

柚子皮生物炭负载 Mg/Al-LDH 对废水中 U(VI) 的吸附性能研究

王灵智¹, 谢水波^{1,2*}, 魏 柏¹, 王晨旭¹, 郭 宇¹, 刘迎九^{1,2}, 李绪忠³

(1. 南华大学土木工程学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 南华大学污染控制与资源化技术湖南省高校重点实验室, 湖南 衡阳 421001;

3. 长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019)

摘要:采用液相共沉淀法制备了柚子皮生物炭负载镁铝层状双氢氧化物复合材料 BC@Mg/Al-LDH, 并将其用于废水中 U(VI) 的去除。探究了 pH、温度、吸附时间、初始质量浓度、干扰离子对 BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI) 的影响。结果表明, 在 U(VI) 初始质量浓度为 10 mg/L、pH=5、温度为 303 K、吸附时间为 5 min 时, BC@Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的吸附量达到 96 mg/g。吸附过程符合准二级动力学模型和 Freundlich 等温模型。FT-IR 和 XPS 分析发现主要吸附机理为表面羟基络合和层间碳酸盐共沉淀。干扰离子试验表明, Ca²⁺、Fe³⁺、Mg²⁺、Cu²⁺ 等对吸附效果无影响。BC@Mg/Al-LDH 经 5 次再生循环利用后吸附率仍可接近 80%。

关键词:生物炭; 层状双氢氧化物; 铀; 吸附;

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)01-0163-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.01.029

Adsorption performance of U(VI) in wastewater by pomelo peel-based biochar loaded Mg/Al-LDH

WANG Ling-zhi¹, XIE Shui-bo^{1,2*}, WEI Bai¹, WANG Chen-xu¹, GUO Yu¹,
LIU Ying-jiu^{1,2}, LI Xu-zhong³

(1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. Hunan Provincial Universities' Key Laboratory of Pollution Control and Resource Technology, University of South China, Hengyang 421001, China; 3. CINF Engineering Corporation Limited, Changsha 410019, China)

Abstract: Pomelo peel-based biochar loaded MgAl layered double hydroxides composite (BC@Mg/Al-LDH) is synthesized via liquid phase co-precipitation method, and applied to remove U(VI) from wastewater. The effects of pH, temperature, reaction time, initial concentration and interfering ions on the adsorption of U(VI) by BC@Mg/Al-LDH are investigated. The consequence indicates that the adsorption amount of BC@Mg/Al-LDH for U(VI) has reached 96 mg·g⁻¹ in 5 minutes when the initial mass concentration of U(VI) is 10 mg·L⁻¹, pH=5, the temperature is 303 K, and the dosage of BC@Mg/Al-LDH is 0.1 g·L⁻¹. The adsorption process can be well described by pseudo-second-order and Freundlich models. It is shown through FT-IR and XPS analysis that main adsorption mechanisms include surface hydroxyl complexation and interlayer carbonate coprecipitation. Ca²⁺, Fe³⁺, Mg²⁺, Cu²⁺ and other interfering ions have no significant effect on the adsorption. The adsorption rate can still be closed to 80% after BC@Mg/Al-LDH has experienced for 5 cycles of regeneration.

Key words: biochar; layered double hydroxides; U(VI); adsorption

铀是核工业中主要的放射性污染物,其迁移率高、半衰期长,能长期稳定地存在于土壤和水体中,并通过生物链在生物内累积产生潜在毒性^[1]。因此,去除放射性元素铀对于环境保护和人体健康至关重要。而吸附技术具有操作便捷、成本低廉、处理效率高、选择性好等优点,是从溶液中去掉放射性元素最实用的方法之一^[2]。

层状双氢氧化物(LDH)是由正电荷金属氢氧化物堆叠成上下层的二维纳米结构材料^[3]。由于

其层状结构均匀分布、孔隙率高、比表面积和离子交换容量大,目前其作为高效吸附剂的应用备受关注^[4-5]。然而,单独的 LDH 作为吸附剂,其压缩多层堆叠结构会降低去除多种污染物的效果,又由于金属离子和 M—O 金属氧键的性质,LDH 表面带正电,限制了其去除重金属离子的能力^[6-7]。而将 LDH 支撑或分散到高比表面积和低成本的多孔基底上可提高其吸附性能。生物炭是由生物质在缺氧条件下热解得到的产物,成本低、无毒无害、结构特

收稿日期:2022-01-22;修回日期:2022-11-13

基金项目:湖南省自然科学基金(2021JJ30579)

作者简介:王灵智(1997-),男,硕士研究生,主要从事水污染处理技术研究,1113190062@qq.com;谢水波(1964-),男,博士,教授,主要从事水处理理论与技术、环境模拟与污染控制研究,xiesbmr@263.net。

性良好等优点显示出其可被用作吸附剂基底材料的潜力^[8-9]。在生物炭的原料来源选择上,采用废弃柚子皮原料易得,经过充分热解后稳定性提高,其大量孔隙和高比表面积成为 Mg/Al-LDH 的合适载体。

笔者采用液相共沉淀法制备了以柚子皮生物炭(BC)为基底负载 MgAl-LDH 的复合材料(BC@Mg/Al-LDH),并将其用于废水中 U(VI) 的去,研究其对 U(VI) 的吸附性能和吸附机理。

1 试验材料及方法

1.1 主要试剂、材料和仪器

六水合氯化镁、六水合氯化铝、氢氧化钠和无水碳酸钠,均为分析纯。所有溶液均用去离子水配制。柚子皮购于衡阳市红湘农贸市场,去离子水清洗干燥后粉碎过 100 目筛。

DF205 鼓风干燥箱;IS-RDD3 恒温振荡器;Unic-2000 紫外分光光度计;QUANTA FEG 450 型扫描电子显微镜;X-Max 能谱仪;Bruker D8 X-衍射仪;Nicolet-460 红外光谱仪;Escalab 250 Xi 型 X 射线光电子能谱仪。

1.2 BC@Mg/Al-LDH 复合材料的制备

将装有柚子皮粉的坩埚放入马弗炉中,升温速率为 2℃/min,550℃ 持续 2 h,制得柚子皮生物炭用去离子水清洗至中性备用(标记为 BC)。

采用液相共沉淀法合成 BC@Mg/Al-LDH。首先将 MgCl₂·6H₂O 和 AlCl₃·6H₂O 按摩尔比 2:1 溶于 100 mL 的去离子水,加入 1 g 生物炭,剧烈搅拌。然后用 NaOH 和 Na₂CO₃ 的混合溶液滴定,使 pH 保持在 10 左右,温度控制在 40℃ 上下,70℃ 结晶 18 h,用去离子水洗涤,在 60℃ 的鼓风干燥箱烘干。

1.3 吸附试验

所有吸附试验的吸附剂投加量均为 0.1 g/L,反应温度为 303 K,U(VI) 的初始质量浓度为 10 mg/L,取 50 mL U(VI) 溶液倒入 150 mL 容量瓶,加入吸附剂,并采用 0.1 mol/L 的 NaOH、HCl 调节溶液 pH,在 200 r/min 的恒温振荡反应器下反应 2 h。达到吸附饱和平衡后,离心取上清液,测量 U(VI) 的浓度。吸附试验在一组平行实验中进行。U(VI) 的去除效率 μ (%) 及平衡时吸附量 q_e 的计算式分别为:

$$\mu(\%) = [(c_0 - c_e)/c_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$q_e = (c_0 - c_e) \times (v/m) \quad (2)$$

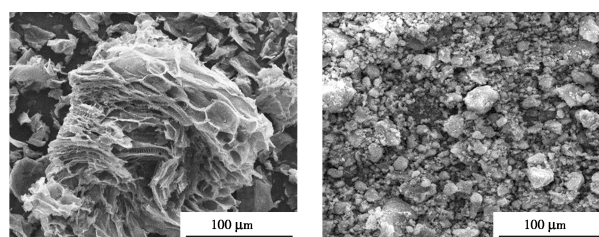
其中: C_0 为 U(VI) 的初始质量浓度,mg/L; C_e 为反应达平衡时 U(VI) 的质量浓度,mg/L; V 为溶液体积,mL; m 为吸附剂投加质量,mg。

2 结果与讨论

2.1 材料表征

2.1.1 SEM 和 EDS 分析

柚子皮生物炭和 BC@Mg/Al-LDH 的 SEM 图及负载前后生物炭的 EDS 能谱图如图 1 所示。从图 1(a) 中可以看出,柚子皮生物炭表面存在大量孔隙和沟壑状结构,能够为 LDH 提供理想负载位点。而从图 1(b) 中可以看出,生物炭表面被颗粒状 LDH 纳米材料所覆盖,表明 MgAl 层状双氢氧化物成功在生物炭上沉淀并且有效的分散开来,减轻了 MgAl-LDH 的团聚效应。从图 1(c)、图 1(d) 中可以看出,吸附前的 BC@Mg/Al-LDH 由 C、O、Mg、Al 元素构成,并且 Mg 与 Al 的质量比接近 2:1,这与材料制备时的六水合氯化镁和六水合氯化铝的投加量比例一致。吸附后,O:C 质量比相对吸附前下降,且 U 元素出现在表面,表明含氧基团是吸附 U(VI) 主要官能团。

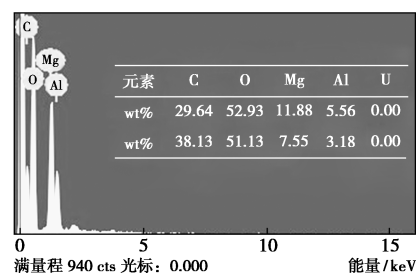


(a) 柚子皮生物炭的

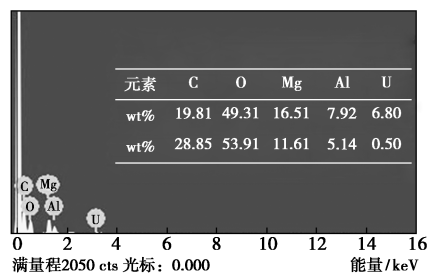
(b) BC@Mg/Al-LDH 的

SEM 图

SEM 图



(c) 吸附前 BC@Mg/Al-LDH 的 EDS 图



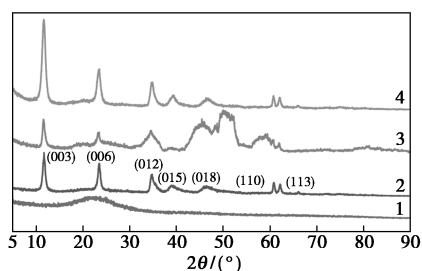
(d) 吸附后 BC@Mg/Al-LDH 的 EDS 图

图 1 柚子皮生物炭和 BC@Mg/Al-LDH 的 SEM 图及负载前后生物炭的 EDS 能谱图

2.1.2 XRD 分析

柚子皮生物炭、BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI)

前后和 MgAl-LDH 的 XRD 图谱如图 2 所示。从图 2 中可以看出,柚子皮生物炭在 $2\theta=22^\circ$ 存在明显的特征峰,这主要是热解生物炭产生的^[10]。BC@Mg/Al-LDH 与 MgAl-LDH (PDF No.51-1525) 出现了重复低强度的 (003)、(006)、(012)、(015)、(018)、(110) 和 (113) 特征峰,表明一定量的 MgAl-LDH 成功负载在柚子皮生物炭表面,这与 SEM 表征的结果一致^[11]。吸附后 BC@Mg/Al-LDH 的 XRD 图谱与吸附前相似,表明生物炭表面的 MgAl-LDH 层状结构没有被破坏,材料的稳定性高。

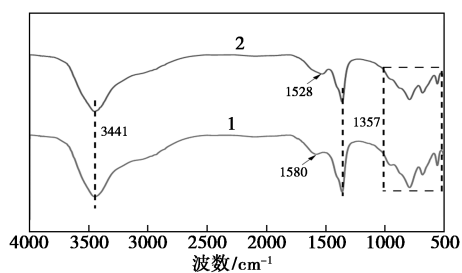


1—柚子皮生物炭;2—吸附前 BC@Mg/Al-LDH;
3—吸附后 BC@Mg/Al-LDH;4—MgAl-LDH

图 2 柚子皮生物炭、BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI)前后和 MgAl-LDH 的 XRD 图

2.1.3 FT-IR 分析

BC@Mg/Al-LDH 吸附前后的 FT-IR 图谱如图 3 所示。由图 3 中可以看出,吸附前 3444 cm^{-1} 处高强度且宽大的峰是羟基的伸缩振动峰,吸附后轻微地向低波数移动且强度减弱范围变小,这归属于羟基与 U(VI)之间的相互作用^[12-13]。 1358 cm^{-1} 处和 1580 cm^{-1} 的吸收峰是 MgAl-LDH 夹层间 CO_3^{2-} 的特征不对称振动峰,吸附后在 1528 cm^{-1} 产生了新的振动,这是碳酸盐和 U(VI)之间的相互作用^[14-16]。在 $400\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ 的低频振动带是金属氧键(M—O, O—M—O),表明 MgAl-LDH 层中含氧阳离子的平移运动^[17]。FT-IR 的分析结果进一步



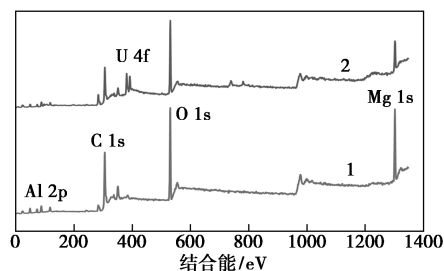
1—吸附前;2—吸附后

图 3 BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI)前后的 FT-IR 谱图

解释了 EDS 分析中 O:C 质量比下降的原因是含氧官能团与 U(VI)的相互作用。

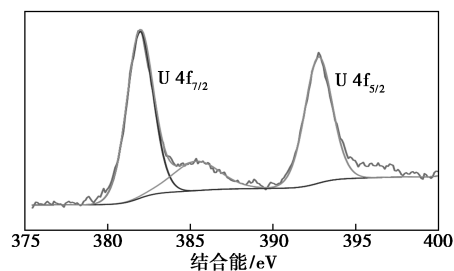
2.1.4 XPS 分析

BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI)前后的 XPS 图谱如图 4 所示。由图 4(a)中可以看出,吸附 U(VI)后 BC@Mg/Al-LDH 的 XPS 图谱出现了 U 4f 的特征峰。从图 4(b)中可以看出,U 4f 分别由 381.98 eV 的 U 4f_{7/2} 峰和 392.77 eV 的 U 4f_{5/2} 峰组成,表明含氧官能团与 U(VI)的相互作用不涉及还原反应^[18]。U 4f_{7/2} 又分为 Mg/Al—O—U (381.98 eV) 和 O=C—O—U (385.29 eV) 2 个峰,结果表明 BC@Mg/Al-LDH 的表面羟基和 LDH 夹层间碳酸根离子与 U(VI)发生了络合反应,这与 FT-IR 分析结果相同。从图 4(c)中可以看出,吸附前 O 1s 是 M—O/O—H (531.37 eV , 峰 1) 和 H₂O/C—O (531.81 eV , 峰 2)

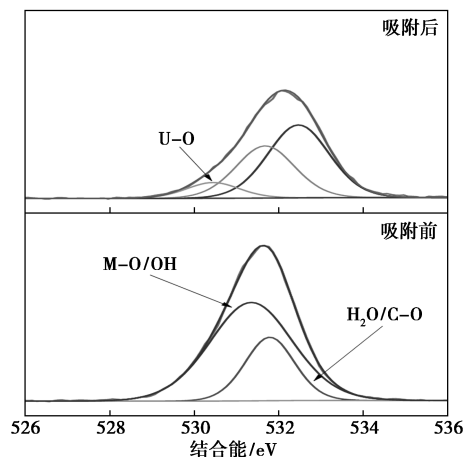


1—吸附前;2—吸附后

(a) 全扫描光谱



(b) U4f 的高分辨率光谱



(c) O1s 的高分辨率光谱

图 4 BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI)前后 XPS 图谱

2 个相互重叠的特征峰组成^[19]。吸附后, U-O 峰出现在 530.46 eV。峰 1 所占比例呈下降趋势, 从 72.13% 下降到 53.61%, 这显示了 BC@Mg/Al-LDH 表面羟基含量的减少, 说明羟基是参与反应的关键官能团^[12,20]。因此, BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI) 的反应机理主要是表面羟基和层间碳酸根离子的络合作用^[21]。

2.2 BC@Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的吸附性能

2.2.1 pH 对吸附容量的影响

在投加质量浓度为 0.1 g/L、吸附时间为 120 min、初始 U(VI) 质量浓度为 10 mg/L、温度为 303 K 时, 柚子皮生物炭和 BC@Mg/Al-LDH 在 pH 为 2~8 下对 U(VI) 的吸附容量如图 5 所示。由图 5 中可以看出, 当 pH 为 2~3 时, 材料严重质子化, 大量的 H⁺ 与 UO₂²⁺ 竞争吸附位点, 从而导致与 UO₂²⁺ 的配位亲和力丧失, 吸附容量低^[22]; 当 pH 从 3 增加到 5 时, 2 种材料对 U(VI) 的吸附容量都急剧增加, 在 pH=5 时达到最大吸附容量, BC@Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的吸附容量为 98 mg/g, 高于柚子皮生物炭对 U(VI) 的吸附容量 88 mg/g。当 pH 增大后, UO₂²⁺ 更易与水溶液中 OH⁻ 结合形成 (UO₂)₂(OH)₂²⁺、(UO₂)₃(OH)₂⁵⁺ 等水合离子, 导致 U(VI) 的吸附容量反而下降^[23]。因此后续试验初始溶液 pH 均采用 5.0。

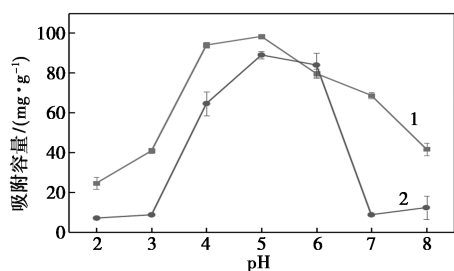


图 5 pH 对 BC 及 BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI) 的影响

2.2.2 干扰离子对吸附容量的影响

核工业排放的酸性铀废水中混合着各种金属离子和阴离子。不同浓度干扰离子对 BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI) 的影响如图 6 所示。由图 6 中可以看出, 阴离子对吸附无明显影响, Ca²⁺、Mg²⁺ 对吸附有轻微的抑制作用, Cu²⁺ 存在时, 去除率显著降低, 主要是由于相比于阴离子, 二价阳离子具有更小的离子半径和较强的正电荷。而 Fe³⁺ 反而促进了吸附过程, 这是由于水解产物与 U(VI) 络合, 提高了

去除率。结果表明, BC@Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的吸附在低质量浓度的干扰离子下具有良好的选择性。

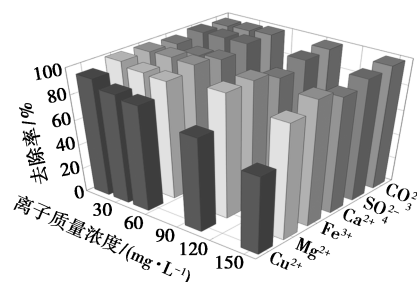
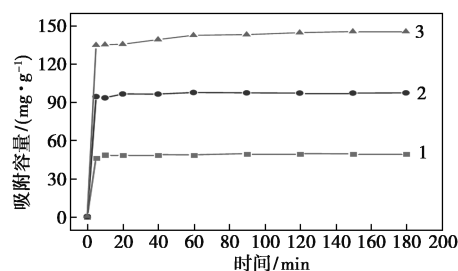


图 6 不同质量浓度干扰离子对 BC@Mg/Al-LDH 吸附 U(VI) 的影响

2.2.3 吸附时间对吸附容量的影响

在 pH = 5、温度为 303 K、投加质量浓度为 0.1 g/L、U(VI) 的初始质量浓度为 5~15 mg/L 的条件下, BC@Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的吸附容量随时间的变化情况如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 低质量浓度 (5~10 mg/L) 下, 5 min 基本达到吸附平衡; 高质量浓度 (15 mg/L) 下在 60 min 达到吸附平衡。对不同质量浓度 U(VI) 的最大吸附容量分别为 48.52、96.28、142.37 mg/g。

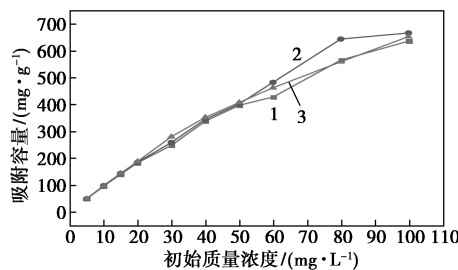


1—5 mg/L; 2—10 mg/L; 3—15 mg/L

图 7 吸附时间对吸附容量的影响

2.2.4 U(VI) 的初始质量浓度对吸附容量的影响

在 pH = 5、投加质量浓度为 0.1 g/L 条件下, U(VI) 初始质量浓度对 U(VI) 的吸附容量的影响如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 随着 U(VI) 初始质量浓度的增加, BC@Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的吸附



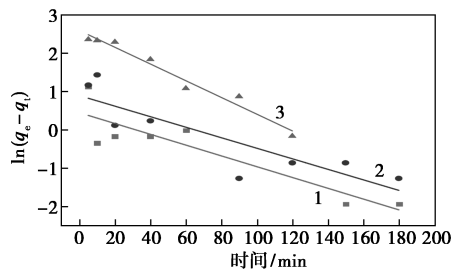
1—293 K; 2—303 K; 3—313 K

图 8 U(VI) 的初始质量浓度对吸附容量的影响

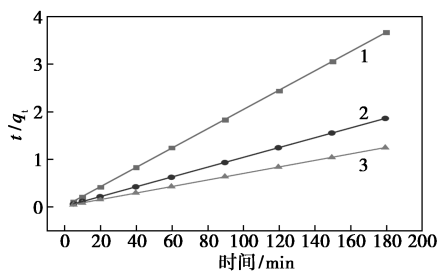
量也快速增加,在 U(VI) 质量浓度为 100 mg/L 时最大吸附容量达到 665.56 mg/g。主要是由于吸附前期吸附剂表面存在大量吸附位点,对 U(VI) 的吸附容量随质量浓度增加而增加。随着 U(VI) 初始质量浓度越来越大,吸附点位都被铀离子占据结合,吸附容量缓慢增大,最后趋向于平衡^[24]。

2.2.5 吸附动力学

采用准一级动力学和准二级动力学模型对吸附过程进行了拟合,结果如图 9、表 1 所示。从表 1 中可以看出,相关系数 R^2 表明二阶模型是描述吸附动力学的最佳模型,BC@ Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的去除主要是以化学吸附为主导^[25]。



(a) 准一级动力学模型



(b) 准二级动力学模型

1—5 mg/L; 2—10 mg/L; 3—15 mg/L

图 9 准一级和准二级动力学模型拟合曲线

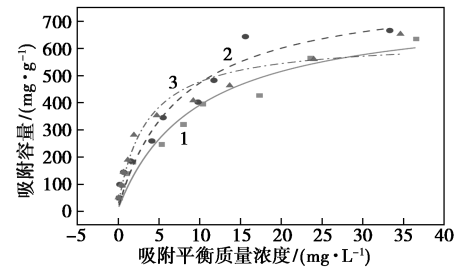
表 1 准一级和准二级模型的拟合参数

C_0/q_e ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	q_e (实验)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	准一级吸附 动力学模型			准二级吸附 动力学模型		
		k_1	q_e (计算)	R^2	k_2	q_e	R^2
5	49.36	0.014	1.552	0.777	0.020	49.35	1.000
10	97.40	0.014	2.431	0.722	0.010	97.18	1.000
15	145.31	0.022	13.402	0.963	0.007	146.20	1.000

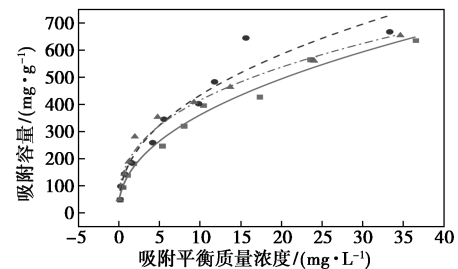
2.2.6 吸附等温线

采用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温模型进行拟合,结果如图 10 所示,其拟合参数如表 2 所示。从图 10、表 2 中可以看出,在不同温度下 Freundlich 吸附模型的相关系数 R^2 都高于 Langmuir 吸附模型。因此,BC@ Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的吸附主要

以多层吸附为主,并且 K_L 的数值都介于 0~1 之间,说明吸附比较容易进行^[26]。BC@ Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的吸附在 Langmuir 模型理论下最大吸附容量为 828.2 mg/g。



(a) Langmuir



(b) Freundlich

1—293 K; 2—303 K; 3—313 K

图 10 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合曲线

表 2 等温吸附模型拟合参数

温度/ ℃	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	$q_{\max}/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$K_L/$ ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)	R^2	$K_F/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	n	R^2
20	759.273	0.104	0.944	125.829	0.455	0.986
30	828.183	0.131	0.936	159.376	0.432	0.943
40	634.422	0.297	0.955	175.109	0.373	0.977

2.3 BC@Mg/Al-LDH 的可重复利用性

将吸附 U(VI) 后的混合液过滤分离,沉淀物加入 HCl(50 mL, 0.1 mol/L) 洗脱剂,振荡和解吸 2 h。用蒸馏水洗 3 次并在 65℃ 下干燥 12 h 后,获得再生的 BC@ Mg/Al-LDH 用于下一个吸附循环,BC@ Mg/Al-LDH 的循环再生实验结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,随着循环次数的增加,去除率逐渐降低约 20%,经过 5 次循环后,BC@ Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的吸附率仍接近 80%。表明 BC@ Mg/Al-LDH 的重复利用性高。

表 3 BC@Mg/Al-LDH 的循环再生实验

次数	1	2	3	4	5
吸附率/%	98.55	95.62	88.12	82.33	79.65

3 结论

(1) 采用液相共沉淀法制备了 BC@ Mg/Al-LDH 复合材料。SEM 分析表明,生物炭的引入良好地分散了 MgAl-LDH,弥补了纯 LDH 易团聚的缺陷。EDS 分析发现,Mg:Al 元素比例接近于 2:1,O:C 元素比大于 1,表明成功制备了含氧活性官能团丰富的 BC@ Mg/Al-LDH 复合材料。

(2) 在 pH = 5、BC@ Mg/Al-LDH 质量浓度为 0.1 g/L、吸附时间为 120 min、U(VI) 初始质量浓度为 100 mg/L、温度为 303 K 时,最大吸附量为 665.56 mg/g。在低质量浓度(10~30 mg/L) Ca²⁺、Fe³⁺、Mg²⁺、Cu²⁺ 干扰离子存在下,BC@ Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的去除率也超过 90%。进行 5 次连续吸附解吸循环试验,吸附率仍接近 80%,可重复用于对 U(VI) 的吸附。

(3) BC@ Mg/Al-LDH 吸附 U(VI) 的过程符合准二级动力学模型,Langmuir 最大理论吸附容量为 828.2 mg/g, Freundlich 等温线模型对 BC@ Mg/Al-LDH 吸附 U(VI) 的拟合度更接近。BC@ Mg/Al-LDH 对 U(VI) 的主要吸附机理为表面羟基和层间碳酸根离子与 U(VI) 络合形成共沉淀。

(4) 以柚子皮生物炭为基底负载 MgAl-LDH 制备了 BC@ Mg/Al-LDH 复合材料,相对比其他金属炭基复合材料,BC@ Mg/Al-LDH 具有高速吸附(低质量浓度下 5 min 内达到吸附平衡)和高效吸附($Q_{\max} = 665.56$ mg/L)特点。

参考文献

- [1] 王宁,庞宏伟,于淑君,等.层状双金属氢氧化物及复合材料对放射性元素铀的吸附及机理研究[J].化学学报,2019,77(2):143-152.
- [2] 赵悦,赵春雷,王锐,等.吸附分离水体中铀的吸附材料研究新进展[J].精细化工,2018,35(4):549-555.
- [3] 肖江,周书葵,刘星,等.层状双金属氢氧化物及其复合材料去除水体中重金属离子的研究进展[J].材料导报,2020,34(5):5023-5031.
- [4] Dos Santos G E D S, Lins P V D S, Oliveira L M T D M, et al. Layered double hydroxides/biochar composites as adsorbents for water remediation applications: Recent trends and perspectives [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124755.
- [5] 郭丽君,梁颖,张艳荣,等.焙烧态 MCNOs/LDH 复合材料的制备及其对水体 F⁻ 去除的研究[J].现代化工,2020,40(12):141-146.
- [6] Huang D, Liu C, Zhang C, et al. Cr(VI) removal from aqueous solution using biochar modified with Mg/Al-layered double hydroxide intercalated with ethylenediaminetetraacetic acid [J]. Bioresour Technol, 2019, 276: 127-132.
- [7] Jia Y, Zhang Y, Fu J, et al. A novel magnetic biochar/MgFe-layered double hydroxides composite removing Pb²⁺ from aqueous solution: Isotherms, kinetics and thermodynamics [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 567: 278-287.
- [8] 刁卓凡,庞宏伟,唐昊,等.磁性竹荪生物炭材料对水中铀的高效去除与机理[J].科学通报,2020,65(34):3954-3964.
- [9] 张杰,贺敏婕,陈可欣,等.马缨丹生物炭对水中 Pb(II) 污染的吸附研究[J].现代化工,2021,41(7):122-127.
- [10] 符剑刚,贾阳,李政,等.磁性生物炭负载 Mg-Fe 水滑石的制备及其吸附水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的性能[J].化工环保,2019,39(5):574-580.
- [11] Tu J, Peng X, Wang S, et al. Effective capture of aqueous uranium from saline lake with magnesium-based binary and ternary layered double hydroxides [J]. Sci Total Environ, 2019, 677(10):556-563.
- [12] Song S, Yin L, Wang X X, et al. Interaction of U(VI) with ternary layered double hydroxides by combined batch experiments and spectroscopy study [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 338: 579-590.
- [13] Goh K H, Lim T T, Banas A, et al. Sorption characteristics and mechanisms of oxyanions and oxyhalides having different molecular properties on Mg/Al layered double hydroxide nanoparticles [J]. J Hazard Mater, 2010, 179(1-3):818-27.
- [14] Wang X X, Yu S Q, Wu Y H, et al. The synergistic elimination of uranium(VI) species from aqueous solution using bi-functional nanocomposite of carbon sphere and layered double hydroxide [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 342: 321-330.
- [15] Xie L, Zhong Y, Xiang R, et al. Sono-assisted preparation of Fe(II)-Al(III) layered double hydroxides and their application for removing uranium(VI) [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 328: 574-584.
- [16] Chubar N. New inorganic (an) ion exchangers based on Mg-Al hydroxides: (alkoxide-free) sol-gel synthesis and characterisation [J]. J Colloid Interface Sci, 2011, 357(1):198-209.
- [17] Tan X, Liu S, Liu Y, et al. One-pot synthesis of carbon supported calcined-Mg/Al layered double hydroxides for antibiotic removal by slow pyrolysis of biomass waste [J]. Sci Rep, 2016, 6(1):39691.
- [18] Ma S, Huang L, Ma L, et al. Efficient uranium capture by polysulfide/layered double hydroxide composites [J]. J Am Chem Soc, 2015, 137(10):3670-3677.
- [19] Zhang R, Chen C, Li J, et al. Preparation of montmorillonite @ carbon composite and its application for U(VI) removal from aqueous solution [J]. Applied Surface Science, 2015, 349: 129-137.
- [20] Yao W, Wang X, Liang Y, et al. Synthesis of novel flower-like layered double oxides/carbon dots nanocomposites for U(VI) and 241Am(III) efficient removal: Batch and EXAFS studies [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 332: 775-786.
- [21] Zou Y, Wang X, Wu F, et al. Controllable synthesis of Ca-Mg-Al layered double hydroxides and calcined layered double oxides for the efficient removal of U(VI) from wastewater solutions [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 5(1):1173-1185.
- [22] 伍随意,李仕友,胡俊毅,等.聚乙烯胺改性磁性酵母复合材料去除铀(VI)的性能[J].复合材料学报,2021,38(9):3065-3075.
- [23] Yin L, Wang P, Wen T, et al. Synthesis of layered titanate nanowires at low temperature and their application in efficient removal of U(VI) [J]. Environ Pollut, 2017, 226: 125-134.
- [24] 姜高峰,谢水波,谭文发,等.改性虾壳粉对水溶液中 U(VI) 的吸附性能研究[J].工业水处理,2021,41(9):104-110.
- [25] 李丽萍,吴平霄,刘俊钦. Mg/Al-LDH 对 UO₂²⁺ 的高效吸附研究[J].环境科学学报,2018,38(8):3080-3089.
- [26] 胡世琴,杨斌,范甲,等.氨基功能化烟叶生物炭对废水中 U(VI) 的吸附行为[J].精细化工,2021,38(12):2566-2572, 2585. ■