

碱处理方式对咖啡渣基水热炭形貌及铀吸附性能的影响研究

曾祥宇^{1,2}, 陈贺宇¹, 庄秀珊¹, 张 获¹, 马建洪^{1,2*}

¹ 南华大学资源环境与安全工程学院 湖南衡阳

² 南华大学铀矿冶生物技术国防重点学科实验室 湖南衡阳

【摘要】咖啡渣为咖啡副产品, 因其产量丰富、组分多样而使研究学者对其资源化利用产生广泛关注。文章以咖啡渣为原料, 采用水热法制备咖啡渣基水热炭, 并分析碱处理方式对水热炭材料形貌、表面官能团及 U(VI) 吸附性能的影响。实验结果显示, 由浓度为 3 mol/L 氢氧化钾溶液处理后的咖啡渣制备出的水热炭 (AHOC) 表面更为疏松多孔, 含氧官能团更多, 且 U(VI) 吸附性能最佳; 温度对三种水热炭 U(VI) 吸附性能的影响并不一致, 碱溶液处理咖啡渣基水热炭 (HAC) 对 U(VI) 的吸附量随温度升高而升高, 咖啡渣基水热炭 (HOC) 和 AHOC 在 298 K 时的 U(VI) 吸附量高于 288 K 和 308 K; 咖啡渣基水热炭具备较快的 U(VI) 去除速率, 在反应 60 min 时可达到平衡; 咖啡渣基水热炭去除 U(VI) 的过程中除吸附作用外还存在还原作用。

【关键词】咖啡渣; 水热炭; 碱处理; 铀; 吸附

【基金项目】国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (12105138); 中国博士后科学基金资助项目 (2021M691485)

【收稿日期】2024 年 11 月 18 日

【出刊日期】2025 年 1 月 22 日

【DOI】10.12208/j.aes.20250002

The influence of alkali treatment on the morphology and uranium adsorption properties of coffee grounds-based hydrochar

Xiangyu Zeng^{1,2}, Heyu Chen¹, Xiushan Zhuang¹, Di Zhang¹, Jianhong Ma^{1,2*}

¹ School of Resources, Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan

² Key Discipline Laboratory for National Defense for Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy, University of South China, Hengyang, Hunan

【Abstract】Coffee grounds, a byproduct of coffee production, have garnered significant attention from researchers due to their abundant availability and diverse composition, prompting exploration into their potential resource utilization. In this study, coffee grounds were utilized as raw materials to synthesize hydrochar, with an analysis conducted on the impact of alkaline treatment on the morphology, surface functional groups, and U(VI) adsorption capabilities of the resulting material. The results revealed that coffee grounds treated with a 3 mol/L KOH solution yielded hydrochar (AHOC) with a more porous surface, increased oxygen-containing functional groups, and exhibited superior U(VI) adsorption performance. The influence of temperature on the U(VI) adsorption performance of the three hydrochar materials was found to be inconsistent. The adsorption amount of U(VI) by HAC increased with increasing temperature, while the adsorption amount of U(VI) by HOC and AHOC at 298 K was higher than that at 288 K and 308 K. Furthermore, the coffee grounds based hydrochar demonstrated rapid U(VI) adsorption kinetics, reaching equilibrium within 60 minutes of reaction. Importantly, the coffee grounds based hydrochar not only exhibited adsorption behavior towards U(VI), but also demonstrated reduction effect.

作者简介: 曾祥宇 (2002-) 男, 硕士研究生。研究方向: 铀污染水体修复;

*通讯作者: 马建洪 (1992-) 女, 博士研究生、高级实验师。研究方向: 铀污染水体及土壤修复。

【Keywords】Coffee grounds; Hydrochar; Alkali treatment; Uranium; Adsorption

铀矿开采和加工过程可能会产生大量含铀等天然放射性核素的废物, 如果处置不当, 将会对环境造成一定的潜在辐射危害^[1]。含铀废水可能会污染土壤和水源, 对生态平衡和人类健康造成危害^[2]。因此, 有效地去除废水中的铀离子, 仍是亟待解决的问题。目前, 常规去除含铀废水中铀离子的方法主要有化学沉淀法、离子交换法、膜分离法、螯合剂法和吸附法等。其中吸附法因去除效果好、易处理和适应性广等特性^[3], 被广泛用于处理含铀废水。吸附法处理含铀废水主要是将具有吸附性能的吸附剂与含铀废水接触, 使废水中铀等放射性核素和其他有害重金属吸附在多孔性固体吸附剂表面, 从而达到去除有毒、有害元素的目的^[4]。吸附剂通常是由极性较强的物质制成, 具有很强的亲水性, 并具有一定的选择性, 能够高效地吸附铀离子。常见的吸附剂包括低硅铝酸盐基材和活性炭等。

咖啡是世界三大饮料作物之一, 其产量和消费量均居世界首位, 随之而来的是大量的咖啡渣等副产品^[5]。咖啡渣富含纤维素、木质素、蛋白质及各种脂类, 这些组分决定了咖啡渣具有极强的可资源化潜力^[6]。目前, 对咖啡渣的研究主要集中在生产生物柴油^[7]、氧化石墨烯^[8]和聚羟基脂肪酸^[9], 分析金霉素吸附^[10]、去除重金属离子^[11,12]以及制备活性炭等方面。水热炭化不需要强氧化剂或复杂的设备, 反应条件温和且环境友好, 可以通过反应温度和停留时间等参数来实现产品的可控合成^[13,14], 是一种较为理想的生物炭制备技术。

本研究以咖啡渣为原料, 采用水热法制备出三种咖啡渣基生物炭, 研究三种水热炭对 U(VI) 的吸附性能, 并对其形貌和表面官能团进行表征, 探究其作用机理, 为进一步开发和利用咖啡渣提供理论依据。

1 实验与方法

1.1 材料与试剂

实验所用试剂包括氢氧化钾(分析纯)。实验所用溶液均用去离子水配制。实验所用设备主要有恒温干燥箱、磁力搅拌器、pH 计、恒温振荡器和液体紫外分光光度计。

1.2 水热炭制备

将煮泡后的咖啡渣清洗至流出液清澈, 随后置

于 80℃ 恒温干燥箱中烘干, 得到干咖啡渣。

碱溶液处理咖啡渣制备: 称取适量干咖啡渣加入到装有浓度为 3 mol/L 氢氧化钾水溶液的烧杯中, 其中咖啡渣投加量为 1 g/mL; 随后将烧杯置于磁力搅拌器上, 80±0.1℃ 条件下搅拌反应 3 h 进行碱处理; 将碱处理后的咖啡渣用去离子水清洗至流出液为中性; 最后, 将清洗干净的碱处理后的咖啡渣置于预热至 80±0.1℃ 的恒温干燥箱中干燥至恒重, 得到碱溶液处理咖啡渣。

水热炭制备: 将干咖啡渣和碱溶液处理咖啡渣与去离子水按 1 g/L 的投加量放入反应釜中, 将内衬容量为 100 mL 的水热合成反应釜(型号: LC-KH-100)置于预热至 200±1℃ 的恒温干燥箱中, 保持温度恒定进行 12 小时的反应, 分别得到未经处理的咖啡渣基水热炭(HOC)、碱溶液处理咖啡渣基水热炭(HAC)。将制备出的 HOC 加入到装有浓度为 3 mol/L 氢氧化钾水溶液的烧杯中, 其中 HOC 投加量为 1 g/mL; 随后将烧杯置于磁力搅拌器上, 80±0.1℃ 条件下搅拌反应 3 h 进行碱处理; 将碱处理后的咖啡渣用去离子水清洗至流出液为中性; 最后, 将清洗干净的碱处理后的咖啡渣置于预热至 80±0.1℃ 的恒温干燥箱中干燥至恒重, 得到碱溶液处理水热炭(AHOC)。

1.3 水热炭表征

采用扫描电镜(SEM, CLARA)、傅里叶红外光谱(FTIR, Thermo Scientific Nicolet iS10)和 X 射线光电子能谱(XPS, Escalab 250Xi)分别对材料的形貌结构和表面官能团进行表征。零电荷点测定: 将材料加入到一系列不同初始 pH 值, 浓度为 0.01 mol/L 的 NaCl 水溶液反应 24 h 后, 用 pH 计测量上层溶液的 pH 值, 并计算反应前后的 pH 变化值(ΔpH), 其中 ΔpH 为零时的初始 pH 值为材料的零电荷点(pH_{PZC})。

1.4 吸附实验

配制 pH 分别为 2.00、2.50、3.00、3.50、4.00、5.00, 初始浓度为 20 mg/L 的铀溶液, 对比不同 pH 条件下水热炭对溶液中铀的去除效果; 配制初始浓度为 20 mg/L 的铀溶液, 称取一定量的水热炭置于 10 mL 离心管内, 随后加入相应体积的铀溶液, 其中水热炭投加量 1 g/L, 反应温度 25℃, pH 为 5.00,

研究反应时长对水热炭去除铈的影响; 配制初始浓度分别为 10、20、50、100、150、200、300 mg/L 的铈溶液, 称取一定量的水热炭置于 10 mL 离心管内, 随后加入相应体积的铈溶液, 其中反应温度分别为 15、25 和 35°C, 水热炭投加量为 1 g/L, 反应时长为 60 min, pH 为 5.00, 研究水热炭的等温吸附性能。

2 结果与讨论

2.1 水热炭表征

图 1 展示了 HOC、HAC、AHOC 的 SEM 图像

以及相应的 EDS 元素分布图, 其中 SEM 图像显示了样品的微观形貌, 而 EDS 元素分布图揭示了样品中碳和氧的分布情况。从图中可以看出, HOC 呈细小块状结构, 堆叠严重 (图 1a), HAC 呈大片状结构, 错落堆积 (图 1b), AHOC 的表面较为粗糙, 呈疏松结构 (图 1c)。根据 EDS 元素分析结果, HOC、HAC 和 AHOC 的碳元素与氧元素含量比分别为 7.5、4.9 和 1.7。以上结果表明, 三种水热炭中氧元素最高的为 AHOC。

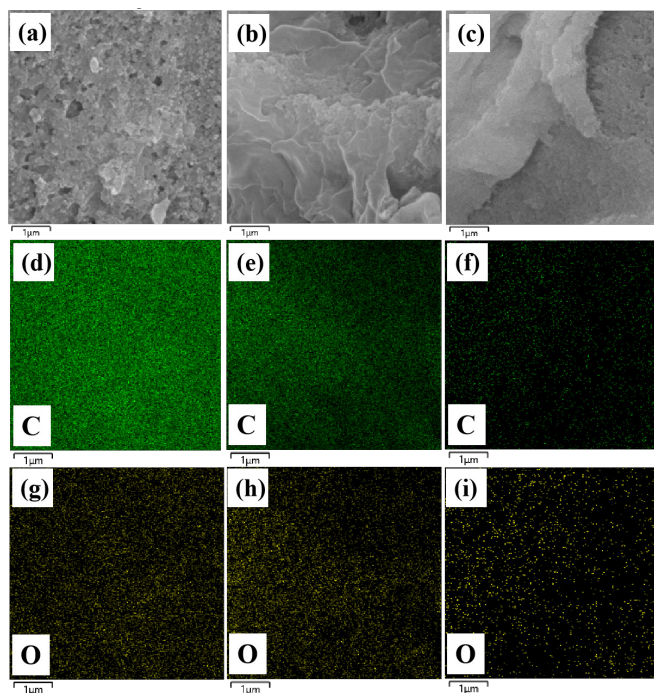


图 1 (a-c) HOC, HAC 和 AHOC 的 SEM 图像, (d-f) HOC, HAC, 和 AHOC 的 C 元素分布, (g-i) HOC, HAC, 和 AHOC 的 O 元素分布

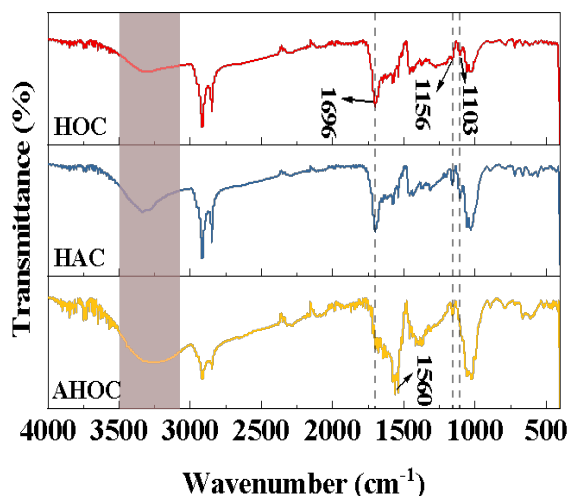


图 2 HOC, HAC 和 AHOC 的 FTIR 曲线

图2展示了三种水热炭的FTIR曲线。三种水热炭的FTIR曲线存在相同的特征峰,其中 3300 cm^{-1} 为O-H伸缩振动峰, 1696 cm^{-1} 为C=O的伸缩振动峰^[15], 1156 和 1103 cm^{-1} 为C-O不对称伸缩振动峰。与HOC相比,HAC的O-H和C-O伸缩振动峰均增强,表明经氢氧化钾改性咖啡渣制备水热炭可以引入更多的含氧官能团。与HOC和HAC相比,AHOC在 1560 cm^{-1} 和 1156 cm^{-1} 处峰值增强, 1130 cm^{-1} 处峰值消失, 1696 cm^{-1} 峰值减弱,表明氢氧化钾改性对水热炭的炭骨架及表面化学特性均有一定影响。对比三种水热炭O-H伸缩振动峰可以发现,三种水热炭中HAC表面的自由羟基量最高,而AHOC的分子间氢键量最高,表明碱处理方式对水热炭表面含氧官能团的存在形式有一定影响。

2.2 pH影响

图3a展示了三种水热炭的零电荷点(pH_{PZC})。从图中可以看出,HOC、HAC和AHOC的 pH_{PZC} 值分别为4.38、6.26和6.94。通常,材料表面的官能团在溶液 $\text{pH} < \text{pH}_{\text{PZC}}$ 时会发生质子化,带正电,而在 $\text{pH} > \text{pH}_{\text{PZC}}$ 时发生去质子化,带负电^[16]。在酸性溶液中,通常以正离子形式存在。因此,溶液pH可通过影响材料表面的带电性进而影响材料与U(VI)的静电相互作用。溶液pH值对水热炭铀吸附性能的影响结果如图3b所示。HAC对U(VI)的去除率随溶液pH升高逐渐升高,HOC对U(VI)的去除率随pH升高先升高后下降再升高,AHOC对U(VI)的去除率随溶液pH升高先升高并趋于稳定。 $\text{pH} < 3.0$ 时,HOC和HAC对U(VI)去除率的变化趋势一致,可能原因是HAC和HOC材料表面在 $\text{pH} < 3.0$ 时

均接近中性(图3a)。 $\text{pH} > 3.0$ 时,HOC对U(VI)的去除率随pH升高先下降再上升,去除率整体低于HAC。

以上结果表明,三种水热炭与U(VI)的相互作用存在一定区别,其中HOC对U(VI)的去除以静电作用为主,HAC对U(VI)的去除在一定程度上受静电作用影响,AHOC对U(VI)的去除不受静电作用影响。

2.3 吸附动力学

为探究三种水热炭对溶液中铀的吸附动力学,分别使用准一级(式1)和准二级(式2)动力学模型对298 K下的动力学实验数据进行拟合。

准一级动力学方程:

$$Q_t = Q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (1)$$

准二级动力学方程:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} \quad (2)$$

Q_e 和 Q_t ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)分别为平衡时刻和t时刻的吸附量; k_1 (min^{-1})和 k_2 ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)分别是准一阶速率常数和准二阶速率常数。

图4为水热炭对铀的吸附动力学模型拟合曲线,拟合参数如表1所示。根据 R^2 值(表1)可以看出,三种水热炭的准一级动力学拟合曲线与实测数据点符合程度更好,表明HOC、HAC和AHOC对U(VI)的吸附过程符合准二级动力学模型。从图中可以看出,三种水热炭对U(VI)的吸附在反应60 min后趋于平缓且波动幅度可忽略不计,因此后续实验均取60 min为反应时长。

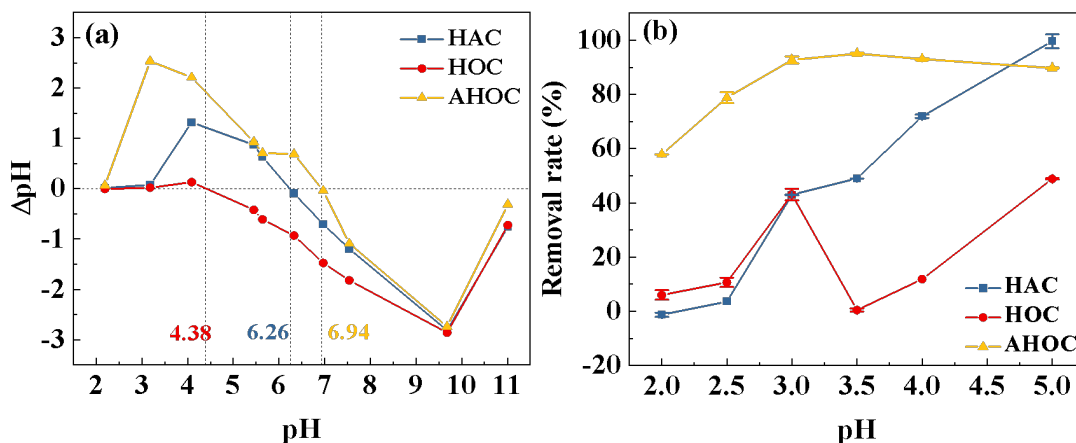


图3 (a) 水热炭的零电荷点, (b) pH对水热炭铀去除率的影响

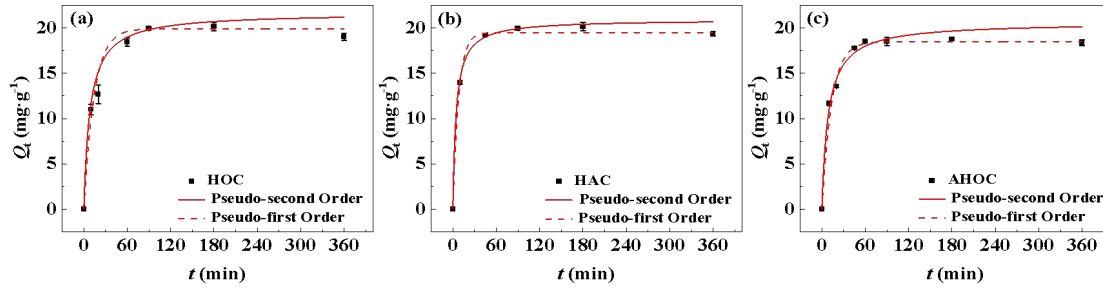


图4 (a) HOC, (b) HAC, 和 (c) AHOC 的吸附动力学模型拟合曲线

表1 动力学模型拟合参数

材料	Q_e, exp	$T/(\text{K})$	Pseudo-firstOrder			Pseudo-secondOrder		
			$Q_e/(\text{mg}\cdot\text{g})$	$k_1/(\text{min}^{-1})$	R^2	$Q_e/(\text{mg}\cdot\text{g})$	$k_2/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	R^2
HOC	18.814	298	20.696	0.03	0.8298	22.807	0.003	0.7974
HAC	19.187	298	20.930	0.05	0.8443	24.288	0.003	0.7897
AHOC	18.501	298	18.487	0.07	0.9332	20.606	0.006	0.9315

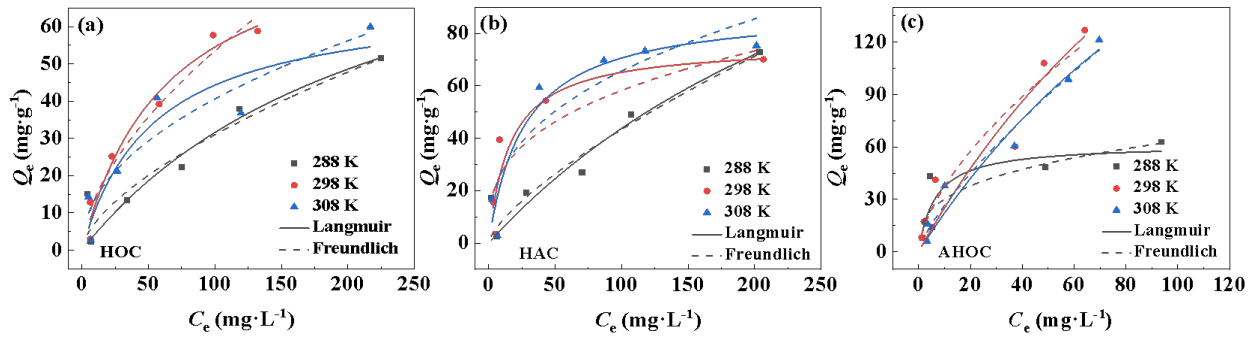


图5 (a) HOC, (b) HAC 和 (c) AHOC 的 Langmuir 模型与 Freundlich 模型吸附等温线拟合图

2.4 等温吸附

为分析水热炭对 U(VI) 的等温吸附性能, 采用 Langmuir 模型 (式 3) 与 Freundlich 模型 (式 4) 对水热炭的 U(VI) 等温吸附数据进行拟合分析, 拟合曲线和相关参数分别如图 5 和表 2 所示。

Langmuir 模型:

$$Q_e = \frac{K_L Q_m C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

Freundlich 模型:

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

式中: Q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 为吸附平衡量; C_e ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 为平衡浓度; Q_m ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 为拟合的最大单层吸附容量; K_L ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$) 为 Langmuir 模型常数; K_F ($\text{mg}^{1-n}\cdot\text{L}^n\cdot\text{g}^{-1}$) 为 Freundlich 模型常数; n 表示吸附

驱动力或表面不均匀程度。

从图 5 可以看出, 三种水热炭中, AHOC 对 U(VI) 的吸附量最大, HAC 对 U(VI) 的吸附量次之, HOC 对 U(VI) 的吸附量最小。温度对三种水热炭 U(VI) 吸附性能的影响不一致, 其中 HAC 对 U(VI) 的吸附量随温度升高而升高, HOC 和 AHOC 在 298 K 时的 U(VI) 吸附量高于 288 K 和 308 K。这可能是三种水热炭表面的优势官能团存在一定区别, 温度变化可影响体系中分子热运动的激烈程度及孔隙结构, 从而在一定程度上影响水热炭的 U(VI) 吸附性能^[17]。比较模型拟合系数 R^2 值 (表 2) 可知, 三种水热炭对 U(VI) 的吸附行为与 Langmuir 模型和 Freundlich 模型的匹配度相差不大, 说明三种水热炭对 U(VI) 的吸附可能同时涉及单层吸附和多层吸附。

表 2 等温模型拟合参数

材料	T/ (K)	Langmuir			Freundlich		
		$K_L/ (L \cdot mg^{-1})$	$Q_e/ (mg \cdot g^{-1})$	R^2	$K_F/ ((mg^{1-n} \cdot L^n) \cdot g^{-1})$	n	R^2
HOC	288	0.0043	105.18	0.8797	1.7319	1.5968	0.8985
	298	0.0158	89.11	0.9716	3.6685	1.7190	0.9592
	308	0.0187	68.02	0.8760	4.6592	2.1278	0.8845
HAC	288	0.0028	202.03	0.8989	1.5853	1.3921	0.9099
	298	0.0609	75.85	0.8360	12.6401	3.0145	0.7614
	308	0.0370	89.73	0.9300	11.2699	2.6146	0.8431
AHOC	288	0.1545	61.45	0.7262	14.3668	3.1022	0.7314
	298	0.0060	442.24	0.8900	8.8619	1.6006	0.9220
	308	0.0059	399.73	0.9579	4.6228	1.3185	0.9702

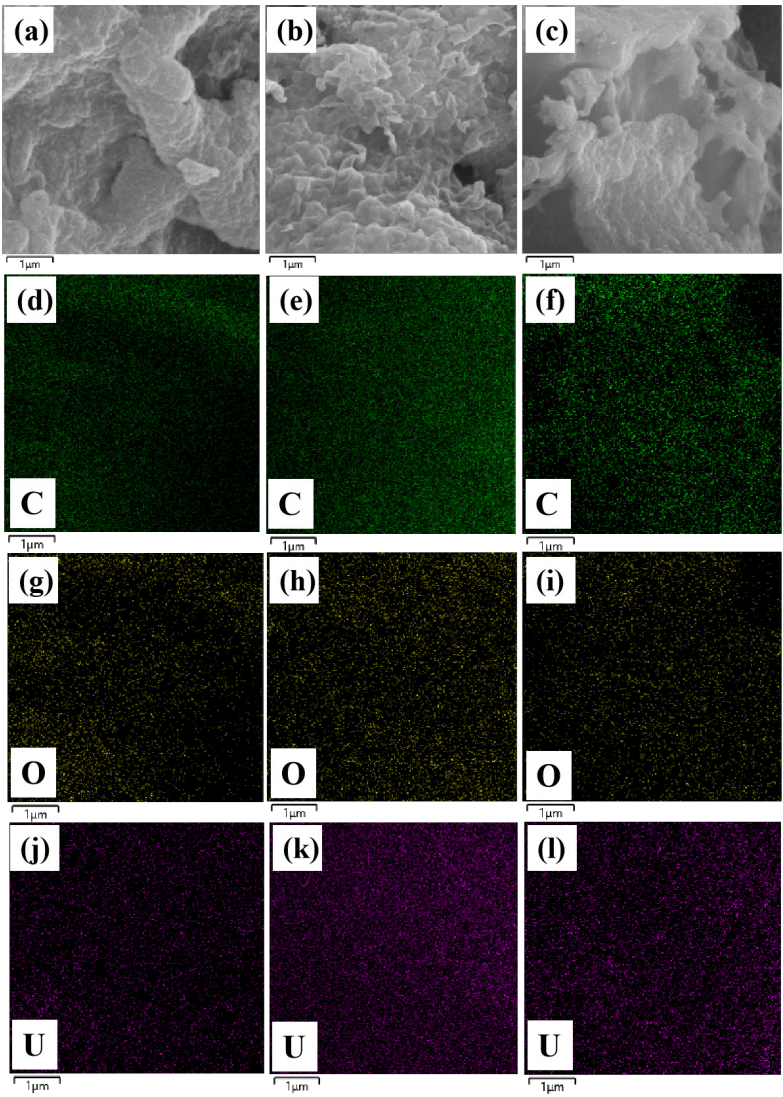


图 6 (a-c) HOC-U, HAC-U 和 AHOC-U 的 SEM 图像, (d-f) HOC-U, HAC-U 和 AHOC-U 的 C 元素分布, (g-i) HOC-U, HAC-U 和 AHOC-U 的 O 元素分布, (j-l) HOC-U, HAC-U 和 AHOC-U 的 U 元素分布

2.5 机理分析

图6展示了吸附铀后的HOC、HAC、AHOC的SEM图像以及相应的EDS元素分布图,其中SEM图像显示了样品的微观形貌,而EDS元素分布图揭示了样品中碳和氧的分布情况。从图中可以看出,水热炭的形貌在吸附铀后发生了一定改变,其中HOC的块状结构变大,堆叠更为明显(图6a),HAC由大片结构变为块状结构(图6b),AHOC的粗糙表面变光滑,呈致密结构(图6c)。从EDS元素分布图(图6d-l)中可以看出,三种水热炭吸附铀后其表面均负载有铀,其中HAC和AHOC中的U元素含量高于HOC,表明三种水热炭均可成功去除溶液中的铀。

为进一步分析水热炭吸附铀的作用机理,对吸附铀前后的水热炭进行了FTIR和XPS表征,结果分别如图7和图8所示。从图7可以看出,吸附铀后,HOC、HAC和AHOC的FTIR图谱中分别在 927 cm^{-1} 、 936 cm^{-1} 和 906 cm^{-1} 处出现新的吸收峰,该峰归属于 $\text{O}=\text{U}=\text{O}$ 的伸缩振动^[18],验证了U(VI)

成功被HOC、HAC和AHOC吸附。XPS全谱图(图8a-c)在380-400 eV出现的新的U 4f特征峰,同样验证了U(VI)在水热炭上的成功负载。从图8d-f可以看出,吸附U(VI)前HOC、HAC和AHOC的O 1s精细谱图可经分峰处理得到两个峰,结合能从高到低依次归属于C-O和C=O的伸缩振动峰。吸附U(VI)后,HOC-U、HAC-U和AHOC-U的O 1s精细谱图均出现新的U-O峰,同时AHOC-U谱图中还出现了 H_2O 峰^[19],表明三种水热炭的含氧官能团参与了铀的吸附过程。三种水热炭的U 4f精细谱图(图8g-i)均可分峰成四个峰。以HOC-U的U 4f精细谱图为例(图8g),结合能 382.12 eV ($\text{U}4\text{f}_{7/2}$)和 393.20 eV ($\text{U}4\text{f}_{5/2}$)处的特征峰对应HOC-U中的U(IV),而 385.68 eV ($\text{U}4\text{f}_{7/2}$)和 396.30 eV ($\text{U}4\text{f}_{5/2}$)处的特征峰对应HOC-U中的U(VI),表明HOC去除U(VI)的过程中发生了氧化还原反应。以上结果表明,三种水热炭对U(VI)的去除机理相同,具有一定吸附作用,同时存在一定的还原效果^[20]。

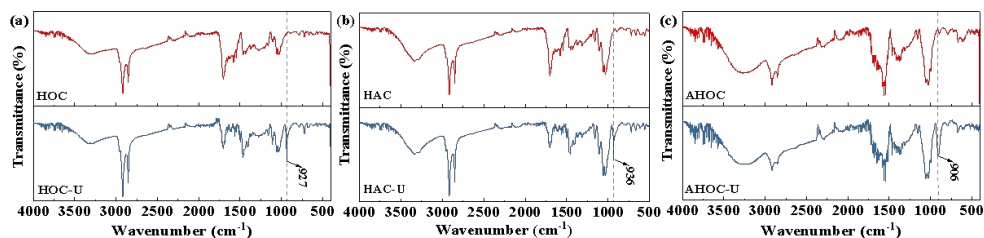


图7 (a) HOC, (b) HAC和(c) AHOC吸附U(VI)前后的FTIR曲线

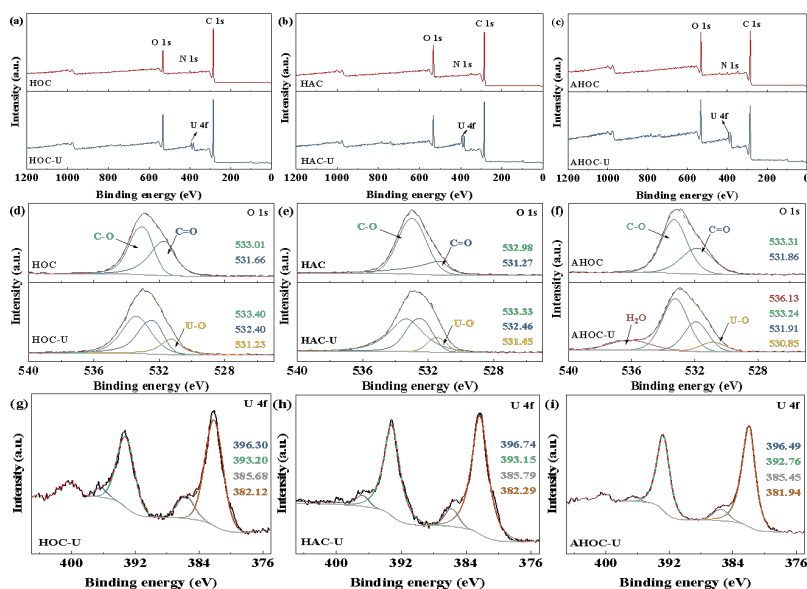


图8 HOC, HAC和AHOC吸附U(VI)前后的XPS全谱图、O 1s和U 4f精细谱图

3 结论

(1) 以咖啡渣为原料制备的水热炭表面含丰富的含氧官能团, 碱处理方式对水热炭的形貌、表面官能团及 U(VI) 吸附性能具有一定的影响。由碱处理咖啡渣制备的水热炭(AHOC)表面更为疏松多孔, 含氧官能团更多, 且 U(VI) 吸附性能最佳, 对 U(VI) 的去除效果受 pH 影响最小。

(2) 咖啡渣基水热炭具有较快的 U(VI) 吸附速率, 在反应 60 min 时可达到平衡。

(3) 咖啡渣基水热炭去除水中 U(VI) 的作用机理为吸附作用与还原作用共存。

参考文献

- [1] 潘英杰, 薛建新, 陈仲秋. 我国铀矿冶废物的利用与有用资源的回收[J]. 铀矿冶, 2012, 31(01): 40-45.
- [2] 陈拓, 彭捍, 肖海鹏等. 贝壳基吸附材料的制备及其铀吸附性能研究[J]. 应用化工, 2022, 51(12): 3481-3485+3491.
- [3] 宋爽, 顾鹏程, 陈中山等. 酸化氧化水热炭在含铀放射性废水处理中的应用研究[J]. 中国科学: 化学, 2019, 49(01): 155-164.
- [4] 张海阳, 高柏, 马文洁等. 基于 SPSS 除 U(VI) 材料的吸附特性及影响因素分析[J]. 有色金属工程, 2020, 10(04): 109-116.
- [5] 田青柏, 杨关运, 李晓强等. 磁性咖啡渣生物炭制备及其对金霉素的吸附特性研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(08): 33-36.
- [6] JEONG G T. Valorization of lipid-extracted spent coffee grounds: the synthesis of levulinic acid by thermochemical process[J]. Industrial Crops & Products, 2022, 187(PA).
- [7] WONG Y Y, RAWINDRAN H, LIM J W, et al. Attached microalgae converting spent coffee ground into lipid for biodiesel production and sequestering atmospheric CO₂ simultaneously[J]. Algal Research, 2022, 66.
- [8] CHALLA A A, SAHAN N, SAEWCAYK P K, et al. Graphene oxide produced from spent coffee grounds in electrospun cellulose acetate scaffolds for tissue engineering applications[J]. Materials Today Communications, 2023, 35.
- [9] CRUZ V M, PAIVA A, LISBOA P, et al. Production of polyhydroxyalkanoates from spent coffee grounds oil obtained by supercritical fluid extraction technology[J]. Bioresource Technology, 2014, 157.
- [10] 田青柏, 杨关运, 李晓强等. 磁性咖啡渣生物炭制备及其对金霉素的吸附特性研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(08): 33-36.
- [11] 任杰, 万力, 陈楠纬等. 咖啡渣活性炭的制备、表征及其对 Cr(VI) 的吸附机制研究[J]. 生物质化学工程, 2020, 54(04): 1-8.
- [12] 胡月, 陈玉婷, 宋俊志等. 可见光促进咖啡渣去除重金属离子 Cr(VI) 的行为及机理[J]. 水处理技术, 2022, 48(12): 53-58.
- [13] 刘亦陶, 魏佳, 李军. 废弃生物质水热炭化技术及其产物在废水处理中的应用进展[J]. 化学与生物工程, 2019, 36(01): 1-10.
- [14] 缪巍, 陈则良, 刘振刚等. 废弃生物质水热炭化衍生碳基光催化材料的研究进展[J/OL]. 环境学: 1-10[2023-05-01].
- [15] 杜家豪, 赖金龙, 罗学刚. 改性竹基生物炭对铀的吸附特性及其机理分析[J]. 工业水处理, 2021, 41(05): 119-124.
- [16] 王亚洲. 微生物发酵棉秆基生物质炭制备及对铀的吸附性能研究[J]. 西南科技大学, 2022.
- [17] 刘俐莉, 杨荣, 郭静. 咖啡渣生物炭对水体中阳离子染料的吸附研究[J]. 山东化工, 2021, 50(04): 299-302.
- [18] DING L, TAN W F, XIE S B, et al. Uranium adsorption and subsequent re-oxidation under aerobic conditions by *Leifsonia* sp.- Coated biochar as green trapping agent[J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 778-787.
- [19] WANG J C, REN J, YAO H C, et al. Synergistic photocatalysis of Cr(VI) reduction and 4-Chlorophenol degradation over hydroxylated α -Fe₂O₃ under visible light irradiation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 311, 11-19.
- [20] 刘金香, 谢水波, 马华龙, 等. 零价铁对奥奈达希瓦氏菌还原 U(VI) 的影响及机制[J]. 中国有色金属学报, 2015 (08): 2309-2315.