

DOI:10.1395/j.cnki.issn1000-0720.2021.052801

基于 CTAC 改性活性炭的膜包用于水溶液中六价铬的吸附去除及其再生性研究

郭晓涵^{1,2}, 荆辉^{1,2}, 赵曼淑³, 张晓龙^{*1}, 王莉燕^{2,4}, 李金花^{*2,4},

陈令新^{2,4}

(1. 烟台大学环境与材料工程学院, 烟台 264005; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东省海岸带环境过程重点实验室, 海岸带环境工程技术研究与发展中心, 烟台 264003; 3. 山东大学环境科学与工程学院, 青岛 266237; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 使用多孔聚丙烯膜包覆阳离子表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵 (CTAC) 改性活性炭, 制成 CTAC 改性活性炭聚丙烯信封式膜包, 用于吸附去除水中的 Cr(VI), 并考察了膜包材料的再生性。采用扫描电镜和红外光谱表征分别对 CTAC 改性活性炭进行了形貌和结构表征, 考察了 CTAC 改性后国药粉末活性炭膜包在海水、湖水、自来水 3 种实际水样中的去除效果, 得到了满意的去除率 (88.5%~97.5%) 和精密度 (0.25%~1.83%)。采用氢氧化钠溶液解吸, 膜包在 3 次重复利用后, 对 Cr(VI) 的平均去除率可达 91.2%, 在 5 次重复利用后, 对 Cr(VI) 的平均去除率可达 65.4%, 仍有较好的去除效果。该 CTAC 改性结合膜包的方法有望为含铬废水治理提供普适性的吸附材料和方法。

关键词: 六价铬; CTAC 改性活性炭; 信封式膜包; 吸附去除; 再生

中图分类号: X506; X523 **文献标识码:** A

CTAC modified activated carbon membrane-package for adsorption removal of hexavalent chromium in aqueous solution and its regenerability

GUO Xiaohan^{1,2}, JING Hui^{1,2}, ZHAO Manshu³, ZHANG Xiaolong^{*1}, WANG Liyan^{2,4}, LI Jinhua^{*2,4}, CHEN Lingxin^{2,4}

(1. School of Environmental and Material Engineering, Yantai University, Yantai 264005; 2. CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Shandong Key

收稿日期: 2021-05-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1603001) 项目资助。

作者简介: 郭晓涵

***通信作者:** 张晓龙

李金花

Laboratory of Coastal Environmental Processes, Research Center for Coastal Environmental Engineering and Technology, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003; 3. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Cationic surfactant cetyltrimethylammonium chloride (CTAC) modified activated carbon envelope-type membrane was prepared by using porous polypropylene film coated with CTAC and applied for the adsorption and removal of Cr(VI) from water, as well as the regeneration of membrane-material was studied. Scanning electron microscopy (SEM) and infrared spectroscopy (IR) were employed to characterize the morphology and structure of the CTAC modified activated carbon material. The application effects of CTAC modified Sinopharm powder activated carbon for adsorptive removal of Cr(VI) from seawater, lake water and tap water samples were investigated. The satisfactory removal rates were obtained of 88.5%-97.5% with precision of 0.25%-1.83%. By desorption with sodium hydroxide solution, after three times of reuse, the average removal rate of Cr(VI) can reach 91.2%, and after five times of reuse, the average removal rate can remain at 65.4%, which still has a good removal effect. The method of CTAC modified membrane coating is simple, economical and efficient, which is expected to provide a universal adsorption material and method for the treatment of chromium containing wastewater.

Keywords: Cr(VI); CTAC modified activated carbon; envelope-type membrane-package; adsorption removal; regeneration

Cr 是一种广泛分布在地壳中的金属元素，主要以三价铬 (Cr(III)) 和六价铬 (Cr(VI)) 的形式存在^[1-2]。其中，Cr(VI)的毒性是Cr(III)的 100 倍，即使在低浓度情况下，也会对人体产生强烈的致癌、致畸和致突变的效果^[3]。在环境水体中，铬离子会以含氧阴离子的形态存在，并通过食品、水体等进入人体，对人类产生极大危害。由于电镀、钢铁和汽车制造等工业活动会产生大量的含铬废水^[4]，因此，在排放含铬工业废水前，会对其进行处理以减少对人体健康的影响。目前，对于 Cr(VI)的处理，常采用沉淀法^[5-6]、膜分离法^[7]、氧化还原法^[8-10]和吸附法^[11-13]。沉淀法，是将铬离子生成沉淀除去；膜分离法，是采用选择性膜分离去除；

还原法，是用还原剂去除；吸附法，是通过吸附剂吸附去除铬离子。由于吸附法具有价格实惠，容易操作等优势，广泛用于铬离子的去除中^[14]。

通过吸附法去除铬离子时，良好的吸附剂会显著提高去除效率。活性炭具有无数细小孔隙，是一种良好的吸附剂材料^[15]，同样由于经济实惠，操作简单的优势，因此被广泛应用。改性后的活性炭吸附能力会显著提高^[16-17]。目前，能够提高吸附 Cr(VI)能力的改性方法，包括氧化改性、酸碱改性和负载改性等^[18]。由于活性炭具有良好的重复利用性，通过解吸附后的活性炭依然具有良好的吸附性能，因此常用来做吸附剂。此外，合理的解吸附剂不仅能提高脱附效率、还能增加吸附剂的重复使用次数从而减少吸附法的成本。目前解吸附剂的选择，大致有酸碱解吸附剂、盐解吸附剂和螯合解吸附剂等^[19]。由于改性活性炭在偏酸性条件中对 Cr(VI)离子的吸附能力较强，因此，常选择 NaOH 作为解吸附剂。NaOH 解吸附的原理是：在碱性条件下，OH⁻首先扩散到活性炭表面，减弱活性炭与 Cr(VI)离子之间的引力，其次 OH⁻与 HCrO⁴⁻中的氢离子发生反应，进一步减弱 Cr(VI)离子与活性炭之间的引力，使 Cr(VI)离子以 CrO₄²⁻的形式脱离活性炭的吸附，进而可以完成对活性炭的解吸附过程^[20]。

在之前的研究中，采用阳离子表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵（CTAC）对椰壳粉末活性炭进行改性，并用多孔聚丙烯膜包覆，制备信封式膜包^[21]。经过处理后的信封式膜包不仅具有去除效率高、环保廉价等优点。同时，信封式膜包可以实现活性炭与溶液的快速分离，直接检测上清液。进一步地，为探究 CTAC 改性的适用性，在本实验中，对国药集团生产的粉末活性炭也进行了 CTAC 改性并制成膜包，进行 Cr(VI)吸附去除及膜包再生性研究。对 CTAC 改性的活性炭进行了形貌和结构表征，考察了 CTAC 改性后国药粉末活性炭膜包在海水、湖水、自来水 3 种实际水样中的去除效果。选用碱性解吸附剂 NaOH 溶液对膜包进行解吸，着重考察了膜包的重复利用性，实验结果令人满意。最后，对比了不同改性方法对 Cr(VI)去除的效果。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

采用 S-4800 台式扫描电子显微镜（SEM，日本日立公司）对材料进行形貌表征，采用 Nicolet iS50 傅立叶变换红外光谱仪（FT-IR，美国赛默飞世尔公司）进行结构表征，采用 NanoDrop 2000/2000c 微量紫外可见分光光度计（UV-Vis，美国赛默飞世尔公司）进行 Cr(VI)溶液的吸光度测定。

K₂Cr₂O₇、1,5-二苯碳酰二肼（DPC）、CH₂Cl₂、NaOH 和粉末活性炭（国药集团化学试

剂公司)，十六烷基三甲基氯化铵（CTAC，上海阿拉丁生化科技公司），粉末椰壳活性炭（上海埃彼化学试剂公司），多孔聚丙烯膜（尺寸：50 mm×50 mm 孔径：3.0 μm，北京升河诚信膜科技发展中心）。

1.2 实验方法

1.2.1 活性炭改性

配置 300 mL 1 mmol/L CTAC 溶液，然后加入 0.5000 g 的活性炭。室温下 350 r/min 机械搅拌 6 h。然后将活性炭分离，在分离过程中，用超纯水反复冲洗，洗去活性炭表面残留的 CTAC。最后将活性炭置于 60 °C 的真空干燥箱中，干燥 12 h。

1.2.2 信封式膜包的制作与预处理

根据 Basheer^[22]已发表的方法制作信封式膜包，首先将方形的多孔聚丙烯膜对折，然后将两个边用热封机热封，再将 0.0500 g 的 CTAC 改性活性炭由未封装处装入，最后全部密闭热封，确保膜包没有破损以及漏碳的情况存在。由于多孔聚丙烯膜具有疏水性，因此，膜包应在处理后再使用。在使用前，先将膜包用二氯甲烷浸泡 3 min，再用超纯水超声 1 min，洗净二氯甲烷。用滤纸擦干待用。

1.2.3 吸附与脱附实验

吸附实验中，将 10 mg/L Cr(VI)溶液稀释为 1 mg/L，将其 50 mL 加入到 50 mL 离心管中，将预处理后的膜包浸入离心管的溶液中。然后将离心管放置在恒温振荡器，在室温下，160r/min 振荡反应 3 h。振荡结束后，取出膜包，溶液经处理后测定 Cr(VI)含量。脱附实验中，准备 50 mL 浓度为 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液，将吸附完成的聚丙烯膜包用超纯水冲洗后，再次预处理后浸泡至溶液中，并置于恒温振荡器中，室温下，160 r/min 恒温振荡反应 6 h。脱附实验结束后，取出膜包，烘干后备用。

1.2.4 重复利用实验

重复利用实验的过程为：将烘干后的膜包按照 1.2.3 节的方法进行吸附和脱附实验，测定膜包的重复使用次数。

1.3 Cr(VI)含量测定

采用微量紫外分光光度计对铬离子进行测定。参考文献^[21]，Cr(VI)含量测定方法为：在 1 mL 吸附后溶液中加入 10 μL 的 6 mol/L 的 HCl，再加入 40 μL 的 DPC 溶液，待颜色无明显变化后，在 540 nm 波长测溶液吸光度。

1.4 计算方法

本文主要计算溶液中 Cr(VI)的去除效率和吸附量，如式（1）、（2）所示：

$$R = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (2)$$

式中, R (%) 为 Cr(VI) 的去除效率, C_0 (mg/L) 为制备的 Cr(VI) 的浓度; C (mg/L) 为吸附后 Cr(VI) 的浓度; q_e (mg/g) 为 Cr(VI) 平衡时的吸附量; C_e (mg/L) 为 Cr(VI) 平衡浓度; V (L) 为溶液体积; m (g) 为吸附剂质量。

1.5 实际水样中 Cr(VI) 去除

为进一步探究该材料的实际应用价值, 将其应用于海水、湖水和自来水 3 种实际水样中。将 50 mg CTAC 改性活性炭包覆在 3.0 μm 的聚丙烯膜包中, 投入到 50 mL 加标后的 Cr(VI) 溶液中进行吸附, 160 r/min 振荡反应 3 h。Cr(VI) 溶液由海水、湖水和自来水经滤膜过滤去除悬浮物后配制, 海水取自烟台大学东门海域、湖水取自烟台大学三元湖、自来水取自中国科学院烟台海岸带研究所的实验室。

该实验的主要流程如图 1 所示, 主要包括 CTAC 改性活性炭的合成、制备信封式膜包、对膜包进行预处理、吸附过程、解吸过程与重复吸附过程。

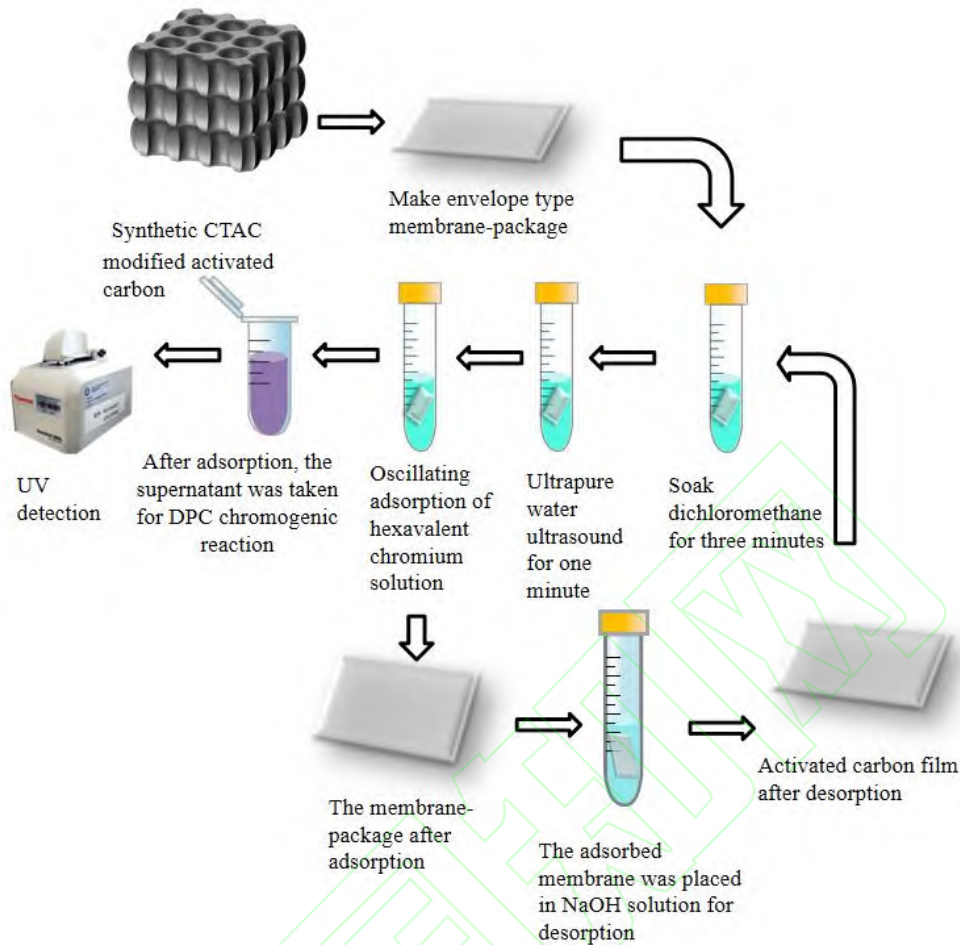


图 1 实验流程图

Fig. 1 Schematic illustration of the experimental process

2 结果与讨论

2.1 标准曲线的建立

使用 UV-Vis 对铬离子浓度进行检测，建立了 Cr(VI)浓度与吸光度的关系曲线。分别取 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 和 1.00 mg/L 的 Cr(VI)标准溶液 1 mL 置于 1.5 mL 离心管中，使用 HCl 和 DCP 溶液显色后，测量溶液吸光度。以 Cr(VI)浓度为横坐标、紫外吸光度为纵坐标，绘制标准曲线。在 0.00~1.00mg/L 范围内，标准曲线的线性方程为 $y = 0.5672x (R^2=0.999)$ ，线性关系良好。

2.2 改性活性炭的表征

采用扫描电镜 (SEM) 对国药粉末活性炭和 CTAC 改性国药粉末活性炭进行表征，结果如图 2 所示。图 2A 为改性前活性炭，图 2B 为 CTAC 改性后活性炭。两者对比可知，原始活性炭表面粗糙、有大孔存在，通过改性，活性炭表面孔径变小、孔的数量变少，表面变

得光滑。可能的原因是，CTAC 成功负载到活性炭的表面^[23]，增加了活性炭表面的正电荷，可以有效增强吸附能力。

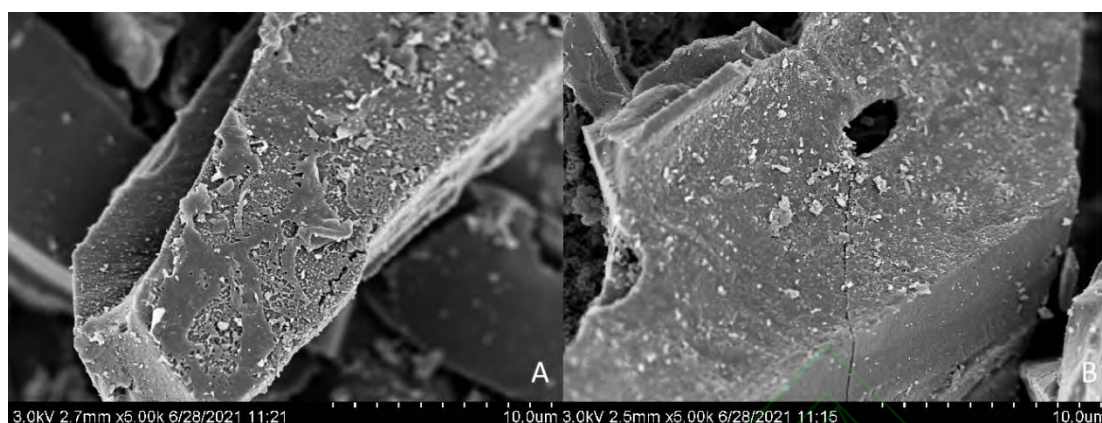


图 2 国药粉末活性炭 (A) 和 CTAC 改性国药粉末活性炭 (B) 扫描电镜图

Fig. 2 SEM images of activated carbon(A) and CTAC modified activated carbon(B) of Sinopharm powder

使用 FT-IR 对国药粉末活性炭和 CTAC 改性后国药粉末活性炭的官能团进行表征。如图 3 所示，在 3440 处出现的宽峰带对应的是 O-H 的伸缩振动峰，在 1600 处出现的峰对应的是 C=C 的伸缩振动峰，CTAC 改性活性炭 (B) 与活性炭 (A) 相比在 2915 处多了一个振动峰，对应为附着在活性炭表面的 CTAC 的 CH₂-的对称与不对称伸缩振动^[23]，表明 CTAC 已成功加载在活性炭表面上。

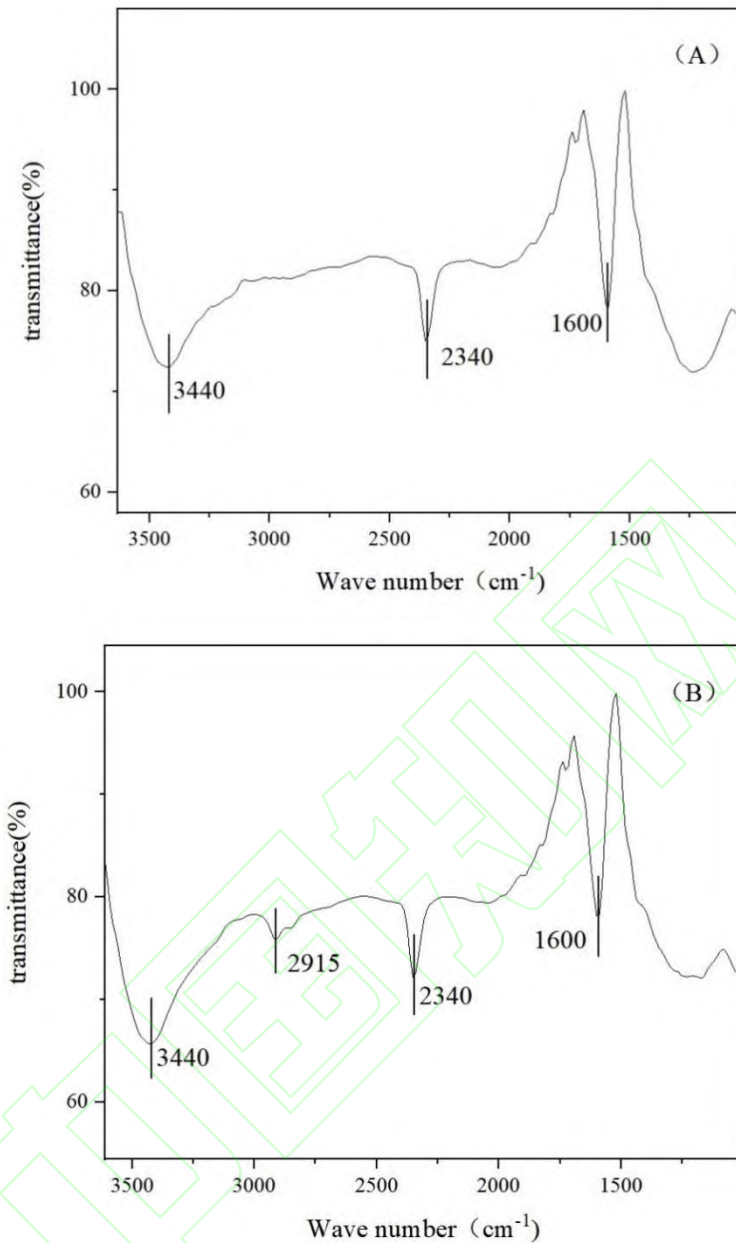


图 3 国药粉末活性炭 (A) 和 CTAC 改性国药粉末活性炭 (B) 的红外光谱图

Fig. 3 FT-IR spectra of activated carbon(A) and CTAC modified activated carbon(B) of Sinopharm powder

2.3 实际水样应用

为了探究活性炭改性方法和聚丙烯膜包制作过程的普遍适用性和可重复性,本研究采用国药集团生产的粉末活性炭,按照 1.2 中的方法制备 CTAC 改性国药粉末活性炭膜包,并将之应用于湖水、海水和自来水 3 种实际样品中吸附。通过膜包对 Cr(VI)吸附去除效率以及相对标准偏差的对比,可以很好的衡量活性炭的吸附能力。由表 1 知,直接检测实际水样时,检测不到溶液中 Cr(VI)的存在。选择加标浓度为 0.5 mg/L 和 1.0 mg/L,经过振荡吸附,粉

末国药活性炭膜包对海水中 Cr(VI) 的去除效率为 88.5%~92.9%，相对标准偏差 (RSD) 为 0.98%~1.9%；在自来水中去除效率为 90.5%~91.7%，RSD 为 0.87%~1.3%；在湖水中的去除效率为 96.5%~97.2%，RSD 为 0.25%~0.71%。改性后的国药的粉末活性炭在这 3 种实际水样中的吸附去除效果良好，精密度高。

综上所述，椰壳粉末活性炭和国药粉末活性炭经过 CTAC 阳离子表面活性剂改性都可成功制成膜包，用于实际样品中 Cr(VI) 的吸附去除，具有理想的吸附性能和稳定性，该方法具有一定的普遍适用性。

表 1 CTAC 改性国药活性炭在实际样品中对六价铬的去除效果
Table 1 Effect of CTAC modified Sinopharm activated carbon on removing hexavalent chromium in actual samples

Samples	Added concentration / (mg/L)	Post-adsorption concentration / (mg/L)	Removal efficiency / %	RSD / %
Tap water	0	0	- ^a	-
	0.5	0.042	91.7	0.87
	1	0.095	90.5	1.27
Seawater	0	0	-	-
	0.5	0.058	88.5	1.83
	1	0.071	92.9	0.98
Lake water	0	0	-	-
	0.5	0.018	96.5	0.25
	1	0.025	97.5	0.71

^aNot available

2.4 膜包的再生性

在之前的工作中，成功制备了 CTAC 粉末椰壳活性炭膜包用于吸附水溶液中的 Cr(VI)^[21]，考察了活性炭投加量、溶液的 pH、膜孔径、吸附温度和时间等影响因素，得出的结论是，在最优化条件下，该膜包对 1mg/L Cr(VI) 的去除效率可达到 99.8%。在本实验中，采用了之前实验中的最优条件^[21]，即，活性炭的投加量为 0.0500g、溶液的 pH 为 2、多孔聚丙烯膜尺寸为 50 mm×50 mm、孔径为 3μm、吸附温度为 25℃、吸附时间为 3h。

由于实际应用的因素，吸附剂的再生性研究极其重要^[24]。随着活性炭在环境保护领域的广泛应用，其循环再生能力的考察也成为了衡量活性炭性能的重要指标之一^[25]。从环保和经济的角度出发，活性炭再生技术的研究不仅具有工程利用价值和经济价值，而且对于减

少碳排放和环境中的二次污染也有一定的积极意义^[26]。

测试了膜包在 NaOH 溶液中解吸附后重新吸附的结果。3 次重复利用后，膜包对 Cr(VI) 的平均去除率可达 91.2%；4 次后，平均吸附去除率为 78.9%；5 次后，平均吸附去除率仍在 65.4%。实验结果表明，0.1 mol/L 的 NaOH 溶液能够很好地对吸附 Cr(VI) 后 CTAC 改性活性炭膜包进行再生，膜包具有良好的重复利用性。

2.5 不同改性方法吸附性能的比较

利用 CTAC 改性活性炭处理了含 Cr(VI) 的废水，并且吸附去除效率可高达 97.5%。同样可用于处理 Cr(VI) 离子的活性炭的改性方法，还有高锰酸钾法、硝酸铁和硫酸改性法等。在任改玲的实验中^[27]，硫酸改性活性炭具有较高的 Cr(VI) 离子去除率，达到了 95.6%，但需要的初始浓度大、投加大，且进行 24h 的吸附。在刘冰等的实验中^[28]，高锰酸钾改性活性炭吸附去除 Cr(VI) 离子的效率达到 91.2%。在郭璇等的实验中^[29]，硝酸铁改性活性炭吸附去除 Cr(VI) 离子的效率为 83.99%。3 种方法都采用了超纯水介质，而本研究使用实际湖水水样，基质较为复杂。通过对比，充分显示 CTAC 改性活性炭是一种良好的吸附剂，有望为含铬废水治理提供普适性的吸附材料和方法。

表 2 不同改性活性炭吸附能力的对比

Table 2 Comparison of adsorption capacity of different modified activated carbons

Modification methods	Optimal experimental conditions	Maximum removal efficiency	References
CTAC modified carbon membrane-package method	pH2; Time: 3 h; Initial concentration: 1 mg/L; Dosage: 1g/L; Temperature: 25°C	97.50% Lake water	This work
Sulfuric acid modification method	pH3; Time: 24 h; Initial concentration: 50 mg/L; Dosage: 10 g/L; Temperature: 25°C	95.60% Ultrapure water	[27]
Potassium permanganate modification method	pH2; Time: 4 h; Initial concentration: 10 mg/L; Dosage: 1g/L; Temperature: 25°C	91.20% Ultrapure water	[28]
Iron nitrate modification method	pH4; Time: 2 h; Initial concentration: 10 mg/L; Dosage: 5 g/L; Temperature: 25°C	83.99% Ultrapure water	[29]

3 结论

成功制备了 CTAC 改性国药活性炭膜包, 并对改性后的国药活性炭进行表征。将制成的活性炭膜包用于 3 种实际水样中, 均得到了很高的去除率(88.5%~97.5%)和高稳定性(RSD: 0.25%~1.9%), 说明该材料有很强的实际应用价值, 且不受其他离子的干扰。采用 NaOH 溶液将吸附后的膜包解吸, 5 次重复试验后仍具有良好的吸附性能(达到了 65.4%), 可以有效节省原材料。综上所述, CTAC 改性活性炭膜包制备方法操作简单, 成本较低, 具有很高的重复利用性和实际应用价值, 可以作为一种环境友好新材料用于实际污水中 Cr(VI)的吸附去除。

参考文献

- [1] Xia J Y, Xu T, Yang Y Q, Xiong Y. Adsorption of cadmium and lead ions in aqueous solution by chestnut endothelium. *ChinJAnalLab*, 2021,40(2):180.
夏皎云,徐彤,杨玉清,熊艳. 板栗内皮对水溶液中镉离子和铅离子的吸附. *分析试验室*,2021,40(2):180.
- [2] Zhao Y, Linghu W S.The harm of chromium ion and its treatment research progress. *Henan Chem Ind*,2020,37(5):6.
赵银,令狐文生. 铬离子的危害及其处理研究进展. *河南化工*,2020,37(5):6.
- [3] Huang R X, Zhou M, Cai H H, Huang H J.Valence change of exogenous chromium and mechanism of decontamination of Cr(VI) in natural water. *Guangdong Chem Ind*,2014,41(12):173.
黄锐雄,周咪,蔡慧华,黄华坚.地表水外源铬价态转换及六价铬污染消除机理探讨. *广东化工*,2014,41(12):173.
- [4] Li J C Z.Efficiency and mechanism of the enhancement reduction of aqueous Cr(VI) by zero-valent iron and the solidification of chromium in the sludge and residue[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
李金春子. 强化零价铁还原水中 Cr(VI)效能与机理及含铬泥渣固定化研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2016.
- [5] Cai H M,Han W,Jiang X,Guo J,Jia D M.Advances in research of removing chromium(VI) ion from water. *Shandong Chem Ind*,2020,49(3):53.
蔡华敏,韩巍,蒋鑫,郭嘉,贾冬梅. 水中铬(VI)离子的去除研究进展. *山东化工*,2020,49(3):53.
- [6] Ramakrishnaiah C R, Prathima B. Hexavalent chromium removal from industrial wastewater by chemical precipitation method. *Int J Eng Res Appl*, 2012, 2(2): 599.
- [7] Li Y X. Removal of chromium [Cr(VI)] and Cadmium [Cd(II)] by 316L porous stainless steel supported alumina membrane[D]. Xianyang: Northwest A&F University,2017.
李易轩. 多孔不锈钢基氧化铝膜对水溶液中 Cr(VI)和 Cd(II)的去除性能研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学,2017.
- [8] Zeng J. Study on treatment of wastewater containing chromium with ion exchange method. *Jiangxi Chem Ind*,2019(3):108.

- 曾婧. 离子交换法处理含铬废水的研究. 江西化工,2019(3):108.
- [9] Zhao B Q. Treatment of high concentration chromium wastewater by sulfur dioxide reduction. *Chemical Enterprise Management*,2013(14):200.
赵邦清. 二氧化硫还原法处理高浓度含铬废水. 化工管理,2013(14):200.
- [10] Wu J M, Cheng S G. Study on the optimal for the treatment of chromium-containing wastewater by sulfur dioxide method. *Safety and Environ Eng*,2014,21(5):89.
吴继明,程胜高. 二氧化硫还原法处理含铬废水最佳工艺条件研究. 安全与环境工程,2014,21(5):89.
- [11] Xu L G, Wan M, Li S Y, Zhao Z Z, Ma W Z. Study on the treatment of chromium-containing wastewater by diatomite modified by chitosan. *Shandong Chem Ind*,2019,48(14):229.
许令国,万梦,李诗瑶,赵壮壮,马万征. 壳聚糖改性硅藻土处理含铬废水的实验研究. 山东化工,2019,48(14):229.
- [12] Zeng L, Bai L, Xiang Y, Guo X X. Adsorption performance of alkali modified fly ash for Cr^{6+} in waste water. *J Chengdu University(Natural Science Edition)*,2019,38(2):210.
曾丽,白露,向莹,田雪梅,郭小萱. 碱改性粉煤灰对废水中铬离子吸附性能研究. 成都大学学报(自然科学版),2019,38(2):210.
- [13] Lu W, Li J, Sheng Y, et al. One-pot synthesis of magnetic iron oxide nanoparticle-multiwalled carbon nanotube composites for enhanced removal of Cr(VI) from aqueous solution. *J Colloid Interf Sci*, 2017, 505: 1134.
- [14] Sun S C, Liu Y Y, Wang L, Bai Y N. A review on treatment of dye wastewater by adsorption materials. *Shandong Chem Ind*,2018,47(16):73.
孙世操,刘彦洋,王力,白亚楠. 吸附材料处理染料废水的研究进展. 山东化工,2018,47(16):73.
- [15] Fan S S, Xu T T, Zhang H, Qian Q H, Liu S Q. Study on the treatment of chromium-containing electroplating wastewater by modified activated carbon. *Electroplating Pollution Control*,2019,39(1):72.
范思思,许同桃,张浩,钱清华,刘顺强. 改性活性炭处理含铬电镀废水的研究. 电镀与环保,2019,39(1):72.
- [16] Yang B N. Study on adsorption treatment of chromium-containing electroplating wastewater by modified activated carbon. *Contemporary Chem Ind*,2019,48(3):488.
杨宝宁. 改性活性炭吸附处理含铬电镀废水的研究. 当代化工,2019,48(3):488.
- [17] Wang C L. Modified activated carbon treatment of wastewater containing chromium[D]. Chengdu: Xihua University,2015.
王晨丽. 改性前后活性炭处理含铬废水实验研究[D]. 成都: 西华大学,2015.
- [18] Yang S E, Lin J Q. Review of modification technology of activated carbon and its application. *J Anhui Agri Sci*,2014,42(9):2712.
杨四娥,林建清. 活性炭的改性技术及其应用研究进展. 安徽农业科学,2014,42(9):2712.
- [19] Lan X, Guo S T, Li B. Reviews on desorption of heavy metal in water by adsorption method. *Shandong Chem Ind*,2020,49(10):81.
兰馨,郭帅庭,李彬. 吸附法处理水中重金属的解吸附研究进展. 山东化工,2020,49(10):81.
- [20] Jing G H, Dong M X, Zhou Z M, Xu Q Q. Effects of ultrasound on adsorption and desorption of chromium(VI) on activated carbon. *CIESC J*,2009,60(11):2805.

- 荆国华,董梅霞,周作明,许庆清. 超声波对活性炭吸附/脱附 Cr(VI)的影响. 化工学报,2009,60(11):2805.
- [21] Zhao M S,Liu T,Lu W H,Zhang X L,Li J H,Chen L X. Envelope membrane packed with CTAC modified active carbon for Cr(VI) removal from aqueous solution. EnvironChem,2020,39(9):2593.
赵曼淑,刘涛,鹿文慧,张晓龙,李金花,陈令新. 基于 CTAC 改性活性炭的信封式膜包用于水溶液中六价铬去除. 环境化学,2020,39(9):2593.
- [22] Basheer C, Alnedhary A A, Rao B S, et al. Development and application of porous membrane-protected carbon nanotube micro-solid-phase extraction combined with gas chromatography/mass spectrometry. Anal Chem, 2006, 78(8): 2853.
- [23] Wang Y N. Adsorption of arsenic from groundwater by cationic surfactant modified activated carbon electrode[D].Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019.
王一楠. 阳离子表面活性剂改性活性炭电极对地下水中砷的吸附研究[D].武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [24] Zheng W J,Lin J W,Zhan Y H,Wang H.Adsorption characteristics of nitrate and phosphate from aqueous solution on zirconium-hexadecyltrimethylammonium chloride modified activated carbon.Environ Sci,2015,36(6):2185.
郑雯婧,林建伟,詹艳慧,王虹. 锆-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性.环境科学,2015,36(6):2185.
- [25] Jin X P.Preparation of cassava sludge-based activated carbon and study on hexavalent chromium adsorption[D]. Maanshan: Anhui University of Technology,2018.
靳晓鹏. 木薯污泥活性炭的制备及对六价铬的吸附研究[D].马鞍山: 安徽工业大学,2018.
- [26] Liu S T,Xue H P,Qiu D F,Feng X J,Wang N Q. Research and prospect on activated carbon regeneration technology.Sintering and Pelletizing,2021,46(1):31.
刘慎坦,薛鸿普,仇登菲,冯小娟,王念秦. 基于活性炭再生技术的研究进展及前景展望.烧结球团,2021,46(1):31.
- [27] Ren G L.Study on the effect of resin on improving the performance of waterborne coatings. Shanxi Chem Ind,2019,39(6):13.
任改玲. 不同酸改性活性炭去除水溶液中 Cr(VI)的研究. 山西化工,2019,39(6):13.
- [28] Liu B,Ma R H,Liu C T. Characterization and Cr(VI) adsorption capability of activated carbon modified with KMnO₄. ChemReagents,2016,38(9):819.
刘冰,马荣华,刘春涛. 高锰酸钾改性活性炭的表征及吸附 Cr(VI)性能的研究. 化学试剂,2016,38(9):819.
- [29] Guo X,Zhao H X. Adsorption capacity of Cr(VI) by iron nitrate modified activated carbon. Guangdong Chem Ind,2020,47(16):8.
郭璇, 赵昊星. 硝酸铁改性活性炭对六价铬离子吸附性能研究. 广东化工,2020,47(16):8.