

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.012

FeCl₃改性污泥水热炭的制备及对水中钒的吸附

白华清¹, 魏业香¹, 曾正仁¹, 林强¹, 金芷琪¹, 旷鹏²,
方俊华²

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610031; 2. 重庆大学 三峡库
区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 钒矿开采和加工过程中会产生大量废水,其中钒元素具有潜在毒性和环境风险。水热炭作为一种新兴吸附剂,在水处理领域显示出了巨大的应用潜力。以脱水污泥为原料制备污泥水热炭(HTC),再用FeCl₃改性后得到改性水热炭(MBC)。对HTC和MBC进行比表面积和孔径、SEM、FT-IR、Zeta电位表征分析,并探究它们对水中钒的吸附效果和重复利用性。结果表明,经改性后污泥水热炭成功负载了铁氧化物,对阴离子型污染物的吸附能力增强。HTC和MBC吸附含钒废水的最佳pH分别为3和4,最佳投加量为12 g/L,MBC抗阴离子干扰能力优于HTC。HTC和MBC对钒的吸附与Langmuir方程和准二级动力学方程的拟合效果更好。经过4次吸附-脱附后,MBC对初始浓度为50 mg/L的钒溶液的吸附率仍高达98.42%,说明MBC在处理含钒废水中具有较大的应用潜力。

关键词: 污泥; 水热炭; 改性; 钒; 吸附

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0081-07

Preparation of FeCl₃ Modified Sludge Hydrothermal Carbon and Its Adsorption of Vanadium in Water

BAI Hua-qing¹, WEI Ye-xiang¹, ZENG Zheng-ren¹, LIN Qiang¹, JIN Zhi-qi¹,
KUANG Peng², FANG Jun-hua²

(1. Southwest Municipal Engineering Design and Research Institute of China, Chengdu 610031, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: During the mining and processing of vanadium ore, large amounts of wastewater are generated, and the vanadium element poses potential toxicity and environmental risks. Hydrothermal carbon (HTC), as an emerging adsorbent, has shown great potential in the field of water treatment. Using dewatered sludge as the raw material, HTC was prepared, and then modified with FeCl₃ to obtain modified biochar (MBC). Characterization analysis, including specific surface area and pore size, SEM, FT-IR, and Zeta potential, were conducted on both HTC and MBC to investigate their adsorption performance and reusability for vanadium in water. The results indicated that the modified hydrothermal carbon successfully loaded iron oxides, enhancing its adsorption capacity for anionic pollutants. The optimal pH for vanadium adsorption in wastewater by HTC and MBC was 3 and 4, respectively, with an optimal dosage of 12 g/L. MBC exhibited better resistance to anion interference compared to HTC. The adsorption of vanadium by both HTC and MBC fitted well with the Langmuir isotherm and pseudo-second-order

kinetic models. After four adsorption-desorption cycles, the adsorption rate of MBC for a vanadium solution with an initial concentration of 50 mg/L remained at 98.42%, demonstrating that MBC has great potential for the treatment of vanadium-containing wastewater.

Key words: sludge; hydrothermal carbon; modification; vanadium; adsorption

钒是一种重要的有价金属元素,被广泛应用于炼钢、有色合金、化工生产等领域;同时,钒的化合物也被广泛用作陶瓷、颜料和工业的催化剂。自2011年以来,全球钒的消费量不断增长,2019年达到了 $10.21 \times 10^4 \text{ t}^{[1]}$ 。钒矿开采和加工过程中会产生大量废水,其中钒元素具有潜在的毒性和环境风险。目前含钒废水的处理方法有沉淀、萃取、吸附等。其中,沉淀法在处理过程中会引入新的杂质;溶剂萃取法对钒的选择吸附性较差,而且对废水pH要求高;吸附法因操作简单、净化效率高、能耗低、环境友好等优点,而得到了广泛应用。制备经济、高效的吸附剂是目前以吸附法处理重金属废水的研究热点之一^[2]。

污泥水热炭作为一种新兴的吸附剂,在水处理和环境保护领域显示出了巨大的潜力^[3]。其丰富的孔隙结构和表面官能团等使其具有优异的吸附性能,可用于去除水中重金属、有机物及其他污染物。 FeCl_3 改性污泥水热炭在吸附性能、再生性能和成本效益方面表现出显著优势,因此备受研究者的关注^[4-5]。Izghri等^[6]将浸渍 FeCl_3 的两相橄榄油渣(TPOMW)制备为水热炭,并用于催化高级氧化去除亚甲蓝(MB),在 250°C 、反应时间为4 h、MB初始浓度为50 mg/L、 FeCl_3 与TPOMW比例为1.5的条件下,MB去除率约为91%。Sharififard等^[7]合成了铁纳米颗粒浸渍活性炭(IrAC)复合材料,并通过膜-孔-表面扩散模型研究了其在间歇系统中的钒吸附速率,发现外部质量传递和孔扩散是吸附过程的关键因素。Osmanova等^[8]研究了基于三价铁氧化物-氢氧化物和活性炭(Fe-AC)纳米复合材料从铝酸盐溶液中吸附钒(V)的过程,发现Fe-AC吸附剂在pH为4~4.5时吸附量显著提高,表现出作为钒(V)吸附剂的潜力。以上研究说明 FeCl_3 改性水热炭在重金属离子吸附领域有着广阔的应用前景。

为此,以脱水污泥为原料制备水热炭,再采用 FeCl_3 作为改性剂对其进行改性,将改性前后的水热炭用于含钒废水处理,探究其对钒的吸附性能,并

优化吸附条件,以实现水中钒的高效、经济去除,为含钒废水处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验原料

研究所用污泥取自重庆市某公司经板框压滤后的脱水污泥。污泥取样后于 4°C 下保存待用。经测试,污泥初始含水率为77.05%,灰分含量为48.25%,pH为7.1。

实验试剂有盐酸、氢氧化钠、氯化铁、偏钒酸铵、氯化钠、碳酸氢钠、碳酸钠、硫酸钠,均为分析纯。

1.2 改性水热炭的制备和表征

取100 g污泥,加入200 mL去离子水后倒入高压磁力搅拌反应釜中,设定反应时间为4 h、反应温度为 240°C ,磁力搅拌器转速为480 r/min。待反应结束后,自然冷却至 60°C 以下。用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤纸对反应所得物质进行抽滤,分离出的固相产物用去离子水洗涤2~3次。将固相产物置于 105°C 烘箱恒温干燥24 h。干燥后的固相产物研磨过100目筛,所得物质即为水热炭(记为HTC),保存在干燥皿中待用。

取10 g水热炭,与200 mL、0.5 mol/L的 FeCl_3 溶液混合,用1 mol/L的氢氧化钠和盐酸溶液调节pH为10。置于恒温磁力搅拌器上加热,当温度升至 75°C 后,恒温搅拌1 h。计时结束后在室温下冷却至 60°C 以下,再用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤纸抽滤,分离出的固相产物用去离子水洗涤2~3次。将固相产物置于 105°C 烘箱恒温干燥24 h,然后研磨过100目筛,所得物质即为磁改性水热炭(记为MBC)。

采用Max II型全自动多站比表面积和孔径分析仪、Sigma300型场发射电子显微镜、NicoletiS50型红外光谱仪、Zetasizer Nano型Zeta电位分析仪、粉末X射线衍射仪对HTC和MBC进行表征分析。

1.3 生物炭对水中钒的吸附

称取一定量的HTC和MBC,分别加入到25 mL浓度为50 mg/L(以钒含量计算)的偏钒酸铵溶液中,用1 mol/L盐酸和0.5 mol/L的氢氧化钠溶液调节

pH,在恒温水浴振荡器(25 °C,180 r/min)上吸附16 h后用0.45 μm滤膜过滤,测量滤液中钒的浓度,计算HTC和MBC对钒的吸附率,探究生物炭投加量、溶液初始pH、共存离子对吸附效果的影响。

1.4 等温吸附模型与吸附动力学模型

采用Langmuir和Freundlich等温吸附模型拟合25 °C下HTC和MBC的吸附实验数据,采用准一级和准二级动力学方程拟合0、10、20、60、240、480、960 min的吸附实验数据。

1.5 循环吸附实验

① 吸附:取0.30 g的HTC和MBC,分别与25 mL浓度为50 mg/L的含钒溶液混合,用1 mol/L盐酸和0.5 mol/L的氢氧化钠溶液调节pH为3,在恒温水浴振荡器(25 °C,180 r/min)上吸附16 h后用0.45 μm滤膜过滤,测量滤液中钒的浓度,计算HTC和MBC对钒的吸附率。

② 脱附再生:用去离子水反复冲洗①中HTC和MBC,直至洗出液pH=7。将收集的HTC和MBC在60 °C下恒温烘干至恒质量。取0.30 g烘干的HTC和MBC,与25 mL浓度为0.5 mol/L的Na₂CO₃溶液混合,在恒温水浴振荡器(25 °C,180 r/min)上脱附16 h后用0.45 μm滤膜过滤,再用去离子水反复冲洗HTC和MBC,直至洗出液pH=7。将收集的HTC和MBC在60 °C下恒温烘干至恒质量。

以①和②为一个周期,重复多次,探究HTC和MBC对钒的循环吸附效果。

2 结果与讨论

2.1 污泥水热炭的表征

2.1.1 比表面积和孔径

经测定,HTC和MBC的比表面积分别为21.471、7.782 m²/g,孔体积分别为0.132、0.044 m³/g,孔径分别为25.148、18.875 nm。可见,经过改性后生物炭的这几个指标均出现了不同程度的减小。这是由于改性过程生成的金属化合物负载于生物炭表面和部分孔道所致^[9]。

利用N₂吸附-脱附法测定两种生物炭的吸附-脱附等温线,结果见图1(a)。根据IUPAC吸附等温线分类,HTC和MBC的吸附等温线均为IV型等温线,存在H3型回滞环,HTC和MBC中存在介孔分布,孔径不均匀、孔结构不完整,存在平板狭缝、裂缝和楔形结构等。从吸附体积来说可以明显看到

HTC的吸附体积大于MBC,这说明HTC内部孔隙结构较发达,图1(b)中两种生物炭的孔径分布结果也证实了这一点。

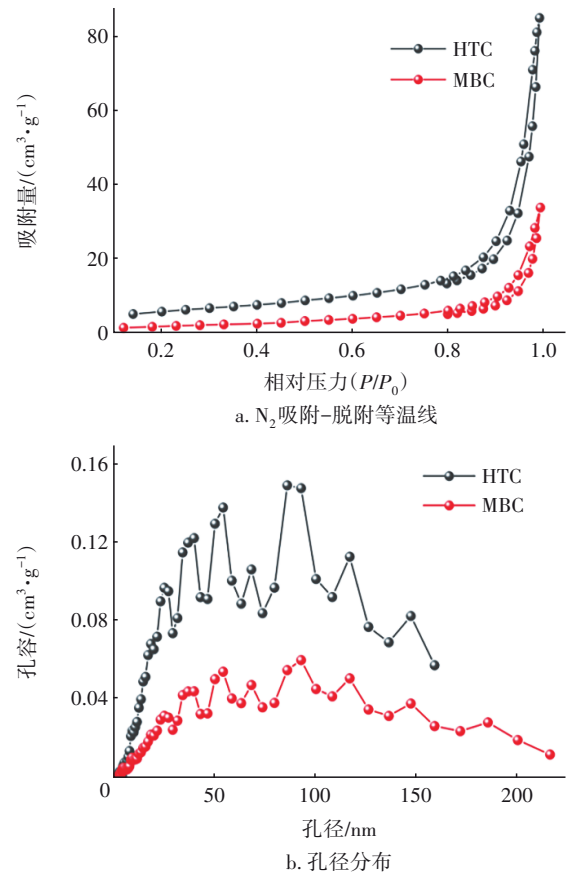
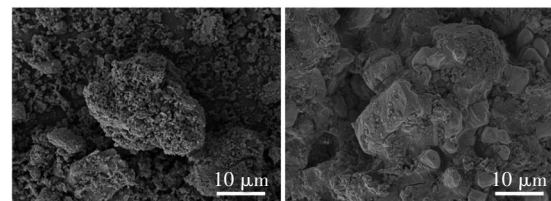


图1 HTC和MBC的N₂吸附-脱附等温线及孔径分布

Fig.1 N₂ adsorption-desorption isotherms and pore size distribution of HTC and MBC

2.1.2 SEM表征

两种生物炭的扫描电镜照片见图2。HTC表面粗糙、不规则,且具有较多的孔隙;与HTC相比,MBC表面则较为光滑,但有许多凸起,孔隙结构相对较少,这表明不规则的铁氧化物颗粒成功分散在MBC表面,并填充到了孔隙结构内部,这与比表面积和孔径分析结果相吻合。



a. HTC

b. MBC

图2 HTC和MBC的扫描电镜照片

Fig.2 SEM images of HTC and MBC

2.1.3 FT-IR 表征

HTC 和 MBC 的 FT-IR 分析结果如图 3 所示。HTC 和 MBC 中多数特征峰位置相同。在 $3\ 000\sim 3\ 690\ \text{cm}^{-1}$ 处的特征峰是由 —OH 伸缩振动导致^[10]。在 MBC 中,该特征峰强度明显增强并发生了偏移,表明其 —OH 数量有所增加。在 $2\ 925$ 、 $2\ 853\ \text{cm}^{-1}$ 处的特征峰分别是由烷基、脂肪族中甲基的 C—H 对称伸缩振动和亚甲基中的 C—H 反对称伸缩振动的特征峰^[11-12]。 $1\ 654\ \text{cm}^{-1}$ 附近是酮、酰胺基团或羧基中 —C=O 的伸缩振动峰; $1\ 630\ \text{cm}^{-1}$ 处是 C=C 振动峰^[13]; $1\ 436\ \text{cm}^{-1}$ 处的特征峰是 —CH_2 和 —OCH 相关基团的弯曲振动^[14]。 $1\ 033$ 和 $797\ \text{cm}^{-1}$ 处的特征峰主要是由脂肪烃的 C—C 或 C—O 拉伸振动,或硅酸盐的 Si—O 振动引起的^[15-16]。 $692\ \text{cm}^{-1}$ 处的特征峰主要是由 C—O—C 拉伸振动引起^[16]。MBC 在 $669\ \text{cm}^{-1}$ 处出现一个特有的特征峰,这是由于 Fe—O 拉伸振动导致的^[17],说明铁氧化物已经成功负载到 HTC 上。综上所述,采用 FeCl_3 改性可以增加水热炭的 —OH 数量,并负载 Fe—O 化合物等,从而提高了其吸附能力。

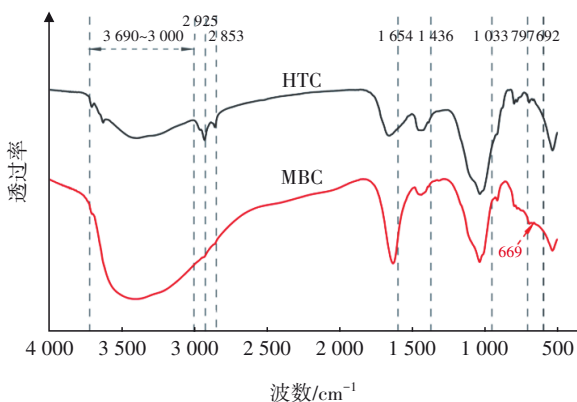


图3 HTC和MBC的红外光谱图

Fig.3 FT-IR spectra of HTC and MBC

2.1.4 Zeta 电位

当 pH 为 2、3、4、5、6、7 时,HTC 和 MBC 的 Zeta 电位分别为 4.33、0.692、-1.46、-2.09、-4.31、-6.21 mV 和 14.7、9.54、-1.59、-3.32、-8.11、-7.94 mV,即 Zeta 电位都随 pH 的升高而降低,说明它们表面的负电荷随着 pH 的提高而增多。HTC 的 pH_{zpc} 为 3.32, MBC 的 pH_{zpc} 为 3.85,说明 FeCl_3 改性可以增加水热炭表面的正电荷。当 $\text{pH} < \text{pH}_{\text{zpc}}$ 时,生物炭表面会因为发生质子化而带正电,有利于阴离子型污染物的吸附去除。

2.2 吸附效果

2.2.1 投加量的影响

不同 HTC 和 MBC 投加量下对钒的吸附率如图 4 所示。钒的吸附率会随着 HTC 和 MBC 投加量的增加而增大。当投加量由 $1\ \text{g/L}$ 增加到 $24\ \text{g/L}$ 时,HTC 对钒的吸附率由 63.03% 增大到 84.93%,MBC 对钒的吸附率由 87.93% 增大到 99.90%。这是因为,当水中钒的浓度不变时,水热炭的吸附位点会随投加量的增加而增大。当 HTC 的投加量 $\geq 16\ \text{g/L}$ 、MBC 的投加量 $\geq 12\ \text{g/L}$ 时,吸附率随投加量增加的变化幅度变小。这是因为随着投加量的增加,单位面积生物炭接触的钒更少,导致吸附量随投加量的增加呈下降趋势。综合考虑经济效益和吸附效果,在后续实验中采用 $12\ \text{g/L}$ 的投加量。

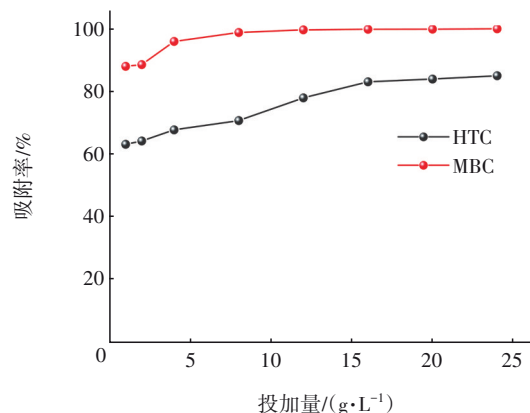


图4 投加量对 HTC 和 MBC 吸附率的影响

Fig.4 Effect of dosage on absorption efficiency of HTC and MBC

2.2.2 pH 的影响

当 pH 为 2、3、4、5、6、7 时,HTC 对钒的吸附率分别为 63.60%、77.22%、71.77%、68.37%、67.08% 和 69.83%,MBC 对钒的吸附率分别为 98.35%、99.56%、99.76%、99.17%、98.74% 和 96.67%。对于 HTC,随溶液 pH 的升高,吸附率总体上呈先升高后降低的趋势;而对于 MBC,当溶液 pH 从 2 增加到 4 时,吸附率略有提高,之后略有降低。这是因为钒溶液的 pH 影响钒酸盐的形态和生物炭表面的电荷状态。

当 $\text{pH} \leq 3$ 时,在强酸性条件下钒主要以 VO_2^+ 的形式存在,吸附剂表面发生羟基质子化反应,使得吸附剂表面官能团带正电,与溶液中 VO_2^+ 等阳离子发生静电排斥,导致吸附率偏低;而当 pH 升高时, VO_2^+ 逐步转化为 $\text{H}_3\text{V}_{10}\text{O}_{28}^{3-}$,钒离子与吸附剂表面发

生静电吸附,导致吸附率逐渐上升,当 $3 < \text{pH} < 5$ 时,溶液中的钒则主要以 $\text{H}_3\text{V}_{10}\text{O}_{28}^{3-}$ 和 $\text{HV}_{10}\text{O}_{28}^{5-}$ 形式存在,而由于 H^+ 浓度降低,吸附剂表面官能团质子化程度减弱,对于钒离子静电吸引减小,从而导致吸附率降低。而在 $\text{pH} > 5$ 时,钒主要以 $\text{HV}_{10}\text{O}_{28}^{5-}$ 和 H_2VO_4^- 形式存在,并且部分钒会形成去除效率较低的钒聚合物,随着 pH 的升高, $\text{HV}_{10}\text{O}_{28}^{5-}$ 和 H_2VO_4^- 逐渐增多,吸附剂表面质子化程度进一步减弱,静电吸附减小,从而导致吸附剂的吸附能力进一步降低。

结合2.1.4节分析可知,HTC和MHC的 pH_{zpc} 分别为3.32和3.85,当 $\text{pH} < \text{pH}_{\text{zpc}}$ 时,HTC和MBC表面官能团通过质子化反应使得其表现出正电性,随着 pH 升高,钒离子存在形态逐渐从阳离子变为阴离子,并通过静电作用被吸附剂吸附;当 $\text{pH} > \text{pH}_{\text{zpc}}$ 时,随着 H^+ 浓度降低,HTC和MBC表面官能团质子化程度不断减小,溶液中钒阴离子逐渐增多,与吸附剂的静电吸附程度不断减弱,最终导致吸附率降低。

2.2.3 共存离子的影响

在含钒废水中,常常存在其他竞争性阴离子,使吸附剂的吸附效果降低。引入含钒废水中常见的共存阴离子(Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-}),其中钒浓度为 50 mg/L ,探究其对HTC和MHC吸附钒效果的影响,结果如图5所示。可见,4种离子均会使HTC和MBC对钒的吸附量和吸附率降低。4种离子对HTC吸附率的影响程度排序为: SO_4^{2-} (46.93%) $>$ CO_3^{2-} (48.30%) $>$ Cl^- (50.07%) $>$ HCO_3^- (55.17%)。其中二价阴离子对HTC吸附钒的竞争作用强于一价阴离子,说明阴离子所带负电荷越多,对吸附的竞争性越强。此外, CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的水解会改变溶液中 H^+ 浓度,影响钒的存在形态,从而对吸附效果造成不同程度的影响。

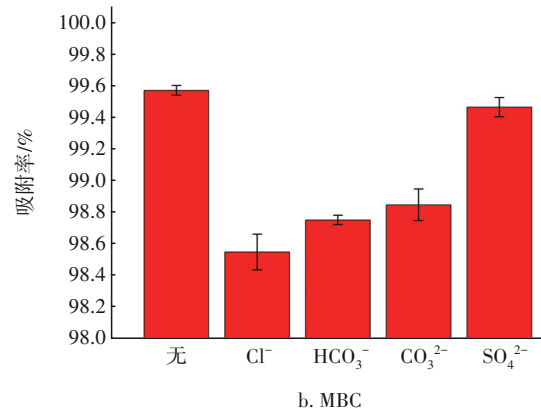
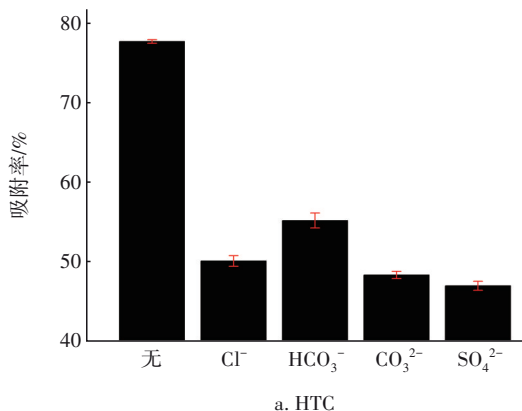


图5 共存离子对HTC和MBC吸附效果的影响

Fig.5 Effect of coexisting ions on absorption efficiency of HTC and MBC

由图5(b)可知,4种离子对MBC吸附率影响程度排序为: Cl^- (98.55%) $>$ HCO_3^- (98.75%) $>$ CO_3^{2-} (98.85%) $>$ SO_4^{2-} (99.47%)。这是因为MBC的孔隙更小,而 Cl^- 和 HCO_3^- 具有相对较小的水合离子半径,更容易进入吸附剂的孔隙中占据吸附位点,降低MBC的吸附效果。但就整体而言,添加共存离子后MBC对钒的吸附率均能保持在98%以上,说明这4种共存阴离子对MBC吸附钒的效果影响较小,且MBC抗阴离子干扰性能明显优于HTC。

2.3 吸附等温线

HTC和MBC的吸附量随着初始钒溶液浓度的增加而增加,且Langmuir和Freundlich方程的拟合程度相关性均较好(见表1),但Langmuir相关系数大于Freundlich相关系数,即Langmuir方程与实验数据的拟合度优于Freundlich方程,说明HTC和MBC对钒的吸附过程以单分子层吸附为主,同时又有不规则的多层吸附。

表1 Langmuir和Freundlich方程拟合参数

Tab.1 Fitting parameters of Langmuir and Freundlich equations

项目	Langmuir方程			Freundlich方程		
	$q_m/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	K_L	R^2	K_F	$1/n$	R^2
HTC	25.320	0.010	0.994	0.326	0.859	0.991
MBC	9.644	1.479	0.970	5.476	0.352	0.959

2.4 吸附动力学

拟合结果显示,随着吸附时间的增加,HTC和MBC对钒的吸附量不断提高。HTC在吸附4h后,基本达到吸附平衡,16h后的吸附率为71.88%;MBC在吸附8h后,基本达到吸附平衡,16h后的吸

附率为 99.24%。HTC 和 MBC 吸附钒的相关动力学参数如表 2 所示。可知两种动力学模型拟合的相关系数 $R^2 > 0.99$, 拟合效果较好, 这表明化学吸附和物理吸附都起着重要作用。严格来说, 准二级动力学方程拟合的相关系数更大, 表明 HTC 和 MBC 对钒的吸附机制主要是化学吸附, 包含离子交换、络合配位、氧化还原等途径。

表 2 吸附动力学拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of adsorption kinetics

项目	准一级动力学方程			准二级动力学方程		
	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	K_1/min^{-1}	R^2	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	$K_2/(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$	R^2
HTC	3.08	7.487	0.992	3.16	5.050	0.998
MBC	4.08	16.590	0.998	4.12	18.822	0.999

2.5 循环吸附实验

经过 4 次循环吸附后, HTC 对钒的吸附率由 76.20% 降至 58.23%, 而 MBC 对钒的吸附率仍保持在 98.42%, 说明 MBC 是一种经济高效的含钒废水吸附剂。随着循环利用次数的增加, HTC 对钒的吸附率大幅下降, 而 MBC 对钒的吸附率降幅较小。一方面, 在吸附-脱附再生过程中, HTC 和 MBC 表面的孔隙结构被破坏。另一方面, 吸附过程中生物炭表面的部分官能团会发生氧化还原反应, 通过比较吸附前后 HTC 和 MBC 的 XRD 谱图(见图 6)可以看出, 吸附后 HTC 和 MBC 上出现了 VO_2 、 V_2O_3 、 $VOOH$ 等物质。这是因为附着在吸附位点的钒(V)能与 HTC 和 MBC 上相邻官能团发生氧化还原反应。例如吸附位点上的钒(V)部分被还原为钒(IV), 同时 HTC 和 MBC 表面的伯羟基被氧化为羧基, 并且部分官能团无法在脱附再生时再生, 从而导致吸附能力逐渐下降。

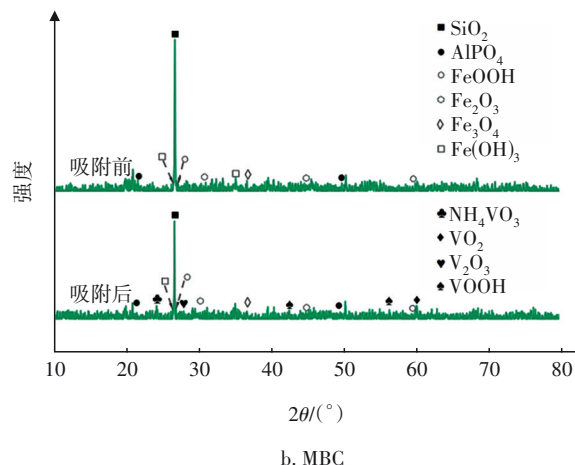
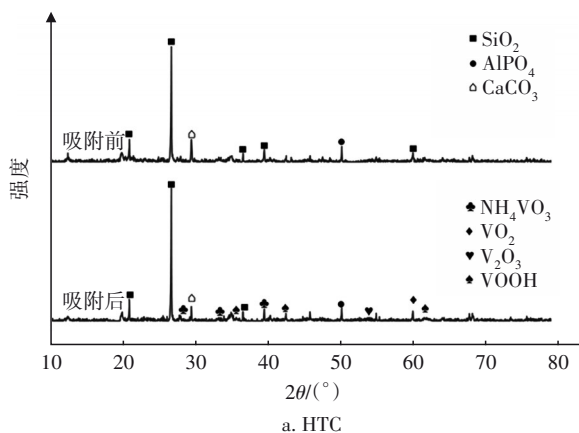


图 6 HTC 和 MBC 吸附前后的 XRD 谱图

Fig.6 XRD diagrams of HTC and MBC before and after adsorption

3 结论

- ① 污泥水热炭经 $FeCl_3$ 改性后其理化性质发生改变, 对阴离子型污染物的吸附能力提高。
- ② HTC 和 MBC 吸附钒的最佳 pH 分别为 3 和 4。综合考虑经济效益和吸附效果, 最佳投加量为 12 g/L。MBC 抗阴离子干扰性能明显优于 HTC。
- ③ HTC 和 MBC 达到吸附平衡的吸附时间分别为 4 h 和 8 h, 且两者对钒的吸附符合 Langmuir 方程和准二级动力学方程。
- ④ 随着循环利用次数的增加, HTC 和 MBC 对钒的吸附量和吸附率均逐渐减小。经过 4 次循环吸附后, MBC 对 50 mg/L 钒溶液的吸附率仍然可达 98.42%, 这表明 MBC 在含钒废水处理中具有较大的应用潜力。

参考文献:

[1] LEE J C, KURNIAWAN, KIM E Y, *et al.* A review on the metallurgical recycling of vanadium from slags: towards a sustainable vanadium production [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 343-364.

[2] 单丹娜. 碳基纳米材料吸附水中药物类污染物的研究进展[J]. 中国给水排水, 2024, 40(14): 42-50. SHAN Danna. Advances in adsorption of typical pharmaceuticals on carbonaceous nano-materials in water [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(14): 42-50 (in Chinese).

[3] LIU H, BASAR I A, NZIHOU A, *et al.* Hydrochar derived from municipal sludge through hydrothermal

- processing: a critical review on its formation, characterization, and valorization [J]. *Water Research*, 2021, 199:117186.
- [4] NGUYEN L H, VAN H T, CHU T H H, *et al.* Paper waste sludge-derived hydrochar modified by iron (III) chloride for enhancement of ammonium adsorption: an adsorption mechanism study [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 21:101223.
- [5] WANG F, GUO C, LIU X, *et al.* Revealing carbon-iron interaction characteristics in sludge-derived hydrochars under different hydrothermal conditions [J]. *Chemosphere*, 2022, 300:134572.
- [6] IZGHRI Z, ENAIME G, LOUARRAT M, *et al.* Novel catalyst from two-phase olive mill wastes using hydrothermal carbonisation for the removal of methylene blue by heterogeneous Fenton-like oxidation [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2020, 100(8):854-872.
- [7] SHARIFIFARD H, SOLEIMANI M. Modeling and experimental study of vanadium adsorption by iron-nanoparticle-impregnated activated carbon [J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2017, 43(4):2501-2516.
- [8] OSMANOVA A K, GEIDAROV A A, DZHABBAROVA Z A, *et al.* Vanadium (V) adsorption from aluminate solutions by an Fe-AC nanocomposite [J]. *Russian Metallurgy*, 2022(3):211-216.
- [9] 王润之, 何强, 郭程晨, 等. 稻秆生物炭负载Fe/Ca对化粪池中磷的吸附特性[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(3):205-214.
WANG Runzhi, HE Qiang, GUO Chengchen, *et al.* Adsorption capacity of phosphorus in septic tanks by rice straw biochar loaded with Fe/Ca [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(3):205-214 (in Chinese).
- [10] LIU S B, TAN X F, LIU Y G, *et al.* Production of biochars from Ca impregnated ramie biomass (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) and their phosphate removal potential [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(7):5871-5880.
- [11] 常胜, 张金山, 柳召刚, 等. AOPs在混合型稀土精矿降磷再精选中的促进作用[J]. *中国稀土学报*, 2023, 41(2):320-330.
- CHANG Sheng, ZHANG Jinshan, LIU Zhaogang, *et al.* The role of AOPs in promoting the beneficiation of mixed rare earth ore by phosphorus reduction [J]. *Journal of Rare Earths*, 2023, 41(2):320-330 (in Chinese).
- [12] CHEN B, CHEN Z, LV S. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2):716-723.
- [13] ZHU X, YANG X, LI W, *et al.* Efficient removal and recovery of vanadium (IV and V) from high acidic waste water with resins D851 and D201: a comparative study [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49:103153.
- [14] 任海伟, 邢雪晔, 周启芬, 等. 中药渣制备微晶纤维素工艺优化及其结构表征[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1):196-204.
REN Haiwei, XING Xueye, ZHOU Qifen, *et al.* Optimization of the process for preparing microcrystalline cellulose from traditional Chinese medicine residues and its structural characterization [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(1):196-204 (in Chinese).
- [15] CHEN L, CHEN X L, ZHOU C H, *et al.* Environmental-friendly montmorillonite-biochar composites: facile production and tunable adsorption-release of ammonium and phosphate [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156:648-659.
- [16] YU Y, LIU M, YANG J. Characteristics of vanadium adsorption on and desorption from humic acid [J]. *Chemistry and Ecology*, 2018, 34(6):548-564.
- [17] WEN Z, ZHANG Y, GUO S, *et al.* Facile template-free fabrication of iron manganese bimetal oxides nanospheres with excellent capability for heavy metals removal [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 486:211-218.
-
- 作者简介:**白华清(1975-),男,安徽宣城人,本科,正高级工程师,注册咨询(投资)工程师、注册公用设备(给水排水)工程师,从事市政给排水工程、生态环境保护工作。
E-mail:499695851@qq.com
收稿日期:2024-08-21
修回日期:2024-12-20

(编辑:李德强)