

# 碳基铀吸附材料研究进展

董浩

四川省自然资源实验测试研究中心(四川省核应急技术支持中心), 四川 成都

收稿日期: 2026年3月17日; 录用日期: 2026年3月27日; 发布日期: 2026年4月27日

## 摘要

核能作为优化我国能源结构、推动经济高质量发展的关键清洁能源, 其发展依赖于稳定的铀资源供给。传统陆地铀矿分布不均且储量有限, 促使非常规铀资源(海水、盐湖、核废水等)开发成为重要战略方向。碳基吸附材料凭借高比表面积、丰富孔隙结构、优异的耐酸碱/耐高温/抗辐射稳定性及环境友好性, 在铀吸附分离领域展现出独特优势。本文系统综述了活性炭、介孔碳、碳纳米管及石墨烯四类典型碳基材料的结构特性与铀吸附性能, 重点分析了材料表面改性(如官能团接枝、元素掺杂)对吸附容量、选择性及动力学性能的调控机制。现有研究表明, 通过表面功能化设计可显著提升碳基材料对铀的络合能力与吸附效率, 但多数工作仍局限于实验室规模。未来需聚焦规模化制备工艺优化、复杂工况适应性提升及实际工程化验证, 以推动清洁经济的碳基吸附材料从实验室走向工业化应用, 为我国核能产业可持续发展提供技术支撑。

## 关键词

铀吸附, 碳基材料, 表面改性, 非常规铀资源

# Research Progress in Carbon Based Uranium Adsorption Materials

Hao Dong

Sichuan Experimental Testing and Research Center of Natural Resources (Sichuan Nuclear Emergency Technical Support Center), Chengdu Sichuan

Received: March 17, 2026; accepted: March 27, 2026; published: April 27, 2026

## Abstract

As a critical clean energy source for optimizing China's energy structure and promoting high-quality economic development, nuclear power relies on a stable supply of uranium resources. The uneven distribution and limited reserves of traditional terrestrial uranium ores have driven the development of unconventional uranium resources—such as seawater, salt lake brines, and nuclear wastewater—

as an important strategic direction. Carbon-based adsorbent materials, featuring high specific surface area, abundant pore structure, excellent acid/alkali resistance, thermal stability, radiation resistance, and environmental friendliness, exhibit unique advantages in uranium adsorption and separation. This paper systematically reviews the structural characteristics and uranium adsorption performance of four typical carbon-based materials: activated carbon, mesoporous carbon, carbon nanotubes, and graphene. It focuses on the regulatory mechanisms of surface modification (e.g., functional group grafting, elemental doping) on adsorption capacity, selectivity, and kinetic performance. Current studies show that surface functionalization can significantly enhance the complexation ability and adsorption efficiency of carbon-based materials for uranium, although most research remains at the laboratory scale. Future efforts should focus on optimizing large-scale preparation processes, improving adaptability to complex working conditions, and conducting practical engineering verification. These steps will promote the transition of clean and economical carbon-based adsorbents from laboratory research to industrial application, providing technical support for the sustainable development of China's nuclear power industry.

## Keywords

Uranium Adsorption, Carbon Based Materials, Surface Treatment, Unconventional Uranium Resources

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着社会经济的快速发展，能源需求持续增长，化石燃料燃烧引发的环境问题与资源枯竭问题日益突出。核能作为一种高效、清洁、低碳的能源形式，在保障能源安全、实现“双碳”目标中扮演着关键角色，是我国优化能源结构、促进经济可持续发展的重要战略选择[1]。铀作为核技术发展的核心原料，其资源供给直接决定了核能产业的发展前景。

自然界中铀的同位素均具有放射性，且半衰期极长(如  $^{238}\text{U}$  半衰期约  $4.47 \times 10^9$  年)，是核反应堆与核燃料循环的基础。传统陆地铀矿主要包括沥青铀矿、钾钒铀矿等类型，其全球分布极不均匀，主要集中在哈萨克斯坦、澳大利亚、加拿大、尼日尔等国家[1]，我国陆地铀矿资源储量相对有限，且开采成本较高、环境约束较强。在此背景下，开发海水、盐湖卤水、核废水等非常规铀资源提取技术，成为缓解铀资源供给压力、保障核能产业可持续发展的重要途径，具有重大的战略意义与现实价值。

吸附法因具有操作简便、成本低廉、环境友好、选择性可调等优势，成为非常规铀资源提取的主流技术之一[2]。在众多吸附材料中，碳基吸附材料凭借其独特的物理化学性能脱颖而出：具有丰富的孔隙结构与较大的比表面积，可为铀吸附提供充足的活性位点；具备优异的耐酸碱腐蚀性、耐高温性与抗辐射稳定性，能适应复杂的工况环境；且原料来源广泛、易于制备，可通过表面改性实现功能化调控，大幅提升对铀的吸附容量与选择性[3]。因此，系统梳理碳基吸附材料在铀吸附领域的研究进展，分析其结构-性能关系，展望未来发展方向，对推动非常规铀资源开发技术的突破具有重要指导意义。

## 2. 活性炭

活性炭作为一类典型的无定形碳基吸附材料，比表面积可达  $500\sim 1700\text{ m}^2/\text{g}$ ，同时具备化学性质稳定、机械强度高、耐酸耐碱、耐高温、不溶于水及有机溶剂、可再生且成本低廉等优良特性，已被广泛应用

于水处理、气体分离、环境修复等领域，在铀吸附领域的研究与应用也最为成熟[4]。

活性炭的吸附作用源于物理吸附与化学吸附的协同效应：物理吸附源于活性炭内部分子受力均衡，而表面分子受力不平衡，使得表面易通过范德华力吸附其他分子；化学吸附则是活性炭与被吸附物质之间发生电子转移或化学键合的结果，二者共同构成了活性炭对水溶液中铀离子的吸附过程[5]。Mellah A 等以默克公司提供的活性炭为研究对象，探究了溶液 pH 值对其铀吸附性能的影响，结果表明 pH 是调控吸附效果的关键因素：吸附率随 pH 值升高至  $4.0 \pm 0.1$  时迅速达到最大值，随后随 pH 继续升高而快速下降，该活性炭对铀的饱和吸附容量为  $28.30 \text{ mg U/g ads}$  [6]。

为进一步突破活性炭吸附容量与选择性的限制，研究者通过表面改性技术对其进行功能化优化。Zhao Y 等以活性炭为基底，将具有高铀亲和性与选择性的苯甲酰硫脲基团接枝于活性炭表面，改性后材料的饱和吸附容量提升至  $82 \text{ mg U/g ads}$ ，同时吸附速率显著加快，且对复杂体系中的铀离子具有良好的离子选择性[7]。Zhang Y 等制备了磷酸化改性活性炭，静态吸附实验表明，该材料的最佳吸附 pH 值为 5.0，饱和吸附量可达  $197 \text{ mg U/g ads}$ ，其吸附行为更符合拟二阶动力学方程与 Langmuir 等温吸附模型，表明化学吸附在其吸附过程中占据主导地位[8]。

### 3. 介孔碳

与传统活性炭相比，介孔碳具有更优异的结构特性：比表面积可达  $2500 \text{ m}^2/\text{g}$ ，孔体积最高达  $2.3 \text{ cm}^3/\text{g}$ ，孔径呈现一定的短程有序性，且孔径尺寸、孔道形状与结构可通过制备工艺灵活调控；同时，材料表面富含含氧官能团(如羟基、羧基、羰基等)，为表面接枝、功能化改性提供了丰富的反应位点，可用于制备高吸附量、高选择性的铀吸附材料[9]。

Nie B 等以介孔硅 SBA-15 为模板、蔗糖为炭源，通过硬模板法制备了有序介孔炭，该材料具有孔结构有序、孔径分布均匀、比表面积大等优势。将  $2.0 \text{ g/L}$  的有序介孔炭投入 pH 值为 6.0、初始浓度为  $15 \text{ mg/L}$  的铀溶液中，铀吸附效率高达 99.9%，展现出优异的铀吸附性能[10]。Mayes R 等通过声化学聚合反应，在不同孔径的介孔碳表面接枝胺基团，开展含铀模拟海水的吸附实验，结果表明孔径对吸附效果影响显著：孔径为  $10 \text{ nm}$  和  $50 \text{ nm}$  的介孔碳接枝率最高，微孔与大孔介孔碳的接枝率最低；在高比表面积条件下，微孔结构不利于三碳酸铀酰的吸附，只有孔径与萃取介质、目标金属的尺寸与性质相适应，才能获得较佳的吸附效果[11]。

Husnain S 等采用环保型前驱体浸渍法，在磁性介孔碳表面接枝磷酸盐基团，制备了磁性功能化介孔碳吸附材料。在真实海水中，该材料 4 小时内可吸附约 69% 的铀，得益于氮原子与磷酸酯官能团的协同络合作用，其对铀形成了稳定的配位结构，同时具备优异的磁分离性能与可重复利用性，为海水提铀提供了高效、便捷的技术方案[12]。

### 4. 碳纳米管

碳纳米管具有典型的一维管状纳米结构，其管壁由  $\text{sp}^2$  杂化碳原子有序排列组成，具备优异的物理化学性能：比表面积大，管壁碳原子具有不饱和性，易与其他原子发生化学键合，化学活性良好，因此具有较强的吸附能力，是储氢材料、有机污染物吸附材料等领域的理想选择。

与气体吸附不同，碳纳米管对水溶液中金属离子的吸附性能与比表面积、空隙体积、管径无直接关联，而主要取决于表面酸度与表面官能团性质[13][14]。纯碳纳米管因范德华力作用表现出较强的疏水性，限制了其在水溶液中的分散性与铀吸附性能。Schierz A 等采用  $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  混合酸对碳纳米管进行酸化处理，随着酸化时间延长，材料表面生成大量羧基(-COOH)等含氧官能团，亲水性逐渐增强，同时饱和吸附容量也随之提升[15]。

为进一步提升碳纳米管对铀的吸附性能,研究者通过表面接枝技术对其进行功能化改性。Shao D 等采用等离子体技术,将羧甲基纤维素接枝到多壁碳纳米管表面,接枝后材料在水中的溶解度显著增强,其表面的羧基、羟基等官能团可与铀离子形成稳定的络合物,饱和吸附容量提升至 112 mg U/g ads,较未接枝材料大幅提高[16]。Tan L 等通过水热法制备了磁性钴铁氧体/多壁碳纳米管复合材料,该材料对铀溶液的 pH 值表现出较强依赖性:在 pH < 6 时,材料吸附铀后表面电荷发生正迁移,表明铀离子以阳离子或中性内层表面复合物形式被吸附,导致净表面电荷负性减小;在 pH > 6 时,材料带高负电荷,铀离子吸附对其电位影响不明显;在最佳 pH 值 6.0 条件下,该材料的饱和吸附容量达到 212.7 mg U/g ads,兼具优异的吸附性能与磁分离便捷性[17]。

## 5. 石墨烯

石墨烯是由 sp<sup>2</sup> 杂化碳原子构成的单原子层二维碳纳米材料,具有独特的层状结构,其层间原子均为表面原子,暴露了大量活性位点;同时具备机械强度高、导电性优异等优势,已成为水处理领域的研究热点。

氧化石墨烯作为石墨烯的重要衍生物,表面富含羧基、羟基、环氧基等含氧官能团,是制备铀吸附材料的理想基底[18]。Xu Y 等研究表明,氧化石墨烯可通过表面含氧官能团与水溶液中的铀离子形成络合作用,有效提取铀资源,但由于缺乏靶向性官能团,其对铀的饱和吸附容量仅为 97.5 mg U/g ads,吸附选择性有待提升[19]。

为突破这一限制,研究者通过引入靶向官能团,制备了高性能功能化石墨烯基吸附材料。Wang F 等通过直接混合法,将对铀具有高亲和性的胍基团接枝到氧化石墨烯表面,合成了氧化石墨烯/胍胺水凝胶。该水凝胶的吸附过程以化学吸附为主,饱和吸附容量可达 398.41 mg U/g ads;即使在铀浓度仅为 3.71 μg/L 的模拟海水中,吸附率仍达到 83%,展现出极高的亲和力与选择性,为海水提铀提供了高效材料[20]。Huang Z 等利用壳聚糖(富含羟基与氨基)与氧化石墨烯通过自组装技术,制备了壳聚糖-氧化石墨烯气凝胶。该气凝胶具有多孔三维结构,比表面积大,且表面官能团丰富,在不同铀浓度的模拟海水中均表现出极佳的选择性:在铀浓度仅为 3.52 μg/L 的模拟海水中,吸附率近乎 100%,且具备良好的机械强度与可重复利用性,在实际海水提铀场景中具有广阔应用前景[21]。

## 6. 结语

碳基吸附材料凭借其丰富的孔隙结构、较大的比表面积与孔隙率,以及优异的耐酸碱腐蚀、耐高温、抗辐射和环境友好等特性,在铀吸附分离领域展现出独特且不可替代的优势。通过表面氧化、浸渍改性、官能团接枝等多种表面功能化策略,可精准调控材料表面化学性质,显著提升其对铀的吸附容量、选择性与动力学性能。对比四种类型吸附材料,活性炭材料制备成本较低、比表面积中等、化学稳定性较好,但存在吸附容量低、速率慢、选择性差的缺点;介孔碳材料比表面积中等、吸附容量适中、速率快、选择性好,但存在模板法成本偏高,无模板法孔径调控精度不足的情况;碳纳米管材料比表面积较低、化学稳定性中等、吸附容量适中、速率快、选择性好,但存在制备成本较高、规模化应用受限的缺点;石墨烯材料比表面积最高、吸附容量最高、选择性最好、速率最快、易功能化,但成本最高,化学稳定性最低,规模化应用困难的缺点。

现有研究已从单一碳基材料拓展至复合碳基材料,从实验室基础研究逐步向实际工况应用探索,取得了一系列突破性成果。但总体而言,目前碳基铀吸附材料的研究仍多局限于实验室规模,仍面临三大核心挑战:一是规模化制备工艺不成熟,难以实现高性能碳基材料的低成本、大批量生产,限制了工程化应用;二是复杂工况适应性不足,实际海水、盐湖卤水体系中存在大量干扰离子(如 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、

Mg<sup>2+</sup>等), 易竞争吸附位点, 导致吸附效率与选择性下降; 三是工程化验证匮乏, 缺乏中试试验与长期运行数据, 材料的稳定性、可重复利用性及成本效益难以评估。

未来, 碳基吸附材料在铀吸附领域的发展应聚焦以下方向: 一是优化材料制备工艺, 开发绿色、高效、低成本的规模化合成方法, 实现材料性能与生产成本的平衡; 二是深化表面改性技术创新, 设计具有高选择性、高抗干扰性的靶向官能团, 提升材料在复杂体系中的吸附性能; 三是加强工程化应用研究, 开展中试试验与长期运行评估, 完善材料的分离回收、再生循环工艺, 推动清洁经济的碳基吸附材料从实验室走向工业化应用。

## 参考文献

- [1] Yeralin, Z.M. and Goncharenko, S.N. (2019) Models for Solving Key Problems of Strategic Development of Uranium Mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, **4**, 199-208. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-199-208>
- [2] Liu, D., Wang, Y., Zuo, L., Guo, M. and Liu, S. (2025) Advanced Materials for Uranium Adsorption: A Mini Review of Recent Developments. *Frontiers in Materials*, **12**, Article ID: 1541204. <https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1541204>
- [3] Boussouga, Y., Joseph, J., Stryhanyuk, H., Richnow, H.H. and Schäfer, A.I. (2024) Adsorption of Uranium (VI) Complexes with Polymer-Based Spherical Activated Carbon. *Water Research*, **249**, Article 120825. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120825>
- [4] Ho, S. and Saad, M.J. (2022) A Review on Heavy Metal and Dye Removal via Activated Carbon Adsorption Process. *Asian Journal of Chemistry*, **35**, 1-16. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2023.24019>
- [5] Wang, X., Cheng, H., Ye, G., Fan, J., Yao, F., Wang, Y., et al. (2022) Key Factors and Primary Modification Methods of Activated Carbon and Their Application in Adsorption of Carbon-Based Gases: A Review. *Chemosphere*, **287**, Article 131995. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131995>
- [6] Mellah, A., Chegrouche, S. and Barkat, M. (2006) The Removal of Uranium(VI) from Aqueous Solutions onto Activated Carbon: Kinetic and Thermodynamic Investigations. *Journal of Colloid and Interface Science*, **296**, 434-441. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.09.045>
- [7] Zhao, Y., Liu, C., Feng, M., Chen, Z., Li, S., Tian, G., et al. (2010) Solid Phase Extraction of Uranium (VI) onto Benzothiourea-Anchored Activated Carbon. *Journal of Hazardous Materials*, **176**, 119-124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.005>
- [8] Zhang, Y., Ye, T., Wang, Y., Zhou, L. and Liu, Z. (2021) Adsorption of Uranium(VI) from Aqueous Solution by Phosphorylated Luffa Rattan Activated Carbon. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **327**, 1267-1275. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07592-w>
- [9] Li, X., Song, Q., Liu, B., et al. (2011) Adsorption of Uranium by Carbon Materials from Aqueous Solutions. *Progress in Chemistry*, **23**, 1446-1453.
- [10] Nie, B., Zhang, Z., Cao, X., Liu, Y. and Liang, P. (2013) Sorption Study of Uranium from Aqueous Solution on Ordered Mesoporous Carbon CMK-3. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **295**, 663-670. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1820-0>
- [11] Mayes, R.T., Górka, J. and Dai, S. (2016) Impact of Pore Size on the Sorption of Uranyl under Seawater Conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **55**, 4339-4343. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03698>
- [12] Husnain, S.M., Kim, H.J., Um, W., Chang, Y. and Chang, Y. (2017) Superparamagnetic Adsorbent Based on Phosphate Grafted Mesoporous Carbon for Uranium Removal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **56**, 9821-9830. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b01737>
- [13] 任学佑. 碳纳米管储氢材料[J]. 中国金属通报, 2001(49): 22.
- [14] 高静, 徐殿斗, 马玲玲, 等. 碳纳米管对水体有机污染物的吸附研究进展[J]. 化工新型材料, 2011, 39(11): 6-8.
- [15] Schierz, A. and Zänker, H. (2009) Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes: Surface Oxidation, Colloidal Stability and Uranium Sorption. *Environmental Pollution*, **157**, 1088-1094. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.09.045>
- [16] Shao, D., Jiang, Z., Wang, X., Li, J. and Meng, Y. (2009) Plasma Induced Grafting Carboxymethyl Cellulose on Multi-walled Carbon Nanotubes for the Removal of UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> from Aqueous Solution. *The Journal of Physical Chemistry B*, **113**, 860-864. <https://doi.org/10.1021/jp8091094>
- [17] Tan, L., Liu, Q., Jing, X., Liu, J., Song, D., Hu, S., et al. (2015) Removal of Uranium (VI) Ions from Aqueous Solution by Magnetic Cobalt Ferrite/Multiwalled Carbon Nanotubes Composites. *Chemical Engineering Journal*, **273**, 307-315. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.110>

- [18] Kuang, D. and Hu, W. (2013) Research Progress of Graphene Composites. *Journal of Inorganic Materials*, **28**, 235-246. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1077.2013.12345>
- [19] Xu, Y. (2008) Nuclear Energy in China: Contested Regimes. *Energy*, **33**, 1197-1205. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.03.006>
- [20] Wang, F., Li, H., Liu, Q., Li, Z., Li, R., Zhang, H., *et al.* (2016) A Graphene Oxide/Amidoxime Hydrogel for Enhanced Uranium Capture. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 19367. <https://doi.org/10.1038/srep19367>
- [21] Huang, Z., Li, Z., Zheng, L., Zhou, L., Chai, Z., Wang, X., *et al.* (2017) Interaction Mechanism of Uranium (VI) with Three-Dimensional Graphene Oxide-Chitosan Composite: Insights from Batch Experiments, IR, XPS, and EXAFS Spectroscopy. *Chemical Engineering Journal*, **328**, 1066-1074. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2017.07.067>