

# SA-CMC-PEG 复合膜吸附 $\text{Cu}^{2+}$ 的研究

李逢春, 张瀚元, 韩铭崎, 张馨, 陈侠\*

(齐鲁工业大学(山东省科学院)环境科学与工程学院, 山东 济南 250353)

**摘要:**以海藻酸钠(SA)、羧甲基纤维素(CMC)和聚乙二醇(PEG6000)交联制备出 SA-CMC-PEG 复合膜,通过单因素实验和正交实验优化出最佳实验条件:SA-CMC-PEG 投加量 10.0 g/L、温度 25℃、吸附时间 120 min,在此条件下 SA-CMC-PEG 复合膜对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附效率为 98.2%。用 SEM 和 FT-IR 等对复合膜的结构、形貌等进行表征,结果表明,复合膜结构为多孔网状并含有 C—O、O—H、COO—等官能团,说明该复合膜易于结合吸附溶液中的  $\text{Cu}^{2+}$ 。在最佳实验条件下探究了 SA-CMC-PEG 的解吸与再吸附性能,在 0.1 mol/L 的 HCl 溶液中解吸 3 次后其对  $\text{Cu}^{2+}$  的去除率仍能达到 91.2%,表明该复合膜是一种可多次利用且高效的吸附材料。

**关键词:**复合膜制备;含铜废水;吸附;再生

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)S2-0208-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.S2.041

## Study on adsorption of copper ions by SA-CMC-PEG composite membrane

Li Feng-chun, ZHANG Han-yuan, HAN Ming-qi, ZHANG Xin, CHEN Xia\*

(College of Environmental Science and Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

**Abstract:** SA-CMC-PEG composite membrane is prepared through cross-linking sodium alginate (SA), carboxymethyl cellulose (CMC) and polyethylene glycol (PEG6000). The optimal experimental conditions are obtained through single-factor experiments and orthogonal tests: SA-CMC-PEG dosage is 10.0 g·L<sup>-1</sup>, temperature is at 25℃ and adsorption time is 120 min, under which the adsorption efficiency of SA-CMC-PEG composite membrane for  $\text{Cu}^{2+}$  is 98.2%. The structure and morphology of the composite membrane are characterized by SEM and FT-IR. The results show that the composite membrane has a porous mesh structure, and contains C—O, O—H, COO— and other functional groups, indicating it is easy to bind and adsorb  $\text{Cu}^{2+}$  in solution. The desorption and readsorption performance of SA-CMC-PEG membrane is investigated under the optimal conditions. Its removal rate of  $\text{Cu}^{2+}$  can still reach 91.3% after three times of desorption in 0.1 mol·L<sup>-1</sup> HCl solution, representing that it is an efficient adsorbent material that can be used many times.

**Key words:** preparation of composite membrane; copper-containing wastewater; adsorption; regeneration

随着工业经济的不断发展,重金属带来的水体和土壤污染越来越受到重视<sup>[1]</sup>。比较常见的重金属铜、镉、铅以及汞等会造成环境污染<sup>[2]</sup>,亦会使人体内的功能酶合成受阻,对细胞质产生毒害作用,并对人体健康造成危害<sup>[3]</sup>。对于重金属的处理常用方法是化学处理、吸附法等<sup>[4]</sup>。膜法吸附由于对重金属离子的选择性好、吸附能力强、重复性好和处理成本低而受到了广泛关注和应用<sup>[5]</sup>。

在自然环境中易获得的海藻酸钠(SA)因分子链中含有许多—COOH 和—OH 基团,使其具有吸附重金属离子的能力<sup>[6-8]</sup>。并且 SA 具有良好的安全性、可再生性等特点,还可以作为去除重金属的固定化载体,在国内外都得到了较多的应用<sup>[8]</sup>。但是

由于 SA 的亲水性,成膜后的材料强度较低,膜也易碎<sup>[6]</sup>。针对这些不足,一些学者<sup>[8-12]</sup>进行了 SA 基复合材料的改进。孙朝辉等<sup>[9]</sup>采用 SA 负载聚乙烯亚胺对  $\text{Cu}^{2+}$  进行吸附,在最佳吸附条件下,达到了很好的效果。Dewangan 等<sup>[10]</sup>将通过交联 SA 和羧甲基纤维素钠(CMC)制成的生物聚合物作为吸附剂,对  $\text{Cr}^{6+}$  进行吸附研究。Benettayeb 等<sup>[11]</sup>将 SA 和尿素接枝后吸附性能大大提高。白玉琦等<sup>[12]</sup>将 SA/MGO 混合制成新的复合材料后,对水体中的重金属  $\text{Cr}^{6+}$  的吸附效率达到 97.3%。

由于单一 SA 的成膜性差、容易发生团聚、不易分离等缺点,导致其在工业应用中难以推广<sup>[6]</sup>。开发 SA 基复合固定化载体,提高固定化载体性能,是

收稿日期:2022-04-13;修回日期:2022-06-02

基金项目:山东省 2020 年面上自然基金(ZR2020MB141);山东省 2021 年大学生创新训练计划项目

作者简介:李逢春(1998-),女,硕士生,研究方向为环境污染控制与修复,1728390116@qq.com;陈侠(1978-),女,博士,讲师,研究方向为工业废水资源化利用,通讯联系人,279351653@qq.com。

研究SA高效去除重金属的突破口之一<sup>[13]</sup>。本研究以SA、CMC和PEG6000为材料,对SA进行接枝聚合形成稳定的复合膜CMC-PEG-SA,将其应用于对污水中重金属Cu<sup>2+</sup>的吸附研究,探究不同因素对Cu<sup>2+</sup>去除效果的影响。

## 1 实验

### 1.1 主要试剂与仪器

SA、无水氯化钙、CMC、PEG6000、CHN<sub>2</sub>Na<sub>2</sub>O<sub>8</sub>水合物、CCl<sub>4</sub>,所有试剂均为分析纯。

可见分光光度计722N(上海佑科仪器仪表有限公司),水浴恒温振荡器SHZ-B(常州诺基仪器有限公司),加热磁力搅拌器DF-II(金坛市医疗仪器厂),红外光谱仪(日本岛津),扫描电子显微镜SU8010(日本日立)。

### 1.2 复合膜的制备

#### 1.2.1 SA-CMC、SA-PEG复合膜的制备

将CMC:SA质量比为1:1的溶液放于培养皿中,在65℃下恒温烘干。烘干至恒重后的膜以1%的氯化钙溶液作为交联剂交联固化30 min,用氯化钙溶液和去离子水对吸附膜冲洗数次,再烘干得到SA-CMC吸附膜。同理制备SA-PEG复合膜。

#### 1.2.2 SA-CMC-PEG复合膜的制备

配制不同比例的SA-CMC-PEG复合膜,使三者的质量比分别为1:1:1、1:2:1、1:3:1。混合液用恒温磁力搅拌器进行均匀搅拌。将除泡后的混凝液倒入洁净的培养皿中,按不同比例进行编号,干燥后用质量分数为1%的氯化钙交联剂进行固化,用去离子水冲洗干净并干燥,不同质量比的SA-CMC-PEG复合膜制备完成。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 Cu<sup>2+</sup>的测定分析

实验用含Cu<sup>2+</sup>废水均为实验室配制的模拟废水,配制浓度为100 mg/L的Cu<sup>2+</sup>贮备液,其他浓度的Cu<sup>2+</sup>溶液均由该贮备液经稀释配得。水溶液中Cu<sup>2+</sup>的测定采用分光光度法<sup>[14]</sup>。

#### 1.3.2 复合膜的分析表征

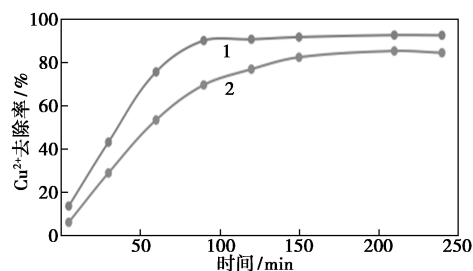
采用SEM和FT-IR表征分析SA-CMC-PEG复合膜吸附前后结构的变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 最佳复合膜的确定

由于SA一般在弱酸性条件下对重金属有较好

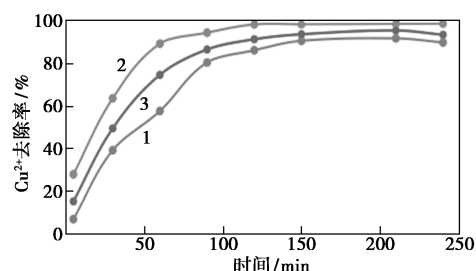
的吸附性能<sup>[15-16]</sup>,设置pH为5、吸附温度为25℃,分别用质量比为1:1的SA-CMC、SA-PEG复合膜做吸附实验,结果如图1所示。0~100 min内吸附率逐渐上升。在吸附时间到达120 min后,吸附率增速变缓。SA-CMC复合膜的吸附效率在90.1%,而SA-PEG复合膜对Cu<sup>2+</sup>的吸附效果仅有76.8%,SA-CMC复合膜的吸附效果优于SA-PEG复合膜,故以CMC为主要变量,对配制复合膜的SA、CMC、PEG6000比例进行优化。



1—SA:CMC=1:1;2—SA:PEG=1:1

图1 SA-CMC、SA-PEG复合膜对Cu<sup>2+</sup>去除率

分别配制了不同质量配比的SA-CMC-PEG 3种复合膜(图2),当SA-CMC-PEG复合膜的质量配比为1:3:1时,对溶液中Cu<sup>2+</sup>的吸附率可达98.2%,达到最佳吸附效果的时间为120 min左右,相比较其他两种配比的复合膜吸附效果好且所需时间短。因此单因素实验、正交实验以及吸附剂的解吸与再吸附实验均采用该配比条件下制得的SA-CMC-PEG复合膜。



1—SA:CMC:PEG=1:1:1;2—SA:CMC:PEG=1:3:1;  
3—SA:CMC:PEG=1:2:1

图2 3种SA-CMC-PEG复合膜对Cu<sup>2+</sup>去除率

### 2.2 吸附时间对吸附效率的影响

在pH为5、投加质量浓度为10.0 g/L复合膜吸附剂、反应温度25℃时,Cu<sup>2+</sup>去除率随时间的变化如图3所示。随着时间的增加,SA-CMC-PEG复合膜对Cu<sup>2+</sup>的吸附率逐渐升高,120 min后吸附率趋于平缓。在开始吸附的前60 min里Cu<sup>2+</sup>去除率增速较快,这是由于此时溶液中Cu<sup>2+</sup>含量高,复合

膜上的吸附位点多,对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附较快。随着时间的增加,溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  含量逐渐减少,各有效位点大多已完成与  $\text{Cu}^{2+}$  的结合,且复合膜上的  $\text{Cu}^{2+}$  会因为静电排斥力而阻碍溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  向膜上转移,因此在吸附一定时间后达到平衡。从图 3 可知,在吸附时间为 120 min 时趋于吸附平衡,此时对溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附率为 98.2%。根据吸附平衡规律以及综合有效性考察,选择最佳吸附时间为 120 min。

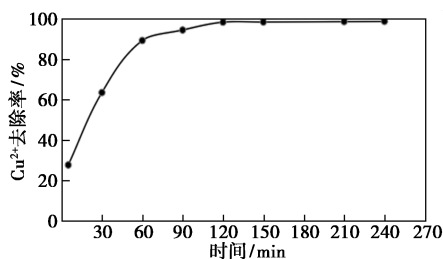


图 3 吸附时间对  $\text{Cu}^{2+}$  去除率的影响

### 2.3 SA-CMC-PEG 复合膜投加量对吸附效率的影响

在设定实验条件下,改变 SA-CMC-PEG 复合膜的投加量(6.0、8.0、10.0、12.0 g/L),考察  $\text{Cu}^{2+}$  去除率的变化,如图 4 所示。吸附效率表现为先快速上升后降低的趋势,在投加量为 10.0 g/L 时,吸附率最好, $\text{Cu}^{2+}$  去除率为 98.7%。由于用于吸附实验的溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  含量是有限的。在一定的质量范围内,当吸附剂投加量增大时,用于吸附的官能团和有效位点数量也随之增大,使得溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  可以更充分地、与吸附膜接触从而被去除。当投加量超过 10.0 g/L 之后,溶液中有限的  $\text{Cu}^{2+}$  不能使过量的吸附剂达到吸附平衡,吸附不稳定,由于振荡器的振荡作用,使得已吸附于复合膜上的  $\text{Cu}^{2+}$  通过解吸作用再次进入溶液中,使得去除率呈现下降的趋势。因此选择最佳吸附剂投加量为 10.0 g/L。

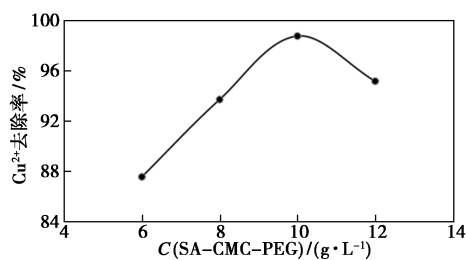


图 4 SA-CMC-PEG 投加量对  $\text{Cu}^{2+}$  去除率的影响

### 2.4 温度对吸附效率的影响

研究了不同温度条件下吸附效果的变化情况,结果如图 5 所示。当温度为 25℃ 时,去除率达到

98.5%,而后出现温度升高去除率降低的现象。温度升高会导致溶液中的粒子快速运动,增大反应速率,促进化学吸附,复合膜上的—OH 和—COOH 等官能团与溶液中的  $\text{Cu}^{2+}$  发生螯合作用<sup>[17]</sup>,因此溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  去除率增大。温度从 25℃ 继续升高时,溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  的无规则运动速率加快,难以吸附于 SA-CMC-PEG 复合膜上,吸附膜表面吸附位点的活性因温度升高而降低,影响了复合膜的稳定性。因此,选择最佳吸附温度为 25℃。

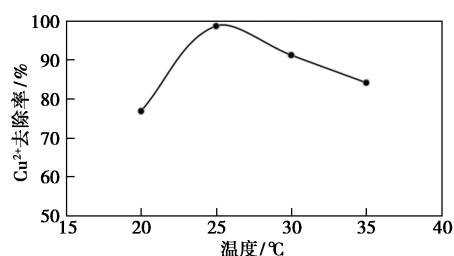


图 5 温度对  $\text{Cu}^{2+}$  去除率的影响

### 2.5 正交实验

实验条件: $\text{Cu}^{2+}$  溶液 100 mL、吸附时间 120 min、pH 5。选定 3 个实验因素,分别是:A  $\text{Cu}^{2+}$  溶液初始浓度、B 吸附剂质量、C 温度。以溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  去除率为考察指标,设计 3 因素 3 水平正交实验,实验结果及分析如表 1 所示。

表 1 正交实验结果

编号	$\text{Cu}^{2+}$ 初始浓度(A)/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	吸附剂质量(B)/g	温度(C)/ $^{\circ}\text{C}$	$\text{Cu}^{2+}$ 去除率/%
1	$A_1$	$B_1$	$C_1$	66.18
2	$A_1$	$B_2$	$C_2$	92.83
3	$A_1$	$B_3$	$C_3$	89.45
4	$A_2$	$B_1$	$C_2$	97.00
5	$A_2$	$B_2$	$C_3$	92.72
6	$A_2$	$B_3$	$C_1$	94.48
7	$A_3$	$B_1$	$C_2$	86.75
8	$A_3$	$B_2$	$C_3$	82.64
9	$A_3$	$B_3$	$C_1$	79.23
$K_1$	248.46	249.93	239.89	$\Sigma = 781.28$
$K_2$	284.20	268.19	276.58	
$K_3$	248.62	263.16	264.81	
$k_1$	82.82	83.31	79.96	$\Sigma/9 = 86.81$
$k_2$	94.73	89.40	92.19	
$k_3$	82.87	87.72	88.27	
$R_i$	11.91	6.09	13.77	

由表1可得,在Cu<sup>2+</sup>溶液初始浓度这一因素上,水平2即浓度为10 mg/L时,Cu<sup>2+</sup>去除率最高;在吸附剂投加量这一因素上,水平2即投加量为10.0 g/L时,去除率最高;在温度这一因素上,水平2即温度为25℃时,去除率最高。由以上分析可得出Cu<sup>2+</sup>吸附实验的最佳条件为:SA-CMC-PEG复合膜量为10.0 g/L、吸附时间为120 min、吸附温度在25℃。且一般认为极差值越大,该因素对实验的影响越大,所以由正交实验的极差R<sub>i</sub>分析可得,上述3个因素对吸附的影响大小顺序为C>A>B。结合单因素实验的结果,温度对Cu<sup>2+</sup>吸附实验的影响最大。单因素实验结果与正交实验结果一致。

## 2.6 解吸实验

将在最佳吸附条件下完成吸附实验的SA-CMC-PEG复合膜解吸3次,并分别进行再吸附实验,结果如表2所示。

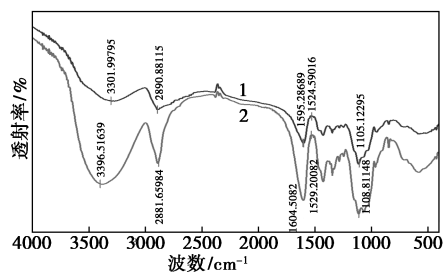
表2 SA-CMC-PEG复合膜3次吸附与解吸实验结果

循环次数	解吸率/%	再吸附率/%
0	0	98.72
1	98.96	98.35
2	97.33	96.41
3	93.84	91.17

由表2可知,该复合膜对Cu<sup>2+</sup>的去除率随着解吸次数的增加而缓慢降低。当解吸3次以后,该吸附膜对Cu<sup>2+</sup>的去除率仍超过91%,因此可证明SA-CMC-PEG复合膜是一种高效、可重复多次利用的吸附膜。

## 2.7 复合膜的吸附表征

用红外光谱分别对吸附前和吸附后的SA-CMC-PEG复合膜进行结构表征,如图6所示。



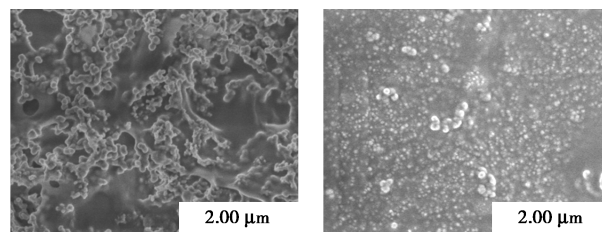
1—吸附前;2—吸附后

图6 吸附前后SA-CMC-PEG复合膜的红外光谱图

图6中,3397和2882 cm<sup>-1</sup>处为SA-CMC-PEG复合膜中O—H的伸缩振动峰,1605和1529 cm<sup>-1</sup>

处为SA-CMC-PEG复合吸附膜中COO—的对称及反对称伸缩振动吸收峰<sup>[18-19]</sup>。1109 cm<sup>-1</sup>处是SA-CMC-PEG复合膜中C—O的伸缩振动峰。通过比较SA-CMC-PEG膜吸附前后的红外光谱图发现,当吸附Cu<sup>2+</sup>后,位于3397和2882 cm<sup>-1</sup>附近O—H的吸收峰显著减弱,可知部分羟基参与了反应。还可观察到,吸附Cu<sup>2+</sup>后COO—与C—O键的吸收峰都有所减弱,证明COO—和C—O键也参与了Cu<sup>2+</sup>的吸附。此外,吸附Cu<sup>2+</sup>后SA-CMC-PEG复合膜的特征峰发生了一些位移,由此可以推断,该复合膜对Cu<sup>2+</sup>的去除不仅仅是发生了络合反应,还可能存在范德华力和静电作用力的共同影响。

用扫描电子显微镜对吸附前与吸附后的SA-CMC-PEG复合膜进行结构表征,结果如图7所示。



(a) 吸附前

(b) 吸附后

图7 吸附前后SA-CMC-PEG复合膜扫描电镜图

由图7(a)可知,配比为1:3:1的复合膜SA-CMC-PEG在吸附前表面呈现多孔、较光滑的网状结构,这种结构使得吸附剂具有较大的比表面积,当吸附剂与溶液接触时,溶液中的Cu<sup>2+</sup>更容易与其结合,从而有利于对Cu<sup>2+</sup>的吸附去除。图7(b)吸附后的复合膜由于结合了Cu<sup>2+</sup>,表面呈凹凸不平的粗糙状,网状结构基本消失,用于吸附的活性位点与Cu<sup>2+</sup>紧密相连,吸附较完全。

## 3 结论

实验以SA为主体,根据不同配比等情况加入高分子物质CMC和PEG制成相应的复合膜。通过吸附、解吸实验并分析实验结果,得到以下结论:

(1)制备的SA:CMC:PEG复合膜中,以1:3:1质量配比制得的膜吸附效果最好,在最佳实验条件下,其吸附效率可达98.2%。

(2)通过红外光谱和扫描电子显微镜分析,SA-CMC-PEG吸附膜中含有C—O、O—H、COO—等官能团,且其结构为多孔网状,这些因素都表明该复合膜易于吸附溶液中的Cu<sup>2+</sup>。

(3)解吸和再吸附实验中,在对SA-CMC-PEG

复合膜进行 3 次解吸后,其对溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  的去除率仍为 91.2%,由此可证明该复合膜是一种可重复利用且高效的吸附剂。

### 参考文献

- [1] 郭成,高翔鹏,李明阳,等.海藻酸钠基吸附材料去除水中重金属离子的研究进展[J].过程工程学报,2021,21(1):3-17.
- [2] Serife T, Robert C, Mike F, *et al.* Bioaccessibility of Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Se and Zn from nutritional supplements by the unified BARGE method[J]. Food Chemistry, 2014, 150: 321-327.
- [3] Yi X F, Sun F L, Han Z H, *et al.* Graphene oxide encapsulated polyvinyl alcohol/sodium alginate hydrogel microspheres for Cu(II) and U(VI) removal[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 158: 309-318.
- [4] 滕洪辉,彭雪,高彬,等.碳材料吸附去除水体中镉离子研究进展[J].水处理技术,2018,44(4):11-16.
- [5] 杨凯钧.紫茎泽兰(*Eupatorium coelestinum* L.)对废水中  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附特性研究[D].雅安:四川农业大学,2015.
- [6] 郭成,高翔鹏,李明阳,等.海藻酸钠基吸附材料去除水中重金属离子的研究进展[J].过程工程学报,2021,21(1):3-17.
- [7] 柴雍,王鸿儒,姚一军,等.海藻酸钠改性材料的研究进展[J].现代化工,2018,38(7):57-63.
- [8] 王婷,王玲,何娉婷,等.海藻酸钠-聚乙烯醇-聚乙二醇复合膜的制备及其对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附[J].化工环保,2014,34(1):76-80.
- [9] 孙朝辉,刘珊,樊升光,等.海藻酸钠负载聚乙烯亚胺功能球对  $\text{Cu}^{2+}$  吸附研究[J].应用化工,2018,47(5):849-854.
- [10] Dewangan T, Tiwari A, Bajpai A K. Removal of chromium(VI) ions by adsorption onto binary biopolymeric beads of sodium alginate and carboxymethyl cellulose[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2011, 32(8): 1075-1082.
- [11] Benettayeb A, Guibal E, Morli A. Chemical modification of alginate for enhanced sorption of Cd(II), Cu(II) and Pb(II)[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 316: 704-714.
- [12] 白玉琦,安燕,胡鸣鸣,等.MGO/SA 制备及其对含 Cr(VI) 污水吸附处理研究[J].应用化工,2020,49(8):1-10.
- [13] 陈宏,刘旭,李亚,等.应用海藻酸钠脱除重金属研究进展[J].化学通报,2017,(3):241-245.
- [14] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法编委会》.水和废水监测分析方法(第四版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] Wang L L, Li H, Yu D, *et al.* Hyperbranched polyamide functionalized sodium alginate microsphere as a novel adsorbent for the removal of antimony(III) in wastewater[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(26): 27372-27384.
- [16] Jiao C L, Xiong J Q, Tao J, *et al.* Sodium alginate/graphene oxide aerogel with enhanced strength-toughness and its heavy metal adsorption study[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 83: 133-141.
- [17] 俞洁,郑继东,陆泉芳,等.壳聚糖/聚乙二醇/丙烯酸吸附剂对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$  的吸附选择性和重复利用性[J].环境科学学报,2017,37(3):1003-1012.
- [18] 姚温浩,于飞,马杰.海藻酸盐复合凝胶吸附材料的合成及其在水处理中的应用[J].化学进展,2018,30(11):132-143.
- [19] 吴昊旻,杜建科,林婷婷.PEGDA/SA 复合水凝胶的制备及性能研究[J].功能材料,2018,49(8):8086-8096. ■
- [16] Lv Y, Liu M, Xu Y. Corrosion and fouling behaviors on modified stainless steel surfaces in simulated oilfield geothermal water[J]. Prot Met Phys Chem, 2018, 54(3): 526-535.
- [17] 柳鑫华,张怀芳,刘越,等.阻垢剂阻垢性能及阻垢机理的研究进展[J].材料保护,2021,54(8):150-157.
- [18] 任大军,庄梦娟,张淑琴,等.绿色阻垢剂研究进展[J].工业水处理,2021,41(12):41-45.
- [19] 尹召龙,张庚,刘潘勤,等. $\beta$ -PASP 阻垢剂的合成及阻垢缓蚀性能[J].精细化工,2019,36(11):2279-2285.
- [20] 张晓瑞,蒋彩云,张政,等.阻垢剂的研究进展[J].应用化工,2019,48(12):2998-3002.
- [21] Dronov D M, Gontovoy A V, Sarkisyan E N, *et al.* Experience of using the Nalco 1392 scale inhibitor in the circulating water supply system of the Novovoronezh NPP[J]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Yadernaya Energetika, 2021, (1): 41-48.
- [22] Guo X, Joy J S C, Cheng Y, *et al.* Scale inhibitors for industrial circulating water systems: A review[J]. J Water Chem Technol, 2021, 43(6): 517-525.
- [23] Liu X, Geng M, Zhou S. Study on the scale and corrosion inhibitor of urban reclaimed water reused in circulating cooling water of power plant[J]. Iop C Ser Earth Env, 2019, 227(5): 52061.
- [24] 覃海华,李彩亭,刘海,等.PASP、PAA 与 PBTCA 阻垢性能的对比如实验研究[J].中国环境科学,2010,30(11):1466-1472. ■

(上接第 207 页)

- [8] Singh D K, Villamayor A, Shetty H. Advance chemical cleaning methodology for plate heat exchanger scaling and fouling removal in place[C]. 3rd International Conference on Advancements in Aero-mechanical Materials for Manufacturing: Icaamm-2020, 2021.
- [9] 肖艳,曹顺安,陈东.低溶速阻垢剂的合成及循环冷却水阻垢性能[J].应用化工,2020,49(2):263-266.
- [10] 李利华,崔勇,蒋玉明,等.反渗透膜阻垢剂投加量优化及其阻垢性能评价[J].膜科学与技术,2021,41(3):135-141.
- [11] 王洋洋,刘庆旺,范振忠,等.油田常用阻垢剂的研究进展[J].石油化工,2021,50(11):1222-1228.
- [12] 王玉江,方洪波,姚明修.碳酸钙阻垢剂研究进展及阻垢作用机理[J].应用化工,2021,50(12):3430-3435.
- [13] Cheung H, Shan K, Wang S. A fault-tolerant control method of balancing valves for condenser fouling in water-cooled chillers[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 1793-1798.
- [14] Li W. Oscillatory fouling in condensers in cooling tower systems[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2020, 12(2): 1-7.
- [15] Abeywickrama J, Grimmer M, Hoth N, *et al.* Geochemical characterization of fouling on mine water driven plate heat exchangers in Saxon mining region, Germany[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 176: 121486.