

气凝胶在油水分离中的应用

陆佳丽

上海市青浦区排水管理所, 上海

收稿日期: 2026年8月24日; 录用日期: 2026年9月21日; 发布日期: 2026年9月30日

摘要

随着石油开采、石化加工、交通运输及海洋运输等行业的快速发展, 含油废水及溢油污染问题日益突出, 对水生态环境和人类健康造成潜在威胁。传统重力分离、气浮、吸附及膜分离等油水分离技术在处理稳定乳液和微纳米尺度油滴时, 仍存在分离效率、处理通量、能耗、抗污染性能及循环稳定性难以兼顾等问题。气凝胶具有低密度、高孔隙率、高比表面积和三维连通多孔网络等特点, 并可通过表面润湿性调控、孔结构设计及多组分复合等策略实现油水选择性吸附和传输, 因此成为近年来油水分离领域的重要功能材料。本文围绕气凝胶在油水分离中的应用, 从材料组成及结构特征出发, 将相关气凝胶主要分为无机气凝胶、碳基气凝胶、天然聚合物基气凝胶和合成聚合物基气凝胶四类, 系统总结不同类型气凝胶的结构特点、界面润湿性调控策略及其油水分离应用。研究表明, 无机气凝胶具有良好的化学稳定性和热稳定性, 碳基气凝胶具有较高的比表面积、疏水性及油吸附能力, 天然聚合物基气凝胶具有可再生、可降解和环境友好等优势, 而合成聚合物基气凝胶则在机械性能、结构可设计性和化学稳定性方面表现突出。通过定向孔结构构筑、表面低表面能修饰、多重交联及多组分复合, 可进一步实现气凝胶分离效率、通量、机械稳定性和循环再生性能的协同提升。此外, 光热转换、光催化、磁响应和自清洁等功能的引入, 使气凝胶逐渐由单一吸附材料向多功能、连续化油水分离材料发展。最后, 本文总结了当前气凝胶油水分离材料在机械稳定性、规模化制备、长期循环使用、环境安全及实际复杂废水适应性等方面面临的挑战, 并对绿色制备、多尺度结构调控、多功能集成及工程化应用等未来发展方向进行了展望, 为高性能、低能耗和可持续油水分离材料的设计与应用提供参考。

关键词

气凝胶, 油水分离, 润湿性, 多孔结构, 吸附, 油水乳液, 复合材料

Application of Aerogels in Oil-Water Separation

Jiali Lu

Qingpu District Drainage Management Office, Shanghai

Received: August 24, 2026; accepted: September 21, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

With the rapid development of industries such as petroleum extraction, petrochemical processing, transportation, and marine shipping, oily wastewater and oil spill pollution problems are becoming increasingly prominent, posing potential threats to the aquatic ecological environment and human health. Traditional oil-water separation technologies such as gravity separation, flotation, adsorption, and membrane separation still have problems in handling stable emulsions and micro/nano-scale oil droplets, such as difficulty in simultaneously achieving separation efficiency, processing throughput, energy consumption, anti-fouling performance, and cycle stability. Aerogels have the characteristics of low density, high porosity, high specific surface area, and three-dimensional interconnected porous networks. Furthermore, through strategies such as surface wettability control, pore structure design, and multi-component composites, selective adsorption and transport of oil and water can be achieved. Therefore, they have become an important functional material in the field of oil-water separation in recent years. This paper focuses on the application of aerogels in oil-water separation. Based on material composition and structural characteristics, aerogels are mainly classified into four categories: inorganic aerogels, carbon-based aerogels, natural polymer-based aerogels, and synthetic polymer-based aerogels. The paper systematically summarizes the structural characteristics, interfacial wettability control strategies, and oil-water separation applications of different types of aerogels. Research shows that inorganic aerogels possess good chemical and thermal stability; carbon-based aerogels have high specific surface area, hydrophobicity, and oil adsorption capacity; natural polymer-based aerogels offer advantages such as renewability, biodegradability, and environmental friendliness; while synthetic polymer-based aerogels excel in mechanical properties, structural designability, and chemical stability. Through directional pore structure construction, low surface energy modification, multiple cross-linking, and multi-component composites, the separation efficiency, throughput, mechanical stability, and recyclability of aerogels can be synergistically improved. Furthermore, the introduction of photothermal conversion, photocatalysis, magnetic response, and self-cleaning functions is gradually transforming aerogels from single adsorbent materials into multifunctional, continuous oil-water separation materials. Finally, this paper summarizes the current challenges faced by aerogel oil-water separation materials in terms of mechanical stability, large-scale preparation, long-term recycling, environmental safety, and adaptability to complex wastewater conditions. It also provides an outlook on future development directions, including green preparation, multi-scale structural control, multifunctional integration, and engineering applications, offering a reference for the design and application of high-performance, low-energy, and sustainable oil-water separation materials.

Keywords

Aerogel, Oil-Water Separation, Wettability, Porous Structure, Adsorption, Oil-Water Emulsion, Composite Materials

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. 前言

随着全球工业化和城市化进程的持续推进,石油开采、石化加工、机械制造、交通运输、食品加工以及海洋运输等产业产生的含油废水和溢油污染问题日益突出。石油及其衍生物通常包含烷烃、芳香烃、多环芳烃以及其他有机化合物,其中部分污染物具有较强的生物毒性、持久性和生物累积性。当含油污

染物未经有效处理进入自然水体后,不仅会在水体表面形成油膜,阻碍氧气和光线传递,影响水生生态系统的物质循环和光合作用,而且可能导致水体中溶解氧降低及生态系统功能退化。此外,石油类污染物及其伴生有机污染物还可能通过食物链发生富集,对生态环境和人类健康造成潜在威胁[1]。因此,开发高效、低能耗、环境友好且具有良好循环稳定性的油水分离技术,对于含油废水处理和环境保护具有重要意义。

针对含油废水及海洋溢油等油水污染问题,目前已发展出重力分离、离心分离、气浮、过滤、吸附、化学破乳和膜分离等多种处理技术。但传统油水分离技术在处理复杂含油废水时仍面临分离效率、处理通量、能耗、材料再生、抗污染性能及长期稳定性难以兼顾等问题[2]。尤其对于含有表面活性剂的稳定乳液和微米级油滴,传统依赖密度差或简单孔径筛分的分离方法往往难以实现高效分离。因此,开发具有高油水选择性、高孔隙率、良好传质性能、优异循环稳定性以及低环境负荷的新型分离材料成为当前研究的重要方向。

气凝胶具有低密度、高孔隙率、高比表面积和三维连通多孔网络等独特结构特征,同时可以通过表面化学修饰、微纳结构构筑及多组分复合等方式调控其界面润湿性,使其能够实现油相吸附、水或油的选择性透过以及乳液截留等多种分离模式。因此,气凝胶逐渐成为油水分离领域备受关注的新型功能材料,为解决传统油水分离技术中效率、通量和循环稳定性难以协同的问题提供了新的材料设计思路。

综上所述,气凝胶在油水分离领域有着独特的使用价值和广阔的应用前景。本文将深度总结气凝胶材料(无机气凝胶、碳基气凝胶、天然聚合物基气凝胶、合成聚合物气凝胶)在油水分离领域的应用,并指出其面临的挑战和未来发展方向,以便为油水分离技术的研究和应用提供参考。

2. 气凝胶油水分离的基本原理

气凝胶是一类具有高孔隙率、低密度和三维连通多孔网络的材料,其油水分离性能主要来源于多孔骨架、界面润湿性以及液体传输行为之间的协同作用。与传统依赖密度差、机械筛分或单纯吸附的分离材料不同,气凝胶可以通过调节孔结构和表面化学性质,使油相和水相在材料表面及孔道内部表现出不同的界面行为,从而实现选择性吸附、选择性透过或乳液截留。

2.1. 三维多孔结构与油水传输

气凝胶具有高度发达的三维多孔网络结构,其高孔隙率和可调控的孔结构能够为油相提供大量储存空间,并为液体传输提供连续通道,因此多孔结构是决定气凝胶油水分离性能的重要因素之一[3]。

对于吸附型油水分离材料,油相进入气凝胶孔道后,可以通过毛细作用、疏水相互作用、范德华力以及其他界面作用被吸附和储存。碳基气凝胶尤其明显,其三维碳网络能够为油分子提供大量吸附和储存空间,同时疏水界面能够抑制水相进入孔道。

对于过滤型气凝胶,液体在压力差或重力作用下沿孔道发生传输。此时,孔道尺寸及其连通程度直接影响分离通量,而材料表面的润湿性则决定油相和水相能否优先进入孔道。因此,孔结构决定液体“怎么走”,界面润湿性决定“谁能够进入”,二者共同决定最终的油水分离性能。

2.2. 表面润湿性与选择性分离

材料表面的界面润湿性是决定油水选择性的关键因素。通过构建超疏水/超亲油或超亲水/水下超疏油界面,可以改变油水在材料表面的润湿和传输行为,从而实现对特定液相的选择性吸附或透过[4]。

对于疏水/亲油型气凝胶,其表面具有较低的水相亲和性,同时能够与油相产生较强的界面作用。当油水混合物接触材料时,水相受到疏水表面的排斥,而油相则更容易润湿并进入材料孔道,从而实现选择性吸油或油相透过。

因此,水接触角(WCA)通常被用于评价材料表面的疏水程度。通过降低表面自由能并构建微纳米粗糙结构,可以进一步增强材料的疏水性。比如 SiO_2 气凝胶随着表面甲基化程度增加, WCA 由 140° 提高至 152° , 同时孔隙率由 90.18% 提高至 95.72%, 说明表面化学组成和孔结构可以同时影响材料的界面性质。

因此,在气凝胶油水分离体系中,理想的界面设计并非单纯追求更高的水接触角,而是需要综合考虑:

表面自由能→表面粗糙度→油/水界面作用→液体进入孔道的阻力→长期润湿稳定性。

2.3. 毛细作用与界面吸附

气凝胶的高孔隙率和多级孔结构能够产生显著的毛细作用,使油液在接触材料后快速进入内部孔道。在吸油过程中,油液首先润湿材料表面,随后在毛细压力驱动下进入连通孔道并储存在孔隙中。

对于油水分离而言,毛细作用与表面润湿性具有明显的协同关系。当气凝胶表面具有较强的亲油性时,油液能够更加容易地润湿孔壁并进入孔道;与此同时,疏水表面可以增加水相进入孔道的界面能垒,从而提高油水选择性。

碳基气凝胶的油吸附过程除了受到毛细作用影响,还可能涉及疏水作用、范德华力以及 π - π 相互作用等。

因此,可以将气凝胶中的油吸附过程概括为:

油液接触材料→表面润湿→毛细浸润→孔道传输→孔隙储油。

而油水选择性则主要来自:

表面润湿性差异 + 毛细压力差异 + 油/材料界面作用差异。

2.4. 吸附、过滤与膜分离等主要模式

根据材料结构和表面性质的不同,气凝胶可以采用多种油水分离方式。

(1) 吸附-挤压分离

这是弹性气凝胶较常采用的方式。材料首先选择性吸附油相,然后通过机械压缩将油液释放,实现材料再生。天然聚合物和聚合物复合气凝胶尤其适合这种模式。

(2) 重力驱动过滤

当气凝胶具有连续孔道和适当的界面润湿性时,可以利用重力作为驱动力,使特定液相快速通过材料,而另一相受到界面排斥,从而实现连续分离。

(3) 真空辅助连续分离

通过施加外部负压,可以增强液体在气凝胶内部的传输,从而提高分离速率。

(4) 光热辅助分离

对于高黏度原油,油液黏度较高会限制其在多孔材料中的传输。将光热材料引入气凝胶后,可以利用太阳能产生局部热量,降低油液黏度,从而提高油液在孔道中的迁移速度[5]。

3. 界面润湿性调控的关键策略与稳定性比较

表面润湿性是气凝胶实现油水选择性分离的关键界面参数。对于未经改性的天然聚合物和部分无机材料而言,其表面通常含有大量羟基、羧基或氨基等极性官能团,因此容易与水形成氢键,表现出较强亲水性。这种本征亲水性虽然有利于水相润湿,但通常不利于选择性吸油和油相快速传输。

因此,目前气凝胶油水分离研究普遍通过表面化学修饰、微纳结构构筑以及复合材料设计实现界面

润湿性的调控。

3.1. 低表面能物质修饰

降低材料表面自由能是构建疏水界面的常用方法。硅烷、硅氧烷和 PDMS 等低表面能物质可以覆盖材料表面，减少极性基团与水分子的直接接触，从而增强疏水性[6]。

例如，SiO₂ 气凝胶可以通过硅烷化处理降低表面自由能，并结合其本身的纳米尺度粗糙结构形成超疏水/超亲油表面。

3.2. 微纳粗糙结构与超疏水界面

单纯降低表面能并不一定能够获得稳定的超疏水界面。进一步构建微纳米尺度粗糙结构，可以增加液体与固体之间的实际界面面积，并形成特殊的润湿状态。

无机气凝胶本身具有纳米尺度骨架，除降低表面自由能外，构建微纳米尺度粗糙结构能够进一步增强材料的表面疏水性。当低表面能化学组成与微纳米粗糙结构协同时，可形成稳定的超疏水界面，从而提高材料对水相的排斥能力。SiO₂ 气凝胶和 TiO₂ 复合体系均体现了这种“化学组成 + 微纳结构”协同调控机制。Li 等[7]研究通过 MTMS 构建甲基化 SiO₂，并在不同基底上构筑超疏水表面，最大静态水接触角达到 161°，滑动角约 3°。

因此，超疏水界面可以概括为：低表面能化学组成 + 微纳米粗糙结构 = 增强的水排斥能力。

3.3. 复合与交联对润湿稳定性的影响

对于天然聚合物基气凝胶，仅依靠表面低表面能修饰往往难以同时解决湿态稳定性和机械稳定性问题。因此，通过交联、复合以及界面增强等方式提高疏水层与多孔骨架之间的结合稳定性，是实现长期油水分离的重要策略。

这一问题在天然聚合物基气凝胶中尤其突出。天然聚合物具有大量亲水官能团，通常需要通过交联和界面工程提高其湿态结构稳定性。

因此，未来界面润湿性调控不能仅关注“WCA 达到多少？”而应更加关注“经过浸水、油污染、机械压缩和多次循环后，WCA 还能保持多少？”这会成为评价气凝胶实际应用价值的重要指标。

3.4. 不同润湿模式比较

表 1 总结了材料对水和油的界面亲和性不同，油水分离气凝胶主要表现为超疏水/超亲油、超亲水/水下超疏油以及具有润湿性转换能力的智能型等模式。超疏水/超亲油气凝胶能够选择性吸附或透过油相，具有较高的吸油容量和较快的油相传输速率，但长期使用过程中容易发生油污染和孔道堵塞，从而影响分离性能。相比之下，超亲水/水下超疏油材料能够形成稳定的水化层，使水相优先透过并阻隔油滴，通常具有较好的抗油污染能力和较高的分离通量，但在实际应用中往往需要预润湿。

Table 1. Comparison of different wetting modes

表 1. 不同润湿模式比较

润湿模式	分离机制	优点	局限
超疏水/超亲油	吸油、透油	吸油能力高	易油污堵塞
超亲水/水下超疏油	透水、截油	抗油污染、高通量	通常需要预润湿
Janus 润湿	双向选择性传输	可实现定向分离	制备复杂
可切换润湿	外界刺激调控	智能化	响应条件复杂

此外, 智能响应型、Janus 型及可切换润湿材料能够通过温度、光照、pH 或其他外界刺激调节界面润湿性, 从而实现不同油水体系下的可控分离, 为提高材料的环境适应性和再生能力提供了新的思路。总体而言, 不同润湿模式各具优势, 其选择应根据油水组成、分离方式以及抗污染和循环使用要求进行综合考虑。

4. 多尺度孔结构设计对传质行为的影响

如果说界面润湿性决定油水是否愿意进入气凝胶, 那么孔结构则决定油水进入之后如何传输。因此, 孔结构是连接材料微观结构与宏观分离性能的重要桥梁。

气凝胶具有高度发达的三维多孔网络, 通过调节前驱体组成、凝胶过程、冷冻条件、干燥方式以及交联程度, 可以获得不同尺度和不同形貌的孔结构。

4.1. 梯度孔结构与传质效率

气凝胶内部孔结构不仅决定液体的储存空间, 还直接影响油水传输过程中的流动阻力。通过构建具有尺寸梯度的连续孔道, 可在保持较高截留能力的同时降低液体传输阻力, 从而缓解分离通量与选择性之间的权衡关系。

4.2. 分级孔结构与液体快速传输

单一尺度的孔结构通常难以同时满足“高吸附容量”和“快速传输”两个要求。因此, 近年来气凝胶研究逐渐由单一孔结构向分级孔结构发展。

分级孔结构能够在不同尺度上协调液体的储存与传输。较大的孔道有利于降低液体流动阻力, 而较小尺度的孔结构则能够增加材料与液体的接触界面, 因此通过不同尺度孔道的协同作用, 可在吸附容量与传质速率之间实现平衡。Chen 等[8]通过构建分级结构气凝胶进一步证明了多尺度孔结构对油水分离性能的促进作用。

4.3. 定向孔道与各向异性传质

除孔径分布外, 孔道的空间取向同样会影响液体传输行为。通过构建垂直排列或高度取向的连续孔道, 可以降低液体传输路径的曲折度, 并形成更加高效的定向传质通道。Cao 等[9]的仿生垂直微通道气凝胶研究表明, 规则排列的通道结构能够促进液体快速运输, 并实现较高的油水乳液分离通量。

这说明: 孔道“是否连通”决定传质能否进行, 而孔道“是否定向”进一步影响传质效率。因此, 未来气凝胶孔结构设计可以由传统的“提高孔隙率”进一步转向:

孔径调控→孔道连通→孔道定向→分级结构→传质路径优化。

4.4. 孔结构与分离通量 - 选择性的协同调控

气凝胶的孔结构对油水分离过程中的传质效率和选择性具有重要影响。一般而言, 较大的孔道能够降低液体流动阻力, 有利于提高分离通量; 而较小尺度的孔结构则能够增加液体与材料骨架的接触界面, 并通过尺寸筛分和界面作用增强对油滴的截留。因此, 单纯增大孔径并不能持续提高分离性能, 合理构建分级孔、梯度孔和连续连通孔道, 才能兼顾传质速率与分离选择性。

近年来, 研究逐渐由单一孔隙率调控转向孔结构的梯度设计。例如, Liang 等[10]构建了具有仿生梯度孔结构的生物质气凝胶, 通过由大孔向小孔逐渐变化的孔道结构调节液体传输阻力, 实现了分离通量与截留性能的同步提升。该材料对水/油混合物和水包油乳液的渗透通量分别达到 17914.7 和 10285.6 $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 同时保持超过 99% 的截留率, 表明梯度孔结构能够有效缓解传统多孔分离材料中“高通量 -

高选择性难以兼顾”的矛盾。

此外,多尺度结构还可以通过协同调节分子传输通道与尺寸筛分效应进一步提高分离性能。Zhong 等 [11]通过构建细直径纳米纤维、定向大孔通道以及微纳分级粗糙结构,使 PVA/SiO₂ 气凝胶同时具备连续传输通道和尺寸筛分能力,实现了选择性与渗透性的平衡。研究还发现,气凝胶厚度能够改变其主导传质机制:薄层材料主要依靠重力驱动实现快速过滤,而较厚的气凝胶则表现出以毛细作用为主导的传输行为。

因此,多尺度孔结构设计的核心并非简单提高孔隙率,而是通过孔径、孔道连通性、空间梯度及材料厚度的协同调控,降低传质阻力并增强界面筛分作用,从而实现油水分离过程中通量与选择性的协同优化。

4.5. 孔结构与机械稳定性的协同调控

在实际油水分离过程中,气凝胶不仅需要具有较高的孔隙率和良好的传质性能,还需要承受液体冲击、压缩、挤压以及多次循环使用。因此,高孔隙率与机械稳定性之间的矛盾是气凝胶应用过程中需要解决的重要问题。过于疏松的孔结构虽然能够提供较大的储油空间和较低的传质阻力,但容易导致骨架强度降低,并在反复使用过程中发生孔道塌陷,进而造成通量和分离效率下降。

合理的多尺度骨架设计能够在保持高孔隙率的同时提高结构稳定性。一方面,通过纳米纤维、二维片层或聚合物网络构建连续支撑骨架,可以增强气凝胶的抗压缩能力;另一方面,通过交联或构筑互穿网络,可以限制骨架在液体浸润和机械变形过程中的过度收缩,从而维持原有孔道结构。由此,“刚性支撑单元 + 柔性连接网络 + 分级孔结构”逐渐成为兼顾传质性能与机械稳定性的有效设计思路。

总体而言,未来气凝胶孔结构设计应由单纯追求“高孔隙率和高通量”转向传质性能、机械稳定性和循环寿命的协同优化。通过构建具有合理孔径梯度、良好连通性和高强度骨架的多尺度网络,可在降低传质阻力的同时抑制孔道塌陷,为气凝胶从实验室尺度向长期、连续油水分离应用发展提供结构基础。

5. 不同类型气凝胶及在油水分离中的应用

根据气凝胶骨架组成及材料来源的不同,应用于油水分离的气凝胶主要可以分为无机气凝胶、碳基气凝胶、天然聚合物基气凝胶和合成聚合物基气凝胶四大类。不同类型气凝胶在骨架结构、表面化学性质、机械性能、环境稳定性以及可加工性等方面存在明显差异,因此表现出不同的油水分离机制和应用特点。通常而言,无机气凝胶具有较好的化学和热稳定性,碳基气凝胶具有较高的比表面积和优异的油吸附能力,天然聚合物基气凝胶具有可再生、可降解和环境友好等优势,而合成聚合物基气凝胶则在机械性能、疏水性和加工性能方面具有一定优势。

在油水分离过程中,气凝胶的性能并不完全取决于其化学组成,还与三维多孔结构、表面润湿性以及液体传输行为密切相关。因此,不同类型气凝胶通常需要通过表面改性、结构调控或复合构筑等方式进一步优化其油水选择性和分离性能。以下分别对不同类型气凝胶的基本特征及其在油水分离领域的应用进行总结。

5.1. 无机气凝胶

无机气凝胶是较早受到关注的一类气凝胶材料,主要包括 SiO₂、Al₂O₃、TiO₂ 等。该类材料通常具有较高的孔隙率、较大的比表面积以及良好的热稳定性和化学稳定性,其无机骨架能够在较为苛刻的环境下保持相对稳定。因此,无机气凝胶不仅可用于传统吸附和隔热领域,也逐渐被应用于油水分离及多功能水处理体系。

无机气凝胶用于油水分离的优势主要来源于其高度发达的多孔结构和可调控的表面化学性质。通过调节前驱体组成、凝胶网络以及干燥过程,可以获得不同尺度的孔结构;进一步通过疏水化处理或引入低表面能组分,可以将原本具有较强亲水性的无机表面转变为疏水甚至超疏水状态。当微纳米粗糙结构与低表面能表面相结合时,可以显著增强材料的疏水性,使其表现出较强的水排斥和油亲和能力,从而实现油相选择性吸附或透过。

5.1.1. SiO₂ 气凝胶

SiO₂ 气凝胶是研究最为广泛的无机气凝胶之一,具有高孔隙率、高比表面积、低密度以及良好的化学稳定性。其三维纳米网络能够提供大量液体吸附和储存空间,同时丰富的表面羟基使其具有较强的表面功能化能力。Shang 等[12]采用大气压干燥结合表面硅化改性的方法,以甲基三甲氧基硅烷(MTMS)和四乙基正硅酸酯(TEOS)为共前驱体,制备了一种具有优异疏水性的 SiO₂ 气凝胶(见图 1)。研究发现,表面硅化过程中甲基取代程度对气凝胶的结构及疏水性能具有显著影响。随着甲基化程度增加, SiO₂ 气凝胶的体积密度由 0.216 g·cm⁻³ 降低至 0.094 g·cm⁻³, 孔隙率由 90.18% 提高至 95.72%, 水接触角由 140° 增至 152°, 同时颗粒尺寸逐渐减小。经 TMCS 进一步改性后,所得 SiO₂ 气凝胶对大豆油、二氯甲烷、正己烷和真空泵油表现出优异的吸附性能,并具有一定的油水乳液分离能力。此外,该材料在不同 pH 条件下仍能保持良好的疏水性,经过 20 余次正己烷和二氯甲烷吸附-脱附循环后仍能保持完整的结构,表现出良好的化学稳定性和循环使用性能。该研究表明,通过调控表面甲基化程度可以有效协同优化 SiO₂ 气凝胶的孔结构与表面润湿性,为高性能、可循环油水分离材料的制备提供了新的思路。

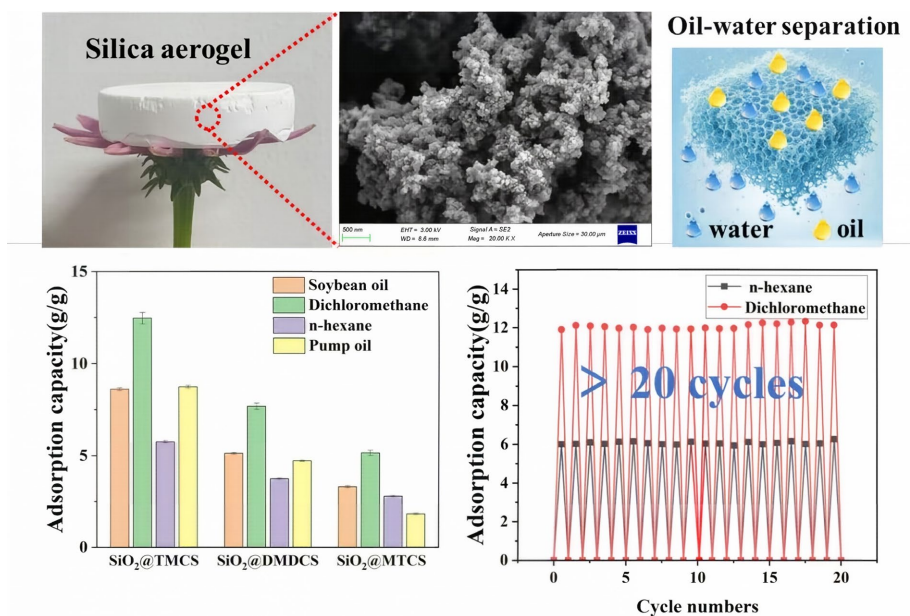


Figure 1. Atmospheric pressure preparation of superhydrophobic surface-modified SiO₂ aerogel for oil-water separation
图 1. 利用大气压技术制备表面经过超疏水处理的二氧化硅气凝胶,用于油水分离

然而,未经改性的 SiO₂ 气凝胶通常表现出较强的亲水性,因此在油水分离过程中需要进一步调节其表面润湿性。通过引入硅烷、硅氧烷或其他低表面能物质,可以降低材料表面自由能,并结合 SiO₂ 本身的纳米尺度粗糙结构形成超疏水/超亲油表面。此类材料能够快速吸附油相,同时阻碍水相进入孔道,因此在油吸附、油水过滤以及油水选择性分离等方面具有较好的应用潜力。

SiO₂ 气凝胶的主要优势在于结构和表面性质易于调控,但其脆性较高、机械强度有限,在反复压缩、

浸泡及循环使用过程中容易发生结构损伤。因此, 增强其力学稳定性以及降低制备成本是进一步实现实际应用需要关注的问题。

5.1.2. Al_2O_3 气凝胶

Al_2O_3 气凝胶具有较高的热稳定性、化学稳定性和比表面积, 其表面含有丰富的羟基和活性位点, 为表面功能化提供了条件。通过调控表面化学性质, 可以赋予 Al_2O_3 气凝胶不同的亲疏水特性, 从而改变油水在其孔道中的传输行为。

在油水分离方面, Al_2O_3 气凝胶可通过疏水改性增强对油相的亲性和, 使其应用于油吸附和油水选择性过滤。同时, 其良好的化学稳定性使其在部分复杂化学环境下具有一定优势。Luo 等[13]以木质纤维和六水合氯化铝($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)为原料, 通过溶胶-凝胶、真空浸渍 PDMS 和梯度温度干燥等工艺构建了超疏水木质纤维/ Al_2O_3 复合气凝胶(见图 2)。通过调控 Al_2O_3 含量, 实现了对气凝胶微观孔结构及表面润湿性的调节, 优化材料的水接触角可达 155° , 同时具有较高的抗压强度(5.5 MPa)和较低的热导率($0.035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。得益于其超疏水表面和窄孔径分布, 该复合气凝胶表现出良好的油水分离性能, 经过 8 次连续热恢复循环后, 初始渗透通量仍可保持 85% 以上。此外, 该材料能够将含油工业废水的油水分离与热处理过程相结合, 实现水资源回收和废热利用, 为多功能油水分离材料的工程化应用提供了新的思路。

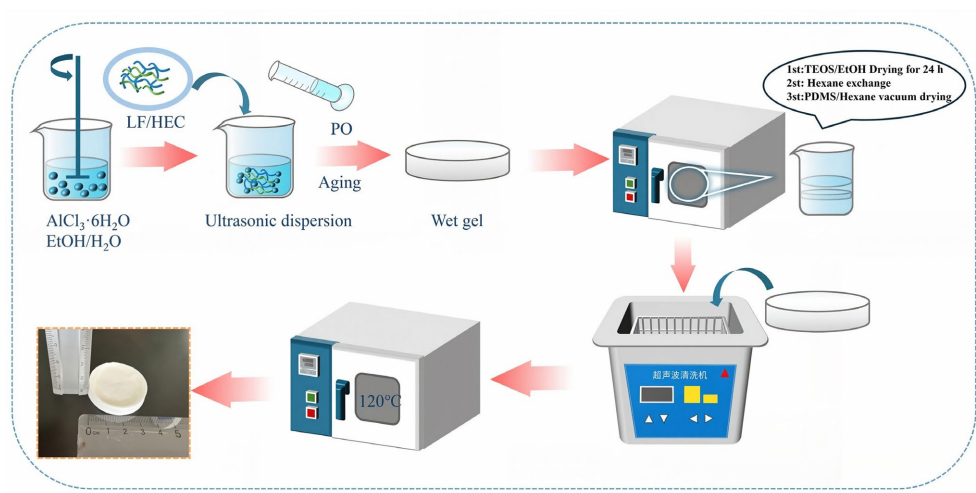


Figure 2. LF/ Al_2O_3 composite aerogel fabrication process

图 2. LF/氧化铝复合气凝胶的制备工艺

不过, Al_2O_3 气凝胶同样存在无机气凝胶普遍存在的脆性问题。此外, 其原料成本和制备条件也可能限制其大规模应用。因此, 目前相关研究主要集中于表面功能化、复合增强和结构优化。

5.2. 碳基气凝胶

碳基气凝胶主要包括石墨烯气凝胶、碳纳米管气凝胶、生物质衍生碳气凝胶等。碳材料具有较高的比表面积、良好化学稳定性和丰富的表面结构, 同时部分碳基材料本身具有较强的疏水性, 因此在油吸附和油水分离领域具有显著优势[14]。

碳基气凝胶的油水分离性能通常与其三维碳网络和表面疏水性质密切相关。油分子可以通过疏水相互作用、范德华力以及 π - π 相互作用等进入并储存在多孔碳网络中, 而水相则受到疏水界面的排斥。此外, 通过构建多级孔结构, 可以进一步增加油相储存空间并改善液体传输速率[15]。

5.2.1. 石墨烯气凝胶

石墨烯具有二维片层结构,通过组装可以形成三维石墨烯气凝胶。其片层之间形成丰富的孔隙结构,同时保留石墨烯较大的比表面积和优异的表面性质。

石墨烯气凝胶通常具有较强的油亲和性,可以通过疏水作用和 π - π 相互作用吸附石油类有机物和芳香族有机溶剂。通过控制石墨烯片层堆叠程度和孔结构,可以进一步调节其吸油容量和油传输性能。Sun 等[16]采用化学还原辅助自组装与冷冻铸造相结合的方法,将羧基化碳纳米管(CCNTs)与交联环氧乙烷二甲基丙烯酸酯(eEPDM)网络协同组装,制备了具有层次化多孔结构的 rGCA/eEPDM 复合气凝胶(见图 3)。研究发现, eEPDM 链的化学交联以及氧化石墨烯(GO)与 CCNTs 之间的 π - π 堆叠和氢键作用共同构建了稳定的双网络结构,从而显著增强了气凝胶的机械强度和柔韧性,有效改善了传统还原氧化石墨烯气凝胶易脆的问题。该复合气凝胶具有良好的疏水性,水接触角达到 128.4° ,油水分离效率高达 98.8%,并表现出 $859 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的乳液分离渗透通量。同时,材料具有良好的结构稳定性和循环吸附性能。由于引入 CCNTs, rGCA/eEPDM 还具备优异的光热转换能力,可通过太阳能驱动光热效应降低高黏度油的黏度,从而增强其吸附和分离性能。该研究通过双网络结构构筑、孔结构调控与光热功能集成,实现了高效、稳定的油水分离,为碳基复合气凝胶的功能化设计及其在高黏度油污染治理中的应用提供了新的思路。

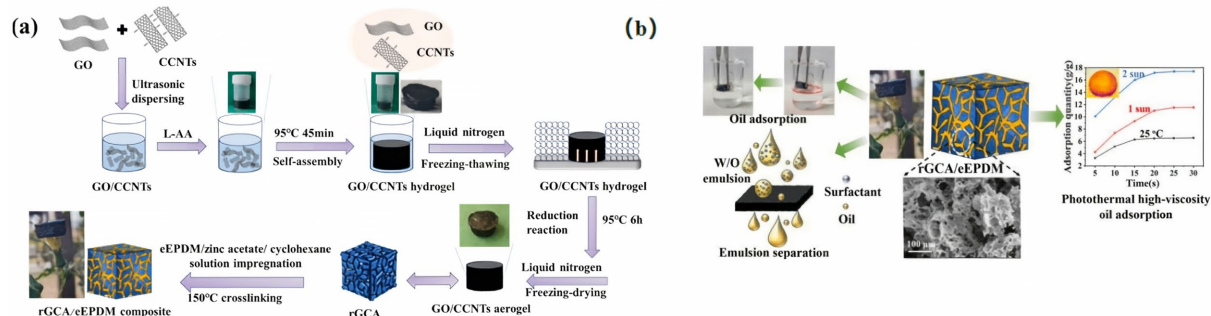


Figure 3. (a) Schematic diagram of the preparation of rGCA and rGCA/eEPDM composite aerogels; (b) Schematic diagram of oil-water separation

图 3. (a) rGCA 及 rGCA/eEPDM 复合气凝胶制备的示意图; (b) 油水分离示意图

5.2.2. 碳纳米管气凝胶

碳纳米管具有较高的长径比,通过相互连接可以形成连续的三维网络结构。该结构不仅能够提供丰富的孔道,还能够提高材料的力学稳定性[17]。碳纳米管气凝胶通常具有较好的疏水性和亲油性,油相可以快速进入碳纳米管构建的孔道并被储存,因此具有较高的油吸附能力。同时,连续的纳米管网络有利于液体快速传输。Wang 等[18]设计了一种具有仿“包子”非对称结构的热响应壳聚糖基气凝胶(PSiCMCS),以壳聚糖为基体,引入改性松香(MPA)增强材料的机械强度和孔隙率,并利用羧基化碳纳米管(CCNT)构建高效热传导网络。在此基础上,通过接枝热响应性聚(N-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAM)分子刷,使气凝胶能够在室温下发生自发收缩并释放吸附油,实现无需外部能量输入的自驱动再生。PSiCMCS 具有致密外层与疏松内部组成的非对称结构,可有效保护内部孔道并提高材料的油吸附和保持能力,其花生油吸附容量可达 $25 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 。COMSOL 模拟结果表明, CCNT 的引入能够有效提高材料的热传导和热响应速率,从而促进油的快速吸附-解吸过程。得益于良好的机械强度和结构稳定性, PSiCMCS 经过 10 次循环后仍保持较高的吸附性能。此外,分子模拟揭示了壳聚糖/MPA/CCNT 三元交联体系中电荷作用、疏水相互作用及氢键作用对材料性能的贡献。真实水环境测试、土壤降解实验及小鼠安全性评价进一步表明,该气凝胶具有良好的环境适应性和生物安全性,为可再生、低能耗和绿色油水分离材料的设计提供了新的思路。

其不足主要包括制备成本较高、碳纳米管分散和组装难度较大,以及纳米材料潜在环境风险等问题。

5.3. 天然聚合物基气凝胶

天然聚合物基气凝胶主要以纤维素、纤维素纳米纤维、纤维素纳米晶、壳聚糖、海藻酸盐、木质素等可再生天然高分子为骨架材料。与无机和传统合成聚合物气凝胶相比,天然聚合物具有来源广泛、可再生、可降解以及环境友好等优势,因此特别符合绿色材料和可持续水处理的发展方向。

天然聚合物通常具有丰富的羟基、羧基或氨基等极性官能团,可以通过氢键、离子交联、共价交联或配位作用构建稳定的三维网络。同时,这些官能团也为后续表面改性和功能化提供了丰富的反应位点。

然而,大多数天然聚合物本身具有较强的亲水性,因此未经改性的天然聚合物气凝胶通常不具备理想的油水选择性。这使得表面润湿性调控和湿态结构稳定性增强成为天然聚合物基油水分离气凝胶研究的重点。

5.3.1. 纤维素基气凝胶

纤维素是自然界中含量最丰富的天然高分子之一,具有来源广泛、可再生、可生物降解以及良好生物相容性等特点。纤维素分子链中含有大量羟基,可以通过氢键形成连续的三维网络,为气凝胶结构构筑提供良好基础[19]。

在油水分离方面,纤维素气凝胶通常需要进一步进行疏水改性,以降低表面自由能并增强油相亲和性。通过引入低表面能分子或构建微纳米粗糙结构,可以获得超疏水/超亲油表面,从而提高油水选择性。纤维素气凝胶的突出优势在于其绿色和可持续性,但其本征亲水性以及水环境中的结构稳定性仍然是限制其实际应用的重要因素。

5.3.2. CNF/CNC 气凝胶

纤维素纳米纤维(CNF)和纤维素纳米晶(CNC)具有纳米尺度尺寸和较大的长径比,可以通过氢键作用构建连续的纳米纤维网络。相比传统纤维素气凝胶,CNF/CNC 气凝胶具有更加精细的网络结构和更高的界面面积[20]。

通过调节 CNF 或 CNC 浓度、冷冻条件和交联方式,可以调控气凝胶的孔径、孔隙率和骨架密度,从而影响油水传输行为。进一步通过 PDMS、硅烷、多酚、金属离子或其他功能材料进行表面和结构调控,可以改善 CNF/CNC 气凝胶的疏水性、湿态稳定性和循环性能。近年来,CNC 与金属有机框架(MOF)的复合也为天然聚合物基多孔材料的功能化提供了新的思路。Liu 等[21]采用 TEMPO 氧化 CNC 与 Fe 掺杂 UiO-66 构建复合材料,发现 CNC 的引入能够改善 UiO-66 的分散稳定性和结晶特征,并促进分级介孔结构的形成,从而实现骨架结构与功能活性位点的协同调控;所得 CNC/UiO-66(Fe)复合材料具有较高的比表面积和良好的循环稳定性。进一步的研究表明,CNC 还可以作为 UiO-66 晶体生长过程中的结构调节组分,通过调控晶体形貌和孔结构,构建具有均一纳米晶体及分级孔网络的 CNC/UiO-66 复合体系[22]。这些研究表明,纤维素纳米材料不仅可以作为气凝胶的结构骨架,还可以通过调控 MOF 晶体生长和孔结构实现功能组分的空间构筑,为天然聚合物气凝胶与 MOF 的复合设计提供了新的材料策略。Qiao 等[23]提出了一种简便且具有规模化制备潜力的超疏水、弹性各向异性纤维素纳米纤维(CNF)气凝胶。通过定向冷冻干燥、PDMS 浸渍及热处理等步骤,构建了具有有序取向结构的 CNF-PDMS 气凝胶片和块体。由于定向孔道结构与 PDMS 疏水改性的协同作用,所得气凝胶表现出优异的超疏水性和弹性。其中,CNF-PDMS 气凝胶片可通过过滤方式实现连续油水分离,分离通量高达 $2800 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,分离效率达到 99.9%;CNF-PDMS 气凝胶块则可通过“吸附-挤压”方式实现油水混合物分离,并可进一步结合真空吸力实现实时连续油水分离,其通量达到 $145 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$,分离效率同样达到 99.9%。该研究表明,通过定向孔结构构筑与表面疏水改性相结合,CNF 气凝胶能够兼具高分离效率、高通量和良好弹性,为低成本、连续化

和多模式油水分离材料的设计提供了有效策略。

因此, CNF/CNC 气凝胶可以被认为是天然聚合物基油水分离材料中具有较大发展潜力的一类体系。

5.3.3. 壳聚糖、海藻酸盐等天然聚合物气凝胶

壳聚糖具有丰富的氨基和羟基, 可以通过化学交联或离子作用构建三维网络[24]; 海藻酸盐含有大量羧基, 可以通过多价金属离子实现离子交联[25]。因此, 两者均具有良好的功能化潜力。

这些材料可通过表面疏水改性或与其他功能材料复合用于油水分离, 同时其天然来源和可降解特性使其具有较好的环境友好性。Yang 等[26]采用双向冷冻、冷冻干燥、化学交联和硅烷化等方法, 制备了一种具有超弹性、高疏水性和亲油性的 SA/CN 复合气凝胶(见图 4)。得益于层状微观结构以及化学交联和硅烷化作用增强的 SA 与 CN 之间的界面相互作用, 所得 L-SA/CN 气凝胶表现出优异的力学性能, 其最大压缩应力达到 80.4 kPa, 塑性变形仅约 4.15%, 同时具有较低的能量损耗。由于良好的弹性恢复能力和疏水/亲油特性, 该气凝胶可通过吸附-挤压方式实现油水混合物的重复分离, 吸油容量可达到自身重量的 34 倍, 并能够在保持原有形状的同时实现循环使用。此外, 在泵辅助条件下, L-SA/CN 气凝胶还可用于油水混合物的连续分离。该研究表明, 通过定向构筑层状结构与化学交联/表面硅烷化协同增强, 能够兼顾生物质气凝胶的高吸油性能、超弹性和循环使用能力, 为可持续油水分离吸附材料的设计提供了新的思路。

但与纤维素体系类似, 其较强的亲水性和湿态稳定性仍需要通过交联和界面工程进一步改善。

总体而言, 天然聚合物基气凝胶具有明显的绿色和可持续优势, 但未来需要重点解决湿态稳定性、机械强度、长期润湿稳定性和规模化制备等问题。

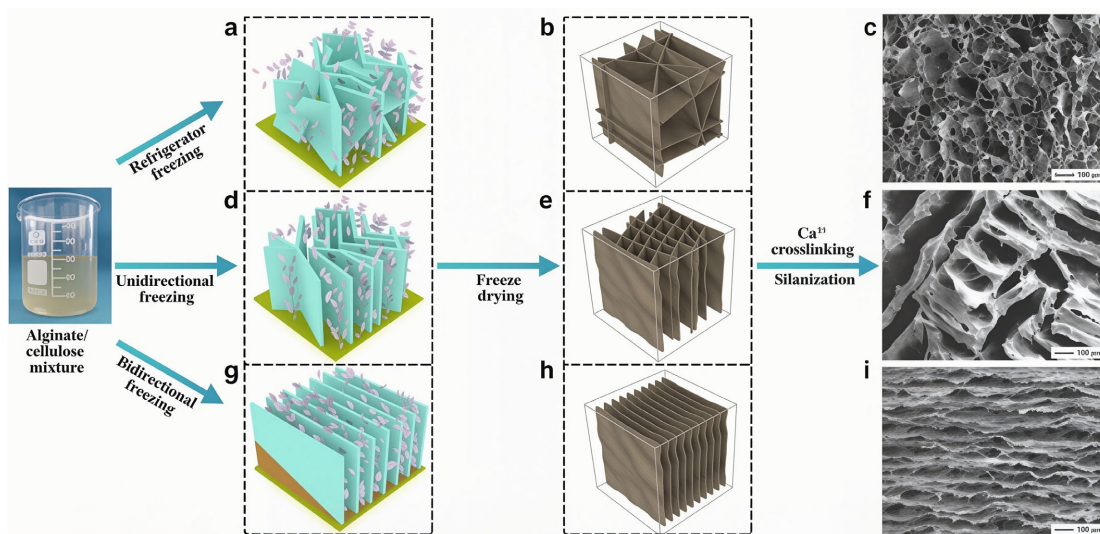


Figure 4. Schematic diagram of SA/CN aerogel manufacturing process

图 4. SA/CN 气凝胶制造示意图

5.4. 合成聚合物基气凝胶

合成聚合物基气凝胶主要包括聚氨酯(PU)、聚苯乙烯(PS)、聚偏氟乙烯(PVDF)、聚酰亚胺(PI)等。与天然聚合物相比, 合成聚合物的分子结构和化学组成具有更强的可设计性, 因此可以通过分子结构调控和交联设计获得不同的孔结构、机械性能和表面润湿性[27]。

此外, 部分合成聚合物本身具有较低的表面能和良好的疏水性, 因此无需复杂的表面改性即可表现出较强的油相亲和性。这使其在吸油和连续油水分离方面具有较大的应用潜力。

5.4.1. 聚氨酯气凝胶

聚氨酯具有良好的弹性、机械强度和可加工性，可以通过构建多孔网络形成轻质弹性气凝胶。

在油水分离过程中，聚氨酯气凝胶可以利用其疏水/亲油性质吸附油相，同时其良好的弹性使其能够通过压缩-释放方式实现油品回收和材料再生。Jiang 等[28]构建了一种低能耗、无化学清洗剂的自清洁聚氨酯基油水分离膜(PU/Ti/Si-10)。该膜在重力驱动条件下表现出优异的油水乳液分离性能，分离通量达到 $2101.12 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，分离效率为 99.1%。得益于 $\text{TiC}@\text{TiO}_2$ 的协同光热转换和光催化作用，膜表面在模拟太阳光照射下能够快速恢复疏水性及油水分离性能，并可在 2h 内完成自清洁和性能恢复。与依赖化学清洗剂的傳統膜再生方式相比，该材料利用太阳能实现污染物降解和膜表面自恢复，有效降低了清洗过程中的能耗、化学品消耗及二次污染风险。此外，该膜在实际运行条件下仍表现出良好的长期稳定性。该研究表明，通过光热-光催化协同与膜表面润湿性调控相结合，可以实现油水分离材料的自清洁与可持续运行，为低能耗、长寿命油水分离材料的设计提供了新的思路。因此，PU 气凝胶特别适合应用于可重复吸油材料。

5.4.2. 聚苯乙烯气凝胶

聚苯乙烯具有较低的表面能和良好的疏水性，因此其多孔气凝胶通常表现出较强的油亲和性。

通过构建高度多孔的 PS 网络，可以获得较高的油吸附容量，并能够吸附多种有机溶剂和石油类污染物。Zhou 等[29]采用溶剂热法制备了一种具有网状石墨烯结构的石墨烯气凝胶 Fe_3O_4 /聚苯乙烯复合材料，其中多孔 Fe_3O_4 纳米颗粒部分替代乙二醇辅助交联作用，并促进石墨烯片层之间的互联。 Fe_3O_4 和聚苯乙烯的引入在石墨烯骨架表面构建了多孔亚结构，有效改善了材料的表面疏水性。所得复合气凝胶具有超低密度($0.005 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和高达 99.7%的体积孔隙率，并表现出良好的可压缩性和形状恢复能力。在油水分离过程中，该材料经过 10 次循环后仍保持较高的原油吸附能力，吸油容量达到自身质量的 40 倍，表现出优异的循环使用性能。此外， Fe_3O_4 纳米颗粒的引入赋予复合气凝胶磁响应特性，使吸附原油后的材料能够通过外部磁场快速回收，并结合机械挤压实现油品回收和材料再生。该研究通过多孔结构构筑、疏水性调控与磁响应功能集成，实现了高吸油容量、快速回收和循环再生，为磁响应碳基气凝胶在油污染治理中的应用提供了新的思路。

但 PS 属于典型的石化来源聚合物，其不可生物降解性和环境负担是限制其进一步应用的重要因素。因此，未来可以通过与天然聚合物或可降解材料复合，降低材料的环境影响。

5.4.3. 聚偏氟乙烯气凝胶

聚偏氟乙烯(PVDF)具有较高的化学稳定性、热稳定性和疏水性，同时具有较好的机械性能，因此在油水分离膜和多孔分离材料领域受到广泛关注[30]。PVDF 气凝胶可以通过其疏水性促进油相传输并阻碍水相进入，同时其稳定的聚合物骨架有利于提高材料在复杂环境中的耐久性。

Wang 等[31]通过将静电纺丝制备的聚偏二氟乙烯/ SiO_2 (PVDF/ SiO_2)纳米纤维与氧化石墨烯(GO)骨架进行交联，构建了 PVDF/ SiO_2 @GO (PSG)复合气凝胶(见图 5)。通过调节纳米纤维中 SiO_2 纳米颗粒的含量，可以有效调控复合气凝胶的孔隙率和表面粗糙度。与 PVDF@GO 气凝胶相比， SiO_2 的引入显著提高了 PSG 气凝胶的机械性能和表面疏水性。其中，PSG-2 气凝胶(PVDF 纳米纤维中 SiO_2 含量为 1%)表现出良好的结构稳定性和优异的吸油性能，吸油容量达到 $129\sim 264 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，同时具有良好的阻燃性和循环使用性能。经过强酸、强碱预处理后，该材料仍能保持稳定的疏水性，表现出优异的化学耐受性，并能够在强酸/强碱环境下通过重力驱动实现油水混合物的有效分离。对于氯仿/水混合物，其分离通量高达 $42,402 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，分离效率达到 99.96%。此外，PSG-2 还具有光热转换能力，可通过光热效应降低原油黏度并加快原油吸附过程，使加热条件下的原油吸收时间缩短 99.65%。该研究通过静电纺丝纤维增强、 SiO_2 表

面粗糙结构调控与 GO 三维骨架构筑相结合,实现了气凝胶机械性能、疏水性、化学稳定性和油水分离性能的协同提升,为恶劣环境下高通量、连续化油水分离及高黏度原油处理提供了新的材料设计策略。

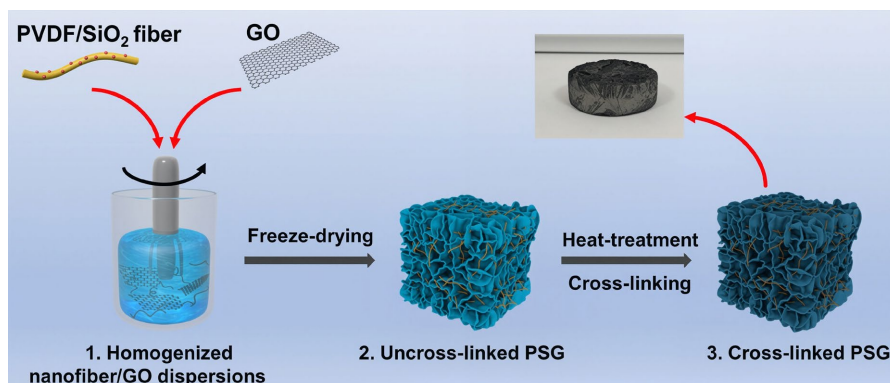


Figure 5. Synthesis process of PVDF/SiO₂@GO nanofiber aerogel

图 5. PVDF/SiO₂@GO 纳米纤维气凝胶合成流程

5.4.4. 聚酰亚胺气凝胶

聚酰亚胺具有优异的耐高温、耐化学腐蚀和机械稳定性能,因此能够适用于较为苛刻的环境[32]。在油水分离领域,PI 气凝胶可以通过构建多孔网络和调节表面润湿性实现油相吸附或选择性透过。

Xu 等[33]采用低温 PHT 交联、冷冻干燥及后续热固化相结合的方法,制备了 PI/PBOZ/PHT 复合气凝胶。快速 PHT 交联能够促进 BOZ 在 PAA 体系中的均匀分散,并在 PI 纳米片骨架基础上构建相互连通的多孔网络,其中固化后的 BOZ/PHT 网络进一步发挥交联增强作用。研究发现,在 PI 含量为 2wt% 时,所得气凝胶表现出优异的超疏水性和油水分离性能,水接触角达到 159.1°,油吸附容量为 36~70 g·g⁻¹,对油水乳液的分离通量最高可达 6971 L·m⁻²·h⁻¹,分离效率达到 99.7%。其优异的分选性能主要归因于分级孔结构对毛细传输的促进作用以及富含 Si-O 和 Si-CH₃ 基团的亲油表面,吸附行为符合 Freundlich 多层吸附模型。此外,该气凝胶具有良好的机械耐久性,在 80%应变下经过 30 次压缩循环后应力仅降低 3%,表明共价交联和氢键作用能够有效稳定多孔网络并促进弹性恢复。随着 PI 含量进一步增加,材料的热稳定性得到改善,焦炭产率由 40.3%提高至 42.2%,热导率进一步降低至 0.0333 W·m⁻¹·K⁻¹。该研究通过聚合物纳米骨架与多重交联网络协同构筑分级孔结构,实现了超疏水性、高油吸附能力、高通量油水分离及良好机械耐久性的统一,为合成聚合物基多功能气凝胶在油水分离的应用提供了新的思路。与部分天然聚合物气凝胶相比,其湿态和高温环境下的结构稳定性具有一定优势。不过,PI 气凝胶通常存在原料和制备成本较高、加工条件相对复杂等问题,因此目前更多集中于高性能和特殊环境下的应用研究。

总体来看,合成聚合物基气凝胶具有机械性能好、结构可设计性强、疏水性可调以及加工性能优良等特点,但其石化来源和不可降解性与当前绿色、可持续材料的发展趋势存在一定矛盾。因此,将合成聚合物与天然高分子、无机材料或碳材料进行复合,是未来实现高性能与环境友好性兼顾的重要方向。

5.5. 不同类型气凝胶在油水分离中的性能比较

表 2 列出了不同类型气凝胶在油水分离中的性能表现具有明显的材料体系差异。无机气凝胶以 SiO₂、Al₂O₃ 等为代表,虽然吸油容量和分离通量相对有限,但具有较高的化学稳定性和热稳定性,适用于复杂及高温含油体系;碳基气凝胶具有较高的表面润湿可调性和多功能特征,并可结合光热效应实现黏性油的高效回收;天然聚合物基气凝胶依托 CNF、海藻酸盐等可再生材料,通过定向冻结和界面疏水改性可

获得较高的孔隙率、吸油容量和分离通量，在绿色油水分离领域具有较好的应用潜力；相比之下，合成聚合物基气凝胶整体表现出更高的吸油容量和分离通量，其中 PVDF/SiO₂@GO 气凝胶的最大吸油容量和油水分离通量分别达到 264 g·g⁻¹ 和 42,402 L·m⁻²·h⁻¹，表现出突出的分离性能。总体来看，当前高性能气凝胶已能够实现高润湿选择性、高吸油容量和高通量分离，但不同材料在分离效率、结构稳定性、循环使用性能和环境可持续性之间仍存在权衡，因此未来应进一步加强材料组成、表面润湿性与多尺度孔结构的协同调控，以实现油水分离材料性能与可持续性的同步提升。

Table 2. Comparison of the properties and oil-water separation performance of different aerogels
表 2. 不同气凝胶的性能及油水分离性能比较

Category	System	Density/ (mg·cm ⁻³)	Oil types	Maximum absorption capacity/ (g·g ⁻¹)	WCA/ (°)	Porosity/%	Specific surface area/ (m ² ·g ⁻¹)	Reusability/ times	Maximum oil flux/ (L·m ⁻² ·h ⁻¹)	Separation efficiency/%
Inorganic	LF/Al ₂ O ₃ -PDMS	210	Industrial oily wastewater	—	155	—	158.3	8	—	>85%
	SiO ₂ @TMCS	94	Oil n-hexane; vacuum pump oil	12.46	152	95.72	—	>20	—	—
Carbon- based	3D graphene- Ag/TiO ₂ @cotton	—	n-hexane toluene	—	161.8	—	75.41	6	—	99.7
	R GCA/e EPDM	—	Oil/organic solvent	—	128.4	—	—	>20	859	98.8
Natural polymer- based	CNF-PDMS	22.7 ± 0.9	Oil/water mixture	24~48	163.5	98.4	—	10	2800	99.9
	SA/CN	—	Oil/water mixture	34	148.7	—	—	10	—	—
Synthetic polymer- based	PVDF/SiO ₂ @GO (PSG-2)	4.671	n-hexane; kerosene; toluene; cooking oil chloroform	129~264	143.67	99.77	—	10	42,402	99.99
	PI/PBOZ/PHT-2	≈16	n-pentane toluene; acetone; PAO oils	73.9	159.1	—	—	10	6971	>98.4

6. 结语与展望

气凝胶凭借超低密度、高孔隙率、丰富的界面以及可调控的三维网络结构，为油水分离提供了区别于传统分离技术的新型材料平台。然而，经过近年来大量研究的发展可以发现，气凝胶油水分离材料的研究重点正在发生变化：研究目标已逐渐由早期单纯追求高吸油容量、高水接触角和高分离效率，转向对界面选择性、传质效率、结构稳定性、抗污染能力以及实际应用可行性的综合优化。现有研究表明，材料的最终分离性能并不能简单归因于某一种材料组分，而是由表面润湿性、孔结构、界面化学和力学稳定性之间的耦合作用共同决定。

从这一角度来看，目前气凝胶油水分离研究仍存在一个较为明显的问题，即材料性能指标与实际应用需求之间存在脱节。大量研究采用单一油品、较高油水比和理想化实验条件进行性能评价，并以水接触角、吸油容量或瞬时分离效率作为主要评价指标。然而，实际含油废水通常具有复杂的组分和动态变化特征，表面活性剂、盐分、悬浮颗粒及其他有机污染物均可能改变材料的界面润湿性，并造成孔道污染和传质阻力增加。因此，未来研究需要从“材料在理想条件下能达到多高的性能”转向“材料在复杂工况下能够稳定运行多长时间”，将长期通量保持率、抗污染能力、循环寿命、油品适应性以及真实废水处理效果作为更加重要的评价指标。

6.1. 从单一性能优化转向界面 - 结构协同设计

未来气凝胶的设计不应继续简单追求更高的孔隙率或更大的水接触角，而应更加重视界面润湿性与孔结构之间的协同关系。例如，超疏水/超亲油材料适合油相吸附和选择性透过，但长期使用容易受到油

污堵塞；超亲水/水下超疏油材料具有较好的抗油污染能力，却可能受到预润湿和水化层稳定性的限制。因此，未来需要从静态润湿性表征进一步转向动态界面行为研究，关注油滴在孔道中的进入、变形、聚并和脱附过程，并通过表面化学、微纳粗糙结构以及空间润湿梯度实现更加精准的界面调控。

与此同时，孔结构设计也应从传统的“高孔隙率”指标转向有效孔隙率、孔道连通性、曲折度和空间取向等更加具有传质意义的结构参数。已有研究表明，梯度孔、分级孔以及定向孔道能够在降低流动阻力的同时增强界面筛分作用，从而改善传统材料中通量与选择性之间的矛盾。因此，未来可进一步发展具有空间梯度和多尺度层级结构的气凝胶，使材料内部不同尺度的孔道分别承担快速运输、油滴截留和污染物吸附等功能，实现从“均一多孔材料”向“功能分区材料”的转变。

6.2. 从高性能实验室材料转向长期稳定的工程材料

机械稳定性和湿态稳定性仍然是限制气凝胶实际应用的重要因素。高孔隙率通常意味着骨架密度较低，而低密度结构又容易在浸水、压缩、反复吸附-脱附以及连续流动条件下发生孔道塌陷和结构疲劳。尤其对于天然聚合物基气凝胶，其本征亲水性和湿态稳定性仍需要通过交联和界面工程进行改善。

因此，未来材料设计需要从单纯提高初始力学强度转向湿态力学稳定性和长期结构保持能力。多重交联、互穿网络、纤维增强、定向骨架以及动态可逆键等策略具有较大的发展潜力。更重要的是，力学性能评价应逐渐从单次压缩测试转向模拟实际运行条件下的长期循环测试，例如连续流动、周期性压力、油水冲击以及复杂化学环境中的结构保持率。只有当材料能够在数十次甚至数百次循环后仍维持稳定的孔结构和分离性能，其“高性能”才具有真正的工程意义。

6.3. 从“高分离效率”转向全生命周期评价

当前不同研究之间的性能比较还存在一定局限。由于油品种类、油水比例、乳液粒径、膜厚度、操作压力和测试方法存在较大差异，不同文献报道的通量和分离效率往往难以直接横向比较。因此，仅以某一项最高性能指标判断材料优劣，可能会高估实验室材料的实际应用潜力。

未来有必要建立更加统一的标准化性能评价体系，至少同时考虑分离通量、分离效率、油水组成、乳液粒径、操作驱动力、循环次数、通量衰减率和污染恢复能力。此外，还应将材料制备过程中使用的有机溶剂、冷冻干燥和高温处理所产生的能源消耗纳入评价。现有研究中，复杂的溶剂交换、冷冻干燥、表面改性和热处理等过程可能增加材料制备成本和能耗，这与气凝胶用于环境治理所强调的绿色属性之间存在一定矛盾。

因此，未来气凝胶油水分离材料的评价应逐渐由传统的性能导向转向性能-成本-环境影响综合评价，通过生命周期评价(LCA)、技术经济分析(TEA)等方法判断材料是否真正具有规模化应用价值。

6.4. 面向真实废水和连续化过程的规模化应用

气凝胶油水分离研究最终需要从静态烧杯实验走向连续流、模块化和工程化处理体系。实际工业废水通常具有较大的处理规模和持续变化的污染负荷，因此材料不仅需要具有较高的瞬时分离效率，还需要具备较高的处理通量、较低的运行阻力以及稳定的长期运行能力。目前许多研究仍停留在实验室尺度，材料制备工艺和测试体系与实际工程条件存在明显差距。

未来可以重点发展气凝胶膜、气凝胶滤芯、气凝胶吸附柱和连续分离模块等工程化形式，并通过放大实验研究材料厚度、面积、流速以及压力对传质和分离性能的影响。同时，应针对含表面活性剂乳液、高盐废水、高黏度原油以及多组分工业废水建立更加接近实际工况的测试体系，使实验室评价结果能够真正转化为工程设计参数。

7. 展望

总体而言, 气凝胶油水分离材料未来的发展方向并不是继续追求某一个孤立的性能极值, 而是建立从“分子界面-多尺度孔结构-宏观传质-材料稳定性-工程运行的完整设计逻辑”, 未来值得重点关注以下几个方面:

(1) 界面精准调控。从静态水接触角向动态润湿、界面能和油滴行为转变, 实现对不同油水体系的选择性传输和抗污染调控。

(2) 多尺度结构设计。将微纳尺度界面结构与宏观定向通道、梯度孔结构相结合, 通过降低传质曲折度和优化尺寸筛分效应, 实现高通量与高选择性的统一。

(3) 高稳定性与可再生。发展具有湿态稳定性、抗疲劳性和自修复能力的三维骨架, 同时降低再生过程中的能耗和材料损失。

(4) 绿色制备与生命周期优化。减少有机溶剂、高能耗冷冻干燥和复杂表面改性步骤, 发展水相、常压干燥和可规模化加工技术, 并综合考虑材料从制备、使用到废弃全过程的环境影响。

(5) 真实工况与工程放大。建立统一的评价标准, 增加真实工业废水、长期连续运行和大面积模块化实验, 使材料性能评价从实验室最优值逐步转向实际工况下的稳定值。

气凝胶油水分离材料的发展应从材料创新进一步迈向系统创新: 不仅要回答如何制备性能更好的气凝胶, 更需要回答如何以更低的资源和能源消耗, 实现长期、连续、可靠且环境友好的油水分离。只有当材料设计、传质机制、再生策略、制备成本和工程运行能够实现整体优化时, 气凝胶才有望真正从实验室高性能吸附/分离材料转变为具有实际应用价值的油污污染治理技术。

参考文献

- [1] Deng, Y.Y., Peng, C.S., Dai, M., *et al.* (2020) Recent Development of Super-Wettable Materials and Their Applications in Oil-Water Separation. *Journal of Cleaner Production*, **266**, Article 121624. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121624>
- [2] Baig, U., Faizan, M. and Dastageer, M.A. (2021) Polyimide Based Super-Wettable Membranes/Materials for High Performance Oil/Water Mixture and Emulsion Separation: A Review. *Advances in Colloid and Interface Science*, **297**, Article 102525. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102525>
- [3] Li, J., Liu, Q., He, J., Zhao, Y., Mu, L., Liu, X., *et al.* (2024) A Review of Superwetting Aerogel-Based Oil-Water Separation Materials. *Materials Today Sustainability*, **26**, Article 100741. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100741>
- [4] Chen, C.L., Weng, D., Mahmood, A., *et al.* (2019) Separation Mechanism and Construction of Surfaces with Special Wettability for Oil/Water Separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 11006-11027.
- [5] 陈明功, 周鑫, 赵彬彬, 等. 油水分离技术的研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(1): 63-67.
- [6] 王庆军, 陈庆民. 超疏水表面的制备技术及其应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(2): 6-10.
- [7] Li, J., Ding, H., Zhang, H., Guo, C., Hong, X., Sun, L., *et al.* (2020) Superhydrophobic Methylated Silica Sol for Effective Oil-Water Separation. *Materials*, **13**, Article 842. <https://doi.org/10.3390/ma13040842>
- [8] Chen, B. and Hu, Y. (2024) Hierarchical Aerogels Based on Cellulose Nanofibers and Long-Chain Polymers for Enhancing Oil-Water Separation Efficiency. *Materials Today Nano*, **26**, Article 100469. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2024.100469>
- [9] Cao, W., Zhang, M., Zhang, Y., Fan, Q., Chen, S., Xu, S., *et al.* (2025) Tree-Inspired Nanofiber Aerogel with Vertically Aligned Microchannels for Salt-Resistant Solar Desalination and Oil-in-Water Emulsion Separation. *Journal of Membrane Science*, **719**, Article 123723. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2025.123723>
- [10] Liang, Z., Liang, C., Li, W., Huang, Z., Hu, H., Gan, T., *et al.* (2025) Self-Assembly Construction of Biomass Aerogel with Tip-to-Based Gradient Pore Structure to Break Trade-Off Effect for Efficient Water/Oil Separation. *Advanced Functional Materials*, **35**, Article 2424873. <https://doi.org/10.1002/adfm.202424873>
- [11] Zhong, S., Zhang, Y., Yang, X., Bi, S., Shao, G., Chen, N., *et al.* (2026) Multi-Scale Structural Regulation of PVA/SiO₂ Hybrid Nanofiber Aerogels for Dual-Mode Separation of Water/Oil Mixtures. *ACS Applied Polymer Materials*, **8**, 2108-2119. <https://doi.org/10.1021/acsapm.5c04198>

- [12] Shang, J., Qin, F., Wang, X., Wang, X., Yu, X., Qian, S., *et al.* (2026) Atmospheric Pressure Preparation of Superhydrophobic Surface-Modified SiO₂ Aerogel for Oil-Water Separation. *Inorganic Chemistry Communications*, **183**, Article 115812. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115812>
- [13] Luo, D., Wang, H., Lu, X., Ma, S., Xu, D., Xie, Y., *et al.* (2025) Lignin Fiber/Alumina Composite Aerogels Fabricated via PDMS Vacuum Impregnation for Thermal Insulation and Oil-Water Separation. *Journal of Porous Materials*, **32**, 2467-2481. <https://doi.org/10.1007/s10934-025-01847-1>
- [14] 甘礼华, 李光明, 朱大章, 等. 碳气凝胶的制备研究[J]. 高等学校化学学报, 2000, 21(6): 955-957.
- [15] 郭新, 张建明, 段咏欣. 纤维素基碳气凝胶研究进展[J]. 纤维素科学与技术, 2017, 25(1): 65-74+82.
- [16] Sun, Y., Guo, J., Gan, G., Xu, Y., Zheng, K., Li, C., *et al.* (2025) Flexible Reduced Graphene Oxide/Carbon Nanotubes/EPDM Composite Aerogel with Superior Photothermal Conversion for Selective Oil Recovery and Emulsion Separation. *Separation and Purification Technology*, **378**, Article 134586. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134586>
- [17] 张迎晓, 周帆, 赖陈, 等. 碳纳米管材料的制备及其应用研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(6): 1781-1796.
- [18] Wang, J.X., Lu, Y.H., Nong, S.Y., Tang, X., Lu, H.Q., Lei, F.H., Liu, H. and Li, W. (2026) Mimosa-Inspired Steamed-Bun-Shaped Rosin-Skeletal Chitosan/Carbon Nanotube Aerogel: Thermoresponsive, Switchable Wettability for Autonomous Oil/Water Separation. *Journal of Colloid and Interface Science*, **720**, Article 140678. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2026.140678>
- [19] 段一凡, 张光磊, 史新月, 等. 纤维素气凝胶的制备与应用研究进展[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(1): 36-43.
- [20] Wang, S., Lu, A. and Zhang, L.N. (2016) Recent Advances in Regenerated Cellulose Materials. *Progress in Polymer Science*, **53**, 169-206. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.07.003>
- [21] Liu, D., Chen, S., Wang, R., Li, L., Ji, J., Wu, T., *et al.* (2026) Bio-Based TEMPO-CNC Reinforced Fe-Doped UiO-66 with Hierarchical Porosity for Efficient Enrofloxacin Removal. *Environmental Research*, **290**, Article 123475. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.123475>
- [22] Liu, D., Wang, R., Wang, H., Ke, K., Li, L., Ji, J., *et al.* (2026) Engineering Cellulose Nanocrystal-Regulated UiO-66 as a Bifunctional Platform for Enhanced Fluoroquinolone Antibiotic Removal. *Chemical Engineering Journal*, **542**, Article 178262. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.178262>
- [23] Qiao, A., Huang, R., Penkova, A., Qi, W., He, Z. and Su, R. (2022) Superhydrophobic, Elastic and Anisotropic Cellulose Nanofiber Aerogels for Highly Effective Oil/Water Separation. *Separation and Purification Technology*, **295**, Article 121266. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121266>
- [24] 张力丹, 朱刚, 郭龙鑫, 等. 超疏水纳米纤维素-壳聚糖碳气凝胶的制备及其油水分离应用[J]. 化工进展, 2026, 45(5): 2977-2990.
- [25] 翟作昭, 许跃龙, 任斌, 等. 海藻酸钠基炭气凝胶的研究进展[J]. 炭素技术, 2020, 39(4): 1-4+10.
- [26] Yang, J., Xia, Y., Xu, P. and Chen, B. (2018) Super-Elastic and Highly Hydrophobic/Superoleophilic Sodium Alginate/Cel-lulose Aerogel for Oil/Water Separation. *Cellulose*, **25**, 3533-3544. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1801-8>
- [27] 王明勇, 马冠香, 张申力, 等. 有机合成聚合物-SiO₂杂化气凝胶研究进展[J/OL]. 化工进展: 1-16. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2026-0582>, 2026-08-21.
- [28] Jiang, Y., Zhang, Y., Gao, C., An, Q., Xiao, Z. and Zhai, S. (2022) Superhydrophobic Aerogel Membrane with Integrated Functions of Biopolymers for Efficient Oil/Water Separation. *Separation and Purification Technology*, **282**, Article 120138. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120138>
- [29] Zhou, S., Jiang, W., Wang, T.H. and Lu, Y. (2015) Highly Hydrophobic, Compressible, and Magnetic Polystyrene/Fe₃O₄/Gra-phene Aerogel Composite for Oil-Water Separation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **54**, 5460-5467. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00296>
- [30] 吴俊君, 厉德, 赖倩, 等. 能源与环境功能应用的聚偏氟乙烯基复合材料研究进展[J]. 塑料工业, 2026, 54(6): 18-25.
- [31] Wang, X., Liu, Z., Liu, X., Su, Y., Wang, J., Fan, T., *et al.* (2022) Ultralight and Multifunctional PVDF/SiO₂@GO Nano-fibrous Aerogel for Efficient Harsh Environmental Oil-Water Separation and Crude Oil Absorption. *Carbon*, **193**, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.03.028>
- [32] 罗俊, 张鸿飞, 周俊吉, 等. 聚酰亚胺基相变复合材料的研究进展[J]. 云南化工, 2026, 53(6): 6-11.
- [33] Xu, Y., Zhao, Y., Liu, F., Que, Y. and Wei, J. (2026) Sequential Interpenetrating Polymer Networks Decoupling Pore Interconnectivity and Mechanical Resilience in Polyimide/Polybenzoxazine Aerogels for Robust Oil-Water Separation. *Chemical Engineering Journal*, **537**, Article 176122. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.176122>