

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.08.017

改性 CoFe_2O_4 对溶液中 U(VI) 的吸附性能研究

杜艳军, 陈蓉, 李小燕, 刘义保, 乐长高

(东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013)

摘要:以水热合成法制备 CoFe_2O_4 材料,考察溶液 pH、固液比、时间、温度、初始 U(VI) 浓度等对 CoFe_2O_4 吸附溶液中 U(VI) 的影响。用扫描电镜(SEM)对材料进行表征,分析其去除 U(VI) 的机理。结果表明, CoFe_2O_4 对 U(VI) 有很好的去除效果,在 pH 为 5.5、固液比 0.3 g/L、反应时间 120 min、 U(VI) 溶液浓度 30 mg/L 条件下, U(VI) 最大吸附容量为 73.9 mg/g。

关键词:铁酸钴; 丙烯酰胺; 铀; 吸附; 机理

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2021)08-0127-07

Study on Adsorption Performance of Modified CoFe_2O_4 for U(VI) in Solution

DU Yan-jun, CHEN Rong, LI Xiao-yan, LIU Yi-bao, LE Zhang-gao

(State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: CoFe_2O_4 material was prepared by hydrothermal synthesis method, and influences of pH value, ratio of solid to liquid, time, temperature, and initial U(VI) concentration on U(VI) in CoFe_2O_4 adsorption solution were investigated. The material was characterized by SEM and mechanism of its removal of U(VI) was analyzed. The results show that CoFe_2O_4 has a very good removal effect on U(VI) . The maximum adsorption capacity of U(VI) is 73.9 mg/g under the conditions including pH value of 5.5, ratio of solid to liquid of 0.3 g/L, reaction time of 120 min, and U(VI) solution concentration of 30 mg/L.

Key words: cobalt ferrite; acrylamide; uranium; adsorption; mechanism

核能的快速发展会产生大量的放射性含铀废水,如果得不到妥善处置将会破坏生态环境,影响公众健康。含铀废水常用处理方法有微生物吸附法、膜分离法、磁—分子法、农林废弃物吸附法等^[1]。

铁酸盐具有较大的比表面积、丰富的表面缺陷、较高的表面活性、良好的磁学性能和稳定的物理化学性质等优点,成为潜在的铀吸附剂材料。 CoFe_2O_4 是一种典型的尖晶石型铁酸盐永磁材料,具有表面化学性质活泼、可磁性分离回收等诸多优点;但亦存在

易团聚、表面易发生氧化还原反应而失活等缺点,因此需要对其进行改性以改善材料固有缺点带来的影响。

本试验采用丙烯酰胺(AM)作为表面活性剂,通过调整表面活性剂、钴铁比例、水热反应温度、水热反应时间等参数,确定最佳制备条件。使用 CoFe_2O_4 复合材料作为吸附剂,通过材料投加量、时间、温度、浓度等对 U(VI) 吸附效果的影响,获取最佳吸附条件。研究结果可以为含铀放射性废水处理提供借鉴。

收稿日期:2021-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41761090,11465002,11765002);江西省自然科学基金项目(20171ACB2021)

作者简介:杜艳军(1981-),男,山东郯城人,博士研究生;通信作者:乐长高(1967-),男,江西抚州人,博士,教授

1 试验

1.1 试剂

八氧化三铈、九水合硝酸铁、六水合硝酸锌、六水合氯化钴、一水合硫酸锰、三水合硝酸铜、丙烯酰胺、偶氮胂Ⅲ、2,4-二硝基苯酚、氯乙酸、乙酸钠、浓硝酸、浓盐酸、氢氧化钠、无水乙醇等均为分析纯试剂。试验过程中所用水均为超纯水。

1.2 仪器、设备

数显恒温磁力搅拌器、离心机、电热恒温鼓风干燥箱、数控超声波清洗机、全温振荡器、电子天平、超纯水机、一体化智能马弗炉、X射线光电子能谱分析仪、多晶X射线衍射仪、扫描电子显微镜等。

1.3 材料制备

1.3.1 CoFe_2O_4 材料制备

在水热介质 pH 为 12, 水热反应温度 $180\text{ }^\circ\text{C}$, 水热反应时间 12 h, 化学计量比 $\text{Co}^{2+}:\text{Fe}^{3+}=1:2$ 的常量参数下, 加入 0.250 g 的 AM 表面活性剂, 制备得到 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 改性 CoFe_2O_4 材料。

1.3.2 不同钴铁比的 CoFe_2O_4 材料制备

在水热介质 pH 为 12, 水热反应温度 $180\text{ }^\circ\text{C}$, 水热反应时间 12 h, 0.250 g 的 AM 的常量参数下, 改变钴铁的化学计量比分别为 1:1 和 1:1.5, 制备得到两种不同钴铁比例的 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 材料。

1.4 静态吸附试验方法

精确量取一定浓度 U(VI) 溶液 25 mL 于 100 mL 锥形瓶中, 用稀 HCl 溶液和 NaOH 溶液分别调节溶液 pH, 加入一定质量 CoFe_2O_4 ; 在一定温度条件

下, 反应一定时间后, 将溶液转移至 50 mL 离心管, 在 4 000 r/min 下离心 2 min, 取上清液测定 U(VI) 浓度。按照式(1)和式(2)计算 U(VI) 的去除率 R 和吸附容量 Q_t 。

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

$$Q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (2)$$

式中, R 为去除率(%); C_0 为溶液中 U(VI) 的初始浓度 (mg/L); C_t 为溶液中 U(VI) 的剩余浓度 (mg/L); Q_t 为吸附容量 (mg/g); V 为溶液体积 (L); m 为吸附剂质量 (g)。

2 结果与讨论

2.1 扫描电子显微镜(SEM)表征结果分析

对 CoFe_2O_4 及 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 材料分别进行 SEM 表征分析, 结果如图 1 所示。从图 1a 可看出, 制备的 CoFe_2O_4 材料呈超过 $3\text{ }\mu\text{m}$ 大小不一的不规则块状, 表面布满了粒径约 100~300 nm 的不规则球形颗粒。从图 1b 可看出, $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 相比纯 CoFe_2O_4 材料其不规则块状的粒径明显减小, 块状尺寸均在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 并且该材料表面的不规则球形颗粒数量明显增多, 粒径明显减小, 说明 AM 对 CoFe_2O_4 有明显的分散效果。

对 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 材料及其与 U(VI) 反应后产物进行 SEM 表征分析, 结果如图 2 所示。从图 2 可知, $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 材料与 U(VI) 反应后产物的表面形貌变得更加粗糙, 且不规则球形颗粒变少, 可能是反应产物沉积到材料表面造成的。

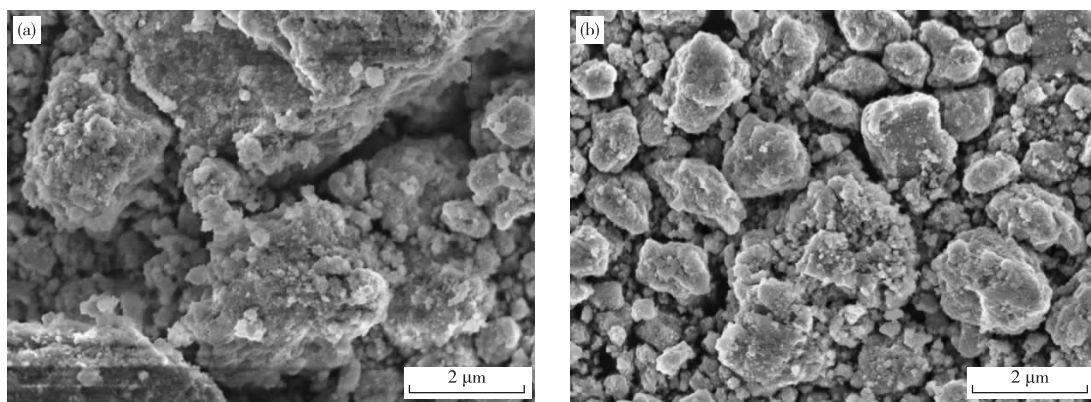
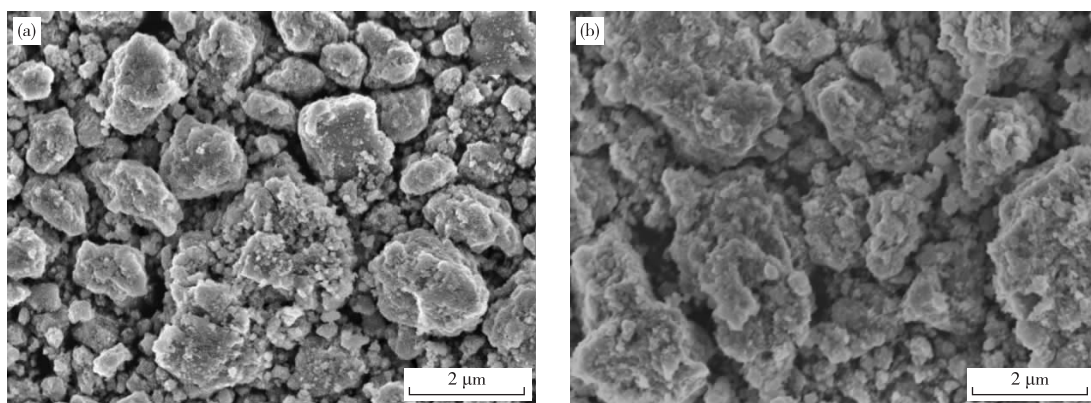


图 1 CoFe_2O_4 (a) 和 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ (b) 的 SEM 形貌

Fig. 1 SEM images of CoFe_2O_4 (a) and $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ (b)

图 2 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ (a)及其与 U(VI) 反应后产物(b)的 SEM 形貌Fig. 2 SEM images of $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ (a) and its reaction product with U(VI) (b)

2.2 CoFe_2O_4 对 U(VI) 的吸附试验结果分析

2.2.1 不同制样条件下的 CoFe_2O_4 材料的 U(VI) 吸附性能研究

为考察制样条件的改变对 CoFe_2O_4 材料的 U(VI) 吸附性能的影响,对添加表面活性剂前后、不同水热反应时间、不同钴铁比下制备的 CoFe_2O_4 材料均进行 U(VI) 的吸附试验,确定 CoFe_2O_4 材料对 U(VI) 的最佳制样条件。

图 3 为添加活性剂前后 CoFe_2O_4 吸附 U(VI) 的结果。结果表明,添加了 AM 的 CoFe_2O_4 材料对 U(VI) 的去除率明显上升。由吸附前段数据可看出,初始吸附是一个快速的过程,在吸附时间为 20 min 时吸附速率明显变缓,后续增长缓慢,且在 120 min 后基本达到吸附平衡状态。因此,吸附反应时间选定为 120 min, U(VI) 去除率从添加活性剂前的 68.4% 提高至添加活性剂后 83.58%。

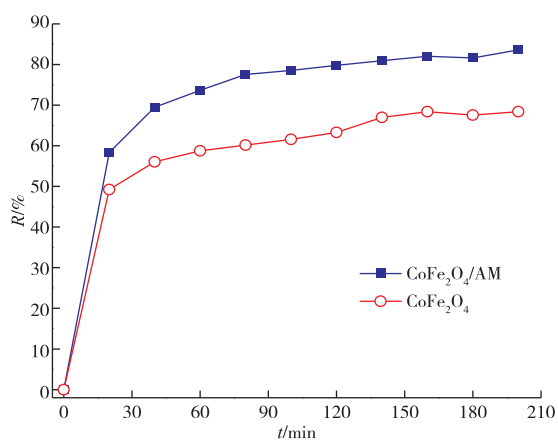
图 3 添加活性剂对 CoFe_2O_4 吸附 U(VI) 的影响Fig. 3 Effects of different CoFe_2O_4 surfactants on adsorption of U(VI)

图 4 为不同水热反应时间 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 对 U(VI) 的去除率随时间的变化曲线。结果表明,水热反应时间在 0.5~2 h 的材料对 U(VI) 的吸附效果差异很小,1 h 的效果相对最好,延长水热反应时间至 4 h 后去除率有明显下降。因此,水热反应时间选定为 1 h。

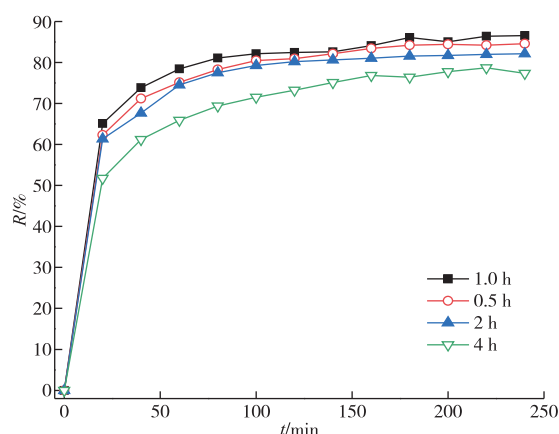
图 4 水热反应时间对 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 吸附 U(VI) 的影响Fig. 4 Effects of different $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ hydrothermal reaction time on adsorption of U(VI)

图 5 为不同钴铁比对 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 吸附 U(VI) 的影响。结果表明,钴铁比从 1:1 变化到 1:3 对吸附结果的影响不是很大,尤其在 1:1 到 1:2 之间的结果接近,1:1.5 的结果最好。综合考虑,选定钴铁比为 1:1.5。

2.2.2 pH 对 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 吸附 U(VI) 的影响

pH 对 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 去除 U(VI) 的影响结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,不同 pH 下 U(VI)

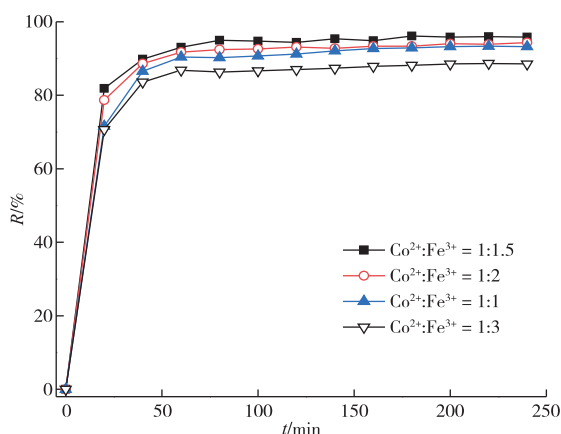


图5 钴铁比例对 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 吸附 U(VI) 的影响

Fig. 5 Effects of $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ Co/Fe ratios on adsorption of U(VI)

去除效果有较大差异,在 pH 为 5.5 时去除率达到峰值 96.6%,当 pH 小于或大于 5.5 时 U(VI) 的去除率随着 pH 的减小或增大而逐渐下降。当 pH 为 3.5~5.5 时,溶液中的铀主要以 UO_2^{2+} 和它小部分水解后产生的 UO_2OH^+ 的形式存在^[2],而在酸性条件下溶液中大量存在的 H^+ 等阳离子也会沉积在吸附剂表面,使吸附剂带正电,然后产生静电排斥作用阻碍吸附材料对 UO_2^{2+} 的吸附。pH 越趋于酸性,溶液中的 H^+ 越多,静电排斥作用越强,对吸附的阻碍也愈发明显,从而吸附效果越差。当 pH 为 5.5~7.0 时,随着溶液 pH 逐渐趋于碱性,溶液中的 UO_2^{2+} 含量急剧下降, UO_2^{2+} 发生水解反应和配位反应得到的一系列产物的比例越来越大,主要以 $(\text{UO}_2)_3\text{OH}_5^+$ 和 $\text{UO}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的形式存在^[3],阻碍了吸附的进行。因此,认为 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 吸附 U(VI) 的最佳 pH 为 5.5。

2.2.3 吸附反应时间对 CoFe_2O_4 吸附 U(VI) 的影响

$\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 在 20、25、30、35 °C 下对 30 mg/L 的 U(VI) 吸附量随时间变化的试验结果如图 7 所示。从图 7 可以看到,在反应初期,随着吸附反应时间增长吸附量快速增大,但增长速率逐渐减小,直至 120 min 左右吸附量几乎不再变化,达到动态稳定状态;当温度从 20 °C 增长到 25 °C,吸附量有小幅增大,随着温度再增加,吸附量虽然仍在增大但上升幅度变得越来越微弱。此吸附过程变化是因为,随着反应的进行,反应初期本来富裕的大量活性吸附位点逐渐被吸附质占据,同时吸附质浓度也随着反

应进行而减小,从而使吸附速率逐渐减小;并且随着温度的升高,溶液中 UO_2^{2+} 的动能有一定程度的变大,使其转移到吸附位点的过程变得更加容易。实际生活中废水的温度一般在常温状态下,且工程上提高温度意味着更大的动力消耗,过长的反应时间会让废水的处理时间效率变低。结合试验结果,确定吸附反应的温度为 25 °C,吸附平衡时间为 120 min。

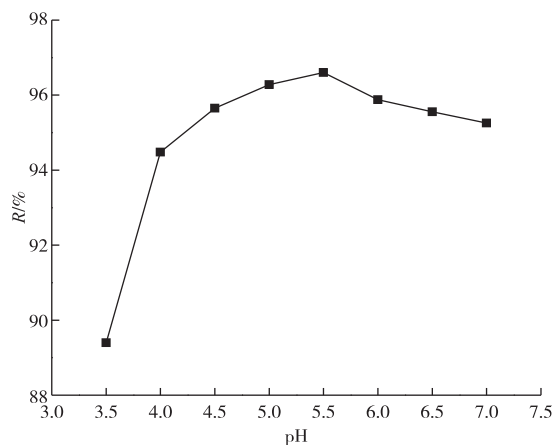


图6 U(VI) 溶液初始 pH 对 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 吸附 U(VI) 的影响

Fig. 6 Effect of initial pH value of U(VI) solution on adsorption of U(VI) by $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$

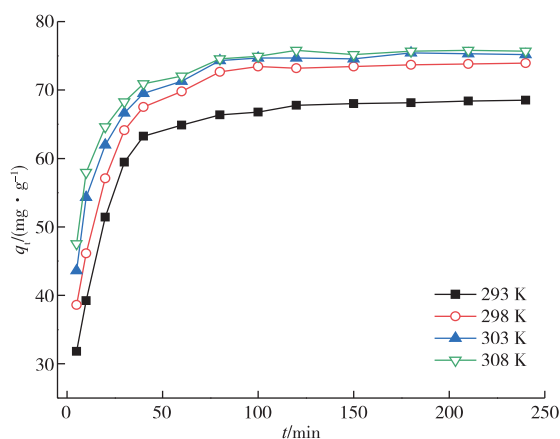


图7 吸附反应时间对 CoFe_2O_4 吸附 U(VI) 的影响

Fig. 7 Effects of adsorption reaction time on adsorption of U(VI) by $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$

2.3 吸附机理分析

2.3.1 动力学分析

对试验数据分别进行了准一级动力学方程和准二级动力学方程拟合。计算所得相关参数见表 1,

动力学模型拟合曲线见图 8。从表 1 和图 8 可以看出,CoFe₂O₄/AM 在不同温度下对 U(VI) 的吸附过程更符合准二级动力学模型,线性相关系数均可达到 0.999 以上,且准二级动力学模型计算得到的理论平衡吸附容量与试验值基本一致,说明此吸附反应过程中化学吸附占主导作用。

表 1 CoFe₂O₄/AM 在不同温度下吸附 U(VI) 的动力学模型拟合参数
Table 1 Parameters for different kinetic models of adsorption of U(VI) by CoFe₂O₄/AM at different temperatures

温度/℃	准一级动力学方程			准二级动力学方程		
	$q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_1/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	R^2	$q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_2/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	R^2
20	27.798 7	0.005 0	0.594 0	70.472 2	0.002 4	0.999 8
25	21.748 4	0.007 1	0.648 4	75.815 0	0.002 6	0.999 8
30	17.984 9	0.007 5	0.670 3	76.746 0	0.003 3	0.999 9
35	15.801 9	0.007 4	0.671 0	76.982 3	0.003 9	0.999 9

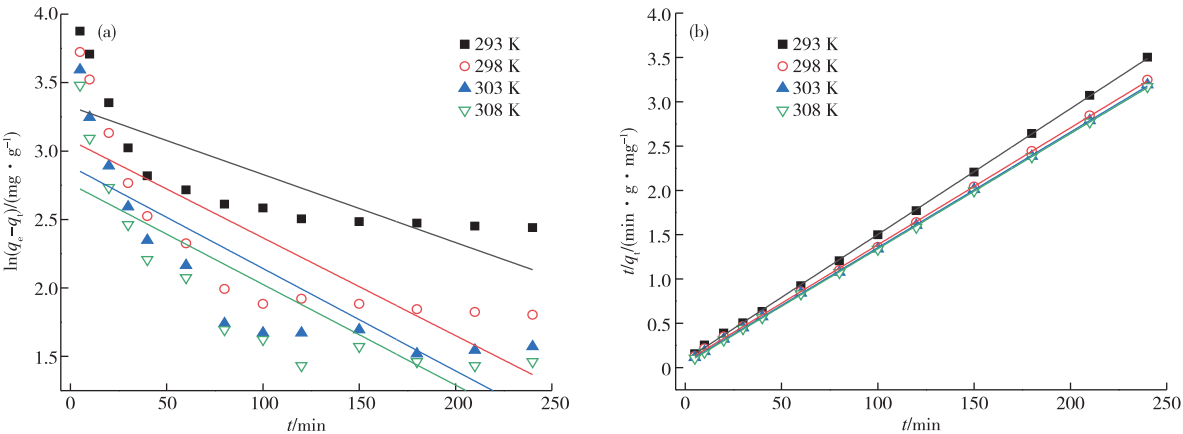


图 8 CoFe₂O₄/AM 吸附 U(VI) 的准一级动力学模型(a)和准二级动力学模型(b)拟合曲线
Fig. 8 Fitting curve of the quasi-first order kinetic model (a) and pseudo-second-order kinetic model (b) for CoFe₂O₄/AM adsorption of U(VI)

2.3.2 等温吸附模型研究

为探究浓度对吸附过程的影响以确定合适的 U(VI) 溶液初始浓度,进行了 CoFe₂O₄/AM 在不同温度下对不同浓度的 U(VI) 的吸附试验,得到相应平衡吸附量 q_e 与平衡浓度 c_e 的关系如图 9 所示。由图 9 可知,CoFe₂O₄/AM 对 U(VI) 的吸附量随着 U(VI) 浓度增大而增大,但增长速度逐渐变缓,是 U(VI) 浓度的增高增大了其与 CoFe₂O₄/AM 的反应机会,CoFe₂O₄/AM 表面吸附位点饱和得越快,但超过平衡点后,过大的 U(VI) 浓度反而可能会抑制吸附速率。吸附剂的投加质量一定,当其有限的吸附位点达到最大饱和和吸附量后就不再增长。平衡吸附量随温度升高有微弱的变大,说明吸附过程可能为吸热反应。

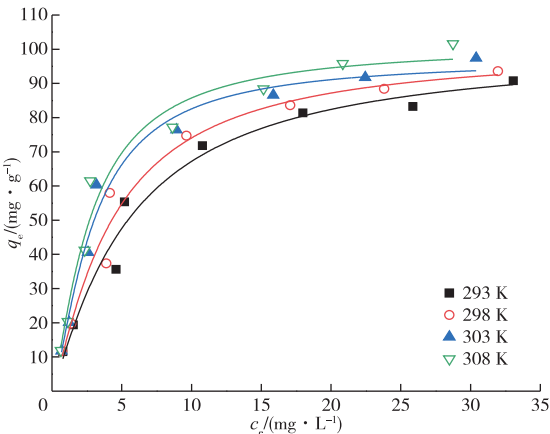


图 9 CoFe₂O₄/AM 对 U(VI) 的平衡吸附量与平衡浓度的关系
Fig. 9 Relationship between q_e and c_e of adsorption of U(VI) by CoFe₂O₄/AM

为进一步明确 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 对 U(VI) 的吸附层结构等吸附机理,对试验数据进行 Langmuir 等温吸附模型和 Freundlich 等温吸附模型拟合,拟合结果如表 2 所示。从表 2 可知,在 20、25、30、35 $^{\circ}\text{C}$ 这 4 个温度下,Langmuir 等温吸附模型的拟合线性相关系数都在 0.98 以上,较

Freundlich 等温吸附模型的线性相关性更好。 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 对 U(VI) 的吸附过程更符合 Langmuir 等温吸附模型,表明 U(VI) 在 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 上的吸附为表面单分子层。Freundlich 等温吸附模型中的 $1/n$ 值都在 $0\sim 1$,说明该吸附过程较容易进行。

表 2 不同温度下 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 吸附 U(VI) 的等温吸附模型参数
Table 2 Parameters for different isothermal adsorption model of adsorption of U(VI) by $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ at different reaction temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	Langmuir 等温吸附模型		Freundlich 等温吸附模型			
	$q_m/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$b/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	R^2	$1/n$	k_f	R^2
20	108.813 9	0.147 0	0.984 2	0.923 0	0.955 9	0.965 5
25	111.358 6	0.170 6	0.988 1	0.547 9	17.530 5	0.905 6
30	112.485 9	0.213 1	0.991 5	0.526 5	20.341 4	0.865 0
35	117.096 0	0.221 0	0.990 6	0.524 4	21.729 5	0.860 1

3 结论

1)改变合成方法的制样参数对材料的物理性质会产生很大影响。表征结果表明,制备得到的 CoFe_2O_4 材料呈不规则球形 CoFe_2O_4 颗粒团聚而成的块状, CoFe_2O_4 颗粒平均粒径约 200 nm。加入表面活性剂 AM 对 CoFe_2O_4 颗粒有很好的分散效果,会抑制 CoFe_2O_4 晶粒生长,提高水热反应时间都有利于材料结晶度的提高。

2)不同制样条件参数对 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 材料的 U(VI) 吸附性能有较大影响。在以丙烯酰胺(AM)为表面活性剂,水热反应温度 60 $^{\circ}\text{C}$,水热反应时间 1 h,钴铁比 1:1.5 的条件下制备的 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 对 U(VI) 可达到最好的吸附效果。

3)动力学模拟结果表明, $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 的 U(VI) 吸附过程符合准二级动力学模型,吸附过程中化学吸附起主导作用;等温吸附拟合结果表明,Langmuir 等温吸附模型与该吸附过程更为相符, $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{AM}$ 对 U(VI) 为单分子层吸附。

参考文献

- [1] 何登武,李冠超,李小燕,等. CuInS_2 光催化还原溶液中 U(VI) 的性能研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(4): 96-101,126.
HE D W, LI G C, LI X Y, et al. Study on performance of U(VI) in CuInS_2 photocatalytic reduction solution[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(4): 96-101,126.
- [2] LOISEAU T, MIHALCEA I, HENRY N, et al. The crystal chemistry of uranium carboxylates [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2015, 45(5): 69-109
- [3] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972, 238(5358): 37-44.
- [4] 桑伟璇,陈蓉,李小燕,等. 玉米淀粉负载型纳米零价铁去除溶液中 U(VI) 研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(8): 92-98.
SANG W X, CHEN R, LI X Y, et al. Removal of U(VI) from solution with nano-zerovalent iron supported by corn starch [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(8): 92-98.
- [5] 刘晴晴,李小燕,秦启凤,等. 纳米铁镍双金属去除溶液中 U(VI) 的性能研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(7): 74-78.
LIU Q Q, LI X Y, QIN Q F, et al. Research on the performance of nano-iron-nickel bimetal in removing U(VI) from solution [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(7): 74-78.
- [6] 曾琴,周义朋,黎广荣,等. 高岭土对酸性水中铀的吸附试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(5): 97-102.
ZENG Q, ZHOU Y P, LI G R, et al. Adsorption of uranium in acidic water by kaolin [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(5): 97-102.
- [7] 刘学,李小燕,陈玉洁,等. 石墨负载纳米零价铁去除溶液中 U(VI) [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(8): 1967-1973.
LIU X, LI X Y, CHEN Y J, et al. Removal of U(VI) from solution with graphite-loaded nano-zero-valent iron[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(8): 1967-1973.
- [8] 李小燕,陈超,刘义保,等. CuO/BiFeO_3 异质结光催化

- 还原溶液中 U(VI) 的性能[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1389-1398.
- LI X Y, CHEN C, LIU Y B, et al. The performance of CuO/BiFeO₃ heterojunction photocatalytic reduction of U(VI) in solution [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1389-1398.
- [9] 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(5): 119-124.
- DU J H, LAI J L, LUO X G. Adsorption characteristics and mechanism analysis of modified bamboo-based biochar for uranium[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(5): 119-124.
- [10] 林永乐, 蒋琪英, 李文进, 等. 稀土铁酸盐的制备及光催化性能[J]. 功能材料, 2021, 52(4): 4001-4006.
- LIN Y L, JIANG Q Y, LI W J, et al. Preparation and photocatalytic performance of rare earth ferrite[J]. Functional Materials, 2021, 52(4): 4001-4006.
- [11] 徐明, 邱木清. 核桃壳生物炭吸附水中铀的研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(7): 70-73.
- XU M, QIU M Q. Study on the adsorption of uranium in water by walnut shell biochar[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(7): 70-73.
- [12] LYU P, WANG G H, WANG B, et al. Adsorption and interaction mechanism of uranium (VI) from aqueous solutions on phosphate-impregnation biochar cross-linked Mg-Al layered double-hydroxide composite[J]. Applied Clay Science, 2021, 209: 106146. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106146>.
- [13] WANG Y, LIN Z W, LIU Q, et al. Ultra-high mechanical property and multi-layer porous structure of amidoximation ethylene-acrylic acid copolymer balls for efficient and selective uranium adsorption from radioactive wastewater[J]. Chemosphere, 2021, 280: 130722. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130722>.
- [14] SHARMA M, CHAUDHARY K, KUMARI M, et al. Highly efficient, economic, and recyclable glutathione decorated magnetically separable nanocomposite for uranium(VI) adsorption from aqueous solution[J]. Materials Today Chemistry, 2020, 18: 100379. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100379>.
- [15] LEHTO J, KOIVULA R, LEINONEN H, et al. Removal of radionuclides from Fukushima Daiichi waste effluents [J]. Separation and Purification Reviews, 2019, 48(2): 122-142.
- [16] SHUBAIR T, ELJAMAL O, TAHARA A, et al. Preparation of new magnetic zeolite nanocomposites for removal of strontium from polluted waters[J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 288: 26-37.