

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.01.024

壳聚糖改性材料用于海水提铀研究

董浩^{1,2}, 文君², 卢喜瑞^{1,2}

(1. 西南科技大学国防科技学院, 绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 通过在壳聚糖上交联偕胺肟基(AO)和1-二甲胺基烯丙基膦酸(DMAAPA), 制备出一种可用于海水提铀的新型壳聚糖改性材料(CTS-AM-AO-DA), 使用FT-IR光谱和扫描电镜表征材料表面的官能团和形貌. 通过吸附实验研究了材料在模拟海水中的吸附动力学过程和溶液pH、盐分以及竞争离子对材料吸附性能的影响. CTS-AM-AO-DA在模拟海水中的平衡吸附容量达到223.0 mg/g, 吸附过程符合准二级动力学方程. 在高pH(8.0)、高盐分(0.5 mol/L NaCl)、存在竞争离子(钙、镁、钒)的条件下, CTS-AM-AO-DA均表现出优异的铀吸附性能, 该材料在海水提铀领域具有潜在的应用价值.

关键词: 壳聚糖; 吸附; 交联; 铀

中图分类号: O632 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)01-0163-06

Study on uranium extraction from seawater with chitosan modified materials

DONG Hao^{1,2}, WEN Jun², LU Xi-Rui^{1,2}

(1. College of National Defense Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: A novel chitosan modified material, CTS-AM-AO-DA was synthesized through the crosslinking of chitosan with amidoxime group and (1-(dimethylamino)allyl) phosphonic acid (DMAAPA) as the uranium adsorbent from seawater. The chemical structures and appearance of the polymers were characterized by the FT-IR spectrum and the SEM. The adsorption kinetics in simulated seawater and the effects of solution pH, salinity, and competing ions on the adsorption properties of materials were studied by using adsorption experiments. The equilibrium adsorption capacity of CTS-AM-AO-DA is 223 mg/g and the adsorption dynamic data are applicable to the quasi-second-order model. Weak alkalinity (8.0), high salinity (0.5 mol/L) or the presence of competitive ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , V^{5+}) can not affect the adsorption properties of this material (CTS-AM-AO-DA) that provides the potential applications in real seawater environment.

Keywords: Chitosan; Adsorption; Crosslinking; Uranium

1 引言

铀是核能发电的主要核燃料来源,随着核能的

发展,陆矿铀储量估计将在一个世纪内耗尽^[1]. 海水中含有超过45亿吨的铀,几乎是陆矿铀储量的1000倍^[2-3],从海水中吸附提取铀被认为是为发展

收稿日期: 2019-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(21876162)

作者简介: 董浩(1996-),男,硕士生,研究方向为海水提铀、放射性废物处理与处置.

通讯作者: 文君. E-mail: junwen@caep.cn; 卢喜瑞. E-mail: luxiruimvp116@163.com

核电提供核燃料的一种可行方案^[4]。

近几十年来,海水提铀吸附剂发展迅速,根据材料种类可分为:无机材料^[5-8]、聚合物复合材料^[9-11]、金属-有机框架材料^[12-14]等。在这些吸附剂中,偕胺肟基吸附剂因其制备简单、成本低廉、在海水 pH 值(8.1)下具有与铀配位结合的能力,从而受到广泛关注^[15-17]。但海水中铀浓度极低(3.3 $\mu\text{g/L}$),同时还存有大量金属离子尤其是钙、镁和钒影响材料对铀的吸附。海水中钙和镁的浓度比铀高 6~7 个量级,在吸附过程中会占据偕胺肟基吸附剂上大量的活性位点;偕胺肟基对钒的配位性高于铀,造成大量钒吸附在材料表面上,且难以洗脱去除;因此提高偕胺肟基吸附剂对铀的吸附选择性是一项有意义的研究工作^[18]。最近 He 等^[19]报道了一种对铀具有高吸附选择性的铀酰结合蛋白,规避了偕胺肟基吸附钒的影响。Wu 等^[20]报道了一种通过辐照接枝乙二胺来制备的新型胺肟基 UHM-WPE 纤维吸附材料,该材料对铀的吸附选择性明显高于钒。Hua 等人^[21]报道了一种表面离子印迹聚丙烯无纺布用于铀的吸附,其对铀的吸附选择性得到显著提升。尽管这些方法有望应用于海水提铀,但这些吸附剂的制备过程较为复杂,并且忽略了海水中大量存在的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对吸附的影响。因此,开发一种制备简单,并且在高浓度钙、镁和近似浓度钒环境下对铀具有高吸附选择性的吸附剂,仍然是一个重要的挑战。

甲壳素及其脱乙酰衍生物壳聚糖是从甲壳类动物中提取的天然生物吸附剂,具有良好的稳定性、配位性和生物相容性,在吸附金属离子方面具有良好的应用前景^[22]。其中,甲壳素及壳聚糖对铀具有较好的吸附性能,在铀的吸附领域也受到了广泛关注^[23]。为解决甲壳素和壳聚糖吸附选择性较差的问题,通过化学改性的方法,修改材料表面的功能基团,可以提高其对铀的吸附选择性^[24-26]。本实验通过在壳聚糖上交联接枝偕胺肟基和 1-二甲胺基烯丙基膦酸(DMAAPA),合成了一种新型壳聚糖改性材料(CTS-AM-AO-DA)并对该材料进行模拟海水等多种体系的吸附试验,探究 pH、盐分以及竞争离子对吸附性能的影响。

2 实验

2.1 试剂

材料制备所需要的壳聚糖(CTS)、丙烯腈(AN)、丙烯酰胺(AM)、 NaHSO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 、

乙酸、戊二醛、乙醇、盐酸羟胺、甲醇和配置吸附溶液所用的 NaHCO_3 、 NaCl 、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 CaCl_2 、 MgCl_2 、 $\text{Na}_3\text{VO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、 NaOH 和 HNO_3 均购自阿拉丁试剂,1-二甲胺基烯丙基膦酸(DMAAPA)购自天成试剂。校准 ICP 所采用的 1000 $\mu\text{g/mL}$ 铀、钒、钙和镁金属离子标准溶液购自西格玛奥德里奇试剂。所有原料均为化学纯级别或以上。

2.2 制备

通过三步化学合成制备出 CTS-AM-AO-DA 材料,合成路线如图 1 所示。

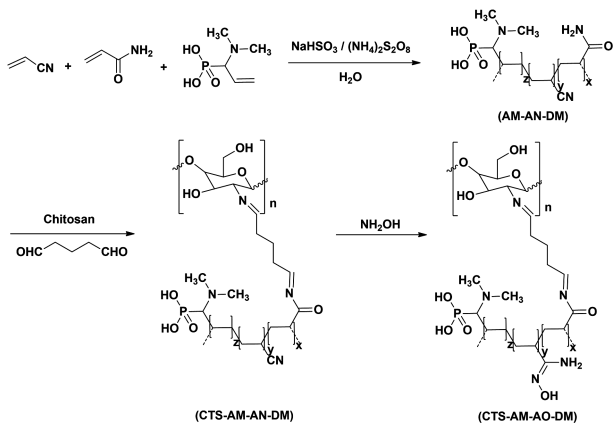


图 1 CTS-AM-AO-DM 的合成

Fig. 1 Synthesis of CTS-AM-AO-DM

AM-AN-DM 的合成: 将 9 g 丙烯酰胺、1 g 丙烯腈和 0.5 g DMAAPA 投入圆底烧瓶内,溶于 30 mL 去离子水中。溶液在氮气氛围下进行磁力搅拌,并于 50 $^{\circ}\text{C}$ 加热 0.5 h。随后向烧瓶中加入 20.6 mg NaHSO_3 和 45.6 mg $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 继续加热 12 h,使混合物充分聚合。使用乙醇将反应完成后的产物洗涤出白色固体,40 $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥后得到 AM-AN-DM。

CTS-AM-AN-DM 的合成: 将 2 g 壳聚糖溶解于圆底烧瓶中 60 mL、1 wt% 的乙酸溶液,加入 5 g 制备的 AM-AN-DM 并进行升温。温度达到 50 $^{\circ}\text{C}$ 时加入 0.5 mL 戊二醛并恒温反应 8 h,使 CTS 与 AM-AN-DM 形成交联。反应后的沉淀物使用乙醇洗涤并 40 $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥后,得到 CTS-AM-AN-DM。

CTS-AM-AO-DM 的合成: 将 CTS-AM-AN-DM 置于含 10 wt% 盐酸羟胺的甲醇/水(50% w/w)溶液中,80 $^{\circ}\text{C}$ 下加热 24 h,使 CTS-AM-AN-DM 上的腈基转换为偕胺肟基。同样将沉淀物用乙醇洗涤并干燥后,得到 CTS-AM-AO-DM。

2.3 表 征

使用美国赛默飞世尔公司的 Nicolet iS 10 傅立叶变换红外光谱仪(FT-IR),通过 KBr 固体压片法收集 CTS-AM-AO-DA 材料制备过程中聚合物在 $4\ 000\sim 600\text{ cm}^{-1}$ 区间的 FT-IR 光谱. 使用德国卡尔蔡司公司的 Super 55 扫描电子显微镜(SEM)观察材料的形貌. 使用美国康塔公司的 Quadrasorb SI 比表面积分析仪获得材料的 Brunauer - Emmett - Teller(BET)比表面积信息. 使用美国珀金埃尔默公司的 Optima 2100DV 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定溶液中的离子浓度.

2.4 吸附实验

称取一定质量的 CTS-AM-AO-DA 作为吸附剂投入到装有模拟海水的广口玻璃瓶中,将玻璃瓶置于振荡器中 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下震荡吸附 24 h,以达到吸附平衡. 以 $1\ 000\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 金属离子标准溶液加入 5 wt% 的稀硝酸配置出 5 种浓度范围为 $0\sim 10\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 的校准标液,对 ICP-OES 进行校准得到线性校准曲线,之后对吸附前和吸附平衡后的溶液进行测量分析. 公式 1 和 2 分别为离子在吸附剂上的平衡吸附容量 q_e (mg/g) 和吸附率 SE:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

$$\text{SE}(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中 V (L) 为溶液体积, m (g) 为吸附剂质量, C_0 和 C_e (mg/L) 分别为吸附前和吸附后溶液中的离子浓度.

研究时间对吸附过程的影响以及吸附动力学所使用的模拟海水制备方法为:向 1 L 去离子水中加入 8 mg $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、193 mg NaHCO_3 和 25.6 g NaCl ,混合均匀后调整 $\text{pH}=8.1$. 通过向铀溶液中加入 NaOH 和 HNO_3 调整 pH 为 $2.0\sim 9.0$,研究溶液 pH 对 CTS-AM-AO-DA 吸附性能的影响. $0\sim 0.5\text{ mol/L}$ 的 NaCl 作为盐分添加至铀溶液中,研究盐分对材料吸附性能的影响. 向模拟海水中加入 CaCl_2 、 MgCl_2 、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_3\text{VO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$,使混合溶液中含有与真实海水浓度相同的钙($411\ \mu\text{g}/\text{mL}$)和镁($1\ 290\ \mu\text{g}/\text{mL}$),同时为了便于测试,将溶液中的铀和钒的浓度分别提高到 20 和 $12.1\ \mu\text{g}/\text{mL}$,对制备的混合溶液进行吸附实验,并探究材料的吸附选择性. 所有实验数据均为三次测量的平均值,数据的相对误差小于 5%.

3 结果与讨论

3.1 CTS-AM-AO-DM 的表征

利用 FT-IR 光谱表征制备过程中三种聚合物的化学结构变化,结果如图 2 所示. 图 2(a)中 $2\ 242\text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰对应着丙烯腈结构上 $\text{C}\equiv\text{N}$ 的拉伸振动; $1\ 690$ 和 $1\ 620\text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰对应着丙烯酰胺结构上 $\text{C}=\text{O}$ 和 $-\text{NH}_2$ 的拉伸振动; $1\ 317$ 和 $1\ 042\text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰对应着磷酸基团结构上 $\text{P}=\text{O}$ 和 $\text{C}-\text{N}$ 的拉伸振动,同时出现的特征峰表明 AM-AN-DM 成功聚合. 图 2(b)的谱图显示:在 AM-AN-DM 的特征峰出现的同时, $1\ 072$ 、 $2\ 862$ 和 $3\ 355\text{ cm}^{-1}$ 处出现新的特征峰,对应着壳聚糖结构的拉伸振动,壳聚糖与 AM-AN-DM 形成稳定的交联状态. 图 1(c)中 $2\ 242\text{ cm}^{-1}$ 处对应 $\text{C}\equiv\text{N}$ 拉伸振动的特征峰消失的同时,在 933 和 $1\ 653\text{ cm}^{-1}$ 处出现了两个新的特征峰,说明材料上的腈基完全转化为偕胺胍基. 壳聚糖表面上存有偕胺胍基和磷酸基团意味着壳聚糖改性材料 CTS-AM-AO-DM 的成功合成.

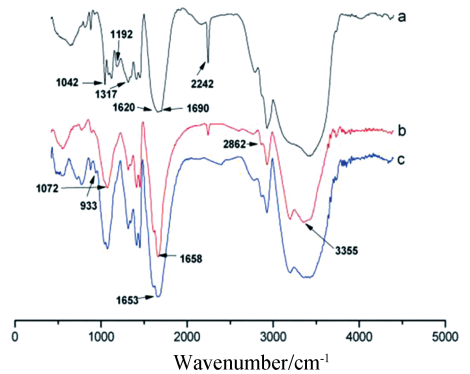


图 2 制备过程中聚合物的 FT-IR 光谱:(a) AM-AN-DM; (b) CTS-AM-AN-DM; (c) CTS-AM-AO-DM

Fig. 2 FT-IR spectra of polymers in preparation: (a) AM-AN-DM; (b) CTS-AM-AN-DM; (c) CTS-AM-AO-DM

使用 SEM 对 CTS-AM-AO-DM 以及在铀溶液吸附后的材料形貌进行表征. 如图 3 所示:合成的 CTS-AM-AO-DM 呈现出没有空隙的颗粒状聚

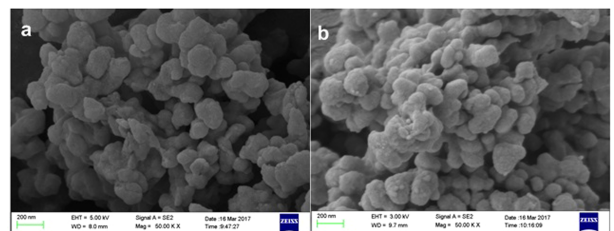


图 3 CTS-AM-AO-DM 的 SEM 图像:(a) 铀吸附前;(b) 铀吸附后

Fig. 3 SEM images of CTS-AM-AO-DM: (a) before uranium adsorption; (b) after uranium adsorption

集形态,粒径约为 200 nm,依旧保持着与壳聚糖类似的微观形貌.使用比表面积分析仪测试,CTS-AM-AO-DM 的比表面积 $S_{\text{BET}}=9.135 \text{ m}^2/\text{g}$,高比表面积意味着材料在溶液中与金属离子接触的活性位点更多,从而具有更快的吸附速率.CTS-AM-AO-DM 在铀溶液中吸附后,微观形貌没有发生明显变化,吸附过程没有对材料表面进行破坏,表现出优异的稳定性.

3.2 CTS-AM-AO-DM 的吸附动力学

将 10 mg CTS-AM-AO-DM 投至 500 mL 模拟海水中,25 °C 下震荡吸附,一定时间取样测试铀吸附容量,对得到的数据进行吸附动力学研究.如图 4 所示,在吸附过程的前 240 min,CTS-AM-AO-DM 的吸附速率较快,240 min 时的吸附容量即可达 100 mg/g 以上,之后吸附容量随着时间的延长缓慢增加,24 h 时达到吸附平衡,此时的平衡吸附容量为 223 mg/g.为了研究吸附动力学机理,采用准一级动力学线性方程(3)和准二级动力学线性方程(4)拟合吸附过程:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

式中 q_t (mg/g) 为时间 t 的吸附容量, q_e (mg/g) 为平衡吸附容量, k_1 (h^{-1}) 为准一级动力学的吸附速率常数, k_2 (g/mg/h) 为准二级动力学的吸附速率常数.

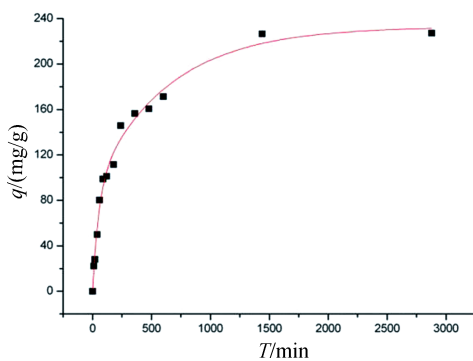


图 4 吸附时间对 CTS-AM-AO-DM 吸附铀的影响

Fig. 4 Effect of contact time on the uranium sorption by CTS-AM-AO-DM

表 1 CTS-AM-AO-DM 准一级和准二级动力学模型的动力学参数

Tab. 1 Kinetic parameters of quasi-first-order and quasi-second-order kinetic models for CTS-AM-AO-DM

quasi-first-order model			quasi-second-order model		
k_1 (h^{-1})	q_e (mg/g)	R^2	k_2 (mg/g/h)	q_e (mg/g)	R^2
0.31	203.7	0.94	0.0017	232.3	0.98

CTS-AM-AO-DM 的动力学参数如表 1 所示,相对较大的相关系数 ($R^2 = 0.98$) 说明准二级动力学线性方程对吸附过程的拟合程度更高,活性位点均匀分布在材料表面上,从而形成单层吸附,此时的饱和吸附容量理论值为 232.3 mg/g,与吸附实验的结果相近.

3.3 pH 对 CTS-AM-AO-DM 吸附铀的影响

pH 显著影响着溶液中铀的存在形态以及材料吸附位点的活性,是影响材料吸附性能的重要因素. $\text{pH} < 4.5$ 时,溶液中铀的存在形态主要以 UO_2^{2+} 为主; $\text{pH} > 4.5$ 后,以 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ 形态存在的程度不断增强,到 $\text{pH} = 6$ 时达到顶值; $\text{pH} = 6.5 \sim 7.5$ 时,以多核络合物 $(\text{UO}_2)_2\text{CO}_3(\text{OH})_3^-$ 为主要存在形式; $\text{pH} = 7.5 \sim 9.0$ 时,大量铀以负价态的 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_4^{4-}$ 存在.为研究铀溶液 pH 对 CTS-AM-AO-DM 的影响,分别将 5 mg CTS-AM-AO-DM 投至 30 mL、浓度为 20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、pH 为 2.0~9.0 的铀溶液中,25 °C 下震荡吸附 24 h 以达到吸附平衡. pH 的影响如图 5 所示,CTS-AM-AO-DM 在 $\text{pH} = 2.0$ 的铀溶液中吸附率仅为 47%,随着 pH 增加,吸附率大幅增加,当 $\text{pH} = 5.0$ 时,吸附率增加到 95% 以上.酸性条件下,铀溶液中大量的 H^+ 会附着在材料的活性位点上,从而降低材料的吸附性能.铀溶液的 $\text{pH} = 5.0 \sim 9.0$ 时, H^+ 对活性位点的抑制作用随着酸性的减弱而减弱,CTS-AM-AO-DM 的吸附率始终保持在 95% 以上.材料上的官能团可以很好与中性和电负性的铀络合物形成配位,所以吸附率较高,CTS-AM-AO-DM 在碱性条件下的吸附率明显高于酸性条件,非常适用于真实海水环境 ($\text{pH} = 8.1$) 下铀的吸附.

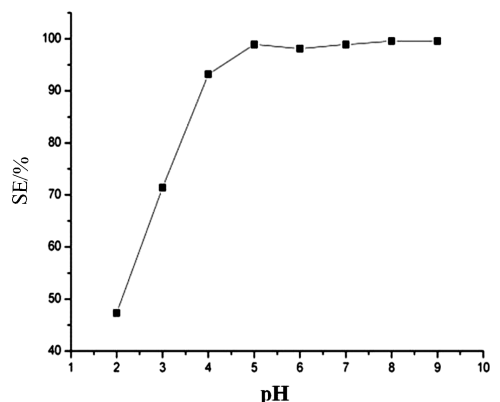


图 5 溶液 pH 对 CTS-AM-AO-DM 吸附铀的影响

Fig. 5 Effect of solution pH on the adsorption of uranium by CTS-AM-AO-DM

3.4 盐分对 CTS-AM-AO-DM 吸附铀的影响

海水中存在的大量盐分是影响材料铀吸附性能的重要环境因素, 研究盐分 (NaCl) 对材料吸附性能的影响至关重要. 分别将 5 mg CTS-AM-AO-DM 投至 30 mL、浓度为 20 $\mu\text{g/mL}$ 、 $\text{pH} = 8.0$ 、NaCl 浓度为 0.01~0.5 mol/L 的铀溶液中, 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下震荡吸附 24 h, 以观察盐分浓度对材料吸附率的影响. 如图 6 所示, NaCl 的浓度在 0.01~0.5 mol/L 范围内, 材料对的铀吸附率始终保持在 99% 以上. 盐分对 CTS-AM-AO-DM 吸收铀的性能没有显著影响, 这与其吸附机理主要为内表面络合, 而非球外表面络合或离子交换过程有关. 海水中的 NaCl 浓度为 0.44 mol/L, 即使在类似海水盐度的溶液中, CTS-AM-AO-DM 依旧保持着较好的吸附性能, 表现出良好的耐盐性.

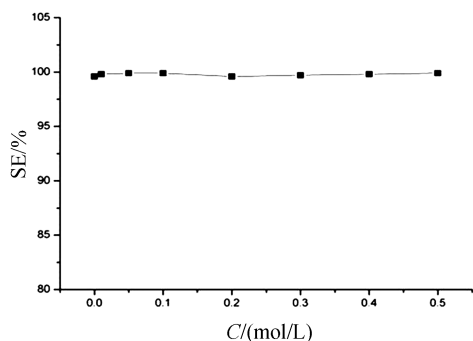


图 6 不同浓度 NaCl 的加入对 CTS-AM-AO-DM 吸附铀的影响

Fig. 6 The adsorption efficiency of uranium in the presence of NaCl with different concentrations

3.5 竞争离子对 CTS-AM-AO-DM 吸附 U(VI) 的影响

从以往报道来看, 胺基吸附材料在海水中吸附铀的同时, 海水中的钙、镁和钒是其主要的竞争离子, 研究竞争离子对 CTS-AM-AO-DM 吸附铀的影响很有必要. 将 10 mg CTS-AM-AO-DM 投至 200 mL 混合溶液中, 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下震荡吸附 24 h 以达吸附平衡. 结果如图 7 所示, CTS-AM-AO-DM 对铀的平衡吸附容量为 115.6 mg/g, 明显大于钒的吸附容量 (65.1 mg/g), 表现出极高的吸附选择性, 材料中的磷酸可以与铀形成良好的配位, 从而降低了钒的吸附量. CTS-AM-AO-DM 对钙和镁的吸附容量分别为 8.1 和 11.6 mg/g, 与铀相比吸附容量较低, 这与材料表面上不含有亲水性的羧基团有关. 竞争离子对吸附性能的影响较小, CTS-AM-AO-DM 上的壳聚糖、偕胺肟基和磷酸基

团的共同作用极大提高了材料对铀的吸附选择性.

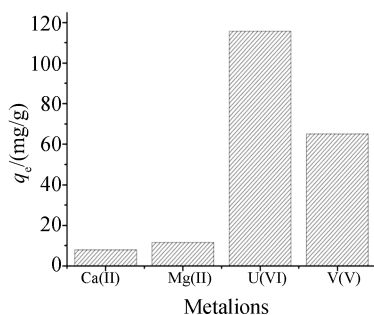


图 7 CTS-AM-AO-DM 对铀的吸附选择性

Fig. 7 Selective uranium adsorption on CTS-AM-AO-DM

4 结 论

1) 通过交联的方法可以将 AN、AM 和 DMAAPA 接枝在壳聚糖表面上, 进行胺肟化处理, 得到对铀具有良好吸附性能的壳聚糖改性材料.

2) 壳聚糖改性材料在配置的模拟海水中的平衡吸附容量达到 223 mg/g, 使用准二级动力学线性方程可以更好的拟合其吸附过程.

3) 在弱碱性 ($\text{pH} = 7.0 \sim 9.0$) 铀溶液中, 壳聚糖改性材料始终保持着高吸附率, 非常适合真实海水的 pH 环境; 即使铀溶液中添加 0.5 mol/L 的 NaCl, 依然对材料的吸附率没有明显影响, 表现出良好的耐盐性.

4) 在掺加钙、镁、钒和铀的混合溶液中, 壳聚糖改性材料对钙、镁的吸附量极低, 钒的吸附量与铀相比也明显较少, 该材料展现出对铀优异的吸附选择性.

参考文献:

- [1] Gabriel S, Baschwitz A, Mathonnière G, *et al.* A critical assessment of global uranium resources, including uranium in phosphate rocks, and the possible impact of uranium shortages on nuclear power fleets [J]. *Ann Nucl Energy*, 2013, 58: 213.
- [2] Saito K, Uezu K, Hori T, *et al.* Recovery of uranium from seawater using amidoxime hollow fibers [J]. *Aiche J*, 1988, 34: 411.
- [3] Kim J, Tsouris C, Mayes R T, *et al.* Recovery of uranium from seawater: a review of current status and future research needs [J]. *Sep Sci Technol*, 2013, 48: 367.
- [4] Davies R V, Kennedy J, Mcilroy R W, *et al.* Extraction of uranium from sea water [J]. *Nature*, 1964, 203: 1110.

- [5] 赖捷, 刘畅, 冷阳春, 等. 粘土岩对铀(VI)的吸附特征研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2017, 4: 815.
- [6] Schenk H J, Astheimer L, Witte E G, *et al.* Development of sorbers for the recovery of uranium from seawater. 1. Assessment of key parameters and screening studies of sorber materials [J]. Sep Sci Technol, 1982, 17: 1293.
- [7] Manos M J, Kanatzidis M G. Layered metal sulfides capture uranium from seawater [J]. J Am Chem Soc, 2012, 134: 16441.
- [8] Ma S, Huang L, Ma L, *et al.* Efficient uranium capture by polysulfide/layered double hydroxide composites [J]. J Am Chem Soc, 2015, 137: 3670.
- [9] Yue Y F, Sun X G, Mayes R T, *et al.* Polymer-coated nanoporous carbons for trace seawater uranium adsorption [J]. Sci China Chem, 2013, 56: 1510.
- [10] Górká J, Mayes R, Baggetto L, *et al.* Sonochemical functionalization of mesoporous carbon for uranium extraction from seawater [J]. J Mater Chem A, 2013, 1: 3016.
- [11] Wang F, Li H, Liu Q, *et al.* A graphene oxide/amidoxime hydrogel for enhanced uranium capture [J]. Sci Rep, 2016, 6: 19367.
- [12] Carboni M, Abney C W, Liu S, *et al.* Highly porous and stable metal-organic frameworks for uranium extraction [J]. Chem Sci, 2013, 4: 2396.
- [13] Li J, Gong L, Feng X, *et al.* Direct extraction of U(VI) from alkaline solution and seawater via anion exchange by metal-organic framework [J]. Chem Eng J, 2017, 316: 154.
- [14] Yang W, Bai Z Q, Shi W Q, *et al.* MOF-76: from a luminescent probe to highly efficient U(VI) sorption material [J]. Chem Commun, 2013, 49: 10415.
- [15] Sekiguchi K, Saito K, Konishi S, *et al.* Effect of seawater temperature on uranium recovery from seawater using amidoxime adsorbents [J]. Ind Eng Chem Res, 1994, 33: 662.
- [16] Kim J, Tsouris C, Oyola Y, *et al.* Uptake of uranium from seawater by amidoxime-based polymeric adsorbent: field experiments, modeling, and updated economic assessment [J]. Ind Eng Chem Res, 2014, 53: 6076.
- [17] Yue Y, Mayes R T, Kim J, *et al.* Seawater uranium sorbents: preparation from a mesoporous copolymer initiator by atom-transfer radical polymerization [J]. Angew Chem Int Edit, 2013, 52: 13458.
- [18] Pan H B, Kuo L J, Wai C M, *et al.* Elution of uranium and transition metals from amidoxime-based polymer adsorbents for sequestering uranium from seawater [J]. Ind Eng Chem Res, 2016, 55: 4313.
- [19] Zhou L, Bosscher M, Zhang C, *et al.* A protein engineered to bind uranyl selectively and with femtomolar affinity [J]. Nat Chem, 2014, 6: 236.
- [20] Gao Q, Hu J, Li R, *et al.* Radiation synthesis of a new amidoximated UHMWPE fibrous adsorbent with high adsorption selectivity for uranium over vanadium in simulated seawater [J]. Radiat Phys Chem, 2016, 122: 1.
- [21] Zhang L, Yang S, Qian J, *et al.* Surface ion-imprinted polypropylene nonwoven fabric for potential uranium seawater extraction with high selectivity over vanadium [J]. Ind Eng Chem Res, 2017, 56: 1860.
- [22] Ngah W S W, Teong L C, Hanafiah M A K M. Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: a review [J]. Carbohydr Polym, 2011, 83: 1446.
- [23] Sunilkumar B, Chakrapani G. Studies on sorption of uranium on chitin: a solid-state extractant application for removal of uranium from ground water [J]. J Radioanal Nuch Ch, 2014, 302: 1489.
- [24] Barber P S, Kelley S P, Griggs C S, *et al.* Surface modification of ionic liquid-spun chitin fibers for the extraction of uranium from seawater: seeking the strength of chitin and the chemical functionality of chitosan [J]. Green Chem, 2014, 16: 1828.
- [25] Mourya V K, Inamdar N N. Chitosan-modifications and applications: opportunities galore [J]. React Funct Polym, 2008, 68: 1013.
- [26] Alves N M, Mano J F. Chitosan derivatives obtained by chemical modifications for biomedical and environmental applications [J]. Int J Biol Macromol, 2008, 43: 401.

引用本文格式:

- 中文: 董浩, 文君, 卢喜瑞. 壳聚糖改性材料用于海水提铀研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 163.
- 英文: Dong H, Wen J, Lu X R. Study on uranium extraction from seawater with chitosan modified materials [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2020, 57: 163.