

电解-电吸附耦合技术对循环冷却水 高效软化研究

周彦好, 张鹏, 夏江楠, 陈安童, 赵浩, 赵贤广*

(南京工业大学环境科学与工程学院, 江苏南京211816)

摘要:针对传统电化学软化技术在处理循环冷却水时存在效率欠佳、能耗较高以及受限于水体碱度的问题,设计了一种电解-电吸附耦合软化系统。结果表明,耦合系统在最适工艺参数条件下,总硬度、碱度的去除效率分别达到70.25%、92%,相比单独的电解单元分别提高了9.5%、5%,运行能耗低至5.6 kWh/(kg CaCO₃);耦合系统在长时间的连续运行情况下仍保持着较高的稳定性,活性炭纤维毡(ACF)电极展现出较好的抗结垢性能。因此,通过电解与电吸附的耦合协调作用,可以有效提升基于电化学技术对循环冷却水软化的能力。

关键词:循环冷却水;电解;电吸附;耦合系统;能耗

中图分类号:TQ150.9

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)11-0208-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.11.037

Study on efficient softening of circulating cooling water by electrolysis-electroadsorption coupled technology

ZHOU Yan-hao, ZHANG Peng, XIA Jiang-nan, CHEN An-tong, ZHAO Hao, ZHAO Xian-guang*

(School of Environmental Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Aiming at solving the problems in the treatment of circulating cooling water by traditional electrochemical softening technology, such as poor efficiency, high energy consumption and water alkalinity constrain, a coupled softening system covering electrolysis-electroadsorption is designed. Experimental outcomes reveal that under optimal process parameters, the coupled system achieves the removal efficiencies of 70.25% and 92% for total hardness and alkalinity, respectively, representing improvements of 9.5% and 5% compared to standalone electrolysis units. Furthermore, the operational energy consumption declines to as low as 5.6 kWh/kg CaCO₃. Stability test demonstrates that the coupled system maintains high stability during prolonged continuous operation, and activated carbon fiber felt electrodes exhibits favorable anti-fouling properties. Consequently, the integration between electrolysis and electroadsorption through their coupled and synergistic effects effectively enhances the electrochemical-based softening capability for recirculating cooling water.

Key words: circulating cooling water; electrolysis; electroadsorption; coupled system; energy consumption

循环冷却水系统广泛应用于石油、化工、钢铁、电力等重工业领域^[1],用水量占比可达到工业总用水量的60%~80%^[2]。随着敞开式循环冷却水不断地蒸发浓缩,水中结垢离子浓度不断提高,导致循环冷却水系统内生成大量的垢^[3]。大量积垢会造成换热器换热性能下降、堵塞管道、滋生细菌、降低水资源利用率,甚至影响企业生产安全与稳定。因此,优化循环冷却水的水质对工业节水减排和企业安全生产有着重要的意义^[4]。

近年来,电化学技术因其绿色环保的优势在水处理领域得到广泛地关注^[5]。目前,大量研究主要围绕电极材料的选择、增大阴极面积、延缓阴极表面结垢等方面来开展^[6]。电极是电化学技术的核心

部件。Muddemann等^[7]开发出一种基于移动石墨-聚合物复合(GPC)阴极和硼掺杂金刚石阳极的电化学反应器,水的硬度去除效果达到了72%以上,在极性反转中也表现出较强的稳定性。理论上,阴极可以采用一切导电材料^[6],因此更多的学者将研究方向转移到增大阴极面积和缓解阴极结垢上。Li等^[8]为了增大阴极的作用面积,提出由8目、12目、20目和50目的不锈钢网组成的七层网耦合阴极,相比两层网耦合阴极,硬度的去除效果得到显著的提升。Sanjuán等^[9]研究发现三维不锈钢羊毛阴极能够提供更大的比表面积,硬度去除效率比二维钛网高20%左右,同时能耗也更低。Yang等^[10]设计出一种围栏结构的阴极,硬度离子被诱导沉积在

收稿日期:2024-02-01;修回日期:2024-09-11

作者简介:周彦好(1997-),男,硕士生,研究方向为电化学除垢,1015792484@qq.com;赵贤广(1968-),男,博士,教授,主要从事化工污染控制新技术的研究与应用,通讯联系人,zxg174@163.com。

碳纤维毡材料的围栏上,缓解了阴极结垢的问题,有效地提高了硬度离子的去除效果。但是,这些技术无法突破水体自身碱度的限制。从理论上来看,碱度越高,电化学水软化技术的效果越好,能耗越低。

电吸附技术已被证实在处理微咸水中具有良好的离子去除能力并拥有较低的能耗^[11]。但是,电吸附软化技术在处理较高碱度的溶液时,容易出现电极结垢的问题。这种特性与电解法软化技术能够优势互补。基于电解和电吸附的水软化原理,笔者构建了电解-电吸附耦合软化系统,期望通过该方式在低能耗条件下突破水体自身碱度的限制,提高对水体硬度的去除效果。

1 实验方法

1.1 实验装置

电解-电吸附耦合软化实验装置如图1所示。该反应器内部长10 cm,宽5 cm,高10 cm,容积为500 mL。钉铱钛电极作为系统的DSA阳极,其中有4块网状5 cm×10 cm×1 mm的阳极。石墨电极作为系统的阴极,其中有2块5 cm×10 cm×1 mm的打孔电极,3块5 cm×9.5 cm×1 mm板状电极。吸附单元由4片5 cm×9.5 cm×4 mm的活性炭纤维毡(ACF)电极和3块5 cm×9.5 cm×1 mm的集电体构成。电解单元中相邻的阴极和阳极之间的间距为5 mm。所有电极与装置接触部分采用玻璃胶密封。原水从反应器的下部进入反应器,通过蛇形流道穿过反应器,并从上部流出。系统采用稳定直流电装置(DC)供电,吸附电极与电解电极共用一个直流电源输装置。

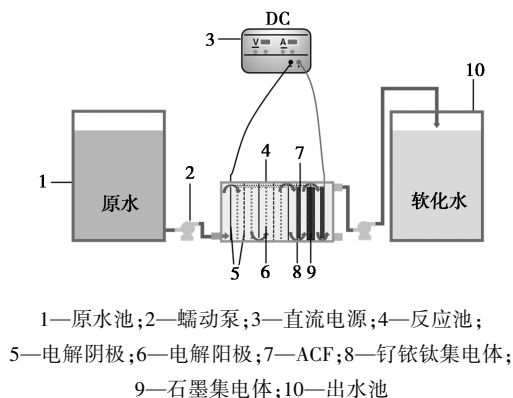


图1 电解-电吸附耦合软化系统示意图

1.2 废水和药剂

用氯化钙(CaCl_2 , $\geq 99\%$)、七水合硫酸镁

($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, AR)、碳酸氢钠(NaHCO_3 , AR)、硫酸钠(Na_2SO_4 , AR)、氢氧化钠(NaOH , AR)、去离子水构成总硬度800 mg/L的模拟循环冷却水。总硬度、碱度、钙硬度、镁硬度全部以 CaCO_3 计。水质详细参数见表1。实验中涉及水样检测的药剂为:EDTA二钠二水合物($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2$, $\geq 99\%$)、七水合硫酸镁($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, AR)、铬黑T(AR)、氯化铵(NH_4Cl , $\geq 99\%$)、氨水(NH_4OH , 28%~32%)、酚酞(98%)、甲基橙(AR)、浓盐酸(HCl , 36%~38%)、碳酸钠(Na_2CO_3 , $\geq 99.8\%$)、乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 95%),国药集团上海化学试剂有限公司(中国上海)生产。

表1 模拟循环冷却水水质

参数	数值	参数	数值
pH	8.1	总硬度/ $[\text{mg} \cdot \text{L}(\text{CaCO}_3)^{-1}]$	800
电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	2350	钙硬度/ $[\text{mg} \cdot \text{L}(\text{CaCO}_3)^{-1}]$	700
总碱度/ $[\text{mg} \cdot \text{L}(\text{CaCO}_3)^{-1}]$	400	镁硬度/ $[\text{mg} \cdot \text{L}(\text{CaCO}_3)^{-1}]$	100

1.3 实验过程

通过蠕动泵将模拟的循环冷却水输入到反应器中,在浸满整个反应器后,再通过蠕动泵将溶液输入到另一个容器中,以探究反应器实时的出水水质状况。耦合软化过程在一个反应器中进行。模拟废水先经过电解单元进行软化处理,再按照设置的流道经过电吸附单元被进一步软化。为了研究关键参数对该耦合软化系统的影响,从电流密度($5 \sim 30 \text{ A/m}^2$)、流量($0.5 \sim 1.5 \text{ L/h}$)以及吸附单元的电极间距($3 \sim 13 \text{ mm}$)开展研究,不同电流密度对应的电压见表2。在研究电气参数和流量对反应器处理效果的影响中,实验均进行了60 min,每5 min取样1次。在研究吸附单元电极的间距对耦合系统的影响中,实验均进行了180 min,除了前60 min内每5 min取1次样,其余均15 min取样1次。在研究ACF再生性能和耦合系统连续运行的稳定性中,每15 min取样1次。

表2 不同电流密度对应的电压

电流密度/ $(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$	5	10	15
初始电压/V	2.75(0.03)	3(0.05)	3.25(0.04)
电流密度/ $(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$	20	25	30
初始电压/V	3.5(0.06)	3.75(0.05)	4(0.09)

1.4 水样检测与数据分析

采用EDTA滴定法(GB 7477—87)测定水中总硬度。采用酸滴定法(SL 83—1994)测定溶液样品

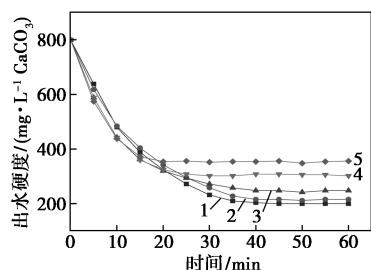
的总碱度。采用雷磁 (PHSJ-6L) pH 计测量样品 pH。采用日本 HITACHI S-4800 扫描电镜对 ACF 进行表征。根据反应前后的数据,分别计算了水样的总硬度、总碱度。

2 结果与讨论

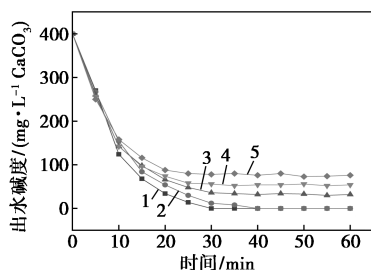
2.1 运行参数优化

2.1.1 水力停留时间

采用流量代替相互成反比的水力停留时间 (HRT) 指数。反应条件为:电压为 3.5 V, 电流密度为 20 A/m², 电解单元间距为 5 mm, ACF 间距为 8 mm。进水流量对耦合系统的影响如图 2、表 3 所示。从图 2 中可以看出,随着进水流量的不断降低,耦合系统在稳定时出水的总硬度和碱度不断下降。这是因为流量越低,溶液停留时间越长,电解单元的电化学反应时间越长,电吸附单元的吸附时间越久。从表 3 中可以看出,随着流量的降低,稳定时的出水 pH 从 6.58 (1.5 L/h) 降低到 3.52 (0.5 L/h)。这是因为随着水力停留时间的增长,电解单元的阴极产生的大量 OH⁻ 被 Mg²⁺ 和 HCO₃⁻ 消耗,使得出水 pH 不断降低。



(a) 出水硬度变化



(b) 出水碱度变化

1—0.5 L/h; 2—0.75 L/h; 3—1 L/h; 4—1.25 L/h; 5—1.5 L/h

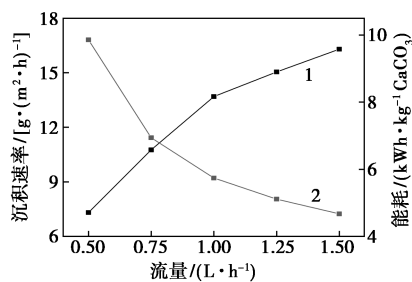
图 2 进水流量对耦合系统的影响

表 3 不同进水流量对应的不同出水 pH

流量/(L·h ⁻¹)	0.5	0.75	1	1.25	1.5
出水 pH	3.52	4.65	5.94	6.25	6.58

为了进一步比较耦合系统与电解单元之间的差

异,比较了 2 种系统在稳定状态下的去除效果,结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出,在不同进水流量下,耦合系统的出水水质都优于电解单元。当流量从 1 L/h 下降到 0.5 L/h 的过程中,耦合系统稳定时的硬度去除效果提升不明显。进水流量对耦合系统沉积速率与能耗的影响如图 3 所示,从图 3 中可以看出,此时的沉积速率从 13.69 g/(m²·h) 快速下降到 7.31 g/(m²·h), 运行能耗从 5.29 kWh/(kg CaCO₃) 快速上升到 9.92 kWh/(kg CaCO₃), 严重降低了系统运行的综合效率。另外,较低的出水 pH 会增加后期的药剂调节成本。从 2 个系统的硬度去除效率差值可以看出,在进水流量为 1 L/h 内,电吸附单元并没有因为流量的降低而提高硬度去除效率。这是因为当电解单元产生较低的 pH 溶液进入到电吸附单元时,较多的 H⁺ 会与待去除的硬度离子产生竞争。同时,ACF 电极表面静电斥力增加会导致吸附单元的软化效率降低^[12]。因此,综合多种指标,最合适进水流量为 1 L/h。



1—沉积速率; 2—能耗

图 3 进水流量对耦合系统沉积速率与能耗的影响

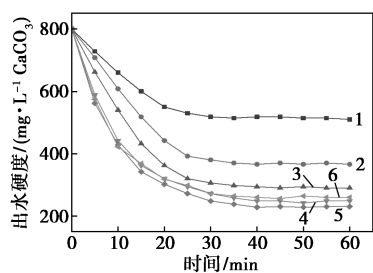
表 4 耦合系统和电解系统在不同进水流量下稳定出水时的去除效率对比 %

流量/(L·h ⁻¹)	0.5	0.75	1	1.25	1.5
电解单元硬度去除效率	66.75	64.00	60.75	55.25	50.00
耦合系统硬度去除效率	75.00	73.50	70.25	61.75	55.75
电解单元碱度去除效率	100.00	95.00	87.00	83.50	78.50
耦合系统碱度去除效率	100.00	100.00	92.00	86.50	81.00

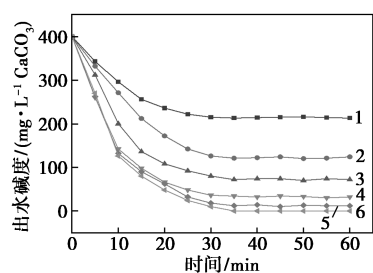
2.1.2 电气参数

在电解-电吸附耦合软化系统中,电流密度用来表示电解单元的电气参数,电压分别表示电吸附单元的电气参数,系统的电流密度以及对应的电压见表 2。反应条件为:电解单元间距为 5 mm,电吸附单元极板间距为 8 mm,进水流量为 1 L/h。

电气参数对耦合系统的影响如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,硬度去除效率随着电气参数的升高而先升后降。这是因为随着电流密度的上升,电解单元阴极的析氢反应加剧,气泡增多,气泡不断扰动水体,使得阴极附近难以形成较为稳定的强碱性环境,造成阴极表面附近的正常沉积过程受到干扰^[13]。其次,电压越大,电吸附单元的双电层越厚,溶液中离子更容易在电极表面富集并储存于双电层中。而随着电压的进一步增大(3.75~4 V),ACF 阴极区域发生电解水的反应,双电层遭到一定的破坏,从而导致吸附能力下降^[14]。从图 4(b)可以看出,碱度随着电气参数上升而下降,这不同于硬度的变化趋势。这是因为电解单元的极板间的电场力加速了 HCO_3^- 不断向阳极移动,导致 HCO_3^- 与 H^+ 反应生成 CO_2 ,而不是生成 CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 反应,这也是出水硬度并没有随电流密度提高而提高的另外一个原因。



(a) 出水硬度变化



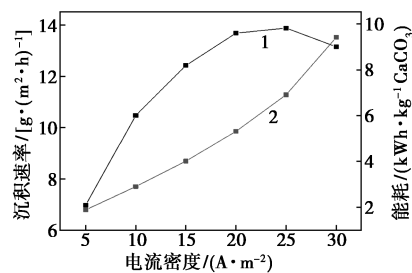
(b) 出水碱度变化

1—5 A/m²; 2—10 A/m²; 3—15 A/m²; 4—20 A/m²;
5—25 A/m²; 6—30 A/m²

图 4 电气参数对耦合系统的影响

电气参数对耦合系统沉积速率与能耗的影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在电气参数为 25 A/m² (3.75 V) 时,出水总硬度从 800 mg/L 降到 230 mg/L 左右,去除效果达到 71.25% 左右,碱度去除效果达到 97%,几乎完全去除,此时的出水 pH 为 5.45 (见表 5)。电气参数对耦合系统沉积速率与能耗的影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出,沉积速率为 13.89 g/(m²·h),能耗为 6.91 kWh/(kg CaCO₃)。

虽然耦合系统在电气参数为 25 A/m² (3.75 V) 时达到了最大硬度去除效率,但是从综合运行角度来看,电气参数为 20 A/m² (3.5 V) 更适合作为耦合系统的运行参数。当电气参数为 20 A/m² (3.5 V) 时,总硬度去除效果达到 70.25%,仅比电气参数为 25 A/m² (3.75 V) 时的去除效率低 1.25%,但运行能耗低至 5.31 kWh/(kg CaCO₃),且出水 pH 趋于中性(pH 为 5.94)。



1—沉积速率;2—能耗

图 5 电气参数对耦合系统沉积速率与能耗的影响

表 5 不同电气参数对应的不同出水 pH

电流密度/(A·m ⁻²)	5	10	15	20	25	30
出水 pH	7.2	6.69	6.12	5.94	5.45	4.48

耦合系统在不同电气参数条件下与电解系统处理效果的对比如表 6 所示。从表 6 中可以看出,耦合系统的处理效果优于电解单元。在最适电气参数条件下(电压 3.5 V, 电流密度 20 A/m²),耦合系统的硬度去除效率、碱度去除效率比电解系统分别提高了 9.5%、5%。

表 6 耦合系统和电解系统在不同电气参数下

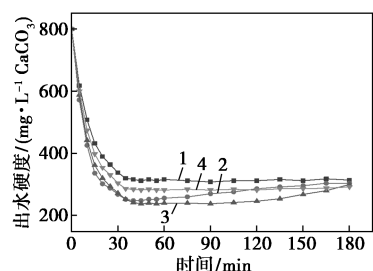
稳定出水时的去除效率对比

电流密度/(A·m ⁻²)	5	10	15	20	25	30	%
电解单元硬度去除效率	33.75	50.00	57.75	60.75	62.25	60.00	
耦合系统硬度去除效率	35.75	53.75	63.75	70.25	71.25	67.50	
电解单元碱度去除效率	43.75	65.50	78.50	87.00	93.50	100.00	
耦合系统碱度去除效率	46.75	69.00	82.00	92.00	97.00	100.00	

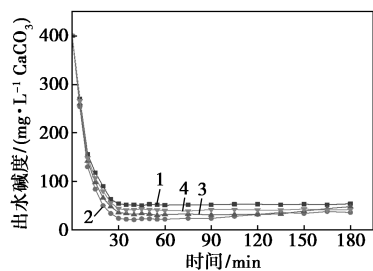
2.1.3 吸附单元极板间距

电解单元极板间距固定,只对 ACF 电极的间距进行研究,结果如图 6 所示。反应条件为:电解单元极板间距为 5 mm,进水流量为 1 L/h,电压为 3.5 V,电流密度为 20 A/m²。

从图 6(a)中可以看出,在极板间距为 8 mm 时,系统总硬度的去除效果最佳;当极板间距为 3 mm



(a) 出水总硬度



(b) 出水碱度

1—none; 2—0.3 cm; 3—0.8 cm; 4—1.3 cm

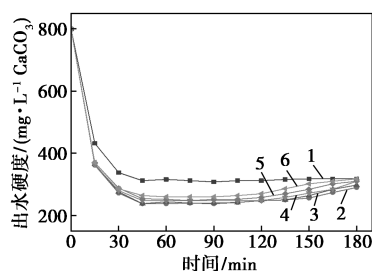
图 6 ACF 间距对耦合系统处理效率的影响

时,耦合系统在前 25 min 表现出较好的处理能力,但是 25 min 后,总硬度的去除效果开始快速降低,而碱度的去除效果却达到了最佳。原因是,当 ACF 的间距过小,阳极和阴极存在互相干扰的问题,阴极与阳极的边界不明显^[15],产生淡水的体积较小。此外,较小的电极间距降低了电阻,导致电解水增强,从而影响了电吸附的效果。从图 6(b)中可以看出,碱度去除效果随电极间距的缩小而增大,这是因为 ACF 电极间距越小,电吸附和电解的双重效益越明显, HCO_3^- 的去除效率越大。当电极间距超过 8 mm,离子到达双电层的时间变长,影响了传质效率^[16]。因此,确定最佳吸附电极间距为 8 mm。

2.2 耦合系统的可靠性

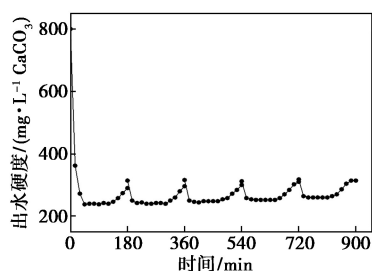
2.2.1 连续运行实验

ACF 的再生实验和连续运行实验结果如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出,经过 5 个循环后,耦合系统的出水硬度变化并不明显。表明耦合软化系统中的 ACF 具有良好的再生能力和稳定性质。从工业应用的角度来看,探索耦合软化系统在长时间运行下的稳定性是非常必要的。因此,在同一废水中建立了连续的处理试验。耦合软化系统每 180 min 对 ACF 解析 1 次,并将电吸附单元中浓水排出,随后继续运行。从图 7(b)中可以看出,随着运行时间的增长,耦合系统的软化效率略有下降,总体保持着较为稳定的状态。



1—电解单元; 2—R1; 3—R2; 4—R3; 5—R4; 6—R5

(a) ACF 的再生实验

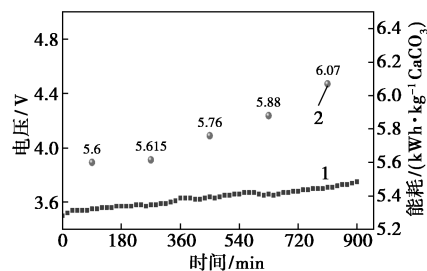


(b) 连续运行实验

图 7 ACF 的再生实验和连续运行实验

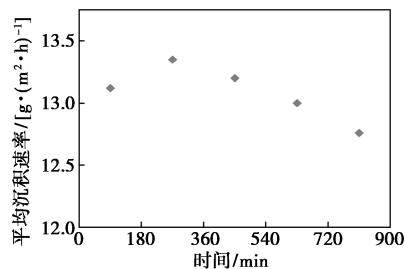
2.2.2 能耗与性能评价

为了探究耦合系统在最适运行参数条件下的长时间运行中的能耗与性能变化,每 15 min 记载 1 次反应过程中的电压和电流,计算和研究该系统的能耗和沉积速率的变化,结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出,耦合软化系统经 900 min 的运行后,电压从 3.5 V 上升到 3.75 V,平均能耗从 5.6 kWh/(kg CaCO_3) 上升到 6.07 kWh/(kg CaCO_3),沉积速率从



1—电压; 2—平均能耗

(a) 电压与平均能耗变化



(b) 平均沉积速率变化

图 8 耦合系统在连续运行条件下的电压与平均能耗变化及平均沉积速率变化

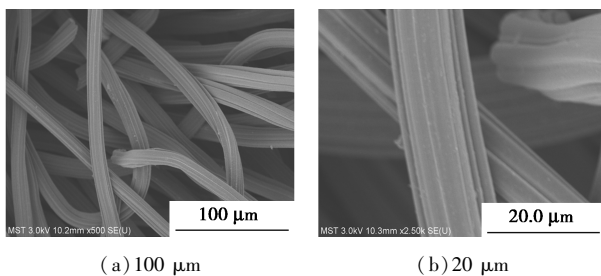
最高 13.35 g/(m²·h) 下降到 12.76 g/(m²·h), 变化幅度不明显。

本研究与其他文献比较结果如表 7 所示。目前,大部分的硬度去除效率主要在 16.4%~72%之间,沉积速率主要在 8~73.4 g/(m²·h)之间,能耗主要在 3.6~118 kWh/(kg CaCO₃)之间。相比这些研究,耦合系统主要优势是具有较高的硬度去除效果(70.25%)和较低的能耗[5.6~6.07 kWh/(kg CaCO₃)]。

表 7 本研究与其他工艺的对比

总硬度/ [mg· (L CaCO ₃) ⁻¹]	去除 效率/ %	电流 密度/ (A·m ⁻²)	沉积速率/ [g·(m ² · h) ⁻¹]	能耗/[kWh· (kg CaCO ₃) ⁻¹]	参考 文献
800	60.5~ 70	20	11.89~ 13.65	5.6~ 6.07	本研究
1150	49.4	30	19.95	27.1	[3]
785	60~ 72	250~ 500	58.2~ 70.9	21.8~ 45.9	[7]
2350	—	100	64.62	5.1	[9]
510	58.90	40	—	23.6	[10]
300	16.50	60	—	—	[13]
1180	—	108	22.8	16	[17]
870	58.60	31	42.32	4.1	[18]
368	61.50	25	25	4	[19]
300	38.50	100	10	118	[20]
350	16.4~ 21.4	100	53.9~ 73.4	17.3~ 23.6	[21]

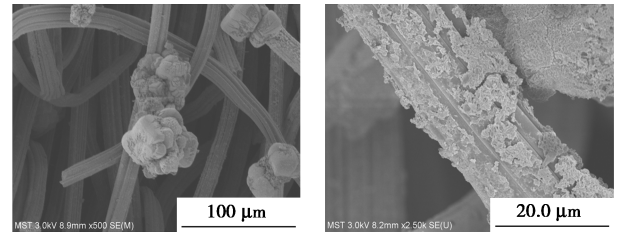
耦合系统和独立电吸附单元的 ACF 阴极在连续运行后的部分 SEM 图如图 9 与图 10 所示。通过对比可以看出,耦合系统中的 ACF 阴极表面连续运行后仍然保持着较为清洁的表面,表明将电吸附单元后置可以有效地提升 ACF 的抗结垢能力。



(a) 100 μm

(b) 20 μm

图 9 耦合系统的 ACF 阴极在连续运行后的部分 SEM 图



(a) 100 μm

(b) 20 μm

图 10 独立电吸附单元的 ACF 阴极在运行后的部分 SEM 图

2.3 耦合系统的运行机制

通过在电解单元末端安置电吸附系统可以提高对循环冷却水的处理效果。具体过程为:循环冷却水首先由电解系统处理,此时大部分硬度离子与碱度离子被去除,未处理的硬度离子随水流进入电吸附系统进行深度处理。

电解软化技术的核心是通过电解水在阴极区域形成一个含高浓度 OH⁻ 的环境 [见式 (1)、式 (2)]^[22],促使结垢离子以结晶的方式形成以 CaCO₃ 和 Mg(OH)₂ 为主的颗粒物从水中分离出来 [见式 (3)、式(4)、式(5)]^[23]。在阳极区域,大量的 H⁺ 与 HCO₃⁻ 反应生成 CO₂ [见式(6)],碱度由此被进一步降低。阴极与阳极的共同作用使得硬度和碱度降低,达到抑制循环冷却水结垢的目的。电吸附的原理是通过外加电压在电极之间形成静电场,带电粒子受到静电力而被迫向带相反电荷的电极板移动,最终被吸附并存储在多孔电极中^[24]。耦合系统的运行机理如图 11 所示。

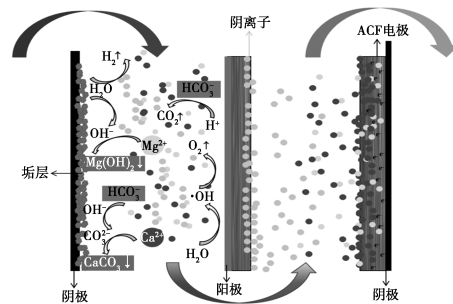
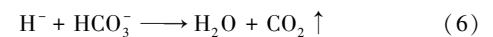
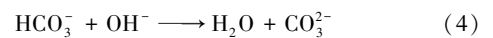
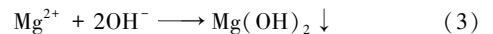
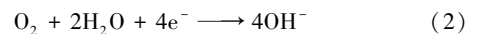
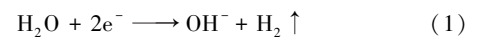


图 11 耦合系统的运行机理

3 结论

(1) 通过电解与电吸附技术耦合,降低了传统

电化学水软化效果受碱度制约的问题,提高了对循环冷却水的处理效率。在最佳运行参数下,总硬度、碱度的去除效率达到70.25%、92%,相比单独的电解单元分别提高了9.5%、5%。

(2)相对于传统的电化学软化技术,耦合系统拥有较低的运行能耗[5.6~6.07 kWh/(kg CaCO₃)]。

(3)在长时间连续工作的情况下,耦合系统能够保持较强的稳定性。

参考文献

- [1] Zhu H, Zheng F, Lu S, *et al.* Effect of electrochemical pretreatment on the control of scaling and fouling caused by circulating cooling water on heat exchanger and side-stream reverse osmosis membrane [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 43: 102261.
- [2] Li X, Wu L, Lu S, *et al.* Treatment of cooling tower blowdown water by using adsorption-electrocatalytic oxidation: Technical performance, toxicity assessment and economic evaluation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 252: 117484.
- [3] Zhao X, Li S, Li Y, *et al.* Investigation of scale inhibition effect and mechanism of S-HGMF in the clean recirculating cooling water system [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 845: 157156.
- [4] Wagner T V, Parsons J R, Rijnaarts H H M, *et al.* Benzotriazole removal mechanisms in pilot-scale constructed wetlands treating cooling tower water [J]. *Journal of Hazard Mater*, 2020, 384: 121314.
- [5] Bannoud A. The electrochemical way of removing the hardness of water [J]. *Desalination*, 1993, 93(1): 545-555.
- [6] Xu H, Xu Z, Guo Y, *et al.* Research and application progress of electrochemical water quality stabilization technology for recirculating cooling water in China: A short review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37: 101433.
- [7] Muddemann T, Haupt D, Engelke M, *et al.* Combination of magnetically actuated flexible graphite-polymer composite cathode and boron-doped diamond anode for electrochemical water softening or wastewater treatment [J]. *Electrochimica Acta*, 2020, 354: 136729.
- [8] 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.
- [9] Sanjuán I, Benavente D, Expósito E, *et al.* Electrochemical water softening: Influence of water composition on the precipitation behaviour [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 211: 857-865.
- [10] Yang Q, Xu L, He Q, *et al.* Reduced cathodic scale and enhanced electrochemical precipitation of Ca²⁺ and Mg²⁺ by a novel fenced cathode structure: Formation of strong alkaline microenvironment and favorable crystallization [J]. *Water Research*, 2021, 209: 117893.
- [11] Xu P, Drewes J E, Heil D, *et al.* Treatment of brackish produced water using carbon aerogel-based capacitive deionization technology [J]. *Water Research*, 2008, 42(10): 2605-2617.
- [12] Ayranci E, Duman O. Adsorption behaviors of some phenolic compounds onto high specific area activated carbon cloth [J]. *Journal of Hazard Mater*, 2005, 124(1/3): 125-132.
- [13] 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.
- [14] Ma S, Ma L, Huang L, *et al.* Experimental study of desalination and ion selection performance using electro-sorption technology with an activated carbon fiber electrode [J]. *Energy Sources*, 2021, 13: 1-17.
- [15] Sruthi T, Gandhimathi R, Ramesh S T, *et al.* Stabilized landfill leachate treatment using heterogeneous Fenton and electro-Fenton processes [J]. *Chemosphere*, 2018, 210: 38-43.
- [16] Porada S, Bryjak M, Van Der Wal A, *et al.* Effect of electrode thickness variation on operation of capacitive deionization [J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 75: 148-156.
- [17] Safari I, Hsieh M K, Chien S H, *et al.* Effect of CO₂ stripping on pH in open-recirculating cooling water systems [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2014, 33(1): 275-282.
- [18] Luan J, Wang L, Sun W, *et al.* Multi-meshes coupled cathodes enhanced performance of electrochemical water softening system [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 217: 128-136.
- [19] 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.
- [20] Zhi S, Zhang S. A novel combined electrochemical system for hardness removal [J]. *Desalination*, 2014, 349: 68-72.
- [21] Jin H, Yu Y, Zhang L, *et al.* Polarity reversal electrochemical process for water softening [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 210: 943-949.
- [22] Gabrielli C, Maurin G, Francy-Chausson H, *et al.* Electrochemical water softening: Principle and application [J]. *Desalination*, 2006, 201(1/3): 150-163.
- [23] 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.
- [24] Porada S, Bryjak M, Van Der Wal A, *et al.* Effect of electrode thickness variation on operation of capacitive deionization [J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 75: 148-156. ■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:<http://www.xdhg.com.cn>