

基于密胺泡沫的超亲油疏水纳米海绵

杨士方, 于 鹏*

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年1月2日; 录用日期: 2026年1月26日; 发布日期: 2026年2月5日

摘 要

石油是工业生产的重要原料, 人们的日常生产生活也离不开各种油类物质, 时常发生的海上溢油事件以及常年进行的工业排污对海洋环境造成了巨大的影响, 急需一种能有效吸收、去除和转移海水中油污和有机污染物的环保型材料。对于油污问题, 普通的处理方法效果并不显著, 并且容易造成二次污染。因此, 本文以价格低廉且环保的密胺泡沫作为基底, 使用氧化石墨对其进行修饰, 经过退火处理后设计构筑了一种具有三维多孔结构的海绵材料, 并设计实验测试了海绵的稳定性、吸油性能和可再生性能, 从而得出超轻纳米海绵是一种密度低、再生能力强、环保高效的“去油神器”的结论, 在工业应用和油污处理方面具有很大的潜力。

关键词

密胺泡沫, 氧化石墨, 污染

The Super Lipophilic-Hydrophobic Sponges Prepared on the Basis of Melamine Foam

Shifang Yang, Peng Yu*

College of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: January 2, 2026; accepted: January 26, 2026; published: February 5, 2026

Abstract

Oil is an important raw material for industrial production, and People's Daily production and life cannot do without a variety of oil. The frequent occurrence of offshore oil spills and perennial

*通讯作者。

industrial sewage has caused a huge impact on the Marine environment, and there is an urgent need for an environmentally friendly material that can effectively absorb, remove and transfer oil and pollutants from seawater. For the problem of oil pollution, the ordinary treatment method is not effective, but easy to cause secondary pollution. Therefore, in this paper, inexpensive and environmentally friendly dense amine foam is used as the base, graphite oxide is used to modify it, and after annealing treatment, a sponge material with three-dimensional porous structure is designed and constructed, and the stability, oil absorption and renewable properties of the sponge are tested by experiments. It is concluded that ultra-light nano-sponge is a kind of "oil removal tool" with low density, strong renewable ability, environmental protection and high efficiency, which has great potential in industrial application and oil pollution treatment.

Keywords

Melamine Foam, Graphite Oxide, Pollution

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. 介绍

石油污染物和含油工业废水的排放造成了严重的水污染,对人类健康和生态环境构成了重大威胁[1]。更重要的是,含油废水的排放会使水质恶化到扰乱工业生产过程的程度。因此,亟需开发高效的材料从水中分离石油污染物[2]。

目前,处理海水中油污染的常用方法包括化学分散剂、生物处理法和吸附法。化学分散剂的作用是将油化合物裂解成微米大小的液滴,常被用于补救被污染的环境[3]。分散剂可以降低油和海水之间的表面张力,从而使海面上的油污形成稳定的微小油滴,在合适的条件下,可以分散90%的泄露油[4]。然而,化学分散剂对水生生物的潜在不利影响引起了广泛关注[5]。生物修复是依赖于石油降解微生物分解海水中的石油污染物,同时从这些污染物中获得其生长和代谢所需的能量和营养[6]。然而,微生物的降解速率较慢,不能直接应用于处理大规模的油污污染事故。相比之下,吸附法使用物理设备和吸油材料消除油污,具有更环保的特性[7]。在各种吸附材料中,多孔材料因其高吸附能力、优异的选择性和良好的可重复使用性等优越优势,在溢油回收中受到了广泛关注[8]。

与二维薄膜材料相比,三维多孔材料具有较大的比表面积和强大的吸附能力[9]。在各种三维多孔基底中,密胺泡沫具有低成本、内部孔隙度丰富、吸收能力强的优点,被认为是一种最具吸引力的基底[10]。然而,原始的密胺泡沫不能有效地将石油污染物从水中分离出来。因此,有必要将其表面改性为超疏水表面,以实现选择性吸油。制备超疏水表面目前主要有两种策略:低表面能物质对粗糙表面进行修饰;低表面能物质表面构建一定粗糙度[11]。最近疏水表面的处理受到了越来越多的关注,研究人员从莲花效应中获取灵感,用以复刻具有特殊拒水性的超疏水表面[12]。本文以密胺泡沫作为基底,将氧化石墨均匀分散在无水乙醇中,然后将其与密胺泡沫复合,获得了疏水亲油且性质稳定的海绵材料。

2. 实验部分

2.1. 材料、试剂与仪器

氧化石墨(GO); 密胺泡沫(MF); 乙醇; 豆油; 石油; 汽油。

电子天平; 超声机; 磁力搅拌机; 烘箱; 管式炉。

2.2. rGO/CMF 海绵材料的合成

首先, 用去离子水清洗密胺泡沫, 去除其中的杂质, 然后将泡沫在 80°C 下干燥 12 小时。将氧化石墨在无乙醇中超声均匀, 并配置成不同浓度的氧化石墨乙醇溶液。接下来, 将干燥后的 MF 浸泡在氧化石墨溶液中 1 小时, 取出泡沫放入烘箱中干燥 12 小时。最后, 将干燥的泡沫放入管式炉中在氮气条件下 400°C 热解 2 小时, 升温速度 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 得到 rGO/CMF 海绵材料。

3. 结果与讨论

3.1. 材料表征

如图 1(a)所示, 扫描电镜图中原始密胺泡沫具有完整的三维多孔结构, 内部含有许多直径大小不一的孔洞, 这些孔洞为海绵吸收油类和有机物溶液提供了良好的基础条件。将氧化石墨超声均匀后分散于密胺泡沫中, 氮气条件下 400°C 退火 2 小时从而合成了 rGO/CMF 海绵材料, 在扫描电镜图中可以观察到, 泡沫的多孔结构没有受到破坏, 氧化石墨薄片均匀分布于材料的骨架结构中, 从而使材料具有良好的疏水性(图 1(b)、图 1(c))。

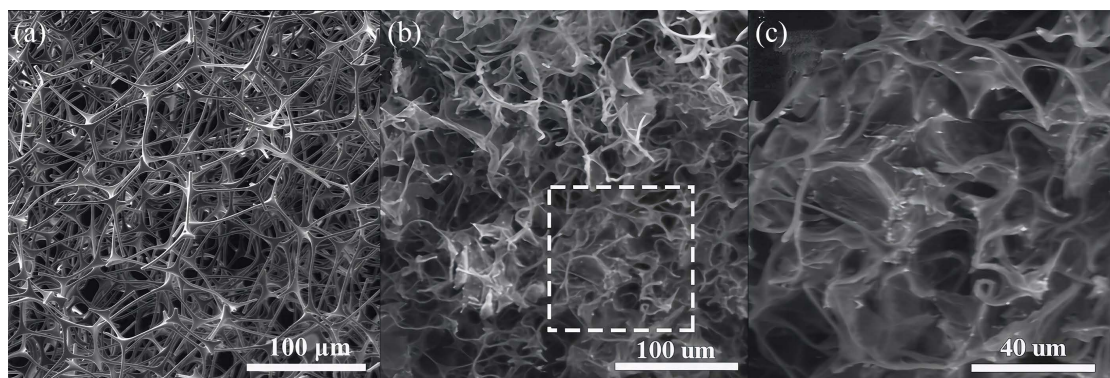


Figure 1. (a) SEM of melamine foam; (b), (c) Scanning electron microscopy images of rGO/CMF sponge
图 1. (a) 密胺泡沫的扫描电镜图; (b)、(c) rGO/CMF 海绵的扫描电镜图

3.2. 材料性能

3.2.1. 材料的疏水性

氧化石墨具有两亲性, 从边缘到中间呈现亲水到疏水的分布, 并且可以降低界面间的能量, 其添加量对于材料疏水性影响较大。在合成 rGO/CMF 海绵材料的过程中, 在氧化石墨和无乙醇的比例分别为 0.25 mg/ml 、 0.50 mg/ml 、 0.75 mg/ml 、 1 mg/ml 、 1.25 mg/ml 的条件下合成五组不同的疏水亲油海绵材料。经过观察, 随着氧化石墨含量的逐步提高, 所合成的海绵材料疏水性也随之提升, 但氧化石墨溶解量达到 1 mg/ml 之后, 氧化石墨无法完全溶解, 溶解度达到顶峰, 并且疏水性无明显提升。所以, 在合成 rGO/CMF 海绵材料过程中, 氧化石墨在无乙醇中的含量为 1 mg/ml 时最为合适。

切割一块体积为 24 cm^3 的密胺泡沫, 计算出原始泡沫密度为 12 mg/cm^3 , 在经过原位修饰和高温热解后合成了 rGO/CMF 海绵材料, 所合成的材料密度降低到了 9 mg/cm^3 , 而形貌和体积并没有产生较大的变化(图 2(a)、图 2(b))。将海绵水平放置于实验台上, 用滴管吸取少量去离子水滴在海绵的表面, 水滴能够长时间保持球状形态(图 2(c))。将 rGO/CMF 海绵材料浸没于装有水的烧杯中, 会形成类似银镜的反光面, 是由材料表面滞留的空气层引起的, 可以看出超轻疏水海绵具有良好的疏水性(图 2(d)) [13]。经过处理后的海绵材料重量很小, 可以轻松放置于蒲公英的顶部, 不会使其产生明显的形变(图 2(e))。

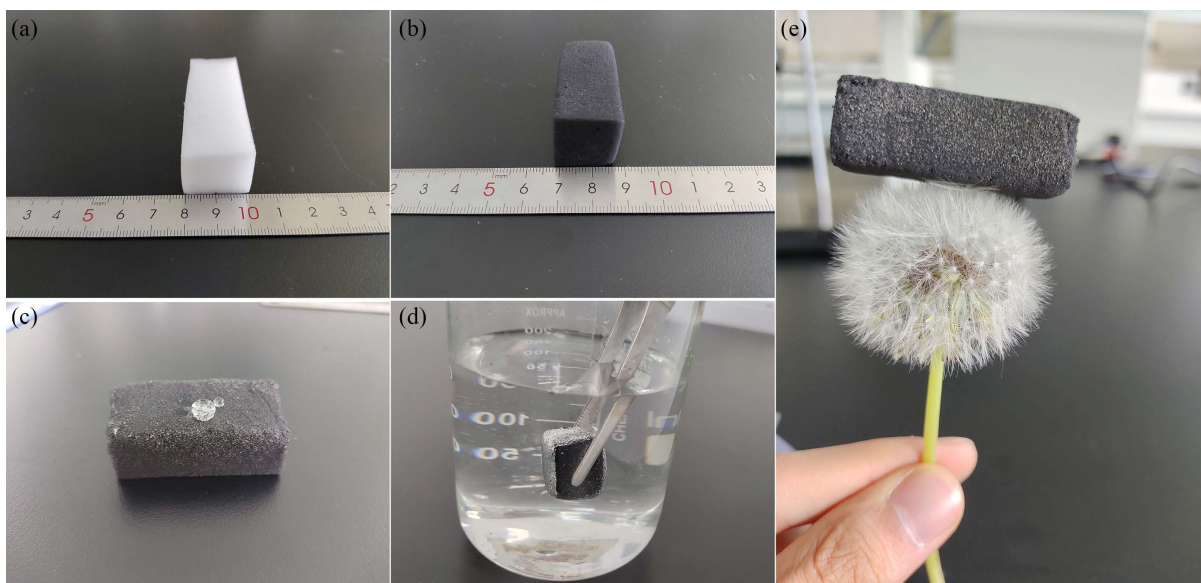


Figure 2. (a) Photos of melamine foam; (b) Photo of rGO/CMF sponge material; (c) Photo of water droplets falling on the surface of rGO/CMF sponge material; (d) Underwater silver mirror phenomenon diagram; (e) Photo of rGO/CMF sponge material placed on dandelion balls

图 2. (a) 密胺泡沫的照片; (b) rGO/CMF 海绵材料的照片; (c) 水珠滴在 rGO/CMF 海绵材料表面的照片; (d) 水下银镜现象图; (e) rGO/CMF 海绵材料放置于蒲公英绒球上的照片

3.2.2. 材料的可再生性

为了进一步探究材料的稳定性,以 rGO/CMF 海绵材料为实验对象,对其进行应力-应变测试。单位面积上所承受的附加内力被称为应力,应变是指在外力或场的影响下物体产生的相对局部形变,根据应变与应力的关系可以推断出材料的稳定性。将材料水平放置于称量仪器上,使用 200 g 的砝码对其施加压力,并通过侧面放置的直尺观测材料的形变程度,通过称量仪器的示数变化计算其应力大小。经过测试可知,当材料的应变达到 30%时,根据测量仪器的示数计算出其应力达到了 5.62 Kpa,将砝码缓慢从材料上移开,观察到经过挤压后的海绵高度保持为原有的 93%(图 3(a)~(c))。实验初步证明了海绵材料稳定性良好,具有进一步研究的价值。

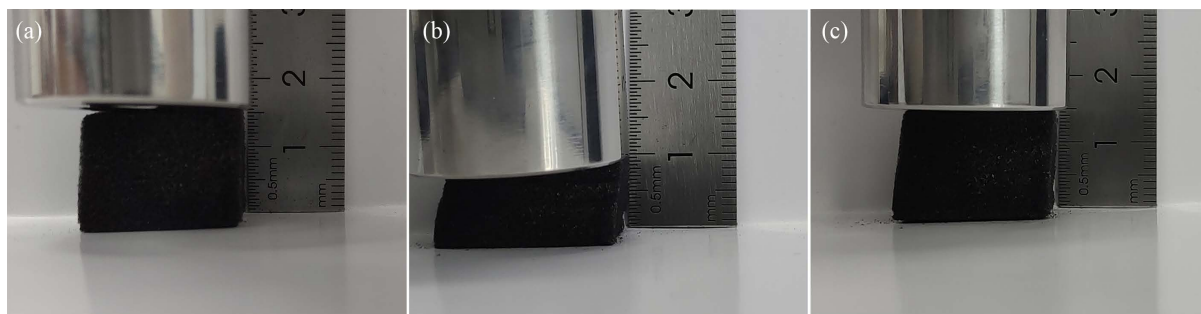


Figure 3. Flowchart of stability testing for rGO/CMF sponge materials

图 3. rGO/CMF 海绵材料稳定性测试的流程图

使用汽油模拟海水中不可回收的油污。首先使用材料对水中的汽油进行吸收,吸收完毕后将海绵材料连同所吸收的汽油一起转移到安全的场地进行燃烧处理。海绵材料中的油类在接触到火源后迅速燃烧,直至几分钟后火焰熄灭,可以观察到燃烧后的海绵材料形貌几乎没有受到任何破坏,并且仍可以继续投

入使用(图 4(a)~(c))。该方法相较于传统的原位燃烧法处理油污而言,不会对海洋生物和环境造成二次影响,具有环保的优点。

使用大豆油模拟具有回收价值的油类和有机物溶液。将水和大豆油混合于烧杯中,用材料将豆油吸收后转移到器皿的上方,通过挤压将大豆油回收到器皿中(图 4(d)~(f))。在这个过程中,海绵材料可以多次使用且方便快捷,相较于传统的回收方法而言更加便利,很大程度上减少了人力物力的浪费。

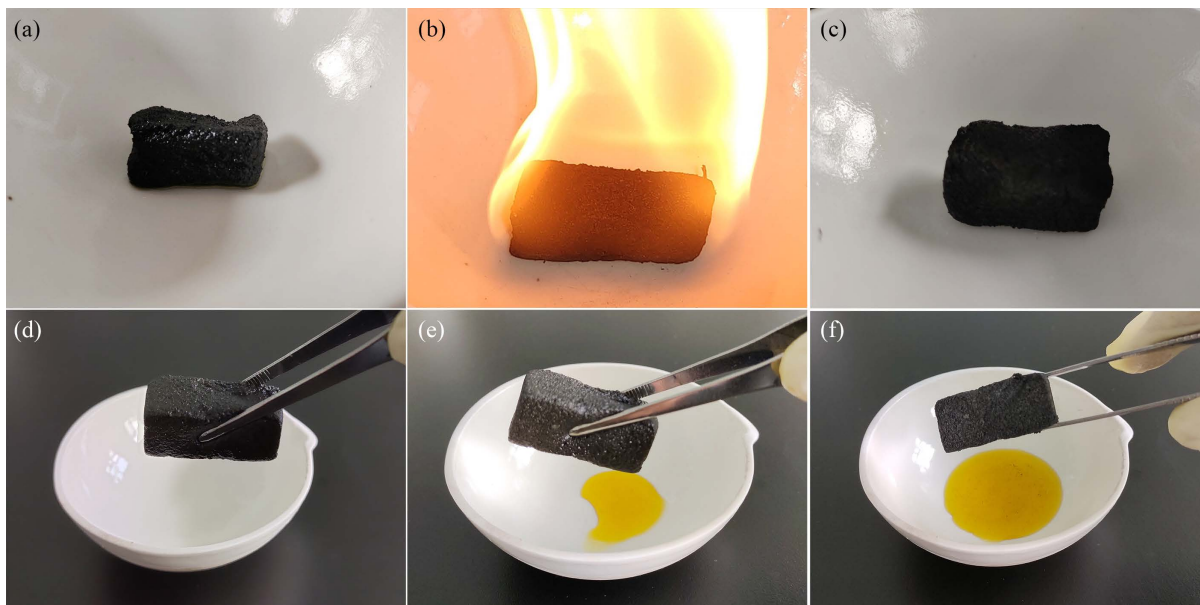


Figure 4. (a, b, c) The combustion test process of rGO/CMF sponge material after absorbing gasoline; (d, e, f) Flowchart of rGO/CMF sponge material for recovering soybean oil through extrusion

图 4. (a、b、c)吸收汽油后的 rGO/CMF 海绵材料进行燃烧测试的流程图; (d、e、f)rGO/CMF 海绵材料通过挤压回收豆油的流程图

3.2.3. 材料的亲油性

将材料放置于装有油水混合物的容器中,几秒钟就能将油类从水中分离出来,但是这样并不能具体客观的表现出材料对油类和有机物溶液的吸收能力。为了进一步测试材料的亲油性和吸收能力,分别使用两种海绵材料对不同种的油类进行吸收和处理。

对于具有回收价值的油类,可以采用吸收和挤压法将其回收。本研究以豆油、汽油和石油为例,初步测试 rGO/CMF 海绵材料对不同种油类的吸收能力。取 rGO/CMF 海绵材料,称重后分别浸入装有三种油类的烧杯中,待材料充分吸收液体后,用镊子夹出再次称量,记录吸取油类前后海绵材料质量的变化。经计算,平均 1 g rGO/CMF 海绵材料对大豆油、石油和汽油的吸收量分别达 112.7 g、102.6 g 和 90.1 g。对比目前已报道的同类吸附材料(见表 1)。SA@P25@SiO₂@MS 对油类的吸收量为 98.2 g/g, Silane-MXene@MF 的吸收量为 99.6 g/g, BMCR 的吸收量为 95 g/g, 而本研究的 rGO/CMF 海绵对大豆油的吸收量为 112.7 g/g 显著高于这些材料,体现出更优异的油类吸收性能。

将材料中的油类挤压到其他烧杯中后,浸入原有烧杯中吸收油类后再称量,重复上述步骤五次,并记录每次材料吸收油类的质量。通过图 5(a)可以看出,材料对于大豆油的吸收量最好,1 g rGO/CMF 海绵材料能够吸收 112.7 g 大豆油,经过五次使用后,吸收量降低了 20%,每克海绵材料仍能吸收自身质量 90.8 倍的大豆油。海绵材料对于石油的吸收量相对较低,但也能达到自身质量的一百倍以上,经过了五次的使用后,吸收量也仅仅降低了 17%。在这三种油类中,材料吸收效果最差的就是汽油,每克海绵材

料对汽油的吸收量保持在 92.2 g 左右，经过了五次使用后，只能吸收自身质量 67 倍的汽油。实验证明，材料不仅对各种油类有着优异的吸收能力，而且可以多次使用，在油污处理领域具有广泛的应用前景。

Table 1. Performance of different absorbents

表 1. 不同吸收剂的性能

吸附剂	吸收量(g/g)	数据来源
SA@P25@SiO ₂ @MS	98.2	[14]
AGO-L-MF	69	[15]
Silane-MXene@MF	99.6	[16]
BMCF	95	[17]
MS@PDA/LMs@TiO ₂	49.1	[18]
rGO/CMF	112.7	本研究

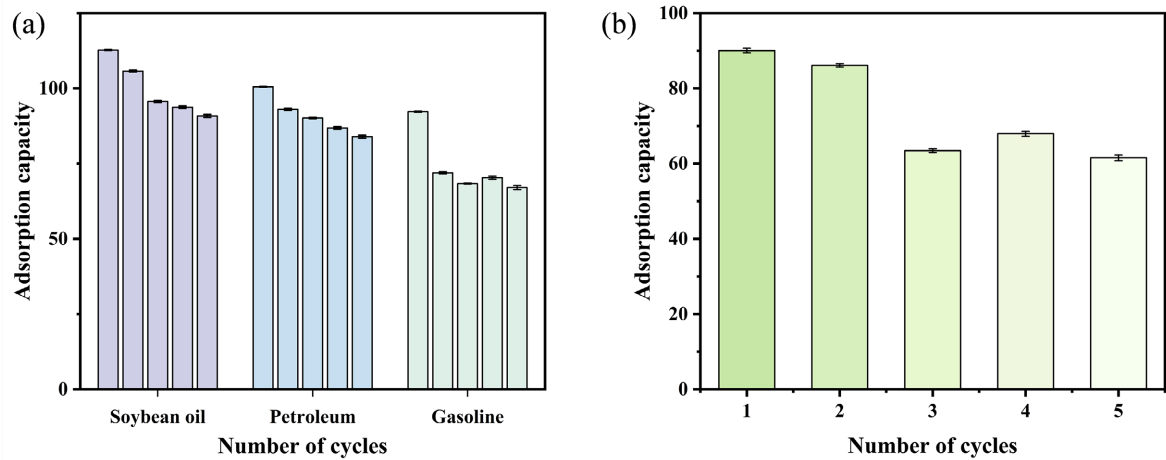


Figure 5. (a) Column analysis of the absorption of soybean oil, petroleum, and gasoline by rGO/CMF sponge material; (b) Column analysis chart of the amount of gasoline absorbed by rGO/CMF sponge material after combustion

图 5. (a) rGO/CMF 海绵材料对豆油、石油和汽油吸收量的柱状分析图；(b) rGO/CMF 海绵材料燃烧后吸收汽油量的柱状分析图

对于没有回收价值的石油污染物，通常采用原位燃烧进行处理。虽然这种方法方便高效，但可能会造成二次环境污染。同时，在处理之前回收这些石油污染物无疑会造成人力和物力资源的浪费。相比之下，使用疏水亲油海绵材料将油从海水中分离出来，然后将载油海绵转移到安全区域集中燃烧，不仅避免了二次环境污染，而且节省了大量的人力和物力资源。以汽油为模型油，设计了一个实验来评估 rGO/CMF 海绵的可重复使用性。具体而言，使用预先称重的 rGO/CMF 海绵在烧杯中吸收汽油，吸收后记录海绵的重量。随后，载油海绵被运送到安全区并点燃，海绵中吸附的汽油迅速燃烧，火焰在几分钟内逐渐熄灭。重复上述过程，并记录每个循环的吸油重量。结果表明，海绵的初始汽油吸收能力达到其自身重量的 90.1 倍。即使在五次燃烧循环后，它仍然保持了 61.6 倍于自身重量的吸收能力，吸收能力仅下降了 31.7% (图 5(b))。实验结果证实，本研究制备的疏水亲油海绵不仅具有优异的亲油性和稳定性，而且可以应对各种类型的油污染，因此在油污处理领域具有广阔的应用前景。

4. 结论

为了解决日益严重的石油污染问题，本研究利用功能材料的亲油性和疏水性，设计了两种基于密胺

泡沫(MF)的亲油性疏水海绵材料,用于吸收水中的石油污染物。首先,用氧化石墨烯(GO)改性密胺泡沫,然后进行退火处理,制备还原氧化石墨烯/密胺泡沫(rGO/CMF)海绵。这种 rGO/CMF 海绵具有优异的疏水性和亲油性。表征测试表明,所制备的超轻纳米水池具有低密度(9 mg/cm^3)、坚固的结构稳定性和超疏水超亲油性能。当浸入油水混合物中时,超轻纳米水池可以快速将油从水中分离出来,吸收能力超过其自身重量的 100 倍。它对大豆油、汽油和石油等各种类型的油具有良好的吸收性能,表明其在油污修复方面具有巨大的潜力。此外,这种超轻纳米水池具有运输和储存方便、制备成本低的特点,进一步提高了其实际应用价值。

参考文献

- [1] Meng, Y., Zhou, X., Huang, Z. and Wang, Z. (2024) Pumping with Modified Polyurethane Sponges: A Rapid Oil Spill Treatment Technology. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **41**, 2133-2142. <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00140-2>
- [2] Irfan, M., Naga Lakshmi, C. and Singh, N. (2023) Superhydrophobic Polyurethane Sponge Modified with Polydimethylsiloxane/Zinc Oxide-rGO for Efficient Oil or Organic Solvent/water Separation. *Materials Letters*, **348**, Article ID: 134668. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134668>
- [3] Rattes de Almeida Couto, C., Catharine de Assis Leite, D., Jurelevicius, D., van Elsas, J.D. and Seldin, L. (2019) Chemical and Biological Dispersants Differently Affect the Bacterial Communities of Uncontaminated and Oil-Contaminated Marine Water. *Brazilian Journal of Microbiology*, **51**, 691-700. <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00153-8>
- [4] Rahsepar, S., Smit, M.P.J., Murk, A.J., Rijnaarts, H.H.M. and Langenhoff, A.A.M. (2016) Chemical Dispersants: Oil Biodegradation Friend or Foe? *Marine Pollution Bulletin*, **108**, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.044>
- [5] Bejarano, A.C. (2018) Critical Review and Analysis of Aquatic Toxicity Data on Oil Spill Dispersants. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **37**, 2989-3001. <https://doi.org/10.1002/etc.4254>
- [6] Varjani, S.J. (2017) Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons. *Bioresource Technology*, **223**, 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- [7] Barthlott, W., Moosmann, M., Noll, I., Akdere, M., Wagner, J., Roling, N., et al. (2020) Adsorption and Superficial Transport of Oil on Biological and Bionic Superhydrophobic Surfaces: A Novel Technique for Oil-Water Separation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **378**, Article ID: 20190447. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0447>
- [8] Hoang, A.T., Nižetić, S., Duong, X.Q., Rowinski, L. and Nguyen, X.P. (2021) Advanced Super-Hydrophobic Polymer-Based Porous Absorbents for the Treatment of Oil-Polluted Water. *Chemosphere*, **277**, Article ID: 130274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130274>
- [9] Xu, Y., Liao, J., He, R., Yang, S., Luo, Z., Xu, M., et al. (2024) Superhydrophobic and Oleophilic Polyurethane Sponge for Oil/Water Separation. *Materials Today Communications*, **38**, Article ID: 107658. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107658>
- [10] Li, Y., Li, X., Xu, L., Yang, Y., Gao, Z., Zhou, Y., et al. (2024) Facile Construction of Superhydrophobic/Superoleophilic Melamine Sponges with Durability and Antifouling for Selective Oil Absorption and Effective Oil/water Separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**, Article ID: 111919. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.111919>
- [11] Zhang, J., Wang, P., Wen, H., Raza, S., Zhu, Z., Huang, W., et al. (2021) Polymer Brush-Grafted Cotton with Petal-Like Microstructure as Superhydrophobic and Self-Cleaning Adsorbents for Oil/water Separation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **621**, Article ID: 126548. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126548>
- [12] Ayala, R., Kim, E.S. and Chae, E.J. (2024) Aerodynamic Characteristics of Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces. *Physics of Fluids*, **36**, Article ID: 025148. <https://doi.org/10.1063/5.0185591>
- [13] Wu, X., Yang, F., Lu, G., Zhao, X., Chen, Z. and Qian, S. (2021) A Breathable and Environmentally Friendly Superhydrophobic Coating for Anti-Condensation Applications. *Chemical Engineering Journal*, **412**, Article ID: 128725. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128725>
- [14] Wang, X., Quan, Q., Piao, H., Sun, K., Ren, Z., Zuo, S. and Zhao, J. (2025) Green Fabrication of Superhydrophobic Melamine Hollow Sponge Tube for Effective NAPL Treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 117195.
- [15] Yun, H., Park, S., Choi, J., Cho, S.Y. and Kwak, H.W. (2025) Melamine and Hydrophobic Graphene Composite Foam with Lignin as a Green Connector for Oil-Water Separation Applications. *Reactive and Functional Polymers*, **209**, Article ID: 106173. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106173>

- [16] Wang, W., Song, X., Xie, Y., Sheng, X. and Zhang, S. (2023) A Study on the Preparation of Superhydrophobic Silane-Mxene Modified Melamine Foam and Its Oil-Water Separation Performance. *Frontiers in Materials*, **10**, Article 1277247. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1277247>
- [17] Zhao, J., Li, Q., Wang, Q., Zhang, J., Sun, X., Zhang, W., *et al.* (2023) Facile Construction of Robust and Powerful Biochar-Decorated Porous Foams with Super-Wettability for Automatic and Continuous Oil Spill Remediation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **62**, 6697-6706. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00173>
- [18] Qiao, L., Zhou, Z., Wang, M. and He, Z. (2025) Lignin Microsphere/TiO₂ Composite-Based Melamine Sponge with Superhydrophobic and Photothermal Properties for Oil/Water Separation and Anti-Icing. *Langmuir*, **41**, 13233-13248. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c00913>