

PAO/In-N-C 电极材料对海水中铀的提取性能研究

宋艳, 王凤菊, 陈刚, 李子明, 吴浩天, 李昊, 李壑, 陈树森

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 研究了以石墨毡为基体材料, 采用化学改性法和涂覆法制备偕胺肟修饰的铜-氮-碳电极材料 (PAO/In-N-C), 并利用电化学工作站从海水中提取铀。考察了电极材料用量、外加电压、加标海水 pH、吸附时间对该电极材料从低浓度加标海水中提取铀的影响, 测试了该电极材料的离子选择性和循环使用性能, 探讨了该电极与铀酰离子的作用机制。结果表明: 针对 pH=8.10 的加标海水, 在外加电压为 -3~0 V、PAO/In-N-C 电极材料用量 7 mg、吸附时间 400 min 条件下, 铀提取率为 71.16%; PAO/In-N-C 电极还原加标海水中的铀分为电吸附和电沉积 2 步, 先利用电磁场加速 UO_2^{2+} 迁移到电极表面, 再形成电中性化合物 UO_2 沉积在电极表面。该材料吸附动力学性能显著, 具有较好的离子选择性和重复使用性, 有望用于海水提铀。

关键词: 海水提铀; PAO/In-N-C 电极; 加标海水; 铀; 提取

中图分类号: TL212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2617(2025)02-0215-07

DOI: 10.13355/j.cnki.sfyj.2025.02.010

铀作为核电运行最重要的核燃料, 其供应是保障核电可持续发展的关键; 但陆地上已探明的铀矿石储量仅能支持全球约 70 年的核能消耗, 因此探寻和开拓新的铀资源十分必要。据探测, 海水中蕴含的铀资源约为 45 亿 t^[1], 如能对其加以有效提取利用, 将有利于核电行业的可持续发展。海水中的铀主要以六价铀形式存在于碳酸铀酰或中性电荷衍生物中, 质量浓度仅为 3.3 $\mu\text{g/L}$, 且存在大量竞争离子, 从海水中提取铀极具挑战性^[2-3]。从海水中提取铀的方法主要有溶剂法、共沉淀法、离子交换法、吸附法和电化学法。其中, 吸附法是目前研究最为广泛的方法之一, 采用该法已从真实海水中成功吸附少量铀, 但使用中仍面临铀吸附容量不高、吸附平衡时间较长、脱附程序复杂等诸多挑战。

相较吸附法, 电化学法具有提取能力较强、铀酰离子迁移速度较快、脱附简单等优点^[4-9], 逐渐受到重视。电极材料的选择是该法的关键, 直接影响提取铀的能耗和反应效率。近年来, 国内外研究人员已研发了多种用于电化学

法从海水中提取铀的材料, 如偕胺肟功能化碳电极、偕胺肟基团修饰碳化钛基 MXene 纳米片电极、 Fe_3O_4 电极等。这些材料都是选用导电性较好、比表面积较大的石墨毡作为基体材料, 再将铀酰离子具有较好提取性能的吸附材料涂覆在石墨毡上, 从而达到高效、快速分离溶液中铀的效果。现有试验研究所用含铀溶液多为配制的纯铀溶液或通过溶解一定量海盐配制的溶液, 未充分考虑真实海水中 Cl、Na、Mg、S、Ca、Fe、V 等离子影响, 材料的吸附性能还有待进一步验证^[10-13]。

针对上述问题, 试验首先采用化学改性法制备了 PAO/In-N-C 材料, 再将其涂覆在石墨毡上制备了 PAO/In-N-C 电极材料, 考察了电极材料用量、外加电压、加标海水 pH、吸附时间对该电极材料从低浓度加标海水中提取铀的影响, 确定了试验条件。此外, 测试了 PAO/In-N-C 电极材料的离子选择性和重复使用性能, 并探讨了该电极与铀酰离子的作用机制, 以期海水提铀提供一种可选择的电极材料。

收稿日期: 2024-09-21

基金项目: 中核集团青年英才科研项目(中核研发[2023]384号)。

第一作者简介: 宋艳(1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无机材料、有机高分子材料。

通信作者简介: 陈树森(1978—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为有机高分子材料。

1 试验部分

1.1 试验原料、试剂与仪器

加标海水:取海南昌江黎族自治县附近海域的真实海水,加入硝酸铈酰六水化合物,用碳酸氢钠溶液调节 pH 至 8.10(真实海水 pH 在 8.10 左右),配制成铈质量浓度为 3.3 mg/L 的加标海水溶液,用于对电极材料进行快速筛选和性能评估。

2-甲基咪唑、六水合硝酸铈、甲醇、氢氧化钾、单宁酸、五水合硝酸铜、硫酸、硝酸、二甲基甲酰胺、二氯亚砷、四氢呋喃、氨水、乙腈、甲醛、乙酸、盐酸羟胺、氯化钠、乙醇、Nafion 溶液(5%)、碳酸氢钠等,均为分析纯。

石墨毡,厚度 2 mm;石墨片电极,30 mm × 30 mm × 30 mm;饱和甘汞参比电极。

DHG-9055A 电热鼓风干燥器,上海一恒科学仪器;BS224S 分析天平,上海仪电科学仪器股份有限公司;KS 3000 i control 恒温振荡仪,艾卡(广州)仪器设备有限公司;RET basic 磁力搅拌器,艾卡(广州)仪器设备有限公司;CHI660C 电化学工作站,上海辰华有限公司;GSL-1400X 管式炉,合肥科晶材料技术有限公司;Tensor II 型傅里叶变换红外光谱仪,德国布鲁克公司;JSM-6480A 型扫描电子显微镜,日本 JEOL 公司;PHS-3C 酸度计,上海仪电有限公司。

1.2 PAO/In-N-C 电极材料的制备

参照文献[14]方法,采用溶剂热合成法制备沸石咪唑酯骨架纳米颗粒(ZIF-8)。将 ZIF-8 纳米颗粒加入到单宁酸溶液中反应一定时间后取出,离心,干燥,之后再加入到五水合硝酸铜溶液中反应一定时间,经离心过滤后放入管式炉中,于 950 °C 下退火 2 h,然后冷却至室温,得铜-氮-碳材料(In-N-C)。

将 In-N-C 材料加入到二甲基甲酰胺和二氯亚砷的混合溶液中,反应一定时间后取出,离心、洗涤后,在冰浴条件下投入到氨水中反应 4 h;离心、过滤、干燥后,加入到乙腈、甲醛溶液和乙酸的混合溶液中,于 90 °C 下反应 12 h;洗涤、干燥后加入到盐酸羟胺、氯化钠和蒸馏水的混合溶液中,于 70 °C 下反应 6 h,离心、过滤,得 PAO/In-N-C 电极材料。

称取一定量 PAO/In-N-C 电极材料加入到导电炭黑、乙醇、Nafion 和蒸馏水的混合溶液中形成涂覆液,在超声搅拌下形成电催化油墨,并将其涂覆到石墨毡上,自然晾干,得 PAO/In-N-C 电极材料。

1.3 电极材料的性能测试

所有电化学提取铈试验均在 CHI 电化学工作站上并采用计时电流法进行。工作电极是 PAO/In-N-C 电极,对电极为石墨片电极,辅助电极为饱和甘汞电极。按照《水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 700—2014)标准^[15]中的方法,利用 ICP-MS 测定加标海水中铈质量浓度,按下式计算 U(VI)提取率 x :

$$x = \frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_0} \times 100\%$$

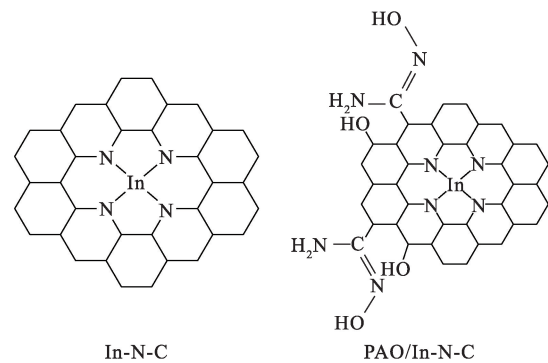
式中: ρ_0 —加标海水中 U(VI) 初始质量浓度, mg/L; ρ_t —电化学提铈 t 时间后加标海水中 U(VI) 质量浓度, mg/L。

电化学提铈后,将 PAO/In-N-C 电极用蒸馏水洗涤,之后置于装有 50 mL 解吸剂的烧杯中,采用施加 3 V 反向电压方式解吸 0.5 h,采用 ICP-MS 测定解吸液中铈质量浓度。

2 试验结果与讨论

2.1 PAO/In-N-C 电极材料红外表征

In-N-C 和 PAO/In-N-C 的化学结构如下:



In-N-C 和 PAO/In-N-C 的红外光谱如图 1 所示。

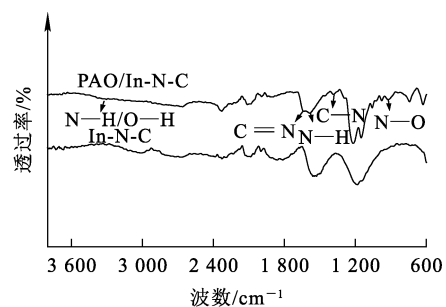


图 1 In-N-C 和 PAO/In-N-C 的红外光谱

Fig. 1 Infrared spectra of In-N-C and PAO/In-N-C

由图 1 看出:与 In-N-C 相比,PAO/In-N-C 的红外光谱在 $3\ 100\sim 3\ 300$ 、 $1\ 637$ 、 $1\ 580$ 、 $1\ 380$ 和 $924\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了新峰,分别对应于偕胺肟基的 O—H、C=N、N—H、C—N 和 N—O 振动峰,表明在 In-N-C 中成功引入了偕胺肟功能基团。

2.2 各因素对 PAO/In-N-C 电极材料提取铀的影响

2.2.1 PAO/In-N-C 电极材料用量的影响

在外加电压为 $-3\sim 0\ \text{V}$ 、加标海水 $\text{pH}=8.10$ 、吸附时间 $360\ \text{min}$ 条件下,考察 PAO/In-N-C 电极材料用量对提取铀的影响,试验结果如图 2 所示。

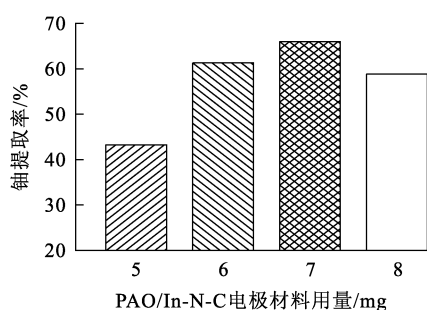


图 2 PAO/In-N-C 电极材料用量对提取铀的影响

Fig. 2 Effect of PAO/In-N-C electrode material dosage on uranium extraction

由图 2 看出:随 PAO/In-N-C 电极材料用量增加,铀提取率先逐渐升高后略有降低;PAO/In-N-C 电极材料用量增至 $7\ \text{mg}$ 时,铀提取率达最大,为 66.02% ;继续增加 PAO/In-N-C 材料用量,铀提取率反而下降,这是因为 PAO/In-N-C 电极材料用量过多,易产生堆积,即使延长超声时间也无法将其完全分散,影响铀提取率。因此,确定 PAO/In-N-C 电极材料用量以 $7\ \text{mg}$ 为宜。

2.2.2 外加电压的影响

在 PAO/In-N-C 电极材料用量为 $7\ \text{mg}$ 、加标海水 $\text{pH}=8.10$ 、吸附时间 $360\ \text{min}$ 条件下,考察外加电压对提取铀的影响,试验结果如图 3 所示。可以看出:随低电压数值增加,电极材料对铀的提取率升高;外加电压为 $-3\sim 0\ \text{V}$ 时,铀提取率达最大,为 66.02% ;继续增加低电压数值,铀提取率反而下降,这是由于低电压数值增大使溶液中其他金属离子与铀酰离子竞争吸附位点,导致铀提取率下降。因此,确定采用外加电压 $-3\sim 0\ \text{V}$ 进行试验为宜。

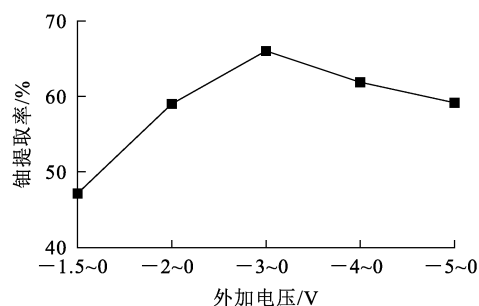


图 3 外加电压对 PAO/In-N-C 电极材料提取铀的影响

Fig. 3 Effect of applied voltage on uranium extraction by PAO/In-N-C electrode material

2.2.3 加标海水 pH 的影响

在提取 U(VI) 过程中,溶液中 U(VI) 的存在形式通常会受到 pH 影响,导致电极材料对铀酰离子的提取能力存在差异。在 PAO/In-N-C 电极材料用量 $7\ \text{mg}$ 、外加电压 $-3\sim 0\ \text{V}$ 、吸附时间 $360\ \text{min}$ 条件下,考察加标海水 pH 对 PAO/In-N-C 电极材料提取铀的影响,试验结果如图 4 所示。

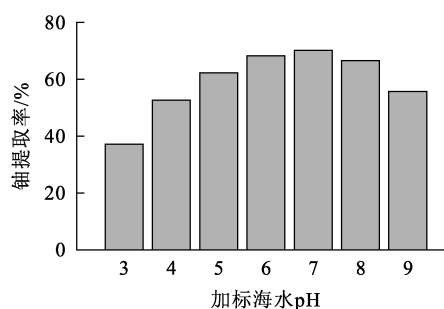


图 4 加标海水 pH 对 PAO/In-N-C 电极材料提取铀的影响

Fig. 4 Effect of pH on uranium extraction by PAO/In-N-C electrode material

由图 4 看出:加标海水 pH 由 3 升至 7 时,PAO/In-N-C 电极材料对加标海水中铀提取率不断升高,并在 $\text{pH}=7$ 时达最大,为 70.11% ;继续升高 pH ,铀提取率反而下降,这是因为偕胺肟基团会在酸性环境中发生质子化效应,正电荷间产生静电斥力,抑制其对铀的吸附,且在 pH 较高条件下, U(VI) 会转变为稳定常数较高的 $[\text{UO}_2(\text{OH})_3]^-$,也不利于吸附^[16]。由于真实海水 pH 在 8.10 左右,因此确定以 $\text{pH}=8.10$ 的加标海水进行试验为宜。

2.2.4 吸附时间的影响

在 PAO/In-N-C 电极材料用量 7 mg、加标海水 pH=8.10、外加电压 -3~0 V 条件下,考察吸附时间对 PAO/In-N-C 电极材料提取铀的影响,试验结果如图 5 所示。

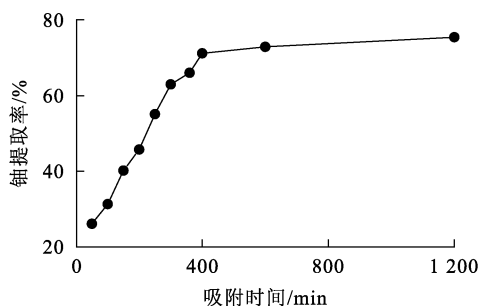


图 5 吸附时间对 PAO/In-N-C 电极材料提取铀的影响

Fig. 5 Effect of adsorption time on uranium extraction by PAO/In-N-C electrode material

由图 5 看出:PAO/In-N-C 电极材料对铀的提取率随吸附时间延长而升高,吸附 400 min 时,铀提取率达 71.16%;之后继续延长吸附时间,铀提取率升幅不大,趋于稳定。因此,确定吸附时间以 400 min 为宜。

分别采用拟一级动力学模型和拟二级动力学模型^[17]对 PAO/In-N-C 电极材料吸附铀的试验数据进行拟合,结果如图 6 所示。

拟一级动力学模型方程:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t;$$

拟二级动力学模型方程:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}.$$

式中: q_e —电极对铀平衡吸附量,mg/g; q_t —吸附 t 时间时电极对铀的吸附量,mg/g; k_1 —拟一级动力学模型的吸附速率平衡常数, min^{-1} ; k_2 —拟二级动力学模型的吸附速率平衡常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; t —吸附时间,min。

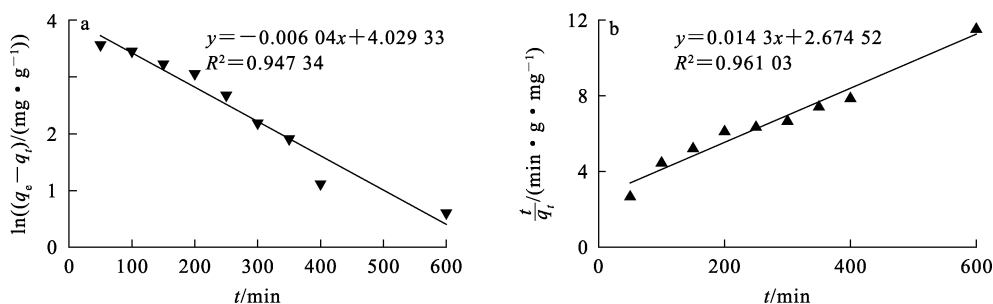


图 6 拟一级(a)和拟二级(b)动力学模型的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of quasi-first-order (a) and quasi-second-order (b) kinetic models

由图 6 看出:拟一级动力学模型的拟合曲线方程为 $y = -0.00604x + 4.02933$,线性相关系数为 0.94734;拟二级动力学模型的拟合曲线方程为 $y = 0.0143x + 2.67452$,线性相关系数为 0.96103。说明采用拟二级动力学模型比拟一级动力学模型描述 PAO/In-N-C 电极材料对 U(VI) 的吸附动力学过程更好,吸附过程中化学吸附占主导。

2.3 XPS 表征

在外加电压 -3~0 V、加标海水 pH=8.01、PAO/In-N-C 电极材料用量 7 mg、吸附时

间 400 min 适宜条件下吸附加标海水中的铀,利用 XPS 分析了吸附铀后 PAO/In-N-C 电极的元素组成,结果如图 7 所示。由图 7(a) 看出:XPS 光谱中有 C、N、O、In 和 U 出现,说明在电极材料表面吸附了一定量的铀。由图 7(b) 看出:U(VI) 在 U 4 $f_{7/2}$ 和 U 4 $f_{5/2}$ 的峰出现在 382.32 和 393.15 eV 处,而 U(IV) 在 U 4 $f_{7/2}$ 和 U 4 $f_{5/2}$ 的峰出现在 380.57 和 391.41 eV 处,U(VI) 和 U(IV) 峰同时出现,说明 PAO/In-N-C 电极能将部分 U(VI) 还原为 U(IV)。

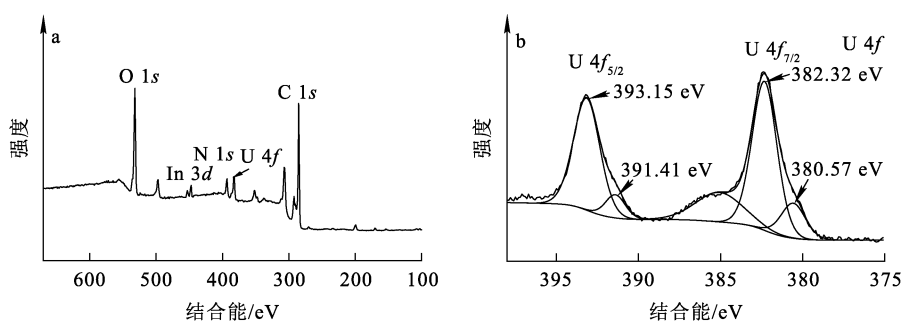


图 7 PAO/In-N-C 电极吸附铀后的全谱 (a)和 U 4f 单谱 (b)
Fig. 7 Full spectrum (a) and U 4f single spectrum (b) after uranium adsorption by PAO/In-N-C electrode material

2.4 吸附机制

PAO/In-N-C 电极与加标海水中铀酰离子的反应过程示意如图 8 所示。PAO/In-N-C 电极与铀酰离子的作用机制包括电吸附和电沉积 2 个过程^[18]。在电吸附过程中,当无电流通过时,各金属离子均匀分布在加标海水中(图 8(a));当有电流通过时,电磁场加速 UO_2^{2+} 迁移到电极表面,在溶液和电极表面形成了双电层(图 8(b)),吸附的铀酰离子可以与负极上的偕胺肟基团配位,协同提高铀提取率,随后结合电子形成电中性化合物 UO_2 沉积在负极表面(图 8(c))。在第 2 次循环中再次无电流通过时,没有特异结合的其他离子将再次分散到溶液中(图 8(d));而再次有电流通过时,铀酰离子继续进行电吸附(图 8(e))和电沉积(图 8(f))。随循环的重复,铀不断沉积在负极表面以实现富集,在铀吸附过程中最关键的部分是 UO_2 的还原,使得铀沉积在工作电极上,易于富集并可提升工作效率。

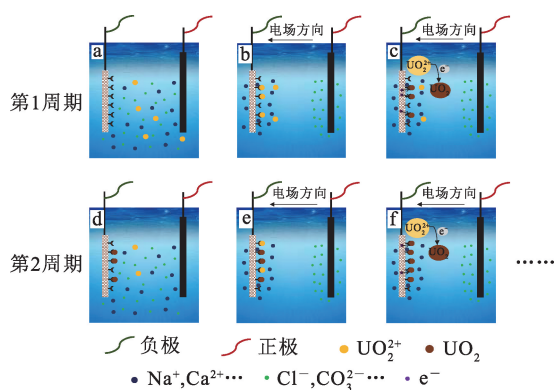


图 8 PAO/In-N-C 电极与加标海水中铀酰离子的反应过程示意
Fig. 8 Schematic diagram of reaction process between PAO/In-N-C electrode material and uranyl ions in spiked seawater

2.5 PAO/In-N-C 电极材料的性能测试

2.5.1 离子选择性

为了验证 PAO/In-N-C 电极材料对铀酰离子的离子选择性,配制了一种模拟溶液,其中金属离子(VO_3^- 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+})和 $U(VI)$ 浓度分别为真实海水中相应离子质量浓度的 1 000 倍, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 质量浓度与真实海水中的相同(Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度过高,已达饱和状态),利用 PAO/In-N-C 电极进行电化学性能测试,测定吸附金属离子前后溶液中离子浓度,计算提取率,结果见表 1。可以看出:PAO/In-N-C 电极对 $U(VI)$ 的提取率为 71.89%,远高于其他离子,说明 PAO/In-N-C 电极对海水中铀酰离子具有较好的选择性。

表 1 PAO/In-N-C 电极材料对金属离子的选择性测试结果
Table 1 Selectivity test results of PAO/In-N-C electrode material for metal ions

金属离子	吸附前溶液中 $\rho_B/(mg \cdot L^{-1})$	吸附后溶液中 $\rho_B/(mg \cdot L^{-1})$	提取率/%
UO_2^{2+}	3.301	0.928	71.89
VO_3^-	1.718	1.349	21.47
Fe^{3+}	1.252	1.072	14.37
Co^{2+}	0.051	0.049	3.92
Ni^{2+}	0.747	0.659	11.78
Cu^{2+}	0.804	0.745	7.33
Mg^{2+}	1 090.05	912.22	16.31
Ca^{2+}	341.42	308.67	9.59
Na^+	10 072.09	9 475.38	5.92

2.5.2 重复使用性能

为研究 PAO/In-N-C 电极材料的重复使用性能,首先通过试验筛选适宜的解吸剂。选用 4 种不同解吸剂对吸附铀后的 PAO/In-N-C 电极材料进行解吸,试验结果如图 9 所示。可以看出:

0.2 mol/L Na₂CO₃对铀的解吸效果最好,解吸率为87.41%;0.1 mol/L HNO₃和0.5 mol/L H₂SO₄解吸效果次之,解吸率分别为64.88%和50.23%;0.4 mol/L NaHCO₃解吸效果最差,解吸率仅为39.12%。因此,选择0.2 mol/L Na₂CO₃溶液为解吸剂。

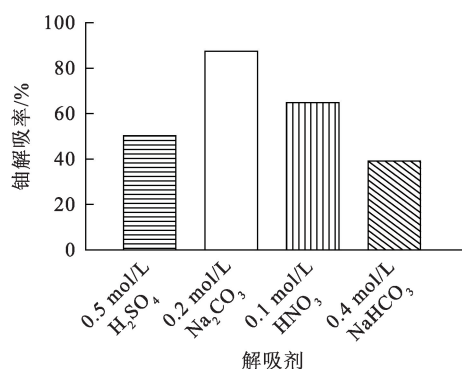


图9 不同解吸剂的解吸效果对比

Fig. 9 Comparison of desorption effects of different desorption agents

在外加电压为-3~0 V、加标海水 pH=8.10、PAO/In-N-C 电极材料用量 7 mg、吸附时间 400 min 条件下进行吸附试验;然后用水冲洗电极,采用施加反向电压方式,用 0.2 mol/L Na₂CO₃ 溶液对电极材料进行铀解吸试验,控制解吸时间为 0.5 h;解吸后取出电极用水冲洗,重复上述操作 4 次,考察 PAO/In-N-C 电极材料的重复使用性能,结果如图 10 所示。

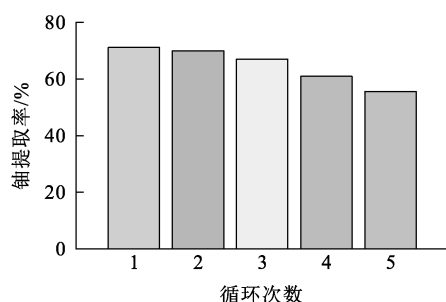


图10 PAO/In-N-C 电极材料的重复使用性能

Fig. 10 Reusability of PAO/In-N-C electrode material

由图 10 看出:随吸附-解吸循环次数增加,电极材料对铀的提取率降低,循环 5 次后,铀提取率仍保持在 55%左右,说明 PAO/In-N-C 电极材料具有较好的重复使用性能。

3 结论

从 In-N-C 材料的构筑及表面偕胺肟的接枝改性出发,利用涂覆法将 PAO/In-N-C 材料负载到石墨毡表面制备了 PAO/In-N-C 电极材料,并采用电化学法将其用于从海水中提取铀是可行的。PAO/In-N-C 电极材料对铀的提取过程首先是利用电磁场加速 UO₂²⁺ 迁移到电极表面,然后形成电中性化合物 UO₂ 沉积在电极表面。在 PAO/In-N-C 电极材料用量 7 mg、外加电压 -3~0 V、加标海水 pH=8.10、吸附时间 400 min 适宜条件下,铀提取率为 71.16%;利用施加反向电压方式对材料进行解吸,以 0.2 mol/L Na₂CO₃ 为解吸剂,铀解吸率可达 87.41%;该电极材料对海水中铀酰离子具有较好的选择性,重复使用性能良好。该电极材料对于采用电化学法从海水中提铀具有一定应用潜力,是一种可供选择的材料。

参考文献:

- [1] DAVIES S S, RYAN P L. Seven chemical separations to change the world[J]. Nature, 2016, 532(7600): 435-437.
- [2] 宋艳, 牛玉清, 宿延涛, 等. 未来海水提铀的前景规划与展望[J]. 核化学与放射化学, 2022, 44(3): 229-232.
SONG Yan, NIU Yuqing, SU Yantao, et al. Future plan and prospect for uranium extraction from seawater[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2022, 44(3): 229-232.
- [3] 徐晗, 王聪芝, 刘峙嵘, 等. 海水提铀吸附材料及官能团配位机理研究进展[J]. 化学学报, 2024, 82(4): 458-470.
XU Han, WANG Congzhi, LIU Zhirong, et al. Advances in adsorption materials and coordination mechanism of functional groups for uranium extraction from seawater[J]. Acta Chimica Sinica, 2024, 82(4): 458-470.
- [4] 李子明, 牛玉清, 宿延涛, 等. 海水提铀技术最新研究进展[J]. 核化学与放射化学, 2022, 44(3): 233-245.
LI Ziming, NIU Yuqing, SU Yantao, et al. Latest research progress of uranium extraction from seawater[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2022, 44(3): 233-245.
- [5] LI H, CHEN S S, SONG Y, et al. Preparation of antibioadhering materials containing quaternary phosphonium salt for uranium extraction from seawater[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6: 3796-3804.
- [6] LIU C, HSU P C, XIE J, et al. A half-wave rectified alternating current electrochemical method for uranium extraction from seawater[J]. Nature Energy, 2017, 2(4): 294-303.
- [7] 黄晨, 毛承凯, 姚运友, 等. 海水提铀用偕胺肟基纤维吸附材料的研究进展[J]. 核化学与放射化学, 2022, 44(3): 246-264.
HUANG Chen, MAO Chengkai, YAO Yunyou, et al.

- Research progress of amidoxime-based fiber for uranium extraction from seawater[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2022, 44(3): 246-264.
- [8] 高子腾,陈树森,丁海云,等. 偕胺肟改性聚丙烯腈电极材料的制备及其从海水中吸附铀试验研究[J]. *湿法冶金*, 2022, 41(5): 437-443.
- GAO Ziteng, CHEN Shusen, DING Haiyun, et al. Preparation of amidoxime modified electrode materials and adsorption uranium from seawater[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2022, 41(5): 437-443.
- [9] 聂小琴,董发勤,何辉超,等. 双官能团纤维修饰电极制备及对高盐水体中铀的高效提取研究[J]. *化工矿物与加工*, 2022, 51(3): 1-8.
- NIE Xiaoqin, DONG Faqin, HE Huichao, et al. Preparation of bifunctional fiber modified electrode and efficient extraction of uranium from high salinity water[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2022, 51(3): 1-8.
- [10] LI N, LI Y, SU R D, et al. Selective extraction of uranium from seawater on amidoximated MXene/metal-organic framework architecture under an electric field[J]. *Desalination*, 2023, 566: 116940-116949.
- [11] TIAN G, GENG J X, JIN Y D, et al. Sorption of uranium(VI) using oxime-grafted ordered mesoporous carbon CMK-5[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1/2/3): 442-450.
- [12] LIU W, YANG Y, CHENG R, et al. Facet-dependent electrochemical uranium extraction in seawater over Fe_3O_4 catalysts[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 319: 124054-124059.
- [13] ZHAO Y S, LIU C X, FENG M, et al. Solid phase extraction of uranium(VI) onto benzoylthiourea-anchored activated carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 176(1/2/3): 119-124.
- [14] VENNA R S, JASINSKI B J, CARREON A M. Structural evolution of zeolitic imidazolate framework-8[J]. *JACS Communication*, 2010, 132: 18030-18033.
- [15] 国家环境保护部. 水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法: HJ 700—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [16] 王妍力, 罗明标, 杨智翔. 海水中铀的形态分布模拟研究: 以上海近海洋山海水为例[J]. *世界核地质科学*, 2017, 34(2): 92-95.
- WANG Yanli, LUO Mingbiao, YANG Zhixiang, et al. Analysis on uranium existing form in sea water: taking coastal water of Yangshan in Shanghai as an example[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2017, 34(2): 92-95.
- [17] 王凤菊, 宋艳, 李子明, 等. 胺基改性壳聚糖吸附材料的制备及其对铀的吸附性能研究[J]. *湿法冶金*, 2024, 43(1): 99-104.
- WANG Fengju, SONG Yan, LI Ziming, et al. Preparation of amino-modified chitosan adsorbent and its adsorption properties for uranium[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2024, 43(1): 99-104.
- [18] SAVAN K R, ANDREW J C R, BRIAN C Y, et al. Electrochemical techniques for uranium extraction from water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 492: 152341-152369.

Extraction Performance of PAO/In-N-C Electrode Materials for Uranium from Seawater

SONG Yan, WANG Fengju, CHEN Gang, LI Ziming, WU Haotian, LI Hao, LI He, CHEN Shusen

(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC,
Beijing 101149, China)

Abstract: An indium-nitrogen-carbon electrode material (PAO/In-N-C) modified with amidoxime was prepared using graphite felt as matrix material by chemical modification and coating, and uranium was extracted from seawater by electrochemical workstation. The effects of the PAO/In-N-C electrode material dosage, applied voltage, pH of spiked seawater and adsorption time on the extraction of uranium from low-concentration spiked seawater were investigated. The ion selectivity and recycling performance of the electrode material were tested, and the interaction mechanism between the electrode and uranyl ions was discussed. The results show that the extraction rate of uranium is 71.16% under the conditions of applied voltage of $-3 \sim 0$ V, PAO/In-N-C electrode material dosage of 7 mg, adsorption time of 400 min, and seawater pH=8.10. PAO/In-N-C electrode material reduction of uranium in seawater is divided into two steps: electroadsorption and electrodeposition. Firstly, the electromagnetic field is used to accelerate the migration of UO_2^{2+} to the electrode surface, and then the electroneutral compound UO_2 is formed and deposited on the electrode surface. The material has remarkable adsorption kinetics, good ion selectivity and reusability, and is expected to be used for uranium extraction from seawater.

Key words: uranium extraction from seawater; PAO/In-N-C electrode; spiked seawater; uranium; extraction