



# 膜电解法用于循环冷却水处理

刘松涛, 徐海龙, 党小梅, 王立朋, 司卿卓, 陈传敏

(华北电力大学环境科学与工程学院, 河北保定 071003)

**[摘要]** 在传统微电解反应器基础上增加离子膜并用于处理循环冷却水。由于离子膜的存在, 反应器阴极室内能够快速富集  $\text{OH}^-$ , 有利于去除  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ , 同时阳极室内电解产生的  $\text{Cl}_2$  溶于水生成的次氯酸盐可作为杀菌剂使用。探究了离子膜类型、电流密度、水力停留时间、极板间距等参数对循环冷却水硬度去除率和比能耗的影响, 并探究了阳极室  $\text{NaCl}$  浓度对除硬效果、比能耗和阳极副产物的影响。结果表明, 使用阳离子膜的反应器, 在进水硬度为  $500 \text{ mg/L}$  (以  $\text{CaCO}_3$  计)、电流密度为  $25 \text{ A/m}^2$ 、水力停留时间为  $14 \text{ min}$ 、极板间距为  $12 \text{ mm}$ 、阳极  $\text{NaCl}$  质量分数为  $4\%$ 、电解时间为  $6 \text{ h}$  的条件下, 硬度去除质量浓度为  $466 \text{ mg/L}$ , 硬度去除率为  $93.2\%$ , 比能耗为  $3.69 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$ , 阳极液有效氯质量浓度为  $3.99 \text{ g/L}$ 。相比常规微电解法, 膜电解法提高了循环冷却水的硬度去除率和电流效率, 同时阳极液可以作为杀菌剂使用, 提高了经济效益。

**[关键词]** 电化学; 沉淀; 膜; 循环冷却水; 硬度; 比能耗

**[中图分类号]** TQ085 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)10-0154-06

## Membrane electrolysis used in circulating cooling water treatment

LIU Songtao, XU Hailong, DANG Xiaomei, WANG Lipeng, SI Qingzhuo, CHEN Chuanmin

(College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Ionic film was added to the traditional microelectrolytic reactor and used to treat circulating cooling water. Due to the existence of the ionic membrane,  $\text{OH}^-$  could be rapidly enriched in the cathode chamber of the reactor, which was conducive to the removal of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ . The chlorine produced by electrolysis in the anode chamber was dissolved in water to generate hypochlorite, which could be used as a fungicide. The effects of ionic film type, current density, hydraulic retention time, plate spacing and other parameters on hardness removal rate and specific energy consumption of circulating cooling water were explored, and the effects of  $\text{NaCl}$  concentration in anode chamber on hardness removal effect, specific energy consumption and anode by-products were also explored. The results showed that the hardness removal mass concentration, removal rate, specific energy consumption and effective chlorine concentration of the anodic solution was  $466 \text{ mg/L}$ ,  $93.2\%$ ,  $3.69 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$  and  $3.99 \text{ g/L}$  under the condition of using cationic membrane reactor,  $500 \text{ mg/L}$  ( $\text{CaCO}_3$ ) of inlet water hardness,  $25 \text{ A/m}^2$  of current density,  $14 \text{ min}$  of hydraulic retention time,  $12 \text{ mm}$  of distance between the plates,  $4\%$  of  $\text{NaCl}$  concentration of anode, and  $6 \text{ h}$  of electrolysis time. Compared with the conventional microelectrolysis method, the membrane electrolysis method can improve the hardness removal rate and current efficiency of circulating cooling water, and the anodic liquid can be used as a fungicide, which improves the economic benefits.

**Key words:** electrochemistry; precipitation; membranes; circulating cooling water; hardness; specific energy consumption

循环冷却水系统广泛应用于工业生产的冷却换热过程, 运行过程中随着循环倍数的增加, 水体中各种无机离子不断浓缩, 导致污垢沉积、管路腐蚀、菌藻滋生等问题, 日常运行中需进行抑垢、缓蚀及除藻处理<sup>[1-2]</sup>。目前, 循环冷却水处理技术多以化学法为主, 化学法技

术成熟并且效果显著, 但投加的化学药剂会造成水体二次污染。微电解技术作为一种“绿色阻垢”技术<sup>[3-5]</sup>, 20世纪70年代初在国外开始被用于修复地下水污染; 80年代该技术被引入国内并应用到工业循环冷却水处理中。岳峰等<sup>[6]</sup>通过实验验证了微电解技术能有效

**[基金项目]** 国家电网有限公司科技项目(5500-202022425A-0-0-00)

稳定地去除冷却水中的成垢离子,减少管路污垢堵塞。王荣君<sup>[7]</sup>通过研究微电解设备结构、运行影响因素等,进一步验证了微电解技术用于处理循环冷却水的可行性。但微电解技术在实际应用中存在电能消耗多、运行成本高的问题,影响了该技术的推广应用<sup>[8]</sup>。

本研究在传统微电解反应器基础上增加了离子膜并用于处理循环冷却水。处理过程中,离子膜阻挡了阴极电解产生的 OH<sup>-</sup>同阳极电解产生的 H<sup>+</sup>发生反应,提高了 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>的去除率;阳极室发生析氯反应,产生的氯气溶于水生成次氯酸盐,次氯酸盐可作杀菌剂使用,降低运行成本。本研究以循环冷却水硬度去除率和反应器比能耗作为指标,分析了不同运行参数对膜电解法处理循环冷却水过程中效率和能耗的影响。

1 实验部分

1.1 装置与材料

循环冷却水膜电解处理实验系统如图 1 所示。电解槽采用有机玻璃制成,阴阳极室最大有效

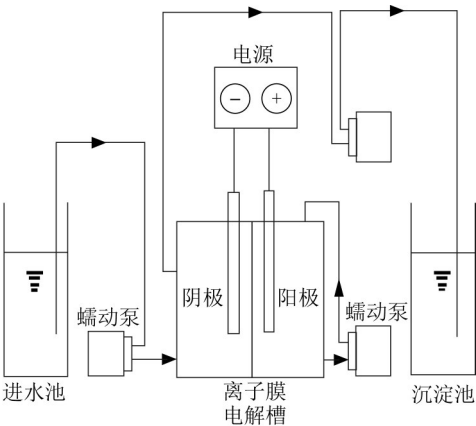


图 1 膜电解循环冷却水处理系统

Fig. 1 Membrane electrolysis circulating cooling water system

容积均为 640 mL;阴阳极板安装间距可调,极板选用镀锌钛网板,尺寸为 10 mm×10 mm;离子膜为均相型阳离子交换膜和均相型阴离子交换膜(杭州华膜科技有限公司),置于电解槽中间,离子膜交换面积为 0.016 8 m<sup>2</sup>,相关参数见表 1。实验电源为迈胜 MP3050D 型稳定直流电源;蠕动泵型号为 BT100-2J,搭配 DG15-24 泵头和 17#软管。

表 1 离子膜参数

Table 1 Ion membrane parameters

离子膜类型	型号	湿态厚度/mm	酸碱耐受浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )	电流密度/(A·m <sup>-2</sup> )	热稳定性/℃	膜面电阻/(Ω·cm <sup>-2</sup> )
均相型阳离子交换膜	HNTECH-E18230	0.25~0.35	≤3	≤400	≤50	≤5.5
均相型阴离子交换膜	HNTECH-E17270	0.30~0.40	≤3	≤400	≤50	≤4

实验用循环冷却水由分析纯的无水 CaCl<sub>2</sub>、NaHCO<sub>3</sub>(物质的量比 1:2)和去离子水配制而成。实验过程中,使用蠕动泵将循环冷却水从进水槽稳定、连续的泵入电解槽阴极室,为使反应更加充分,采用下进上出的进出水方式,冷却水经电解后排入沉淀池;阳极室内注入 NaCl 溶液,用蠕动泵使溶液在阳极室内闭式循环。调节蠕动泵转速模拟处理量和停留时间。

1.2 分析方法

在阴极室排水口取水样,经 0.45 μm 水性滤膜过滤后分析水质参数。水质硬度的测定参考《锅炉用水和冷却水分析方法硬度的测定》(GB/T 6909—2008);氯离子的测定参考《工业循环冷却水和锅炉用水中氯离子的测定》(GB/T 15453—2008);有效氯浓度的测定采用碘量法,参照《消毒技术规范》(第 3 版)。

单位时间内,反应器去除单位质量硬度消耗的

电能称为比能耗,计算公式见式(1)。

$$E=\frac{UIT}{Vc}$$
(1)

式中: E——比能耗, kW·h/kg;  
U——电压, V;  
I——电流, A;  
T——电解时间, h;  
V——处理的循环冷却水体积, L;  
c——硬度去除质量浓度, g/L。

2 结果与讨论

2.1 离子膜类型对水处理效果的影响

调节直流电源使电流稳定输出,电流密度设置为 25 A/m<sup>2</sup>,调节蠕动泵转数确定水力停留时间为 16 min,极板间距设置为 12 mm,阳极室注入质量分数为 0.2% 的 NaCl 溶液。在不同水质硬度下分别使用阴离子膜反应器和阳离子膜反应器进行实验,电

解 30 min 后在排水处取样测定钙硬度。不同离子膜对循环冷却水硬度去除效果的影响见图 2。

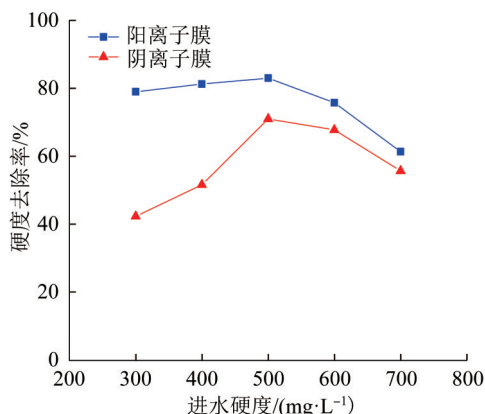


图2 离子膜类型对硬度去除率的影响

Fig. 2 Effect of ionic membrane types on hardness removal rate

由图 2 可知,水质硬度从 300 mg/L 升至 500 mg/L 时,阳离子膜反应器一直对  $\text{Ca}^{2+}$  表现出较高的去除率,去除率提升幅度不大;而阴离子膜反应器对硬度去除率的提升较为明显。当水质硬度高于 500 mg/L,2 种不同类型离子膜的反应器对硬度的去除率均开始降低。这是因为在相同的电流密度下,阴极发生析氢反应产生  $\text{OH}^-$  的速率是一致的,在处理较低硬度的水时, $\text{Ca}^{2+}$  含量较少,阴极产生的  $\text{OH}^-$  过剩;随着硬度的升高,循环冷却水中有更多的  $\text{Ca}^{2+}$  参与反应,硬度去除率有了一定程度的提升;当水质硬度达到 500 mg/L 时,循环冷却水中  $\text{Ca}^{2+}$  的反应速率与阴极产生  $\text{OH}^-$  的速率接近平衡,此时硬度去除率最高;进一步提高硬度,当  $\text{Ca}^{2+}$  增加量高于  $\text{Ca}^{2+}$  去除量时,硬度去除率降低<sup>[9]</sup>。

在处理较低硬度的水时,阳离子膜反应器的除硬效果明显优于阴离子膜反应器;随着硬度的升高,2 种反应器硬度去除率的差距逐渐减小。这是因为当反应器使用阴离子膜时,阴极产生的  $\text{OH}^-$  在静电场力的作用下会透过阴离子膜向阳极迁移而损耗,而阳离子膜会阻挡  $\text{OH}^-$  通过;随着硬度的增加,反应器的槽电压减小,阴离子膜反应器中因发生迁移损耗的  $\text{OH}^-$  的量随之减少,参与  $\text{Ca}^{2+}$  去除反应的  $\text{OH}^-$  增多,与阳离子膜反应器硬度去除率的差距缩小。

## 2.2 电流密度对水处理效果的影响

配制硬度为 500 mg/L 的模拟循环冷却水,使用阳离子膜反应器在极板间距为 12 mm、水力停留时间为 16 min 的参数条件下进行实验,电流密度设置为 10~40 A/m<sup>2</sup>。不同电流密度对循环冷却水硬度去

除率和比能耗的影响见图 3。

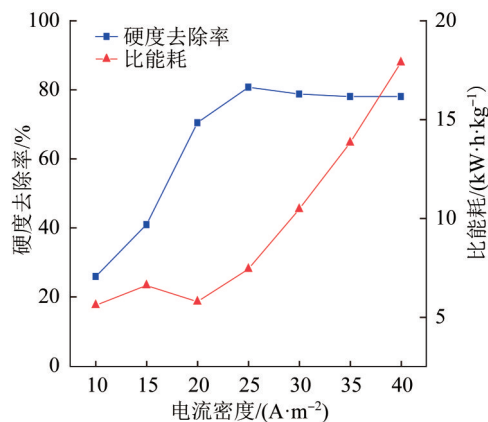


图3 电流密度对硬度去除率和比能耗的影响

Fig. 3 Effect of current density on hardness removal rate and specific energy consumption

由图 3 可知,随着电流密度的增大,循环冷却水的硬度去除率先快速上升,20 A/m<sup>2</sup> 后上升趋势减缓;电流密度增至 25 A/m<sup>2</sup> 时,硬度去除率最高,达到了 80.75%;继续增大电流密度,硬度去除率有较小程度的下降。电流密度增大对硬度去除的正向作用有 2 点:(1)促进电极反应的进行,阴极产生  $\text{OH}^-$  的速率增加;(2)增强阴极对  $\text{Ca}^{2+}$  的静电引力,提高  $\text{Ca}^{2+}$  向阴极的迁移速率<sup>[10]</sup>。但是,电流密度过大时,阴极析氢反应速率增大,水体扰动剧烈,传质过程受到干扰;其次,氢气气泡覆盖在极板表面,阻碍了  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  与阴极的接触<sup>[11]</sup>;此外,两极极板间电场力增大,穿过离子膜到达阴极室的  $\text{H}^+$  增多,导致离子膜附近的部分  $\text{CaCO}_3$  沉淀溶解,最终使得硬度去除率出现下降。

电流密度对反应器耗电量(运行成本)的影响最为显著,可通过反应器运行过程中的比能耗分析。从图 3 可以看出,随着电流密度从 10 A/m<sup>2</sup> 增加至 25 A/m<sup>2</sup>,硬度去除率增大,比能耗上升;电流密度超过 25 A/m<sup>2</sup> 后,硬度去除率趋于稳定,继续提高电流密度使得比能耗陡增,反应器经济性降低,造成能源浪费。同时,过高的电流密度会加速阳极腐蚀,增加运行成本。因此,在保证硬度去除率的前提下,电流密度应在 20~25 A/m<sup>2</sup> 之间选取。

## 2.3 水力停留时间对水处理效果的影响

控制循环冷却水进水硬度为 500 mg/L,使用阳离子膜反应器在极板间距为 12 mm、电流密度为 25 A/m<sup>2</sup> 的条件下,探究水力停留时间(4~28 min)对硬度去除率的影响,结果见图 4。

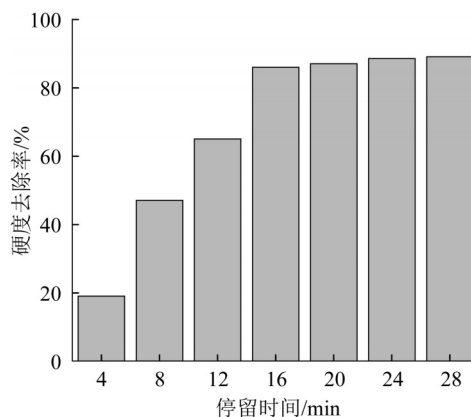


图4 水力停留时间对硬度去除率的影响

Fig. 4 Influence of hydraulic retention time on hardness removal rate

由图4可知,随着水力停留时间的延长,硬度去除率持续增长且增长趋势逐渐平缓。这是因为低停留时间下反应器对循环冷却水处理不充分。徐浩等<sup>[12-13]</sup>通过SEM分析发现,经电解水处理后的阴极结晶水垢主要是松软的粒状文石,其在低停留时间下易被冲散,后续的 $\text{Ca}^{2+}$ 不能附着沉积,从而导致硬度去除率低<sup>[13]</sup>。随着停留时间延长,硬度去除率逐渐提高,但是单位时间内处理的水量减少,除垢效率降低。图4显示停留时间由12 min增至16 min时,硬度去除率仍有明显的提高,16 min后硬度去除率稳定。本研究在12~16 min范围内做进一步探究来选取最佳停留时间,结果见图5。

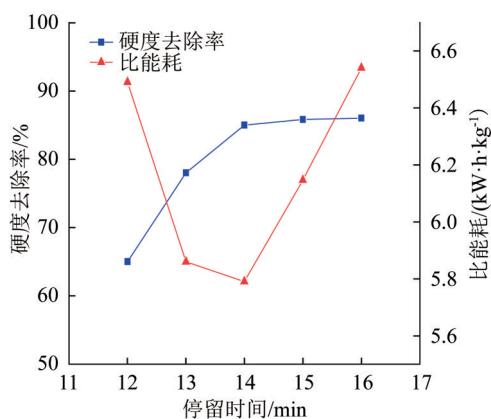


图5 水力停留时间对硬度去除率和比能耗的影响

Fig. 5 Influence of hydraulic retention time on hardness removal rate and specific energy consumption

图5表明了反应器比能耗与水力停留时间和硬度去除率的关系,随水力停留时间的延长,硬度去除率先升高后趋于稳定,比能耗先降低后上升。当停

留时间为14 min时,硬度去除率趋于稳定,比能耗也同时降到最低,经济效益最好。因此本研究选取14 min作为最佳水力停留时间。

#### 2.4 极板间距对水处理效果的影响

控制循环冷却水进水硬度为500 mg/L,使用阳离子膜反应器在电流密度为25 A/m²、停留时间为14 min的条件下,探究不同极板间距(10~50 mm)对硬度去除率和比能耗的影响,结果见图6。

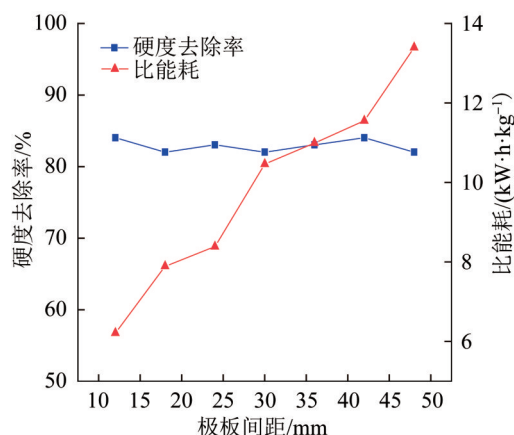


图6 极板间距对硬度去除率和比能耗的影响

Fig. 6 Influence of plate spacing on hardness removal rate and specific energy consumption

从图6可以看出,在同等电流密度下,极板间距对反应器运行中的比能耗影响较大。极板间距增大,维持同等电流密度所需的电压增大,比能耗越高。硬度去除率则在小范围内波动。潘琴荣<sup>[14]</sup>发现极板间距对微电解法除硬效果影响显著,硬度去除率同极板间距成反比,微电解产生的 $\text{OH}^-$ 会与 $\text{H}^+$ 反应而损耗; $\text{Ca}^{2+}$ 的去除反应主要发生在阴极和阴极附近的碱性区域内,极板间距越小, $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 越容易到达碱性区域而被去除。而在膜电解反应器中,由于离子膜的选择透过性,阴极产生的 $\text{OH}^-$ 可在阴极室内富集,碱性区域扩大,减小了极板间距对除硬效果的影响。实际应用中为降低运行成本,需要选择低比能耗的运行参数,所以在满足加工条件的前提下,应尽可能减小反应器极板间距。

#### 2.5 氯化钠浓度对水处理效果的影响

调节电流密度为25 A/m²、水力停留时间为14 min、极板间距为12 mm,控制进水硬度为500 mg/L,使用阳离子膜反应器探究阳极室内不同浓度的NaCl溶液对电解反应的影响,结果见图7。



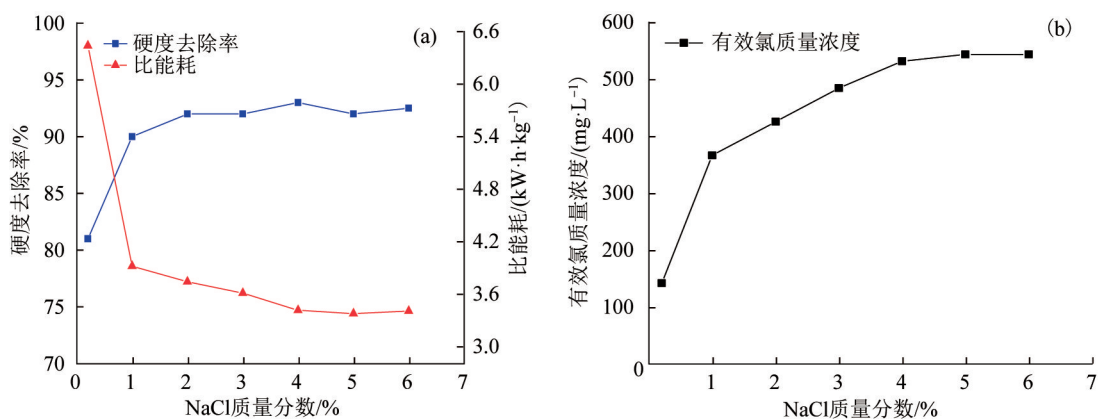


图7 NaCl质量分数对硬度去除率、比能耗(a)和阳极有效氯(b)的影响

Fig. 7 Influence of NaCl concentration on hardness removal rate, specific energy consumption (a) and anode available chlorine (b)

NaCl浓度增大会使溶液电导率增大,一定程度上可降低槽电压,减小电能的消耗<sup>[15]</sup>;同时槽电压降低会使电极极板间的静电场力减小,阳极室向阴极室迁移 $H^+$ 的速率降低,有助于阴极室 $OH^-$ 富集,提高硬度去除率。图7(a)表明,随着NaCl质量分数从0.2%增加至1%,反应器对硬度的去除率提高了9%,比能耗降低明显;进一步增大NaCl质量分数,硬度去除率稳定在92%左右,比能耗的下降趋势逐渐变缓。这是因为在电解质溶液中,离子间存在相互作用,浓度不断增大导致离子间距离不断减小,异电荷离子间的牵制作用增强,离子运动受阻,移动速率减慢,从而导致槽电压下降趋势减缓<sup>[16]</sup>,硬度去除率和比能耗逐渐稳定。

NaCl浓度对阳极室产物 $NaClO$ 也有重要影响。从图7(b)可以看出,随着NaCl质量分数的增加,阳极室电解产生的有效氯增加。这是因为电解时,阳极会同时发生析氧和析氯2种反应,溶液中 $Cl^-$ 浓度的增加有助于降低析氯电位,增大析氧电位,加强析氯的竞争反应,从而提高阳极析氯的电流效率和 $NaClO$ 的产生量<sup>[17]</sup>。NaCl质量分数达到4%后,有效氯质量浓度趋于稳定,继续增大NaCl质量分数会增加运行成本,所以阳极液宜采用质量分数为4%的NaCl溶液。

在NaCl质量分数为4%、电流密度为 $25 A/m^2$ 、水力停留时间为14 min、极板间距为12 mm、进水硬度为500 mg/L的条件下运行反应器6 h后,冷却水硬度去除率为93.2%,有效氯质量浓度为3.99 g/L,反应器比能耗为 $3.69 kW \cdot h/kg$ 。

## 2.6 电解过程中阴、阳极室溶液pH的变化

在最佳运行参数下运行阳离子膜反应器60 min,阴阳极室内溶液pH的变化见图8。

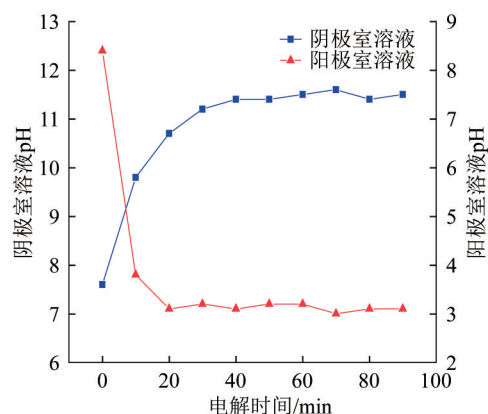


图8 电解过程中阴阳极室溶液pH变化

Fig. 8 The pH changes of the solution in the cathode and anode chambers during electrolysis process

由图8可知,电解过程中随着阴阳极氧化还原反应的进行,阴极室溶液pH逐渐上升,40 min时pH达到11.4并稳定;阳极室溶液pH迅速下降,20 min时pH降至3.1并稳定。但是酸性环境不利于溶液对 $Cl_2$ 的吸收溶解,从而会降低溶液的有效氯含量<sup>[17]</sup>,导致杀菌消毒效果降低。因此,在实际应用中应定期向阳极室加碱或及时更换阳极室溶液。

## 3 结论

(1)膜电解法处理循环冷却水的最佳运行参数为:离子膜选用阳离子膜,电流密度为 $25 A/m^2$ ,水力停留时间为14 min,极板间距为12 mm。在进水硬度为500 mg/L、阳极NaCl质量浓度为4%时,采用最

佳运行参数运行反应器6 h,冷却水硬度去除质量浓度为466 mg/L,硬度去除率为93.2%,比能耗为3.69 kW·h/kg,阳极室副产物消毒液的有效氯质量浓度为3.99 g/L。

(2)相比于常规微电解法,膜电解法在处理循环冷却水时表现出了明显优势,阴极室OH<sup>-</sup>的富集提高了冷却水的硬度去除率和处理效率,同时离子膜反应器的阳极液经处理后可以作为杀菌剂使用,提高了经济效益。

### 参考文献

- [1] 周本省. 工业水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997: 38-40.  
ZHOU Bensheng. Industrial water treatment technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1997: 38-40.
- [2] 周本省. 循环冷却水系统中微生物引起的腐蚀和粘泥的控制[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(7): 301-304.  
ZHOU Bensheng. Control of microbiologically influenced corrosion (mic) and slime in recirculating cooling water systems[J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(7): 301-304.
- [3] 胡灿英. 火电厂循环冷却水阻垢方法研究进展[J]. 广州化工, 2017, 45(24): 53-54.  
HU Canying. Research progress on anti-scaling methods of circulating cooling water[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45(24): 53-54.
- [4] CHO Y I, LIU Rong. Control of fouling in a spirally-ribbed water chilled tube with electronic anti-fouling technology[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(16): 3037-3046.
- [5] TAE KIM W, CHO Y I, BAI C. Effect of electronic anti-fouling treatment on fouling mitigation with circulating cooling-tower water[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2001, 28(5): 671-680.
- [6] 岳峰, 田中博. 采用水都电解除垢技术处理某钢厂循环水研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(14): 153-155.  
YUE Feng, TIAN Zhongbo. Study on treatment of circulating water in a steel plant using shuiduo electrolysis descaling technology[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(14): 153-155.
- [7] 王荣君. 循环冷却水微电解技术及其产业化应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.  
WANG Rongjun. Micro-electrolysis technology of the circulating cooling water and its industrial application [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [8] 何俊, 赵宗泽, 李跃华, 等. 物理方法除垢阻垢技术的研究现状及进展[J]. 工业水处理, 2010, 30(9): 5-9.  
HE Jun, ZHAO Zongze, LI Yuehua, et al. Research status and progress in scale inhibition and removal by physical technology[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(9): 5-9.
- [9] JAOUHARI R, BENBACHIR A, GUENBOUR A, et al. Influence of water composition and substrate on electrochemical scaling [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147(6): 2151.
- [10] ZHANG Zhaoyang, CHEN Aicheng. Simultaneous removal of nitrate and hardness ions from groundwater using electrodeionization[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 164: 107-113.
- [11] 李昀婷. 敞开式循环冷却水系统电解阻垢方法的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.  
LI Yunping. Study on electrolytic scale inhibition method of open circulating cooling water system[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [12] 徐浩, 延卫, 汤成莉. 水垢的电化学去除工艺与机理研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(5): 104-108.  
XU Hao, YAN Wei, TANG Chengli. Technology and mechanism of water scale removal by electrochemical method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(5): 104-108.
- [13] 李佳宾. 电化学除垢设备的影响因素及中试研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.  
LI Jiabin. Study on influence factors and pilot test of electrochemical scale removal equipment[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [14] 潘琴荣. 基于电化学法的工业循环水软化及除盐研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
PAN Qinrong. Study on softening and desalting of industrial circulating water based on electrochemical method[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [15] 李晓琴, 郭晓梅, 贾燕南, 等. 电解参数对次氯酸钠发生器运行效果影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(11): 135-138.  
LI Xiaoqin, WU Xiaomei, JIA Yannan, et al. Research on electrolysis parameters on the running effect of sodium hypochlorite generator[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(11): 135-138.
- [16] 李荻. 电化学原理[M]. 3版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 193-204.  
LI Di. Electrochemical theory [M]. 3th edition. Beijing: Beihang University Press, 2008: 193-204.
- [17] 刘纯玮, 冯莉, 冯一纳. 无隔膜法电解制备次氯酸钠及其稳定性研究[J]. 化工学报, 2018, 69(12): 5246-5255.  
LIU Chunwei, FENG Li, FENG Yi'na. Electrolytic preparation of sodium hypochlorite in undivided cell and its stability[J]. CIESC Journal, 2018, 69(12): 5246-5255.

[作者简介] 刘松涛(1980—), 博士, 硕士生导师. E-mail: taonyliu@163.com. 通讯作者: 陈传敏, 教授, 博士生导师. E-mail: hdecm@126.com.

[收稿日期] 2022-08-01(修改稿)