娟, 黄培强. 二碘化钪参与及二茂钛催化的氮 α -位碳自由基偶联反应及其在含氮杂环合成中的应用 [J]. *化学进展*, 2018, 30(5): 528-546.
- [47] Valiulin R. Organic chemistry: 100 must-know mechanisms [M]. *Journal of Chemical Education*, Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2020. ■