

# 铀提取技术的演进与挑战

王 君<sup>1,2</sup>, 胥国龙<sup>3</sup>, 陈梅芳<sup>3</sup>, 刘芳洋<sup>1</sup>, 蒋良兴<sup>1</sup>

(1. 中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410083;  
2. 长沙理工大学 化学与医药工程学院, 湖南 长沙 410114;  
3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

**摘要:** 铀作为核工业“粮食”, 是保障国家安全和能源安全的战略性资源。目前, 全球铀供应主要依赖常规提取技术, 如露天和井下开采+堆浸、原地浸出等工艺。这些技术成熟度高、成本较低, 是现阶段铀提取的主要方式。然而, 随着优质资源逐渐枯竭、低品质资源开发难度不断加大, 常规铀矿开采正面临多重挑战, 推动铀提取技术向非常规资源领域拓展已成为必然选择。非常规铀资源提取技术主要面向低品位铀多金属共生矿、海水及盐湖卤水中的铀资源回收, 技术路径多样。相关研究虽仍处于研发阶段, 但在拓宽资源边界、实现资源综合利用方面已展现出重要潜力。系统梳理了铀提取技术的基本原理、研究进展与发展趋势, 以期对铀提取领域的技术创新与方向选择提供参考。

**关键词:** 铀; 提取技术; 原地浸出; 非常规铀资源; 海水提铀; 资源综合利用

**中图分类号:** TL212; TF803.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2617(2026)03-0273-11

**DOI:** 10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.001

铀作为支持核能发展与国家战略需求的关键资源, 其独特的能源价值与战略地位日益受到关注<sup>[1-2]</sup>。作为核能发电的主要燃料, 铀为清洁能源体系提供了重要支撑, 在推动低碳转型、保障能源安全方面发挥着不可替代的作用。核能因具有能量密度高、运行稳定、碳排放量低等优势, 已成为我国能源结构优化升级重要组成部分。当前, 全球铀资源供应正面临多重挑战, 包括需求持续增长与资源有限之间的矛盾、传统开采模式与可持续发展要求之间的张力, 以及资源潜力开发与技术可行性之间的协调难题。因此, 系统梳理铀提取技术的发展脉络, 明确未来技术突破方向, 对于保障我国铀资源安全, 推动核能产业高质量健康可持续发展具有重要的理论与现实意义。

目前, 铀提取技术已形成了以“采矿+堆浸—浸出液处理—沉淀”为核心的成熟工艺体系。传统的铀开采主要采用露天开采或地下开采方式, 配合堆浸技术, 适用于铀品位较高( $>0.05\%$ )、赋

存条件较为集中的铀矿床<sup>[3]</sup>。但经过数十年的工业化开采, 全球范围内易开发的高品位、浅层铀矿资源正日趋减少, 导致开采成本持续上升, 环境压力不断加大。当前, 我国铀资源开发已转向砂岩型铀矿的原地浸出(地浸)技术为主, 其产能占比已超过 90% 以上。与此同时, 从海水、盐湖等非常规铀资源中提取铀新技术研究也日益受到关注。海水/盐湖提铀的研究核心在于高性能吸附材料的研发。相关材料的研发从早期的偕胺肟基合成树脂, 逐步发展至偕胺肟改性纳米纤维、多孔有机聚合物、金属有机框架材料等, 研究目标聚焦于提升吸附容量、选择性与循环稳定性<sup>[4-5]</sup>。近年来兴起的电化学、光催化提铀技术, 则通过改变铀在海水/盐湖中 U(VI) 的化学价态, 将其从可溶性转化为沉淀态的 U(IV), 从而实现更高效的分离与收集<sup>[6-7]</sup>。

总体而言, 铀提取技术的发展正从依赖单一高品位资源, 逐步向多层次、多来源的资源体系拓展。本文对当前铀提取技术进行了系统性论述, 重点分

**收稿日期:** 2026-02-02; **修订日期:** 2026-03-31

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52474385, 52504375); 中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金资助项目(2022NRE-LH-06)。

**第一作者简介:** 王君(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为湿法冶金。

**通信作者简介:** 蒋良兴(1982—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为湿法冶金与铀资源提取。E-mail: lxjiang@csu.edu.cn。

析了铀提取技术的演进与挑战。首先,简述了我国当前产铀主流技术——地浸工艺原理、应用条件及面临的问题;其次,聚焦海水/盐湖中的铀资源,综述了各类吸附、催化材料的设计策略与技术进展;最后,总结了当前非常规铀提取技术面临的关键科学与技术挑战,并展望了未来发展趋势,以期铀提取领域的研究与决策提供前瞻性视角。

## 1 地浸技术

地浸通过钻孔系统向砂岩型铀矿含水层注入浸出剂,选择性溶解铀矿物,将难溶的  $U(IV)$  氧化为可溶性的  $U(VI)$ ,再经抽液井将含铀浸出液提取至地表<sup>[8]</sup>。其工艺流程包括:部署抽注井网、浸出剂经注入井进入矿层并与其发生反应、抽出液送至水冶厂,最后通过沉淀、过滤、烘干等工序制成重铀酸盐产品(图 1)<sup>[9]</sup>。为提高资源利用率,处理后的溶液经净化后重新注入矿体,实现浸出剂的循环利用。与露天开采或井下巷道开采+堆浸技术相比,地浸技术更适用于规模化开采高品位、渗透性好的砂岩铀矿,具有绿色、高效、成本低等优势,已成为我国当前天然铀生产的主流方式,其产能占全国总产量 90% 以上。

酸法地浸以硫酸为浸出剂,主要优点在于铀浸出率高、浸出周期短、浸出液铀浓度高,且硫酸价格低廉,不仅广泛应用于常规铀矿山,也被应用于低渗透性、低品位砂岩铀矿床的地浸开采。但该工艺不适用于高碳酸盐含量的铀矿床,因为硫酸会与碳酸盐矿物反应生成沉淀,从而堵塞矿层孔隙,降低其渗透性<sup>[9]</sup>。针对高碳酸盐含量的铀矿床可采用碱法地浸以减少沉淀生成。与酸法地浸相比,碱法地浸具有良好的选择性,  $Ca$ 、 $Mg$ 、 $Fe$ 、 $Al$  等杂质元素在碱性体系中难以溶解,因此浸出液杂质含量低,后续产品纯化难度较小。但该工艺的局限性在于,当矿石中黄铁矿( $FeS_2$ )含量较高时, $FeS_2$  不仅会与氧化剂反应,还会消耗碱性浸出剂,并生成氢氧化铁沉淀,影响浸出效果<sup>[9]</sup>。

$CO_2 + O_2$  中性浸出工艺主要适用于高碳酸盐、高矿化度矿床。该工艺通过向地下矿层注入  $CO_2$  和  $O_2$  的混合溶液,利用氧化反应将难溶的  $U(IV)$  转化为易溶的  $U(VI)$ ,并借助  $CO_2$  形成的碳酸根与铀酰离子配合,形成稳定的碳酸铀酰配合物,从而实现铀的高效浸出。通过注入  $CO_2$  调节 pH 至 6.5~7.5 的中性范围,可有效避免矿层发生化学堵塞等问题,同时降低地下水后续修复

难度,符合绿色矿山建设要求<sup>[9]</sup>。

在目前应用广泛的  $CO_2 + O_2$  中性浸出工艺中,氧原子的氧化活性直接决定反应效率,进而决定铀的地浸效果。研究者们开发了以  $NaNO_2$  为催化氧化剂的  $NaNO_2 + CO_2 + O_2$  特种浸出剂体系。该体系能显著加速矿石中  $U(IV)$  氧化为可溶性  $U(VI)$  的过程<sup>[10]</sup>。

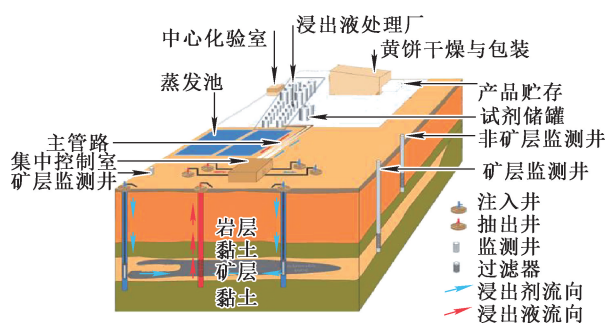


图 1 地浸工艺流程示意<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of in-situ leaching process flow<sup>[9]</sup>

近年来,随着砂岩型铀资源品位的下降,传统地浸技术面临浸出速度低、浸出液铀浓度下降、杂质含量升高,以及矿层化学堵塞等诸多挑战。在铀矿地浸过程中,金属离子的迁移路径通常是从矿物表面向浸出液中扩散。研究表明,电场、磁场、微波、超声波等外加物理场可对浸出过程产生显著影响,为强化地浸效果提供了新的技术路径。外加电场能够改变矿物表面的双电层结构,增大渗流通道截面积,并通过电渗作用强化溶液在微裂隙中的渗流特性<sup>[11-12]</sup>。同时,溶液中的溶质离子在电泳作用下可向其电性相反的电极定向迁移,从而提高电极附近浸出剂的局部浓度,促进浸出反应<sup>[13-15]</sup>。磁场可影响核自旋状态和化学反应电子自旋态,为新化学键的形成创造有利条件<sup>[16]</sup>;磁场产生的洛伦兹力等效效应可加速溶液中离子扩散速率,提升反应物和生成物的传质效率。微波技术可用于矿石预处理,能穿透矿物并实现选择性加热,具有加热过程可控、能耗较低等优势<sup>[17]</sup>。超声波具有较强的方向性和穿透力,可利用声空化效应在局部产生高温高压微环境,从而促进常规条件下难以进行的浸出反应,显著提升目标矿物的浸出率<sup>[18]</sup>。

## 2 海水/盐湖提铀技术

### 2.1 吸附法

据统计,全球海水中蕴含的铀总量高达 45 亿 t,

是陆地已探明铀资源的 1 000 倍<sup>[19]</sup>。内陆高盐度盐湖与地下卤水中铀质量浓度可达海水的数十至数百倍(约 0.1~1 mg/L),资源总量亦不容忽视<sup>[20]</sup>。海水/盐湖提铀的核心挑战在于如何从稀溶液中高效、选择性吸附铀酰配合离子,同时抵抗大量竞争离子的干扰。目前,主流技术以吸附法为核心,并辅以电化学、光催化等新兴方法。吸附法的关键在于吸附材料,目前研究较多的是传统粉末材料和吸附膜材料。

### 2.1.1 传统粉末材料

吸附法利用功能材料与海水或盐湖卤水中的铀酰配合离子发生特异性结合。在多种杂质离子共存的复杂海水或盐湖卤水体系中,理想的吸附材料需兼具高选择性和快速吸附动力学。偕胺肟基材料是目前研究最为深入、性能最优的吸附剂体系<sup>[21]</sup>。偕胺肟基团能与  $\text{UO}_2^{2+}$  形成稳定的五元环螯合物,因此成为了海水提铀吸附材料中的核心功能基团,在弱碱性海水( $\text{pH} \approx 8$ )中表现出优异的选择性与吸附容量。偕胺肟基材料对  $\text{UO}_2^{2+}$  的吸附过程通常包含 2 个步骤: $\text{UO}_2^{2+}$  首先

通过静电作用或物理扩散被输运至材料表面或孔隙内部;随后,其与偕胺肟基团发生配位螯合,实现铀的固定化。当前研究热点集中于优化聚合物骨架的接枝率、孔隙结构与机械强度,以进一步提升吸附动力学与耐用性。如对聚丙烯腈(PAN)粉末进行脲化处理,再采用纺丝技术可制备直径为 400 nm 的全偕胺肟化纤维材料。PAN 的预酰胺化改性及用于大规模生产聚异丁烯二氧膦(PIDO)纳米纤维的吹塑工艺流程示意如图 2(a)所示。PIDO 纳米纤维吸附剂对 5 L 含铀( $8 \times 10^{-6}$ )实际海水吸附 56 d 后,铀吸附容量可达 8.74 mg/g,准一级和准二级吸附动力学模型拟合曲线如图 2(b)所示<sup>[22]</sup>。

此外,抗菌防污偕胺肟功能化石墨烯氧化物复合材料(石墨烯氧化物/壳聚糖/二氨基丙腈/ $\text{ZnO}$ )对盐湖中的铀也具有良好的选择吸附性能,这可归因于多种机制的协同作用:含氧官能团的静电吸引、偕胺肟的螯合作用和氨基的配位作用,该材料对盐湖铀的吸附容量可达 3.67 mg/g,吸附机制如图 2(c)所示<sup>[23]</sup>。

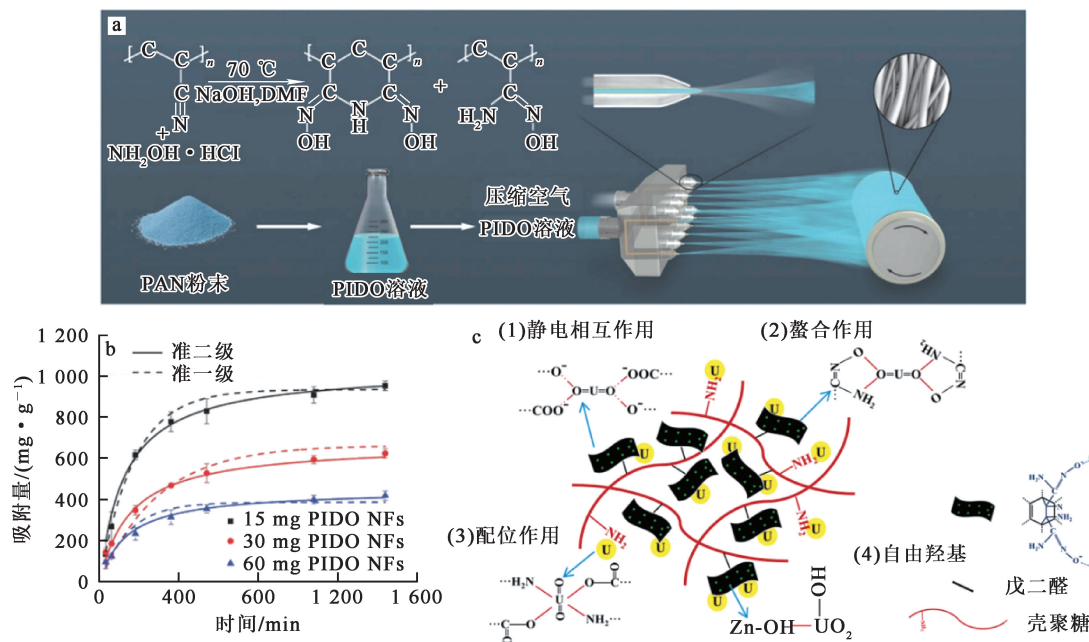


图 2 聚丙烯腈(PAN)的预酰胺化改性示意及用于大规模生产聚异丁烯二氧膦(PIDO)纳米纤维的吹塑工艺(a)<sup>[22]</sup>, PIDO 纳米纤维吸附剂吸附海水中铀的准一级和准二级吸附动力学模型拟合曲线(b)<sup>[22]</sup>; 石墨烯氧化物/壳聚糖/二氨基丙腈/ $\text{ZnO}$  对铀的吸附机制示意(c)<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of pre-acylation modification of polyacrylonitrile (PAN) and blow molding process for large-scale production of polyisobutylene dioxophosphate (PIDO) nanofibers (a)<sup>[22]</sup>, fitting curves of first-order and second-order adsorption kinetics models of uranium in seawater by PIDO nanofiber adsorbent (b)<sup>[22]</sup>, schematic illustration of the adsorption mechanism of uranium by graphene oxide/chitosan/diaminopropionitrile/ $\text{ZnO}$  (c)<sup>[23]</sup>

除了脲胺基材料为代表的有机高分子体系外,研究者们还开发了多种用于从海水中提取 U(VI) 无机多孔吸附材料,包括金属有机框架(MOFs)、共价有机框架(COFs)等<sup>[24]</sup>。典型的 MOFs 材料有 UiO-66(锆基 MOF)、沸石咪唑盐框架(ZIFs)和 MILs 等。其中,UiO-66 因具有极高的化学稳定性和热稳定性成为了 MOFs 领域最具代表性的材料之一<sup>[25]</sup>。图 3(a) 是 UiO-66(Zr) 结构示意图<sup>[26]</sup>,Zr 离子与 8 个氧原子配位,其中 6 个 Zr-O 基团构成  $Zr_6O_4(OH)_4$  金属中心,每个  $Zr_6O_4(OH)_4$  簇或金属中心与 12 个对苯二甲酸配体(BDC)相连,形成具有网状结构的晶体。

UiO-66 在分离操作中的显著稳定性和适用性可归因于锆中心与 BDC 连接剂之间形成的坚固配位连接。典型的 UiO-66 的比表面积约为  $100 \text{ m}^2/\text{g}$ 。Ce 基 UiO-66@ $\text{CeO}_2$  复合材料的比表面积( $981 \text{ m}^2/\text{g}$ )远高于纯  $\text{CeO}_2$  的比表面积( $155 \text{ m}^2/\text{g}$ ),其对 U(VI) 的理论吸附容量达  $706.52 \text{ mg/g}$ <sup>[27]</sup>。通过静电纺丝、原位生长及脲胺基化改性的工艺流程,可在脲胺基化聚丙烯腈(AOPAN)纤维上原位生长 ZIF-67 纤维材料(AOPAN/ZIF),合成路线如图 3(b) 所示。该材料能稳定吸附实际海水中的铀 36 d,对 U(VI) 的吸附容量为  $2.03 \text{ mg/g}$ <sup>[28]</sup>。

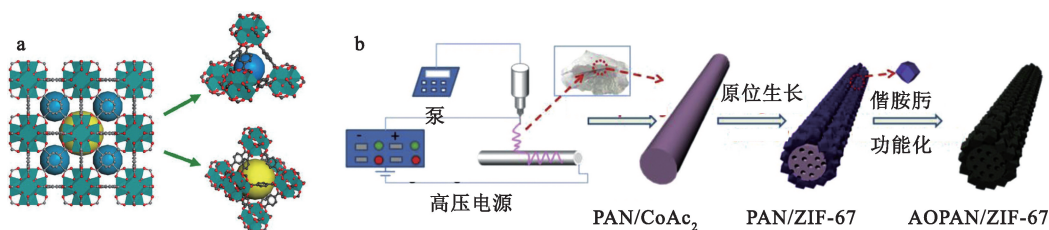


图 3 UiO-66(Zr) 结构的示意(a)<sup>[26]</sup>及 AOPAN/ZIF 的合成路线示意(b)<sup>[28]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of UiO-66(Zr) structure (a)<sup>[26]</sup> and synthesis route of AOPAN/ZIF (b)<sup>[28]</sup>

### 2.1.2 吸附膜材料

传统的粉末吸附剂虽具有较高的铀酰离子吸附性能,但由于其粒径较小且分散度较高,在实际应用中固液分离难度较大,易对水体环境造成二次污染。相较而言,吸附膜能够融合吸附剂颗

粒和膜材料的双重优势,作为新兴材料逐渐成为了海水提铀领域的研究热点。在制备过程中,吸附剂通常被掺入由聚合物材料构成的膜基质中。不同吸附膜材料对海水中铀的吸附效果见表 1。

表 1 不同吸附膜材料对海水中铀的吸附效果

Table 1 Adsorption effects of different adsorption membrane materials on uranium in seawater

| 膜材料类型       | 吸附材料      | 溶液环境<br>(铀浓度) | 铀浓度/ $10^{-9}$ | 吸附时间/d | 铀吸附量/<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | 文献   |
|-------------|-----------|---------------|----------------|--------|----------------------------------------------|------|
| 纳米纤维(静电纺丝法) | 聚酰胺脲(PAO) | 含铀海水          | 330            | 1      | 1.6                                          | [29] |
|             | PAO       | 含铀海水          | 330            | 1      | 6.6                                          | [30] |
|             | 杨梅鞣质      | 模拟海水          | 3              | 1      | 0.001 4                                      | [31] |
| 纳米纤维(吹塑纺丝法) |           | 天然海水          | 3.1            | 87     | 11.39                                        | [32] |
| 纳米纤维(吹塑纺丝法) | PAO 与黑磷   | 天然海水          |                | 87     | 11.76                                        | [33] |
|             | PAO 与壳聚糖  | 天然海水          | 3.6            | 10     | 4.19                                         | [34] |
| 水凝胶膜        | PAO       | 天然海水          |                | 28     | 4.87                                         | [35] |
|             | PAO       | 天然海水          |                | 56     | 8.56                                         | [36] |

传统膜骨架通常基于复合微纤维和纳米纤维构建,具有良好的可加工性与规模化应用潜力。

复合纤维最常见的制备方法是静电纺丝法。该技术是利用高压电场在设定距离内牵伸聚合物溶

液,形成纳米纤维,并在大面积收集层上随机组装超细纤维网络(图 4(a))<sup>[37]</sup>。将聚偏二氟乙烯(PVDF)加入到 PAN 纤维,可削弱纤维之间的静电吸引作用,形成更加均匀分散的纳米纤维网络,从而提升对海水中铀的吸附性能。此外,吹塑纺丝法也较为常见,该技术是利用高速加压气流沿气流方向拉伸聚合物溶液,从而生产出超细纤维。通过多喷嘴吹塑纺丝平台可实现纳米纤维膜的大规模生产,这些膜能对天然海水中的铀表现出良好的吸附性能,吸附容量达 8.7 mg/g,并具有优异的机械强度,至少可循环吸附-脱附 8 次,洗脱率约为 99%<sup>[22]</sup>。

水凝胶基膜是由交联聚合物链构成、具有水合选择性分离功能的屏障材料,其在水环境中能够通过溶胀行为保留大量水分。该类材料的主要优势在于其结构明确的 3D 半互穿网络,可最大程度暴露活性吸附位点,从而提高吸附效率。水凝胶膜通常通过反应成型或聚合方法制备,在合成过程中,可通过引入多种交联剂将偕胺肟功能团嵌入网络结构中,实现对铀酰离子的特异性识别与吸附(图 4(b))<sup>[35]</sup>。如将质量分数为 96% 的偕胺肟(PAOs)掺入离子交联的超分子  $\text{Zn}^{2+}$ -PAO 水凝胶膜后,在海水中浸泡 28 d 条件下,该材料对铀的吸附容量可达 9.23 mg/g<sup>[38]</sup>。

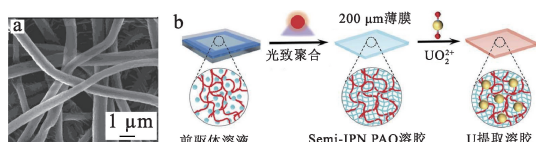


图 4 酰胺化前电纺聚丙烯腈膜的 SEM 图像(a)<sup>[37]</sup>、水凝胶膜的制备示意及铀吸附机制(b)<sup>[35]</sup>

Fig. 4 SEM image of electrospun polyacrylonitrile membrane before amidation (a)<sup>[37]</sup> and schematic diagram of preparation of hydrogel membrane and uranium adsorption mechanism (b)<sup>[35]</sup>

自支撑膜是指由掺入支撑基质中的吸附剂或螯合基团组成的连续膜,通常通过交联反应在商用膜的表面引入螯合基团<sup>[39-40]</sup>。研究表明,在自支撑膜表面引入多酚功能团,可使其与海水中的铀酰离子形成金属-酚醛网络结构。图 5(a)为该膜材料的扫描电子显微镜和能谱仪成像<sup>[41]</sup>。在实际黄海海水测试中,采用三层复合膜,在大气压下可实现 190 L/(m<sup>2</sup> · h)的高通量过滤,铀提取

率达 84%。此外,一种包含偕胺肟-PIM-1 颗粒的多孔膜在海水中动态测试 7 d 后,铀吸附容量可达 6.63 mg/g(图 5(b)~(d)),该膜优异的吸附性能与快速动力学特性主要归因于其多层级结构,这种结构增强了铀酰离子的传质效率,使膜中吸附位点得到充分利用<sup>[42]</sup>。

综上所述,吸附法是一种兼具绿色环保、高环境适应性的海水提铀技术,是目前该领域研究最为广泛和深入的路径。尽管研究者们的工作一直聚焦于开发高性能铀吸附材料,但目前所开发的吸附材料仍面临吸附能力有限、抗生物污染性不足等问题;同时,海水中的微生物、藻类易附着于材料表面,堵塞吸附剂的孔道,导致吸附性能下降;吸附剂的机械强度、化学稳定性及抗生物污染能力也面临严峻考验。因此,各类吸附材料在真实海水环境中的稳定性、适应性和选择性仍有待进一步提升。设计吸附性能更高的吸附剂,并开发宏量稳定制备技术,对于实现海水铀资源的高效、稳定提取,进而加速该技术的产业化应用具有重要意义。

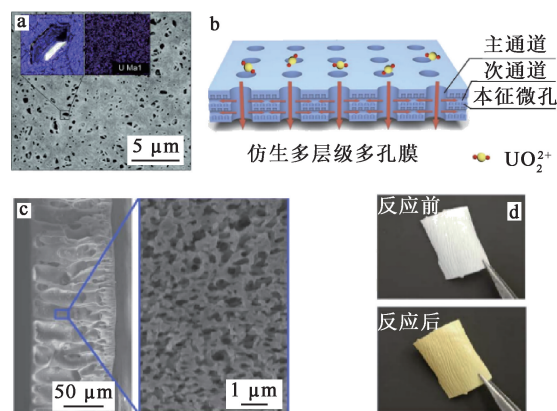


图 5 铀提取后金属-酚醛网络(MPN)膜的扫描电子显微镜和能谱仪成像(a)<sup>[41]</sup>,仿生分层多孔膜的示意(b)<sup>[42]</sup>,横截面扫描电子显微镜图像(c)<sup>[42]</sup>及提取铀前后的光学照片(d)<sup>[42]</sup>

Fig. 5 Scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer images of metal-phenolic network (MPN) membrane after uranium extraction (a)<sup>[41]</sup>, schematic diagram of layered porous membrane (b)<sup>[42]</sup>, cross-sectional SEM images (c)<sup>[42]</sup>, and optical photos before and after uranium extraction (d)<sup>[42]</sup>

## 2.2 电化学法

电化学法的关键优势在于能够施加有利于铀

酰离子迁移的电场(图 6),从而有望突破物理化学吸附中由热力学平衡主导的吸附-脱附限制<sup>[14,43]</sup>。在此过程中,U(VI)离子通过在电极活性位点或官能团上发生化学配合、配位或氧化/还原反应,实现选择性结合,对铀的高效提取起到关键作用。

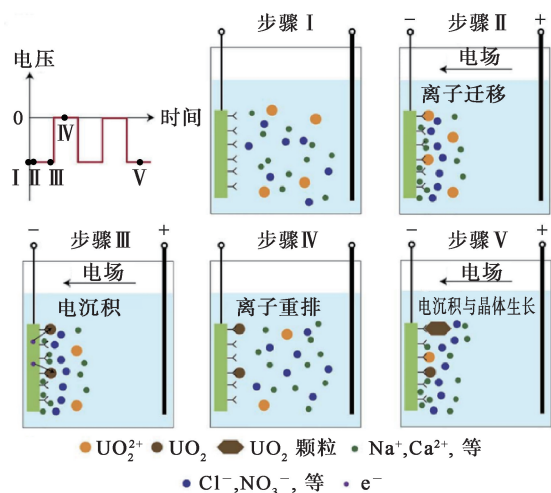


图 6 半波整流交流电化学法提取铀的 5 个步骤示意<sup>[14]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of five steps for extracting uranium using half-wave rectified alternating current electrochemical method<sup>[14]</sup>

通常,在从海水/盐湖卤水中快速捕获 U(VI)过程中,构建两类关键位点至关重要:一是能够选择性结合 U(VI)离子的活性位点或官能团;二是能够实现从电极到表面吸附态的 U(VI)电荷转移的平台。有研究者以 ZIF-8 为前驱体,合成了铁-氮共掺杂碳(Fe-N<sub>x</sub>-C)的电催化剂,并进一步通过接枝氨基脒基团,构建了具有 Fe-N4 原子位点的复合材料(Fe-N<sub>x</sub>-C-R, R 代表氨基脒基团)(图 7(a))<sup>[44]</sup>。在该结构中,氨基脒基团负责选择性捕获 U(VI),Fe-N4 单原子位点作为可逆电子转移平台,而多孔碳胶囊则提供了高导电性。被吸附的  $\text{UO}_2^{2+}$  通过 Fe-N4 原子位点转移的电子发生电化学还原,生成不稳定的  $\text{UO}_2^+$  中间产物;随后,在  $\text{OH}^-$  和  $\text{Na}^+$  参与下,该中间产物被再次氧化,最终生成沉淀物( $\text{UO}_2^{2+} + \text{Na}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{Na}_2\text{O}(\text{UO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})_x + \text{H}^+ + \text{e}^-$ )。此外,另有研究者开发了一种硫、氮双元素功能化的还原型氧化石墨烯泡沫电极。该电极通过分解水产生  $\text{H}_2$  和活性  $\text{OH}^-$ ,生成的  $\text{OH}^-$  阴离子会与  $\text{UO}_2^{2+}$  阳离子结合,在电极表面形成电荷中性的氧化铀氢氧化物( $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ ),从而实现 U(VI)的高效提取(图 7(b)~(c))<sup>[45]</sup>。

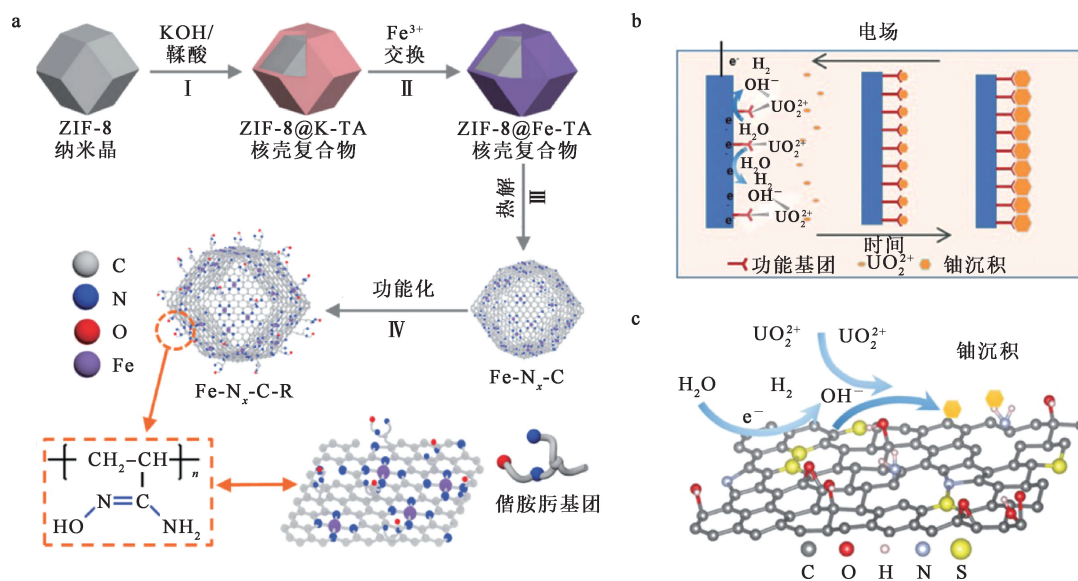


图 7 Fe-N<sub>x</sub>-C-R 合成及聚丙烯脒胺附着在 Fe-N<sub>x</sub>-C 表面的示意(a)<sup>[44]</sup>,铀电解沉积过程示意(b)、(c)<sup>[45]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of synthesis of Fe-N<sub>x</sub>-C-R and attachment of polypropylene amine oxime on surface of Fe-N<sub>x</sub>-C (a)<sup>[44]</sup>,schematic diagrams of uranium electrolysis deposition process (b) - (c)<sup>[45]</sup>

基于 COFs 的电催化剂在电化学法提铀领域也展现出优异的应用前景<sup>[46]</sup>。研究表明,将导电聚合物 PEDOT 嵌入氨基脒功能化的 COF 孔道中,不仅能够有效改善传统吸附剂导电性差的局限,还可实现活性位点上快速电子传输(图 8)<sup>[47]</sup>。基于创新的“还原-氧化”协同电沉积路径( $\text{UO}_2^{2+} \rightarrow \text{UO}_2 \rightarrow \text{UO}_3$ ),该设计在原电池效应作用下显著提升了铀的固化与提取速率。在模拟海水中,其对铀的吸附容量达 26.5 g/g,是传统物理混合电极的 4 倍;在天然海水中,铀富集指数高达  $1.1 \times 10^7$ 。受到高盐环境下海洋细菌生物矿化过程的启发,有研究者开发了单壁碳纳米管修饰的 COFs 复合膜电极,并对电化学铀沉积过程进行了仿生调节,从而有效抑制了真实海水中的析氢副反应及碱金属离子沉积,在天然海水中,该复合膜电极在反应 21 d 内对铀的吸附容量达 48.04 mg/g,在盐度更高的盐湖卤水中,反应 32 d 后的铀吸附容量达 75.72 mg/g<sup>[48]</sup>。

电场能够为铀酰离子迁移提供额外的驱动力,有望打破物理/化学吸附过程的迁移动力学限制。同时,通过施加反向电压,不仅可以实现吸附铀的有效释放与回收,还能利用排斥作用,使与铀酰离子所带电荷相同的干扰离子远离电极表面。这一机制使电化学法在从低浓度、大通量含铀水体中提取铀方面展现出很好的应用前景。然而,在长期运行过程中,电极表面的活性位点易因铀沉积或其他副反应而发生“中毒”失活,从而影响提取能力。此外,许多在实验室研究中表现优异的粉末状电极材料,在实际海水中可能面临结构不稳定、易脱落等问题,亟需开发更具结构稳定性和更实用性的自支撑电极。从工业应用角度来看,电化学提铀技术的可行性在很大程度上取决于经济性。能耗水平、设备投入与维护成本、劳动力支出等因素,将是决定该技术能否实现规模化应用的关键。

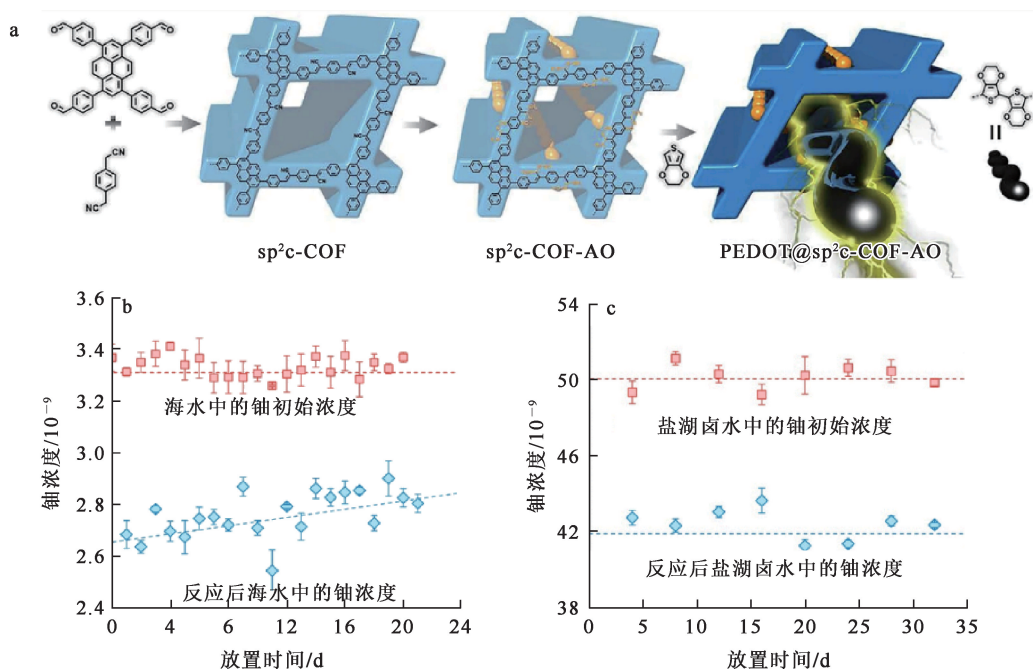


图 8 通过导电聚合物增强 COF 孔通道上偕胺肟基团的电子传输示意<sup>[47]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of electron transfer of oxime groups on COF pore channels enhanced by conductive polymers<sup>[47]</sup>

### 2.3 光催化法

光催化技术作为一种新兴的绿色驱动策略,通过光能驱动半导体激发并产生还原性活性物种,可将水溶液中可溶性的  $\text{U(VI)}$  选择性还原为难溶的  $\text{U(IV)}$ <sup>[49]</sup>。目前已有研究表明,基于光催化过程的

铀提取可能涉及 3 种不同的电子转移机制(图 9)<sup>[50]</sup>:第 1 种是两步单电子转移机制,其中  $\text{U(VI)}$  首先通过接受 1 个电子被还原为  $\text{U(V)}$  ( $\text{U(VI)} + \text{e}^- \rightarrow \text{U(V)}$ ),然后接受第 2 个电子进一步被还原为  $\text{U(IV)}$  ( $\text{U(V)} + \text{e}^- \rightarrow \text{U(IV)}$ ),在某些条件

下,  $\text{U(V)}$  会发生歧化反应, 同时生成  $\text{U(IV)}$  和  $\text{U(VI)}$  ( $2\text{U(V)} \longrightarrow \text{U(IV)} + \text{U(VI)}$ ); 第 2 种机制涉及双电子还原过程,  $\text{U(VI)}$  直接接受 2 个电子一步还原为  $\text{U(IV)}$  ( $\text{UO}_2^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{UO}_2$ )<sup>[51]</sup>; 第 3 种机制主要存在于酸性溶液中,  $\text{U(VI)}$  与一个电子和四个质子反应生成  $\text{U(IV)}$  和 2 个水分子 ( $\text{UO}_2^{2+} + 4\text{H}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{U}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O}$ ), 或者由第 1 种机制生成的  $\text{U(V)}$  与 1 个电子和 4 个质子反应生成  $\text{U(IV)}$  和 2 个水分子 ( $\text{UO}_2^+ + 4\text{H}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{U}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O}$ )。在某些特定的光催化体系中, 导带(CB)位置的过量电子会与溶解氧反应生成超氧自由基  $\cdot\text{O}_2^-$  ( $\text{O}_2 + \text{e}^- \longrightarrow \cdot\text{O}_2^-$ )。  $\cdot\text{O}_2^-$  也可与  $\text{UO}_2^{2+}$  发生反应 ( $\text{UO}_2^{2+} + \cdot\text{O}_2^- \longrightarrow \text{UO}_2 + 2\text{O}_2$ ) 来实现  $\text{U(VI)}$  的还原。

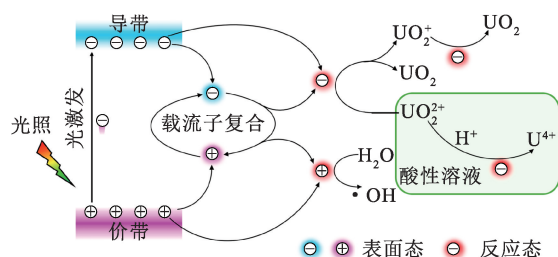


图 9 光催化还原  $\text{U(VI)}$  的机制示意<sup>[50]</sup>

Fig. 9 Schematic diagram of mechanism of photocatalytic reduction of  $\text{U(VI)}$ <sup>[50]</sup>

目前, 研究较为广泛的光催化剂包括 MOFs、COFs、 $\text{C}_3\text{N}_4$  等。据报道, 通过溶剂调控法可以制备获得外径 50~200 nm 的二维 COF 纳米线, 在模拟太阳光且不添加牺牲剂的条件下, 具有大比表面积与丰富活性位点的 COF 纳米线对  $\text{U(VI)}$  的吸附容量达 10.9 g/g。在实际海水中吸附反应 42 d 后, 该纳米线对铀的吸附容量达 34.5 mg/g<sup>[7]</sup>。通过将黑磷与聚脲胺脒进行结合, 复合纤维具有优异的光热与光电效应, 其对天然海水中铀的吸附容量达 11.76 mg/g<sup>[4]</sup>。与传统的二维平面  $\text{C}_3\text{N}_4$  相比, 具有介孔结构的  $\text{C}_3\text{N}_4$  (MCNr) 具有更大的比表面积和孔体积, 且表现出更高的光利用率和更高的提取效率<sup>[52]</sup>, 介孔  $\text{C}_3\text{N}_4$  对海水中铀的吸附容量可达 2 990 mg/g, 是平面  $\text{C}_3\text{N}_4$  的 6.75 倍<sup>[52]</sup>。

光催化法利用取之不尽的太阳能作为海水提铀的驱动力, 通过光激发半导体产生活性还原物种, 将水中游离的  $\text{U(VI)}$  变为沉淀态的  $\text{U(IV)}$ , 能

实现产物与溶液环境的有效固液分离, 被视为一种绿色、低能耗、可持续的解决方案。但由于自然光强远弱于实验室光源, 且海水或盐湖卤水中铀浓度极低, 目前实际铀吸附容量和速率仍有限; 同时, 海水中的溶解氧、碳酸根离子及其他杂质离子会影响其对铀酰离子选择性吸附; 此外, 铀的光催化还原过程大多在酸性体系下进行, 而海水  $\text{pH} \approx 8$ , 后续研究仍有待进一步探究弱碱性环境中光催化性能, 及其对铀的吸附可行性。

### 3 总结与展望

当前的铀提取技术中, 地浸采铀技术在提取效率与成熟度方面具有明显优势, 未来数十年内仍将是主流工艺; 海水/盐湖提铀是一项前瞻性、战略性的技术路径, 有望为核能的可持续发展提供资源保障。但非常规铀提取技术还面临一些问题, 有待进一步解决:

1) 发展砂岩铀矿的绿色浸出、智能过程控制、资源综合利用, 以及拓展非常规铀资源, 是构建我国“高效、低耗、清洁、循环”的铀提取技术体系的可行路径, 也是提升铀资源安全保障能力和行业可持续竞争力的必然选择。

2) 将电场、磁场等物理场引入地浸过程中, 能有效驱动铀酰离子的定向迁移与富集, 有望为铀提取技术从被动“浸出”向主动“物理场促迁移”的范式演进提供关键创新思路。未来研究的重点在于阐明物理场作用下, 铀矿物表面溶解动力学、铀酰离子形态转化, 以及与共存离子/胶体颗粒的竞争作用机制。

3) 对于海水/盐湖提铀, 吸附法仍是最可行的技术手段。随着功能材料领域的快速发展, 纳米结构材料有望实现从实验室到工业化的跨越。但海水环境较为复杂, 需设计并筛选兼具高容量、高选择性和强抗污性的新材料。

4) 半导体材料内部的载流子复合严重, 是限制光催化海水提铀的关键。通过构建 Z 型异质结、S 型异质结等新型光催化体系, 光生载流子分离效率将提升至 50% 以上, 有望实现从“概念验证”到“工程应用”的跨越。同时, 可将光催化与电催化技术进行结合, 在低电压下实现铀的高效提取。

非常规铀资源提取开采技术的发展将是一个“材料突破—过程创新—系统集成—经济可行”的

漫长阶段。这不仅是铀提取技术的进化,更是对未来铀资源利用模式的一次根本性思考——从“挖掘有限陆地矿床”转向“利用无限海洋资源”。该技术路径虽面临诸多挑战,但随着研究的不断深入,有望实现非常规铀资源的高效利用,从而保障核能作为低碳基荷能源的可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 周思聪. 世界铀资源特征与国家铀资源保障对策研究[D]. 北京:核工业北京地质研究院,2024.
- [2] SHARMA V K, SRIHARSHA P, RAO L K, et al. Process intensification in precipitation of uranium from post alkali leach liquor using re-dissolution of sodium diuranate slurry: a short review of laboratory and pilot scale test results[J]. Hydrometallurgy, 2025, 235: 106491.
- [3] FARJANA S H, HUDA N, MAHMUD M A P, et al. Comparative life-cycle assessment of uranium extraction processes[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 666-683.
- [4] WANG T, TAO B, ZUO B, et al. Challenges and opportunities of uranium extraction from seawater: a systematic roadmap from laboratory to industry[J]. Small Methods, 2025, 9: 2401598.
- [5] LIM Y J, GOH K, GOTO A, et al. Uranium and lithium extraction from seawater: challenges and opportunities for a sustainable energy future[J]. Journal of Materials Chemistry: A, 2023, 11: 22551-22589.
- [6] ZHU J, WANG J, LIU Q, et al. Advanced MXene-based materials for efficient extraction of uranium from seawater and wastewater[J]. Science of the Total Environment, 2024, 942: 173755.
- [7] MA X, MEIHAUS K R, YANG Y, et al. Photocatalytic extraction of uranium from seawater using covalent organic framework nanowires[J]. Journal of the American Chemical Society, 2024, 146: 23566-23573.
- [8] LI G, YAO J. A review of in situ leaching (ISL) for uranium mining[J]. Mining, 2024, 4: 120-148.
- [9] SKRIPCHENKO S Y, NALIVAICO K A, TITOVA S M, et al. Recovery of uranium from conversion production sludge by leaching with nitric acid and subsequent ion-exchange concentration[J]. Hydrometallurgy, 2024, 224: 106255.
- [10] 苏学斌, 田野, 任宇, 等. 先进地浸采铀技术与“国铀一号”工程[J]. 核科学与工程, 2025, 45: 819-831.
- [11] 刘泓伟. 外加电场强化铀矿生物浸出工艺研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2023.
- [12] 刘泓伟, 王学刚, 龙杰, 等. 难处理铀矿外场预处理强化生物浸出研究进展[J]. 稀有金属, 2022, 46: 965-974.
- [13] LIU Hongwei, WANG Xuegang, LONG Jie, et al. External field pretreatment to enhance bioleaching of refractory uranium ore: a review[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46: 965-974.
- [14] 李稳, 陈功新, 孙占学, 等. 某铀尾矿中 U、Th 在电场作用下释放及迁移规律[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019, 65-70.
- [15] LI Wen, CHEN Gongxin, SUN Zhanxue, et al. Release and migration of U and Th in uranium tailings under electric field[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019, 65-70.
- [16] 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: 17007.
- [17] 曹哲, 苏学斌, 闻振乾, 等. 基于外加电场的地浸采铀强化浸出与溶质运移的仿真建模研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56: 2157-2168.
- [18] CAO Zhe, SU Xuebin, WEN Zhenqian, et al. Simulation modeling of enhanced leaching and solute transport in in-situ uranium mining based on applied electric fields[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025, 56: 2157-2168.
- [19] 叶宽伟. 电催化氧化法处理电镀废水中有机污染物的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [20] MADAKKARUPPAN V, PIUS A, T S, et al. Influence of microwaves on the leaching kinetics of uraninite from a low grade ore in dilute sulfuric acid[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 313: 9-17.
- [21] 吴永永, 孟舒, 刘津麟, 等. 火山岩型铀矿石超声波强化浸出试验研究[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷)——中国核学会 2017 年学术年会论文集第 2 册(铀矿地质分卷(下)、铀矿冶分卷). 北京: 中国原子能出版社, 2017: 316-320.
- [22] YUAN Y, YU Q, CAO M, et al. Selective extraction of uranium from seawater with biofouling-resistant polymeric peptide[J]. Nature sustainability, 2021, 4: 708-714.
- [23] LI L, HU Z, GUO W, et al. Recent advances in various adsorbents for the extraction of uranium from saline lakes: a review[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 395: 123862.
- [24] TANG N, LIANG J, NIU C, et al. Amidoxime-based materials for uranium recovery and removal[J]. Journal of Materials Chemistry: A, 2020, 8: 7588-7625.
- [25] WANG D, SONG J, WEN J, et al. Significantly enhanced uranium extraction from seawater with mass produced fully amidoximated nanofiber adsorbent[J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8: 1802607.
- [26] LIU N, LIANG H, TIAN W, et al. An antibacterial and antifouling amidoxime-functionalized graphene oxide aerogel for selective uranium adsorption in salt lake water[J]. Colloids and Surfaces: A, 2022, 649: 129367.

- [24] YIQING Y, PALANIANDY P, ZAMAN H G, et al. Functionalized metal-organic frameworks for efficient uranium adsorption from seawater[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2025, 334: 4457-4484.
- [25] CAVKA J H, JAKOBSEN S, OLSBYE U, et al. A new zirconium inorganic building brick forming metal organic frameworks with exceptional stability[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130: 13850-13851.
- [26] WU H, YILDIRIM T, ZHOU W. Exceptional mechanical stability of highly porous zirconium metal-organic framework UiO-66 and its important implications[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2013, 4: 925-930.
- [27] GUMBER N, PAI R V, SANYAL K, et al. Synthesis and uranium adsorption studies of UiO-66 (Ce) based metal organic frameworks from aqueous solutions[J]. *Micro-porous and Mesoporous Materials*, 2022, 341: 112108.
- [28] LI W, LIU Y Y, BAI Y, et al. Anchoring ZIF-67 particles on amidoximerized polyacrylonitrile fibers for radionuclide sequestration in wastewater and seawater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 395: 122692.
- [29] WU Y, YAO Y, DING Z, et al. Co-irradiation induced graft polymerization of pre-swollen polyacrylonitrile nanofiber membranes for uranium extraction from seawater[J]. *Journal of Materials Chemistry: A*, 2025, 13: 3424-3434.
- [30] JIANG H, LUO J, LIU Z, et al. Porous nanofiber membrane from phase separation electronspun for selectively recovering uranium from seawater[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2022, 331: 2523-2532.
- [31] SUN R, QU C, JIANG C, et al. Preparation and performance of silver-incorporated antibacterial amidoximated electrospun nanofiber for uranium extraction from seawater[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2022, 331: 427-438.
- [32] MENG J, LIN X, ZHOU J, et al. Preparation of tannin-immobilized gelatin/PVA nanofiber band for extraction of uranium (VI) from simulated seawater[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 170: 9-17.
- [33] YUAN Y, NIU B, YU Q, et al. Photoinduced multiple effects to enhance uranium extraction from natural seawater by black phosphorus nanosheets[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59: 1220-1227.
- [34] WANG D, LIU Z, YUE Y, et al. Blow spinning of pre-acid-activated polyamidoxime nanofibers for efficient uranium adsorption from seawater[J]. *Materials Today Energy*, 2021, 21: 100735.
- [35] MA C, GAO J, WANG D, et al. Sunlight polymerization of poly(amidoxime) hydrogel membrane for enhanced uranium extraction from seawater[J]. *Advanced Science*, 2019, 6: 1900085.
- [36] LIU T, ZHANG R, CHEN M, et al. Vertically aligned polyamidoxime/graphene oxide hybrid sheets' membrane for ultra-fast and selective extraction of uranium from seawater[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32: 2111049.
- [37] LIU Z, LAN Y, JIA J, et al. Multi-scale computer-aided design and photo-controlled macromolecular synthesis boosting uranium harvesting from seawater[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 3918.
- [38] YAN B, MA C, GAO J, et al. An ion-crosslinked supramolecular hydrogel for ultrahigh and fast uranium recovery from seawater[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32: 1906615.
- [39] SHAN T, MA X, LI H, et al. Plant-derived hybrid coatings as adsorption layers for uranium adsorption from seawater with high performance[J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 675: 121547.
- [40] MA L L, YE H, LIU L, et al. Polypropylene membranes with high adsorption capacity and anti-adhesion properties achieved by hydrophobic interactions and hydrogen bonded self-assembly for uranium extraction from seawater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 138696.
- [41] LUO W, XIAO G, TIAN F, et al. Engineering robust metal-phenolic network membranes for uranium extraction from seawater[J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12: 607-614.
- [42] YANG L, XIAO H, QIAN Y, et al. Bioinspired hierarchical porous membrane for efficient uranium extraction from seawater[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5: 71-80.
- [43] YE Y, JIN J, HAN W, et al. Spontaneous electrochemical uranium extraction from wastewater with net electrical energy production[J]. *Nature Water*, 2023, 1: 887-898.
- [44] YANG H, LIU X, HAO M, et al. Functionalized iron-nitrogen-carbon electrocatalyst provides a reversible electron transfer platform for efficient uranium extraction from seawater[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33: 2106621.
- [45] WANG C, HELAL A S, WANG Z, et al. Uranium in situ electrolytic deposition with a reusable functional graphene-foam electrode[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33: 2102633.
- [46] WEN C, YAO Y, MENG L, et al. Photocatalytic and electrocatalytic extraction of uranium by COFs: a review[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62: 18230-18250.
- [47] SONG Y, HOU L, LAN P C, et al. Creating electrochemical accessibility in covalent organic frameworks for uranium extraction via electrodeposition[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 7093.
- [48] YANG L, QIAN Y, ZHANG Z, et al. A marine bacteria-inspired electrochemical regulation for continuous uranium extraction from seawater and salt lake brine[J]. *Chemical Science*, 2024, 15: 4538-4546.
- [49] TONG H, ZHU A, CHEN G, et al. Review on the synthesis, construction and photocatalytic applications of double-ligand MOFs[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 508: 161068.

- [50] ZHU W, LI X, WANG D, et al. Advanced Photocatalytic uranium extraction strategies: progress, challenges, and prospects[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13:132005.
- [51] LI P, WANG J, WANG Y, et al. Photoconversion of U(VI) by TiO<sub>2</sub>: an efficient strategy for seawater uranium extraction[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 365: 231-241.
- [52] WANG J, WANG Y, WANG W, et al. Tunable mesoporous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheets as a metal-free catalyst for enhanced visible-light-driven photocatalytic reduction of U(VI) [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 383:123193.

## Evolution and Challenges of Uranium Extraction Technology

WANG Jun<sup>1,2</sup>, XU Guolong<sup>3</sup>, CHEN Meifang<sup>3</sup>, LIU Fangyang<sup>1</sup>, JIANG Liangxing<sup>1</sup>

- (1. *School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China*;  
2. *School of Chemistry and Pharmaceutical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China*;  
3. *Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China*)

**Abstract:** Uranium serves as the "grain" for the nuclear industry and constitutes a strategic resource essential for both national and energy security. Currently, the global uranium supply relies primarily on conventional extraction technologies, such as open-pit and underground mining combined with heap leaching, as well as in-situ leaching. These well-established technologies, characterized by high maturity and relatively low costs, represent the primary methods for uranium extraction at present. However, conventional uranium mining is facing mounting challenges, including the gradual depletion of high-grade resources and increasing difficulty in developing low-grade deposits. Therefore, it has become imperative to expand uranium extraction technologies toward unconventional resources. Unconventional uranium resource extraction technologies aim to recover uranium from low-grade polymetallic associated ores, seawater, and salt lake brines. Although various technical pathways are still in the research and development stage, they have demonstrated significant potential for broadening resource boundaries and achieving comprehensive resource utilization. This paper systematically reviews the fundamental principles, research progress, and future development trends of uranium extraction technologies, aiming to provide a reference for technological innovation and strategic direction in the field of uranium extraction.

**Key words:** uranium; extraction technology; in-situ leaching; unconventional uranium resources; uranium extraction from seawater; comprehensive resource utilization