

PAO/TiO₂ 电极的制备 及对海水中铀的高效提取研究

宋艳[#], 陈刚[#], 王凤菊, 吴浩天, 李子明, 李昊, 李壑, 崔琦, 陈树森*

(核工业北京化工冶金研究院 中核海水提铀技术重点实验室, 北京 101149)

摘要: 为探讨电化学技术对海水中 U(VI) 的提取性能, 本文采用滴涂法制备了偕胺肟基聚丙烯脒修饰的 TiO₂ 电极 (PAO/TiO₂ 电极), 利用 SEM、FT-IR、XPS 等手段对其进行表征, 并通过电化学性能测试考察了电极对模拟海水和真实海水中铀的提取效果。结果表明, PAO/TiO₂ 电极对模拟海水中的 U(VI) 有高效捕获能力, 铀提取率达 89.01%, 电极对 U(VI) 的选择性优于其他竞争金属离子 (VO₃⁻、Fe³⁺、Co²⁺、Ni²⁺、Cu²⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺); 在真实海水中对铀的提取率达 59.4%, 铀的吸附量为 4.07 mg/g。PAO/TiO₂ 电极对 U(VI) 的提取机理分析表明, PAO/TiO₂ 电极可通过电吸附和电沉积两步反应实现从海水中提取铀酰离子, 是一种具有应用潜力的电极材料。

关键词: PAO/TiO₂ 电极; 电化学技术; 海水提铀

中图分类号: TL212

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)04-0816-08

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0668

Preparation of PAO/TiO₂ Electrode and Efficient Extraction of Uranium from Seawater

SONG Yan[#], CHEN Gang[#], WANG Fengju, WU Haotian, LI Ziming,

LI Hao, LI He, CUI Qi, CHEN Shusen*

(CNNC Key Laboratory on Uranium Extraction from Seawater,

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

Abstract: In order to investigate the reduction performance of U(VI) in seawater by electrochemical technology, TiO₂ nanotube array electrode was firstly prepared by anodizing method, and then the amidoxime-modified TiO₂ electrode (PAO/TiO₂ electrode) was prepared by using the drip coating method to make the amidoxime functional groups loaded on the surface of TiO₂ electrode. The electrode was characterized by scanning electron microscopy, infrared spectroscopy and X-ray Auger electron spectroscopy. The uranium extraction performance of PAO/TiO₂ electrode in spiked seawater and real seawater was investigated respectively. The reaction mechanism was also proposed. The results of scanning electron microscopy and infrared spectroscopy show that the surface of the prepared TiO₂ nanoarray is smooth and the tube diameter is uniform. PAO containing amidoxime functional groups is

收稿日期: 2024-09-21; 修回日期: 2024-10-18

基金项目: 中核集团“青年英才”项目(中核科发[2023]384号)

共同第一作者: 宋艳, 陈刚

* 通信作者: 陈树森

successfully introduced on the surface of TiO₂ electrode. The results of performance test in spiked seawater show that PAO/TiO₂ electrode has a good ability to extract uranium. The extraction rate of uranium is 89.01% when the reaction time is 600 min. The pseudo-second-order kinetic model ($R^2=0.99583$) can better describe the adsorption kinetic process of U(VI) on PAO/TiO₂ electrode than the first-order kinetic model ($R^2=0.98208$), indicating that the adsorption process of the electrode material is dominated by chemical adsorption. The selective adsorption performance of U(VI) on PAO/TiO₂ electrode is better than that of other competitive metal ions (such as VO₃⁻, Fe³⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺). The desorption test was carried out on the electrode material after uranium adsorption, and the results show that the desorption rate of the electrode is 92.12% when 0.4 mol/L Na₂CO₃ used as the desorption agent. The test results in real seawater show that the extraction rate of uranium is 59.4% and the adsorption capacity of uranium is 4.07 mg/g when the reaction time is 28 h. X-ray Auger electron spectroscopy was used to characterize PAO/TiO₂ electrode before and after uranium adsorption. The results show that the electrode can reduce part of U(VI) to U(IV), and U(VI) is deposited in the form of UO₂ on the surface of PAO/TiO₂ electrode. PAO/TiO₂ electrode can extract uranyl ions from seawater by electroadsorption and electrodeposition, which is a potential electrode material. These results are expected to lay the foundation for the development of large scale sustainable uranium extraction systems from seawater.

Key words: PAO/TiO₂ electrode; electrochemical technology; uranium extraction from seawater

核能作为一种高能量密度、低碳排放的清洁能源,受到了研究者的广泛关注。大多数核电站主要使用铀作为核裂变燃料,然而陆地上的铀矿储量非常有限^[1-3],而海水中蕴藏着约45亿吨铀,因此开发海水提铀技术可为核能可持续发展提供能源保障^[4-7]。海水中的铀浓度低、盐浓度高,且与铀共存的金属离子较多,从海水中提取铀具有较大的挑战性^[8-9]。目前,已有很多吸附材料用于海水提铀研究,如金属有机框架、共价有机框架、水凝胶、纤维基吸附剂等^[10-14],但这些材料存在吸附周期长、生物附着严重、解吸过程复杂等问题。利用电场辅助铀酰离子的吸附与沉积,诱导铀氧化物或其衍生晶体沉积在电极上,是一种行之有效的海水提铀方法。相对于物理化学吸附过程,电化学海水提铀是通过引入电场引导铀酰离子在溶液中的迁移,增加铀酰离子在吸附剂上的相互碰撞概率,进而提高反应速率、增强抗干扰性,同时利用施加反向电压方式进行快速解吸。

在电化学海水提铀中,电极材料的选择直接影响着电化学海水提铀的效率。目前文献中采用的主要是以碳毡为基体材料,在其表面负载吸附剂的电极材料^[15-16]。而碳毡材料质地软,在进行真实海水提铀试验时存在易从电极夹上脱离的风险,因此需开发可支撑型的电极基体材料。TiO₂纳米管阵列电极是一种支撑型、结构稳定的电极材

料,能有效去除酸性含铀溶液中的铀酰离子^[17],但缺乏对真实海水中铀提取效果的研究。在TiO₂电极表面引入对铀具有较好吸附效果的偕胺肟功能基团,利用基团中肟基O原子和氨基N原子的孤对电子与铀形成的强螯合作用进行铀的吸附,可实现对海水中铀的提取,而偕胺肟基聚丙烯腈(PAO)修饰的TiO₂电极(PAO/TiO₂电极)的研制还未见相关报道。本文拟采用阳极氧化法制备TiO₂纳米管阵列电极,利用滴涂法在其表面负载偕胺肟功能基团,制备PAO/TiO₂电极,并考察电极在模拟海水和真实海水中的提铀性能,为电化学海水提铀技术提供一种新材料。

1 方法

1.1 主要实验材料

钛片(0.2 mm),宝鸡腾辉钛业厂;氟化铵、乙二醇、N,N-二甲基甲酰胺、盐酸羟胺、氢氧化钾,分析纯,阿拉丁试剂有限公司;硝酸铀酰六水化合物,99%,麦克林试剂有限公司;导电炭黑,江苏先丰纳米材料科技有限公司。

真实海水,取自海南昌江黎族自治县附近海域,水下5 m取样,室温下密封保存。

模拟海水配制:将硝酸铀酰六水化合物溶于真实海水中,用0.5 mol/L碳酸氢钠溶液调节其pH为8.10,配制成铀浓度为3.3 mg/L的溶液。

离子选择性测试用模拟海水配制: 配制金属离子(VO_3^- 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})和U(VI)浓度为真实海水中相应离子浓度1 000倍的溶液, 保持 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 在海水中的浓度(海水中 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度过高, 已达到饱和状态), 用0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液调节其pH为8.10。

IT6720 型直流电源, 艾德克斯电子有限公司; UTG1022X 函数/任意波形发生器, 优利德科技(中国)股份有限公司; 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(FT-IR), 德国布鲁克公司; GeminiSEM 300 场发射扫描电子显微镜(SEM), 德国 Carl Zeiss 公司; Nexsa G2 X 射线光电子能谱仪(XPS), 赛默飞世尔科技公司。

1.2 电极材料制备

1) TiO_2 纳米管阵列电极制备

采用二次阳极氧化法制备 TiO_2 纳米管阵列电极, 制备过程如下: (1) 将钛片裁剪成 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$, 依次用丙酮、乙醇、去离子水超声清洗 15 min, 取出晾干备用; (2) 以钛片作为阳极, 石墨片作为阴极, 进行一次阳极氧化, 电解液由质量分数为 0.35% 氟化铵、97.65% 乙二醇和 2% 去离子水的混合溶液组成, 在 50 V 下反应 6 h 后用去离子水超声清洗, 直至得到的氧化膜剥离, 自然晾干; (3) 将电极再次放入上述电解液中进行二次阳极氧化, 在 25 V 下反应 16 min 后, 用去离子水清洗, 自然晾干后于 450 °C 管式炉中焙烧 3 h, 得到 TiO_2 纳米阵列电极。

2) PAO/ TiO_2 电极制备

采用滴涂法制备 PAO/ TiO_2 电极, 制备过程如下: (1) 将聚丙烯腈粉末溶于 N, N-二甲基甲酰胺中, 于 50 °C 下搅拌 3 h; (2) 加入盐酸羟胺和氢氧化钾, 搅拌至完全溶解, 于 70 °C 下反应 10 h, 冷却至室温后, 离心获得上层澄清的 PAO 溶液; (3) 称取 0.6 g PAO 溶液, 加入到 N, N-二甲基甲酰胺和导电炭黑的混合溶液中, 超声均匀后将其滴涂在 TiO_2 纳米阵列电极表面, 自然晾干, 得到 PAO/ TiO_2 电极。

1.3 PAO/ TiO_2 电极海水提铀

1) 模拟海水中铀的提取

在模拟海水中, 利用 CHI660C 电化学工作站

进行电极材料的提铀性能测试。以 PAO/ TiO_2 电极为工作电极, 铂片电极为对电极, 饱和甘汞电极为辅助电极, 施加电压为 $-3 \sim 0\text{ V}$, 反应一定时间后将电极取出, 取上清液参照《水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ700—2014)^[18] 中的方法测定铀的浓度, 利用式(1)计算铀提取率 $\theta_1(\%)$ 。取出的电极用去离子水清洗后, 将其置于装有 50 mL 解吸剂的烧杯, 利用施加反向电压的方式进行解吸, 在 3 V 下反应 0.5 h 后取解吸液, 分析其中铀的浓度, 利用式(2)计算解吸率 η 。

$$\theta_1 = \left(1 - \frac{c_t}{c_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta = \frac{c_1 V_1}{(c_0 - c_t) V_0} \quad (2)$$

其中: c_0 和 c_t 分别为模拟海水中 U(VI) 的初始浓度和时间为 t 时的浓度, mg/L; c_1 为解吸液中铀的浓度, mg/L; V_1 为解吸液体积, L; V_0 为模拟海水体积, L。

循环使用性能测试: 第 1 次吸附完成后, 负载铀的电极施加反向电压进行解吸, 解吸剂为 0.4 mol/L Na_2CO_3 溶液, 然后重新用于新的电化学提铀过程, 在相同条件重复 4 个循环。

2) 真实海水中铀的提取

将 25 L 海水放入耐酸碱刻度桶, 以 PAO/ TiO_2 为阴极、铂片为阳极, 利用函数/任意波形发生器进行真实海水(现取现用, 且不做任何处理)中铀的提取, 函数/任意波形发生器采用方波工作模式, 设置脉冲频率为 400 Hz, 电压为 $-5 \sim 0\text{ V}$ 。吸附一定时间后将电极取出以 0.4 mol/L Na_2CO_3 为解吸剂进行解吸, 测试解吸液中铀的浓度, 利用式(3)计算铀提取率 $\theta_2(\%)$, 利用式(4)计算电极对铀的吸附量 $q(\text{mg/g})$ 。

$$\theta_2 = \frac{c_2 V_2}{c_3 \times 25 \times 0.001} \times 100\% \quad (3)$$

$$q = \frac{c_2 V_2}{m} \quad (4)$$

其中: c_2 为解吸液中铀的质量浓度, mg/L; V_2 为解吸液体积, L; c_3 为真实海水中铀的质量浓度, $\mu\text{g/L}$; m 为 PAO/ TiO_2 电极中所含有效吸附剂的质量, mg, 对于尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的 PAO/ TiO_2 电极, 其所含有效吸附剂质量是基底材料表面 TiO_2 质量和涂覆在 TiO_2 纳米阵列表面的 PAO 中聚脲胺脲质量的和, 为 0.012 03 g。

2 结果与讨论

2.1 电极材料表征

利用 FT-IR 分析 TiO₂ 和 PAO/TiO₂ 的化学基团, 结果如图 1 所示。图 1 中 1 639、1 583、924 cm⁻¹ 处的峰分别归属于 PAO/TiO₂ 的 C=N 振动峰、N-H 振动峰、N-O 振动峰, 说明在 TiO₂ 表面成功引入了偕胺肟功能基团。

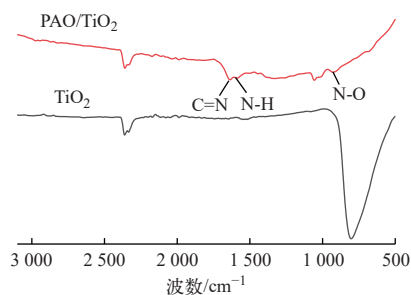


图 1 TiO₂ 和 PAO/TiO₂ 的 FT-IR 谱
Fig. 1 FT-IR spectra of TiO₂ and PAO/TiO₂

TiO₂ 和 PAO/TiO₂ 电极的 SEM 图像如图 2 所示。由图 2 可见, TiO₂ 纳米阵列表面平整光滑, 管径均匀, 将 PAO 涂覆在其表面后, 纳米管表面被 PAO 覆盖, 纳米管形貌不明显。

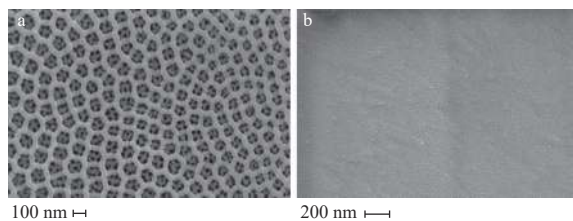


图 2 TiO₂(a) 和 PAO/TiO₂(b) 电极的 SEM 图像
Fig. 2 SEM images of TiO₂ (a) and PAO/TiO₂ (b)

2.2 模拟海水中 PAO/TiO₂ 电极对铀的提取能力

1) pH 的影响

模拟海水 pH 对 PAO/TiO₂ 电极提取铀的影响如图 3 所示。由图 3 可见, PAO/TiO₂ 电极对模拟海水中铀的提取率高于 TiO₂ 电极。随着模拟海水中 pH 的升高, 提取率呈先增后降的趋势, pH=7 时提取率最大, 为 82.12%。这是由于 pH 不仅会影响材料的表面特性, 还会影响铀化学形态的种类和含量。当模拟海水 pH 较低时, 材料表面的活性位点会被模拟海水中存在的 H⁺ 和 U(VI) 同时竞争吸附, 抑制了电极对铀的提取率; 随着 pH 的增加, 两者的竞争减弱, 提取率增加; 但当 pH 较高

时, U(VI) 从以阳离子形式存在逐渐转变为以阴离子形式存在, 使得电极对 U(VI) 的提取率有所下降^[9]。考虑到真实海水 pH 为 8.10 左右, 选用 pH=8.10 的模拟海水开展性能测试。

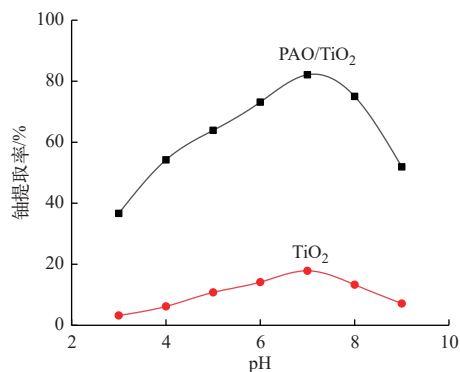


图 3 pH 对铀提取率的影响
Fig. 3 Effect of pH on uranium extraction rate

2) 吸附时间的影响

吸附时间对模拟海水中电极对铀提取率的影响如图 4 所示。由图 4 可见, 随着吸附时间的增加, PAO/TiO₂ 电极对铀的提取率逐渐增加, 至 400 min 时增加缓慢, 600 min 时达到平衡, 此时铀提取率为 89.01%。

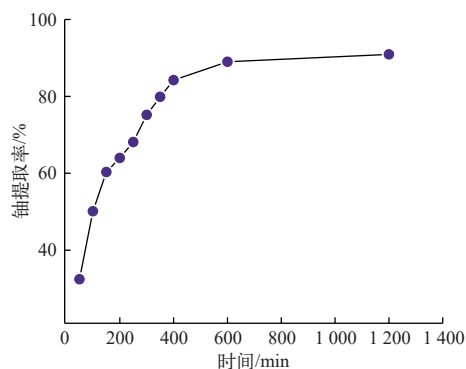


图 4 吸附时间对铀提取率的影响
Fig. 4 Effect of time on uranium extraction rate

采用准一级动力学模型和准二级动力学模型对图 4 进行拟合, 结果如图 5 所示。由图 5 可见, 准二级动力学模型 ($R^2=0.99583$) 较准一级动力学模型 ($R^2=0.98208$) 能更好地描述电极材料对 U(VI) 的吸附动力学过程, 说明电极材料的吸附过程并不是扩散过程占主导而是化学吸附占主导。

3) 离子选择性和干扰性

海水中金属离子对提取率的影响如图 6 所

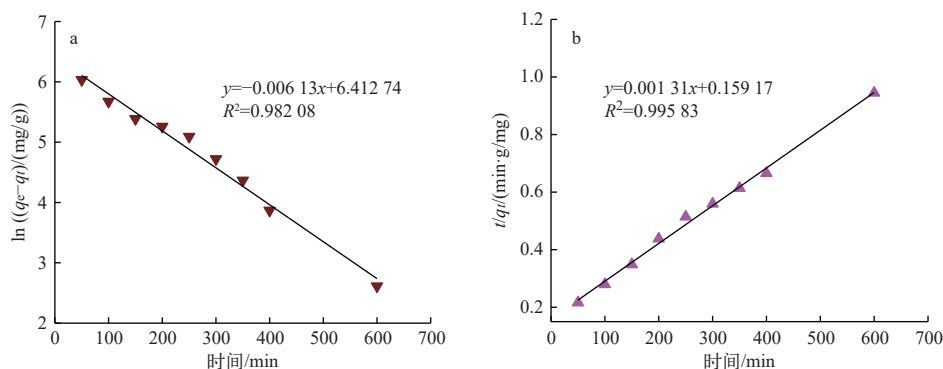
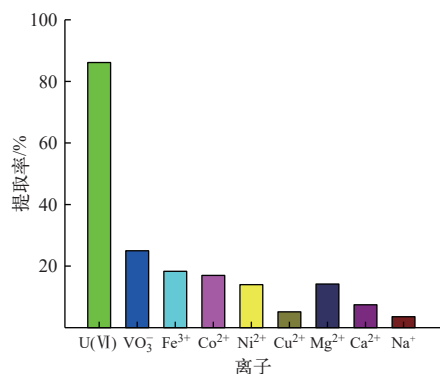


图5 准一级(a)和准二级(b)动力学模型拟合结果

Fig. 5 Fitting results of pseudo-first-order (a) and pseudo-second-order (b) dynamics models

示。由图6可见, PAO/TiO₂ 电极对溶液中 U(VI)、VO₃⁻、Fe³⁺、Co²⁺、Ni²⁺、Cu²⁺、Mg²⁺、Ca²⁺和 Na⁺的提取率分别为 86.14%、24.99%、18.31%、16.97%、13.98%、5.14%、14.17%、7.45% 和 3.57%, 表明电极对 U(VI) 的吸附能力高于其他金属离子, 这种良好的选择性归因于施加在电极上的交变电压能排斥未结合的离子^[20]。

图6 PAO/TiO₂ 电极的离子选择性Fig. 6 Ion selectivity of PAO/TiO₂ electrode

4) 解吸剂选择

利用不同的解吸剂(1 mol/L NaCl、0.4 mol/L Na₂CO₃、0.1 mol/L HNO₃ 和 0.5 mol/L H₂SO₄)对负载铀后的电极进行解吸, 结果如图7所示。由图7可见: 不加解吸剂时, 解吸率仅为 17.8%; 解吸效果最好的是 0.4 mol/L Na₂CO₃, 解吸率为 92.12%; 0.1 mol/L HNO₃ 和 0.5 mol/L H₂SO₄ 解吸效果稍差, 解吸率分别为 55.39% 和 50.12%; 1 mol/L NaCl 解吸效果最差, 解吸率不到 10%。因此, 确定采用 0.4 mol/L Na₂CO₃ 为电极的解吸剂。

5) 循环使用性能

通过循环使用性能评价电极的稳定性, 结果

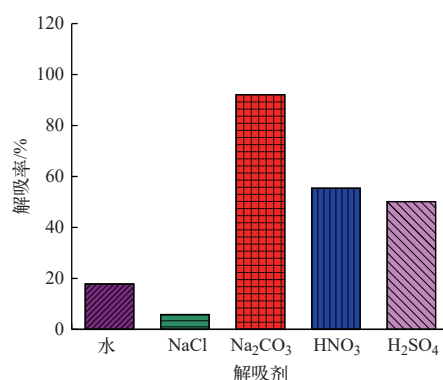
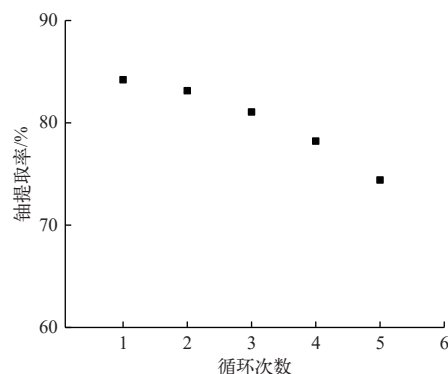


图7 不同解吸剂的解吸结果

Fig. 7 Desorption results of different desorbents

如图8所示。经过5次循环后, PAO/TiO₂ 电极对 U(VI) 的提取率下降不到 10%, 说明 PAO/TiO₂ 电极具有良好的稳定性。铀提取率的下降是由于在连续吸附-解吸中, 电极材料的质量和活性结合位点的损失造成的。

图8 PAO/TiO₂ 电极的循环使用性能Fig. 8 Reusability of PAO/TiO₂ electrode

2.3 真实海水中 PAO/TiO₂ 电极对铀的提取能力

为了考察吸附时间对真实海水中铀提取率的影响, 将 3 个 PAO/TiO₂ 电极放入真实海水中进行

测试,分别于20、24、28 h时取出电极进行解吸,结果如图9所示。随着吸附时间的增加,PAO/TiO₂电极对铀的提取率逐渐增加,当吸附时间为28 h时,PAO/TiO₂电极对铀的提取率为59.4%,此时电极对铀的吸附量为4.07 mg/g,表明PAO/TiO₂电极对真实海水中U(VI)具有较好的提取效果。

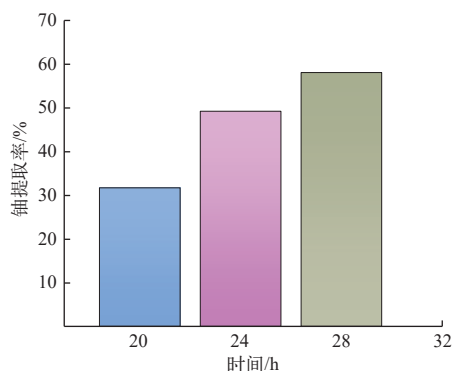


图9 吸附时间对铀提取率的影响

Fig. 9 Effect of adsorption time on uranium extraction rate

2.4 PAO/TiO₂ 电极提取铀的机理

PAO/TiO₂ 电极提取铀前后的 XPS 谱如图10所示。由图10a可知,电极表面吸附了一定量的铀。由图10b可见,U(VI)的U 4f_{7/2}和U 4f_{5/2}

峰出现在382.06 eV和392.58 eV处,而U(IV)的U 4f_{7/2}和U 4f_{5/2}峰出现在381.4 eV和392.02 eV处,U(VI)和U(IV)峰同时出现,说明PAO/TiO₂电极将部分U(VI)还原为U(IV)。由图10c可见,PAO/TiO₂电极的N 1s峰为C(NH₂)=N-OH。提取铀后,C(NH₂)=N-OH峰由398.28、399.64、400.89 eV移至399.36、399.73、401.43 eV,表明铀与偕胺肟发生了螯合作用。由图10d可知,PAO/TiO₂电极的O 1s谱在531.31 eV和532.66 eV处出现2个峰,属于-C(NH₂)=N-OH基团。吸附铀后,两峰分别移至531.60 eV和532.76 eV,而在530.58 eV处出现了1个明显的新峰,属于O=U=O,这说明铀酰离子与PAO/TiO₂电极中的偕胺肟基团发生了化学络合反应。

海水中PAO/TiO₂电极与铀酰离子的反应如图11所示。该反应包括电吸附和电沉积两部分,在电吸附过程中,PAO/TiO₂电极中的-C(NH₂)=N-OH基团可以与U(VI)反应,将其吸附在电极表面,而TiO₂的纳米阵列结构增加了材料的导电性,有利于U(VI)的迁移和扩散,进而增加了材料的电吸附率;在电沉积过程中,当施加电压时,具有较高还原电位的U(VI)可以结合电子形成电中性化合

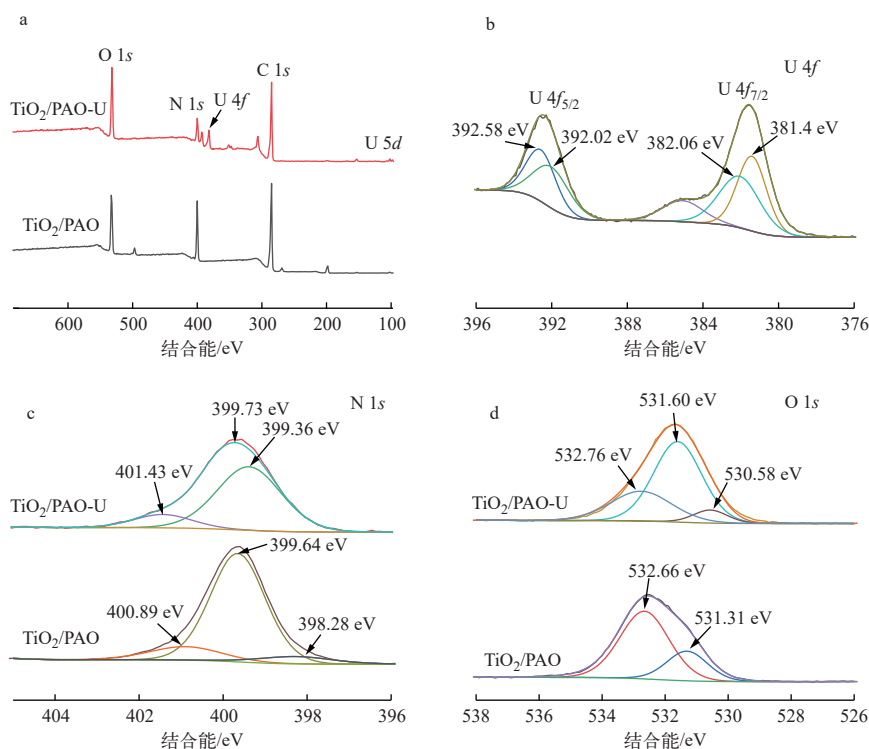


图10 PAO/TiO₂ 电极提取铀前后的 XPS 能谱

Fig. 10 XPS of PAO/TiO₂ electrode before and after uranium aextraction

物 UO_2 沉积在负极表面,使 U(VI) 的提取率进一步增加。

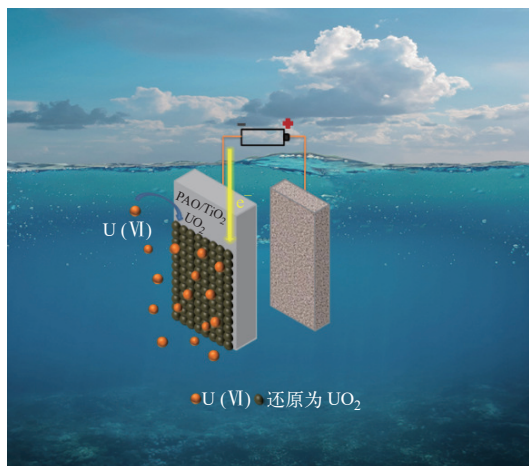


图 11 PAO/TiO₂ 电极与铀酰离子反应示意图
Fig. 11 Schematic diagram of reaction between PAO/TiO₂ electrode and uranyl ion

3 结论

1) 以 TiO_2 纳米管阵列为基体材料,利用滴涂法成功制备了 PAO/TiO₂ 电极,其 SEM 图像、FT-IR 谱和 XPS 能谱均证明在 TiO_2 电极表面成功引入了偕胺肟功能基团。

2) 模拟海水和真实海水中的提铀试验证明,PAO/TiO₂ 电极对海水中 U(VI) 具有高提取率和离子选择性。PAO/TiO₂ 电极吸附铀后, U(VI) 以 UO_2 的形式沉积在 PAO/TiO₂ 电极表面。在真实海水中进行 28 h 提铀试验,电极材料对铀的吸附量为 4.07 mg/g。因此,PAO/TiO₂ 电极材料在电化学海水提铀中具有很好的应用潜力。

参考文献:

- [1] CHU S, MAJUMDAR A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future[J]. *Nature*, 2012, 488: 294-303.
- [2] KUSHWAHA S, PATEL K. Catalyst: Uranium extraction from seawater, a paradigm shift in resource recovery[J]. *Chem*, 2021, 7(2): 271-274.
- [3] XIE Y, LIU Z, GENG Y, et al. Uranium extraction from seawater: Material design, emerging technologies and marine engineering[J]. *Chemical Society Reviews*, 2023, 52(1): 97-162.
- [4] SHOLL D S, LIVELY R P. Seven chemical separations to change the world[J]. *Nature*, 2016, 532: 435-437.
- [5] YUAN Y, YU Q, WEN J, et al. Ultrafast and highly selective uranium extraction from seawater by hydrogel-like spidroin-based protein fiber[J]. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2019, 58(34): 11785-11790.
- [6] ABNEY C W, MAYES R T, SAITO T, et al. Materials for the recovery of uranium from seawater[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117: 13935-14013.
- [7] 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(in Chinese).
- [8] DAI Sheng. Catalyst: Challenges in development of adsorbents for recovery of uranium from seawater[J]. *Chem*, 2021, 7(3): 537-539.
- [9] 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(in Chinese).
- [10] LI H, CHEN 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(7): 3796-3804.
- [11] WANG Y, LIN Z, SONG Y, et al. Enhancing uranium adsorption performance through the introduction of an electron conjugation system on amidoximated phenyl natural bamboo strips[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 337: 126389.
- [12] ZHU G. Reaction: Goal-oriented PAF design for uranium extraction from seawater[J]. *Chem*, 2021, 7(2): 277-278.
- [13] ZHOU Z, SHINDE D B, GUO D, et al. Flexible ionic conjugated microporous polymer membranes for fast and selective ion transport[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(6): 2108672.
- [14] ZHANG C R, QI J X, CUI W R, et al. A novel 3D sp^2 carbon-linked covalent organic framework as a platform for efficient electro-extraction of uranium[J]. *Science China Chemistry*, 2023, 66(2): 562-569.
- [15] 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): 17007.
- [16] GAO Z, CHEN S, DING H, et al. Experimental study on

- efficient electrocatalytic reduction of U(VI) at amine-amidoxime bifunctional graphite felt electrode[J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2022, 146: 110134.
- [17] LIN L M, LIU T, QIE Y K, et al. Electrocatalytic removal of low-concentration uranium using TiO₂ nanotube arrays/Ti mesh electrodes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56: 13327-13337.
- [18] 环境保护部. HJ700—2014 水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [19] 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. 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(in Chinese).
- [20] CHEN D Y, LI Y, ZHAO X Y, et al. Self-standing porous aromatic framework electrodes for efficient electrochemical uranium extraction[J]. *ACS Central Science*, 2023, 9(12): 2326-2332.