纤维素基气凝胶在微塑料过滤领域的研究进展*

张继航[1], 方俊玲[1], 姚家杰[1], 马庆涛[2], 朱晓泉[1†]
(1. 新疆大学 纺织与服装学院 新疆智能与绿色纺织重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830017;
2. 新疆大学 化学学院,新疆 乌鲁木齐 830017)

摘　要：微塑料污染对水生态环境与人类健康构成严重威胁,开发高效环保的微塑料去除技术意义重大. 纤维素基气凝胶凭借高孔隙率、优异的生物相容性及可降解性,在微塑料过滤领域展现出良好的应用前景. 本文综述了近年来纤维素基气凝胶在微塑料过滤领域的研究进展,重点介绍纤维素基气凝胶的制备方法,阐明物理拦截与多机制协同吸附的微塑料过滤机理,梳理提升材料过滤性能的功能化改性策略,分析当前研究面临的瓶颈与挑战,为开发基于纤维素基气凝胶材料的高效、可持续且环境友好的微塑料过滤技术提供参考.

关键词：纤维素基气凝胶;微塑料;过滤机理;功能化改性

DOI：10.13568/j.cnki.651094.651316.2026.03.30.0001

中图分类号：TQ352　**文献标识码**：A　**文章编号**：2096-7675(2026)05-0625-016

引文格式：张继航,方俊玲,姚家杰,马庆涛,朱晓泉. 纤维素基气凝胶在微塑料过滤领域的研究进展[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文),2026,43(5):625-640.

英文引文格式：Zhang Jihang, Fang Junling, Yao Jiajie, Ma Qingtao, Zhu Xiaoquan. Recent progress in cellulose-based aerogels applied to microplastic filtration[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English),2026,43(5):625-640.

Recent Progress in Cellulose-Based Aerogels Applied to Microplastic Filtration

Zhang Jihang[1], Fang Junling[1], Yao Jiajie[1], Ma Qingtao[2], Zhu Xiaoquan[1]
(1. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent and Green Textile, School of Textiles and Garments, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. School of Chemistry, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

Abstract: Microplastic pollution poses a grave threat to the aquatic ecological environment and human health, making the development of efficient and eco-friendly microplastic removal technologies of paramount importance. Owing to their high porosity, excellent biocompatibility and biodegradability, cellulose-based aerogels exhibit good application prospects in the field of microplastic filtration. This review summarizes the research progress of cellulose-based aerogels for microplastic filtration in recent years, highlights their typical preparation methods, elucidates the microplastic filtration mechanisms involving physical interception and synergistic adsorption via multiple mechanisms, systematizes the functional modification strategies for enhancing material filtration performance, and analyzes the key bottlenecks constraining current research. It aims to provide a scientific reference for the development of efficient, sustainable and environmentally friendly microplastic filtration technologies based on cellulose-based aerogel materials.

Key words: cellulose-based aerogels; microplastics; filtration mechanism; functional modification

* **收稿日期**：2026-03-30；**修回日期**：2026-06-09；**录用日期**：2026-06-15.
基金项目：新疆大学博士科研启动基金“三维层级多孔 $Ti_3C_2T_x$/Ag 基体的可控制备及锌枝晶抑制机理研究”(202310130001)；新疆维吾尔自治区天池英才青年博士计划“纤维素基电池隔膜的制备及性能研究”(51052501811).
作者简介：张继航(2002—),男,硕士生,从事纤维素基分离材料制备及应用的研究,E-mail:2069437458@qq.com.
† **通信作者**：朱晓泉(1989—),女,博士,副教授,主要从事功能纤维素基复合材料制备及性能的研究,E-mail:zhuxiaoquan89@163.com.

0 引 言

随着塑料工业的飞速发展,其产品在各领域的应用日渐广泛[1].然而,大量塑料废弃物的不合理处置,导致微塑料污染问题日益严峻. 微塑料是指粒径小于5 mm的塑料颗粒或碎片,来源包括一次性塑料制品、合成纤维织物洗涤脱落物及工业生产中的塑料微珠等[2-4]. 如图1(a)所示,这些微塑料通过地表径流、大气沉降等途径进入水环境,在全球范围内的海洋、河流、湖泊等水体中广泛分布[5]. 据统计,全球每年约有数百万吨塑料垃圾进入海洋,其中相当一部分会分解形成微塑料,对水生态系统构成严重威胁[6].

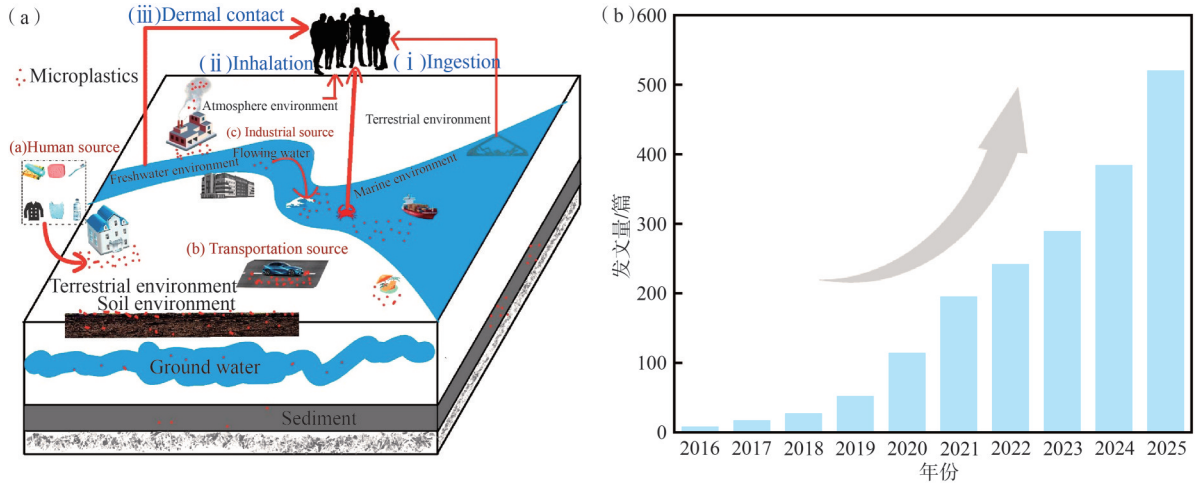


图 1 (a)大气、淡水、海洋、陆地环境中微塑料来源及其迁移途径[5];(b)Web of Science数据库近十年关于微塑料过滤文献发文趋势

Figure 1 (a) Sources of microplastics in atmosphere, freshwater, marine and terrestrial environments and their migration pathways[5]; (b) Publication trend of literatures on microplastic filtration in Web of Science database in the past decade

微塑料具有体积小、比表面积大的特点,能够吸附环境中的污染物,如多氯联苯、多环芳烃、重金属离子等[7]. 水生生物摄食过程中易误吞微塑料,导致肠道堵塞、营养不良、免疫功能下降等问题,还可能通过食物链的传递与生物放大作用,最终对人类健康产生潜在危害,如影响人体内分泌系统、导致炎症反应等[8]. 随着微塑料污染问题加剧,关于微塑料过滤的论文发表数量呈逐年上升趋势(图1(b)),开发高效的微塑料去除技术成为当下研究热点.

目前,应用于微塑料过滤分离的材料种类繁多,包括传统滤料、高分子膜、多孔碳材料、天然生物质材料等[9-12]. 其中天然高分子基多孔材料纤维素基气凝胶是以纤维素为原料,制备的一种具有三维网络结构的轻质多孔材料,具有孔隙率高、比表面积大、生物相容性好和可降解等特点,使其在微塑料过滤领域具有重要应用价值[13-14]. 近年来,纤维素基气凝胶在微塑料过滤领域的研究成果不断涌现,已形成较为系统的研究体系.

本文通过综述纤维素基气凝胶在微塑料过滤领域的研究进展,重点梳理纤维素基气凝胶的制备方法、微塑料过滤的核心机制,并系统阐述纤维素基气凝胶的功能化改性策略,以期为纤维素基气凝胶的规模化生产与微塑料污染治理提供理论参考与技术思路.

1 纤维素基气凝胶的制备方法

纤维素基气凝胶的制备主要有溶解再生法、纳米纤维素自组装法和复合共混成型法,不同制备方法在核心原理、工艺复杂度及产品性能方面存在显著差异(表1).

1.1 溶解再生法

溶解再生法是制备纤维素基气凝胶的传统核心路径,以天然纤维素(如桉木浆、浆粕)为原料,通过“纤维素溶解-凝胶化-干燥”实现分子级重构,形成三维多孔网络,关键在于通过特殊溶剂破坏纤维素紧密的氢键结构,再经交联与干燥保留纤维素多孔特性.

表 1　纤维素基气凝胶主要制备方法综合对比

Table 1　Comprehensive comparison of main preparation methods of cellulose-based aerogels

制备方法	核心原理	主要优点	主要缺点
溶解再生法[15]	纤维素分子级溶解后重构三维网络	结构均匀性好，可实现分子水平的性能调控	溶解工艺复杂，对温度和浓度敏感易导致纤维素过度降解
纳米纤维素自组装法[16]	纳米纤维素单元通过氢键自组装	可实现90%~99.7%的超高孔隙率全程无需有毒化学试剂，绿色环保比表面积高，吸附位点丰富	对纳米纤维素原料的纯度和分散性要求严格
复合共混成型法[17]	纤维素基体与功能材料共混成型	可同步实现力学结构增强与多功能性能叠加	易出现相分离现象，功能材料在基体中的均匀分散性难控制

1.1.1　纤维素的溶解

纤维素是葡萄糖单元通过β-1,4-糖苷键连接形成的线性高分子，分子链间存在大量氢键，形成紧密的结晶区与无定形区结构，导致其难以被水、常规有机溶剂（如乙醇、丙酮）溶解[18–19]．为克服这一困难，研究人员研发出几种能够溶解纤维素的特殊溶剂．如图2（a）所示，使用NaOH/尿素水溶液，通过低温（–12~–5 ℃）冻溶循环破坏纤维素分子间氢键，实现低温溶解，该体系成本低、环境友好，但溶解能力受纤维素聚合度限制，且溶液稳定性需严格控制温度；另一种常用的体系是LiOH/尿素水溶液，通过低温（–15~–8 ℃）冻溶循环破坏纤维素分子间氢键从而实现溶解，该体系溶解速率较快、适用纤维素种类较广，但高聚合度纤维素溶解难度较大，且溶液稳定性对温度与组分浓度十分敏感[15]．由图2（b~d）可知，除离子液体和NaOH/尿素水溶液外，还包括NaOH/硫脲体系、无机酸体系、LiCl/DMAc体系以及近年快速发展的深共晶溶剂体系等．NaOH/硫脲体系与NaOH/尿素体系作用机制相似，低温下可快速溶解纤维素，溶解能力略优于碱/尿素体系，但硫脲具有一定毒性，环境友好性较差．无机酸（如硫酸、磷酸）体系可在室温下快速溶解纤维素，但强酸易导致纤维素过度降解，适用范围较窄．LiCl/DMAc体系溶解能力强（可溶解高聚合度纤维素）且溶液稳定性好，但DMAc价格高、毒性较大、回收困难，不符合绿色制备理念．深共晶溶剂体系由氢键供体与氢键受体按特定摩尔比混合制得[20–23]，具有可设计性强、低毒、可生物降解、热稳定性好等优势，被视为新一代绿色纤维素溶剂，但其溶解速率相对较慢、部分体系黏度较高，仍需进一步优化．不同体系在溶解效率、环境友好性、成本及适用聚合度方面各具优劣，需根据实际应用场景予以选择．

1.1.2　纤维素的凝胶化

凝胶化是将溶解后的纤维素溶液转化为具有三维网络结构凝胶的过程，核心是通过物理或化学作用使纤维素分子重新聚集、交联，形成稳定的空间骨架[24]．根据交联方式不同，可分为物理交联和化学交联．其中物理交联无需添加交联剂，通过改变环境条件（如温度、pH等）诱导纤维素分子自组装形成凝胶．Baraka等[25]以桉木浆为原料，经均质化提取纤维素纤维并制成悬浮液，通过冻融工艺实现物理交联，制备的水凝胶呈蜂窝状基质，具有优异回弹性．由图3（a）可知，在冷冻过程中，体系中的水分子发生结晶，冰晶的定向生长挤压纳米纤维素分子链，大幅缩短分子链间距，使纤维素表面丰富的羟基基团充分靠近，为分子间氢键的形成创造条件；在后续4 ℃缓慢解冻过程中，冰晶逐渐融化，纤维素分子链间形成的大量氢键作为物理交联点，将分散的纳米纤维连接为连续的三维网络结构，大量水分子被锁存于网络孔隙中，形成结构完整、性能稳定的水凝胶．化学交联通过添加化学交联剂，使纤维素分子链上的羟基与交联剂发生化学反应，形成共价键连接的三维网络．Chen等[26]将碱性纤维素溶液和环氧功能化聚乙烯亚胺混合，以环氧氯丙烷为交联剂，经冷冻-解冻与冷冻干燥法制备环氧功能化复合气凝胶．由图3（b~c）可知，在碱性环境下，环氧氯丙烷分子的环氧基团发生开环反应，其两端可分别与纤维素分子链上的羟基、聚乙烯亚胺分子中的氨基发生共价键合．一方面，实现纤维素分子链间的化学交联，构建稳定的三维网络骨架；另一方面，将富含氨基的环氧功能化聚乙烯亚胺成功接枝到纤维素骨架上，交联的同时实现气凝胶功能化改性．Fan等[27]以废旧报纸为原料、戊二醛为交联剂，经冷冻干燥工艺制备轻质、疏水多孔的纤维素基气凝胶．此外，三聚氰胺、柠檬酸及多元羧酸等也常被用于纤维素的化学交联，可显著提升凝胶的耐水性、热稳定性与机械强度[28–30]．

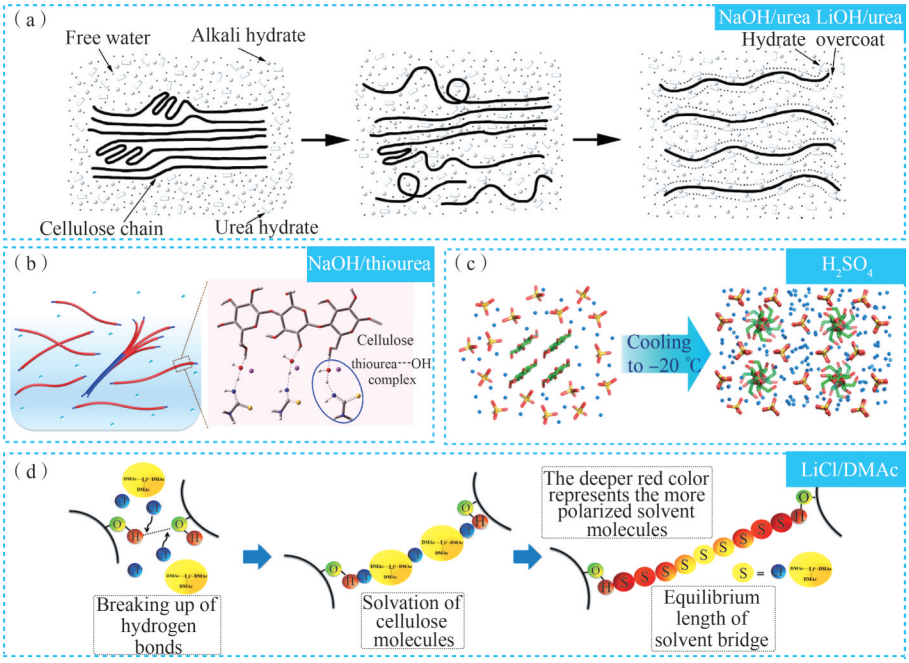


图 2 (a)NaOH/尿素和LiOH/尿素体系的纤维素溶解机理[15];(b)NaOH/硫脲体系的纤维素溶解机理[20];(c)无机酸体系的纤维素溶解机理[21];(d)LiCl/DMAc体系的纤维素溶解机理[22]

Figure 2 Dissolution mechanism of cellulose in (a) NaOH/urea and LiOH/urea system[15]; (b) NaOH/thiourea system[20]; (c) Inorganic acid system[21]; (d) LiCl/DMAc system[22]

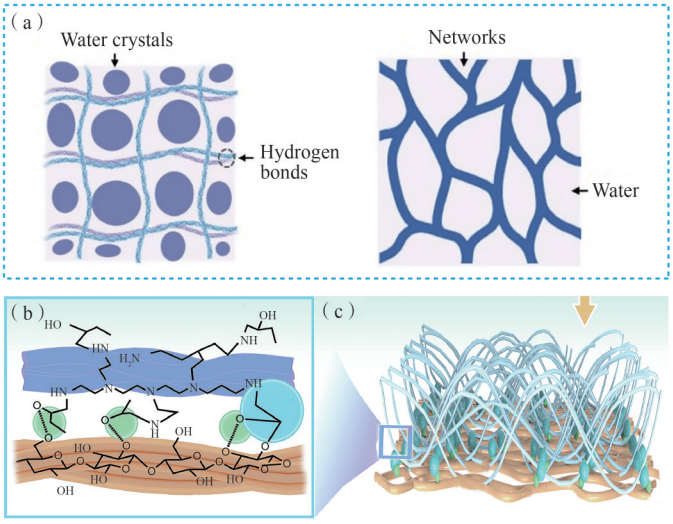


图 3 (a)纳米纤维素凝胶网络的形成[25];(b)环氧功能化聚乙烯亚胺与纤维素分子链的交联反应[26];(c)纤维素基复合气凝胶三维网络结构[26]

Figure 3 (a) Formation of nanocellulose gel network[25]; (b) Cross-linking reaction between epoxy-functionalized polyethyleneimine and cellulose molecular chains[26]; (c) 3D network structure of cellulose-based composite aerogels[26]

1.1.3 纤维素的干燥

干燥是去除凝胶中溶剂并保留三维多孔结构的关键步骤,直接影响气凝胶的孔隙率、比表面积与密度,常用方法包括常压干燥法、冷冻干燥法和超临界干燥法. 1)常压干燥法. 在常压条件下,通过40~80 ℃加热或通风方式去除溶剂,干燥前需将凝胶内部溶剂置换为丙酮等低表面张力溶剂,且所选溶剂的沸点应低于或接近干燥温度(50~70 ℃),以确保溶剂能快速、充分挥发,避免凝胶结构坍塌. Li等[31]采用索氏提取法置换溶剂,经常压干燥制得的纤维素基气凝胶保持柔韧性,比表面积达冷冻干燥产品的4.3倍,且可用于制备阻燃功能型气凝胶. 2)冷冻干燥法. 先将凝胶在低温条件(–80~–20 ℃)下冷冻,使溶剂内部形成冰晶,再在真空条件(压力小于

10 Pa)下使冰晶升华，避免结构塌陷．Sui等[32]通过非定向冷冻干燥法(–60 ℃冷冻、真空冻干)制备核壳结构气凝胶，孔隙率高达99.72%，密度低至5.15 mg/cm^3．3)超临界干燥法．将凝胶置于超临界流体(如CO_2)中，溶剂与超临界流体混合移除，无表面张力影响．Darpentigny等[33]对比冷冻干燥与超临界干燥，发现后者可使氧化纤维素纳米纤丝气凝胶的比表面积增大，且通过优化CO_2循环次数与降压速率，减少结构收缩与塌陷．

1.2　纳米纤维素自组装法

以纤维素纳米纤丝(CNF)、氧化纳米纤维素为原料，无需分子级溶解，通过纳米单元的自组装构建三维网络，是提升气凝胶比表面积与微塑料吸附性能的重要途径．该方法核心机理在于：CNF表面富含大量活性羟基，可通过分子间氢键、范德瓦尔斯力与静电相互作用形成自发的缠结与聚集；而冷冻过程中冰晶的定向生长可作为“动态模板”，驱动纳米纤丝在冰晶间隙中发生定向排布与致密聚集，于冰晶界面完成纳米单元的自组装，形成连续贯通的三维湿凝胶网络；后续经冷冻干燥处理，体系中的冰晶直接从固态升华为气态，可完整保留自组装形成的多孔骨架结构，全程无需引入有毒化学试剂与复杂的溶剂交换工序，兼具绿色环保与结构可控的双重优势．Gong等[16]在2，2，6，6-四甲基哌啶-1-氧化物(TEMPO)氧化的CNF中添加苯乙烯丙烯酸乳液(SAE)，由图4可知，SAE先均匀吸附在CNF表面，经冷冻诱导自组装形成三维网络后，通过烘箱加热实现SAE与CNF的共价交联，在保留气凝胶超高孔隙率(99%)与高比表面积(184 m^2/g)的同时，大幅增强骨架的力学强度与结构稳定性．Jiao等[34]以天然竹纤维为原料，通过环保且低成本的热解路线制备轻质超疏水碳纤维气凝胶；该气凝胶用作吸附剂时，可快速吸附废水中的有机液体，吸附范围广，吸附容量达自身重量的23~51倍，具备可回收性，经燃烧、挤压或提取处理后，循环使用5次仍保持较高吸附效率．

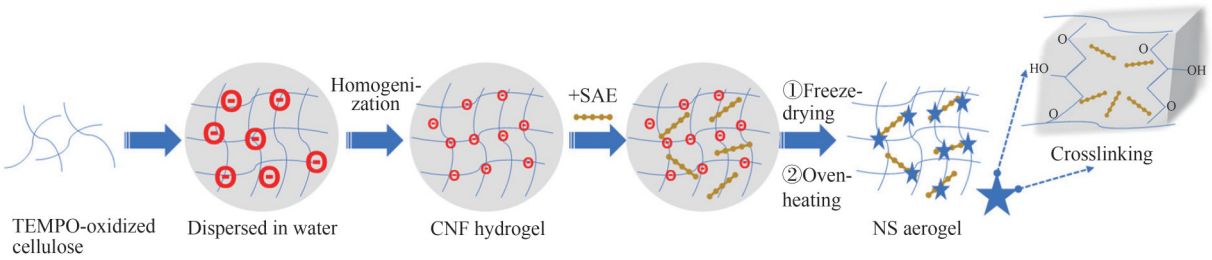


图 4　纳米纤维素自组装气凝胶多孔结构调控[16]

Figure 4　Porous structure regulation of nanocellulose self-assembled aerogels[16]

1.3　复合共混成型法

以纤维素为基体，复合功能纳米材料(如碳纳米管(CNT)等)或生物聚合物，通过共混-成型一体化工艺制备复合气凝胶，实现结构增强与功能叠加．Gnanaseelan等[17]以棉短绒纤维素为基体，分别复合单壁碳纳米管(SWCNTs)与多壁碳纳米管(MWCNTs)，采用NaOH/尿素绿色水系溶解体系，经溶液共混-凝胶再生-冷冻干燥的一体化工艺，成功制备纤维素/CNT复合气凝胶．结果表明，该复合气凝胶具有88%~90%的高孔隙率与176~202 m^2/g的高比表面积，形成均匀互联的亚微米级三维多孔网络结构．He等[35]将再生纤维素与壳聚糖共混，以戊二醛为交联剂，制备再生纤维素/壳聚糖复合气凝胶．交联结构的构建可显著改善纯纤维素基气凝胶的脆性问题，赋予其优异的压缩回弹性能与湿态结构稳定性，在10次循环压缩测试后，仍可保持完整的骨架结构与优异的形变恢复能力．壳聚糖分子中大量的氨基在酸性环境下发生质子化，使气凝胶表面带正电，可通过强静电吸引作用实现对阴离子污染物的高效选择性捕获．

2　微塑料的过滤机制

纤维素基气凝胶凭借独特的结构与表面化学特性，在微塑料过滤过程中展现出多机制协同作用的特点，核心过滤机制可分为物理拦截作用与吸附作用．

2.1　物理拦截作用

纤维素基气凝胶的三维连通多孔结构是实现物理拦截的基础，孔径分布决定其对不同尺寸微塑料的截留能力，如图5(a)所示．当含有微塑料的流体流经气凝胶时，尺寸大于气凝胶孔径的微塑料通过表面筛分效应被阻隔在气凝胶外表面，尺寸与孔径相近或略小于孔径的微塑料，则在流体流动过程中被三维多孔网络结构

捕获,截留于气凝胶内部孔隙中,实现深度拦截[36]. 该机制需要平衡孔径与通量,孔径越小,小尺寸微塑料拦截精度越高,但会增加流动阻力、降低通量,实际应用需兼顾效率与通量. 同时,物理拦截效果受微塑料微观形貌影响显著,不同形貌微塑料的捕获方式与效率存在明显差异. 球形微塑料主要依靠孔径筛分效应实现截留,而纤维状、碎片状、薄膜状微塑料的捕获特性较特殊,纤维状微塑料长径比大,极易与气凝胶孔壁发生机械缠绕,是定向孔道结构气凝胶的优势捕获对象;碎片状与薄膜状微塑料比表面积大,易被多孔结构快速拦截,但也更易堆积堵塞孔道,对材料孔结构设计要求更高.

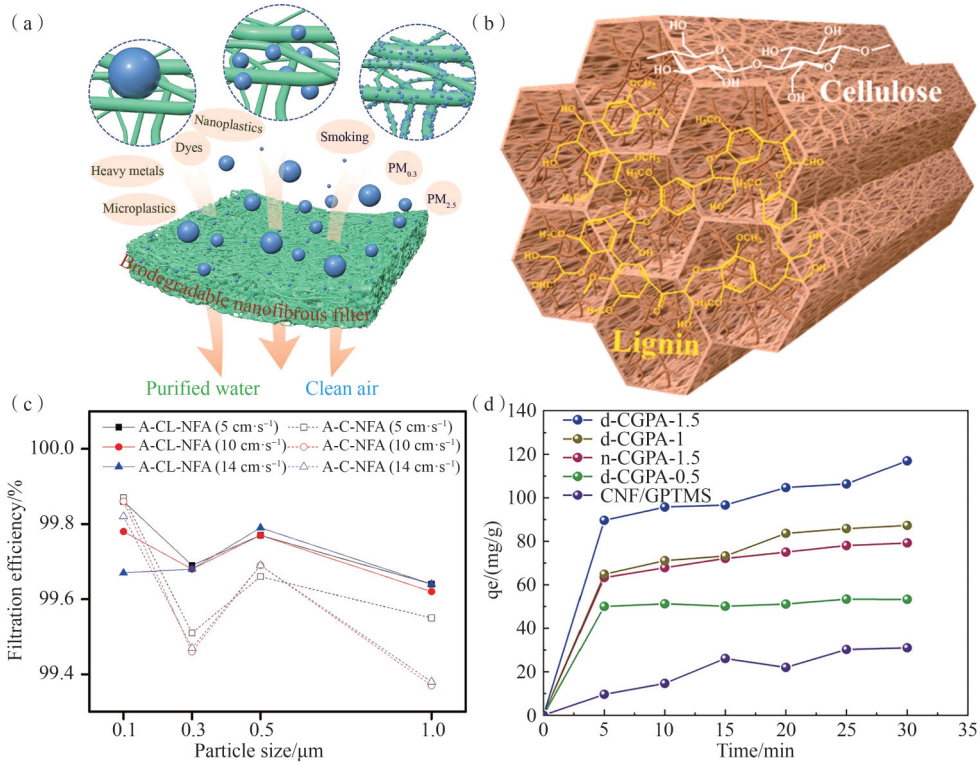


图 5 (a)气凝胶对不同尺寸微塑料物理拦截作用机理[36];(b)NFA材料孔隙结构[37];(c)改性材料对不同直径微塑料颗粒的过滤效率[37];(d)不同成分和结构气凝胶的吸附能力[38]

Figure 5 (a) Mechanism of physical interception of microplastics with different sizes by aerogels[36]; (b) Pore structure of NFA material[37]; (c) Filtration efficiency of modified materials for microplastic particles with different diameters[37]; (d) Adsorption capacity of aerogels with different compositions and structures[38]

Ma等[37]以定向冰模板法+低温退火工艺,通过CNF与硫酸盐木质素制得微蜂窝状气凝胶(NFAs),保留多孔孔壁与分级结构,如图5(b)所示. 该气凝胶构建出贯穿整个材料的轴向定向孔道与多孔孔壁相结合的多级孔体系,定向冰晶生长形成50~120 μm的贯通孔道,为流体提供低阻力的传输路径,增大气凝胶的通量;孔壁上纳米纤维相互缠结形成2~12 μm的次级孔隙,配合孔道内壁悬垂的纳米纤维网络,共同构筑高密度的物理拦截位点,可实现不同粒径微塑料与颗粒物的高效捕获. 由图5(c)可知,与传统天然材料气凝胶过滤器相比,过滤效率高达99.86%,且该微蜂窝状定向结构可引导流体进入孔道内部实现深度过滤,避免颗粒物在材料表面快速堆积造成孔道堵塞,在连续40 h高负荷过滤测试后,其过滤效率仍稳定在99%以上,且具有长期过滤性与抗堵塞性. Zhuang等[38]以定向冷冻工艺制备平行层状孔道结构气凝胶,如图5(d)所示,定向冷冻工艺增强其对水体中微塑料的物理拦截作用与吸附效率,且20 min即可实现吸附平衡. 表明定向冷冻工艺构建的平行层状孔道通过尺寸筛分效应可实现微塑料的高效物理拦截,同时通过优化传质路径提升微塑料在气凝胶内部的迁移效率. 针对差异化形貌微塑料的过滤优化研究,Yang等[39]开发的双向定向多孔气凝胶表现出优异适配性,对涤纶纤维状微塑料的吸附容量是随机多孔气凝胶的8.7倍,核心原因是定向规整孔道可大幅增加纤维状微塑料与孔壁的接触概率,通过机械缠绕与物理拦截的协同作用实现高效捕获. 而针对易堵塞的碎片状、薄膜状微塑料,梯度孔结构气凝胶可有效解决应用痛点,大孔负责快速输

送流体、降低流动阻力，介孔与微孔完成小尺寸碎片、薄膜微塑料的深度拦截，分级孔隙结构可有效延缓滤饼层形成，显著延长过滤材料的使用寿命.

2.2　吸附作用

吸附作用是纤维素基气凝胶捕获微塑料的关键辅助机制，主要依赖气凝胶表面官能团与微塑料间的非共价相互作用实现，其核心作用形式可进一步细分为静电作用、氢键作用与π-π堆积作用.

2.2.1　静电作用

纤维素基气凝胶与微塑料的表面电荷性质是静电作用的核心驱动因素. 当二者表面电荷相反时，静电吸引力显著促进微塑料在气凝胶表面的吸附，主要通过两种途径实现. 一方面，纤维素基气凝胶可通过化学改性（如引入季铵盐等阳离子基团）调控表面电荷；另一方面，微塑料表面因吸附环境离子或自身结构中含有磺酸基、羧基等基团而携带负电荷（图6(a)）[40]. Zhu等[41]以漂白桉木浆为原料，分别通过2,3-环氧丙基三甲基氯化铵（EPTMAC）季铵盐改性与TEMPO氧化改性制备表面电荷可控的CNF，季铵盐改性气凝胶为QCNF，氧化改性气凝胶为TCNF. 由图6(b)可知，TCNF因表面引入羧基，在水体中呈强负电性，Zeta电位值低至−50.8±0.5 mV；而QCNF因纤维素分子链上接枝季铵盐阳离子基团，表面呈强正电性，Zeta电位值达44.0±1.6 mV；两种改性气凝胶相反的带电特性，为针对性静电吸附不同电荷的微塑料提供结构基础. 由图6(c~d)可知，QCNF对表面带负电的羧基化聚苯乙烯微球（PS-COOH）可实现99%的过滤效率，TCNF对表面带正电的氨基化聚苯乙烯微球（PS-NH_2）的吸附效率为75%. 针对实际应用中的极性微塑料，QCNF对水体中带负电的聚氯乙烯（PVC）微塑料具有极佳的吸附捕获效果，去除效率超过99%. 这一结果充分证明，纤维素基气凝胶对微塑料的静电吸附具有显著的电荷选择性，仅当气凝胶与微塑料表面电荷相反时，才能发挥高效的捕获效果，且二者电荷密度越高，静电吸附作用越强，对微塑料过滤效率也越显著.

2.2.2　氢键作用

纤维素基气凝胶分子链上丰富的羟基（–OH），兼具氢键供体与氢键受体双重特性，可与微塑料表面各类极性基团形成稳定氢键，进而将微塑料牢牢固定在气凝胶表面及孔道内部[42]. 以聚苯乙烯（PS）微塑料为例，其表面携带大量的极性基团，可与纤维素分子链上的羟基定向形成氢键相互作用. 通过此种极性基团间的相互作用，实现微塑料的高效锚固，避免吸附后脱附，且气凝胶表面羟基密度高、微塑料极性基团分布广，可形成“多点协同效应”，如图7所示[43]. 王洁等[44]以漂白桉木浆为原料，经高压均质和冷冻干燥制得纯CNF气凝胶. 该气凝胶表面羟基密度高达12.5 mmol/g，对表面含羟基的聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）微塑料的吸附容量可达520 mg/g，显著高于表面极性较弱的聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP）微塑料. 通过傅里叶变换红外光谱分析发现，吸附后气凝胶在3 350 cm^{-1}处的O–H伸缩振动峰明显红移，证明氢键作用的存在. 为进一步验证氢键作用对吸附性能的贡献，该研究将纯纤维素基气凝胶与羟基被部分甲基化的改性纤维素基气凝胶进行性能对比. 结果表明，随着羟基甲基化程度的提高，气凝胶对PET微塑料的吸附容量逐渐降低，当羟基甲基化程度达到70%时，吸附容量下降至原来的32%，这一结果直接证明羟基在氢键吸附微塑料过程中的核心作用. Wu等[45]制备的超分子自组装气凝胶（Ct-Cel）对PET微塑料吸附容量高达511.7 mg/g，进一步证实PET分子链中酯基与纤维素羟基的强氢键配对作用，是极性微塑料被高效吸附的关键.

2.2.3　π-π堆积作用

纤维素基气凝胶与含芳香环微塑料（如PS、PET）间的π-π堆积作用，主要来源于功能化改性过程中引入的芳香族官能团，或复合碳基纳米材料（如石墨烯、CNT）提供的共轭π电子体系[46]. 该非共价相互作用的强度取决于芳香环的数量、平面共轭程度及二者间距，芳香环数量越多、平面性越好、间距越近，π-π堆积作用越强. Yang等[47]采用环保溴化锂熔融盐水合物（LBTH）溶剂体系，实现全纤维素与木质素的同步溶解与分子级重构，制备可压缩木质素增强全纤维素基气凝胶（LEH）. 该体系中，π-π堆积作用完全来源于木质素分子固有的苯丙烷结构单元，可与含芳香环的污染物形成强短程相互作用. 通过拉曼光谱表征可知，吸附后木质素的芳香环面内伸缩振动G带从1 605 cm^{-1}显著红移至1 595 cm^{-1}，这是π-π堆积作用的经典光谱学特征. 在π-π堆积、静电吸引与氢键作用的协同驱动下，气凝胶对含芳香环亚甲基蓝的吸附容量达到18.86 mg/g，比纯纤维素基气凝胶提高57%. 控制实验进一步证明，所有含木质素的气凝胶吸附容量均显著高于纯纤维素基气凝胶，明确木质素提供的π-π堆积作用是实现高吸附性能的关键机制之一.

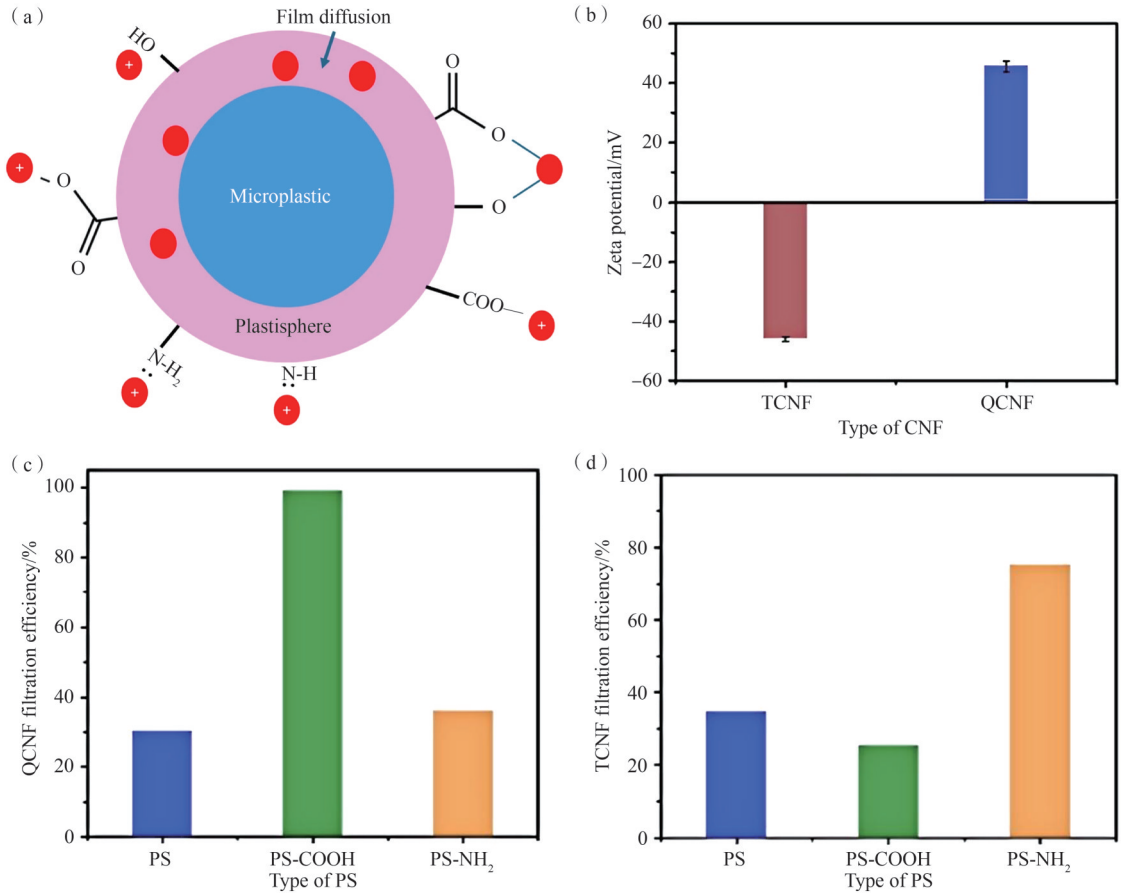


图 6 (a)微塑料表面官能团[40];(b)不同改性CNF气凝胶的Zeta电位[41];(c)QCNF气凝胶对不同微塑料的过滤效率[41];(d)TCNF气凝胶对不同微塑料的过滤效率[41]

Figure 6 (a) Surface functional groups of microplastics[40]; (b) Zeta potentials of different modified CNF aerogels[41]; (c) Filtration efficiencies of QCNF aerogels for different microplastics[41]; (d) Filtration efficiencies of TCNF aerogels for different microplastics[41]

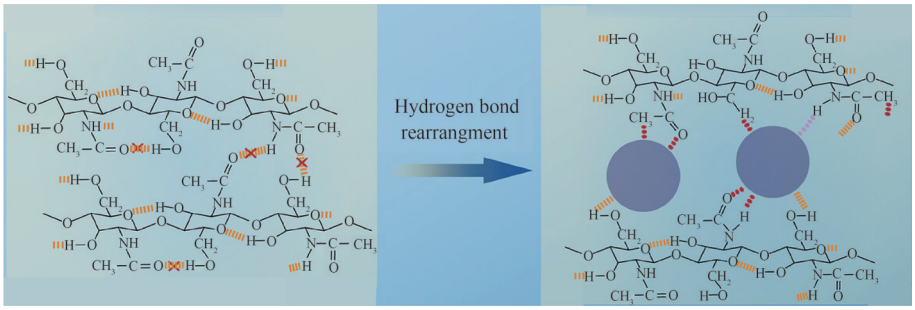


图 7 气凝胶氢键吸附微塑料机理[43]

Figure 7 Mechanism of microplastic adsorption by hydrogen bond of aerogels[43]

3 纤维素基气凝胶的功能化改性

为进一步提升纤维素基气凝胶对微塑料的过滤性能,研究人员通过引入功能纳米材料、调控表面电荷及构建梯度孔结构等策略进行改性,有效增强材料的吸附容量、选择性和循环稳定性.

3.1 复合纳米功能材料

在纤维素基质中引入纳米材料,可通过"结构增强-功能叠加"的协同效应提升气凝胶的吸附能力与机械稳定性,其中闪蒸石墨烯(FG)等碳基纳米材料因独特的结构与表面特性成为研究热点. 郑州大学赵楠团队[48]以TEMPO氧化TCNF为基体骨架,以FG为功能改性剂,以1,2,3,4-丁烷四羧酸为交联剂,辅以铜离子双交联与叔丁醇溶剂置换,经冷冻干燥工艺成功制备具有三维互联多孔网络结构的TCNF/FG复合气凝胶,如图8(a)

所示．从微塑料吸附作用机制来看，该复合气凝胶对水体中微塑料的捕获是多机制协同作用的结果，核心作用机理如图8(b)所示．在疏水相互作用方面，FG的引入使气凝胶疏水性能大幅增强，基于“相似相溶”原理，可与疏水的PE微塑料产生强疏水结合作用，使气凝胶的BET比表面积大幅提升，同时构建分级贯通的多孔结构，其中6~20 μm的大孔结构可实现6~10 μm微塑料的物理拦截与孔隙填充，而孔道内的毛细管力可牵引水体快速进入气凝胶内部，强化微塑料与吸附位点的接触效率．由图8(c~d)可知，随引入FG比例的增加，气凝胶的光热吸收效率可达96.98%，循环能力优秀．其纳米片结构还可增强对微塑料的物理锚定作用，为高盐环境中的微塑料过滤提供潜在解决方案．天津科技大学司传领团队[49]证明CNT、还原氧化石墨烯(rGO)等与纤维素的杂化体系可提升材料综合性能．由图8(e)可知，CNF表面丰富的羟基、羧基基团可与rGO表面的含氧官能团形成强氢键作用，与CNT产生静电作用与疏水结合效应，rGO与CNT则可通过π-π相互作用实现稳定结合．多重非共价键的协同作用，有效抑制石墨烯片层的堆叠与CNT的团聚，实现三种纳米材料在纤维素基质中的均匀分散，为有序多孔结构的构建奠定基础．此类复合气凝胶通过双向冷冻、退火等工艺形成有序层状多孔结构(图8(f))，具备超亲水性与优异的压缩稳定性，其高导电性可强化静电吸附效应，而多级多孔网络能提供充足的微塑料附着位点．

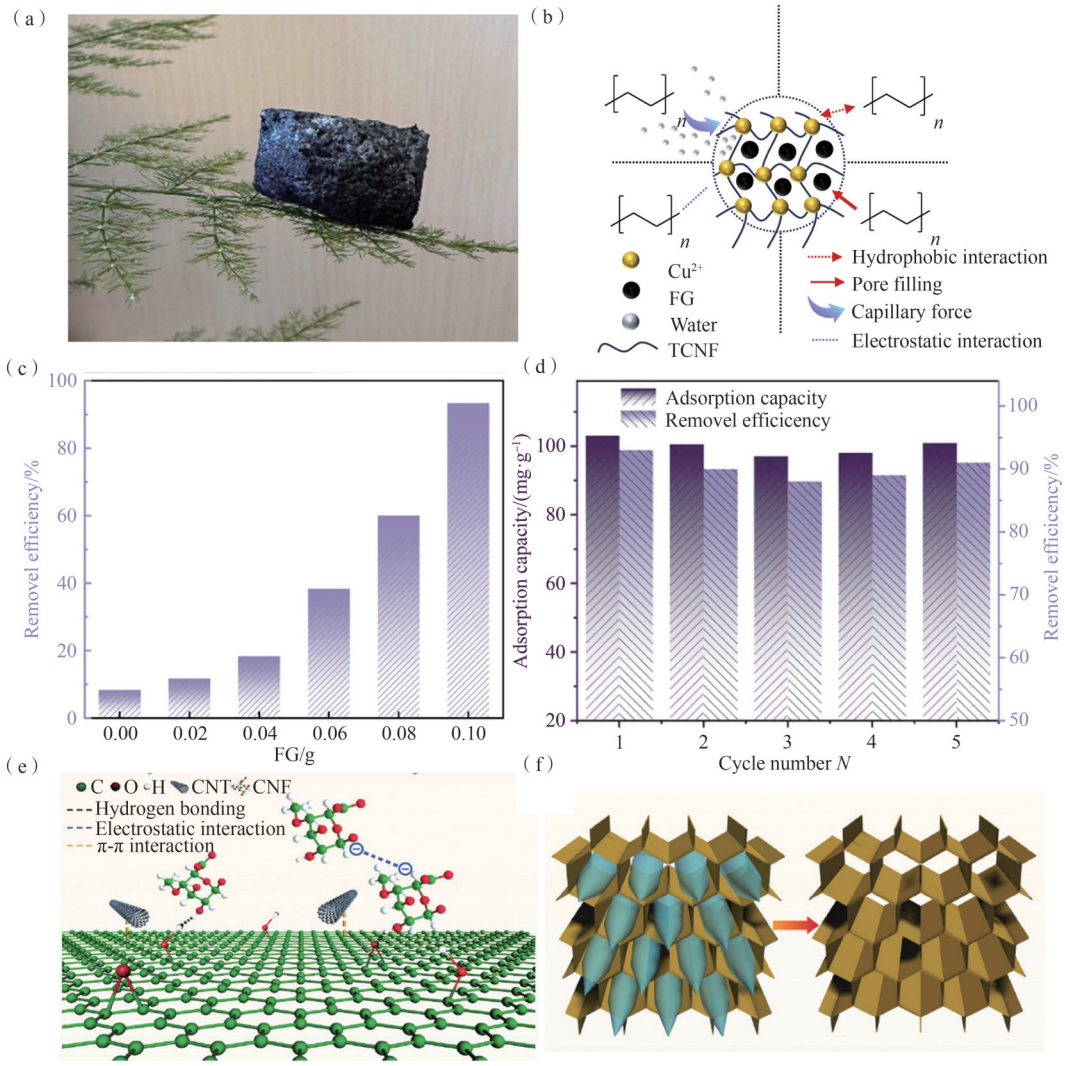


图 8　(a)TCNF/FG气凝胶[48]；(b)TCNF/FG气凝胶微塑料吸附机理[48]；(c)不同FG比例气凝胶的微塑料去除效率[48]；(d)气凝胶的循环微塑料吸附容量与去除效率[48]；(e)CNF、CNT和rGO相互作用[49]；(f)冰晶生长机制[49]

Figure 8　(a) TCNF/FG aerogel[48]; (b) Microplastic adsorption mechanism of TCNF/FG aerogel[48]; (c) Microplastic removal efficiency of aerogels with different FG incorporation ratios[48]; (d) Cyclic microplastic adsorption capacity and removal efficiency of aerogels[48]; (e) Interaction among CNF, CNT and rGO[49]; (f) Ice crystal growth mechanism[49]

3.2 调控表面电荷与化学结构

通过化学改性、离子配位、组分复配等手段调控气凝胶表面电荷与化学官能团,可强化气凝胶与微塑料间的静电作用、氢键作用、配位作用,显著提升吸附选择性与去除效率.

3.2.1 表面电荷调控

南京林业大学卞辉洋团队[50]通过溶剂交换辅助常温干燥制备竹纤维/微纤化纤维素(BF/MFC)气凝胶.由图9(a)可知,该材料借助阳离子淀粉引入季铵基团,与BF、MFC通过氢键构建分级多孔结构,形成物理拦截、静电吸引与分子间氢键的三重协同微塑料捕获体系. 由图9(b)可知,原生BF/MFC的Zeta电位分别为−8.24 mV和−22.8 mV,而改性后BF/MFC气凝胶的Zeta电位高达+18.7 mV,为捕获带负电的微塑料提供强静电驱动力. 该气凝胶对微塑料展现出优异的分离性能,过滤效率最高达99.4%,对500 nm带负电的PS微塑料吸附容量可达720.4 mg/g,对带更多负电基团的PS-COOH微塑料吸附容量提升至933.9 mg/g,实现99.4%的过滤效率、720.4 mg/g的吸附容量. 由图9(c)可知,其在长江、黄河等真实水体中仍保持98.4%以上的净化效率,经12次循环后性能无显著衰减,展现出优异的实际应用稳定性. Zhuang等[51]选取CNF为基体、2, 3-环氧丙基三甲基氯化铵为阳离子改性剂、聚乙烯醇为交联剂,通过液氮冷冻法制备具有定向孔结构的改性气凝胶(CPEA). 改性气凝胶电位分布均匀,由图9(d)可知,该气凝胶对小尺寸微塑料的吸附容量可达146.38 mg/g,是未改性气凝胶的9.4倍,充分验证阳离子化改性对微塑料吸附性能的强化效果. 且该气凝胶在不同外界影响因素下,仍能保持良好的吸附性能,结构稳定、抗环境干扰能力强,在水体微塑料过滤领域具备极高的实际应用潜力.

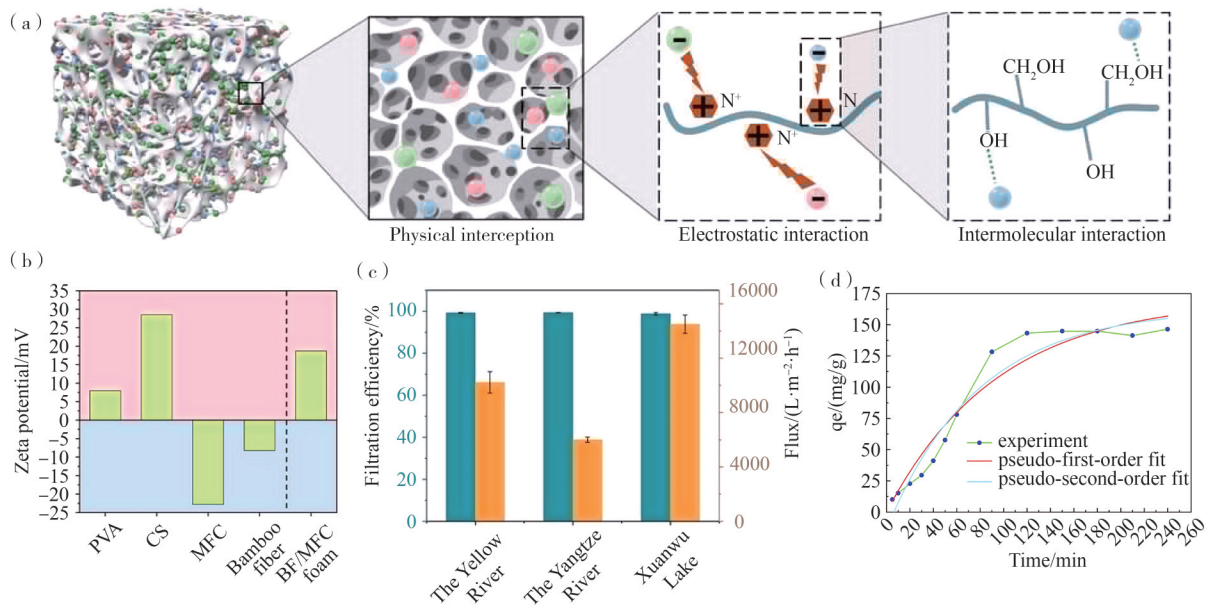


图 9 (a)BF/MFC气凝胶捕获微塑料机理[50];(b)原料与BF/MFC气凝胶Zeta电位[50];(c)不同水体环境中微塑料过滤性能[50];(d)CPEA气凝胶对微塑料的吸附动力学[51]

Figure 9 (a) Mechanism of microplastic capture by BF/MFC aerogel[50]; (b) Zeta potential of raw materials and BF/MFC aerogel[50]; (c) Microplastic filtration performance in different water environments[50]; (d) Adsorption kinetics of CPEA aerogel on microplastics[51]

3.2.2 化学调控

武汉大学吴洋团队[45]基于超分子自组装的化学结构调控策略,利用纤维素与几丁质非共价键作用,仅通过调控纤维素与几丁质的分子组装方式,无需有毒交联剂,构建可自修复的生物质纤维框架(Ct-Cel)气凝胶.由图10(a)可知,该气凝胶在骨架上引入–OH、$–NH_3^+$、–NHCO–等大量活性官能团,可与主流微塑料形成静电、氢键、π-π堆积等多重特异性相互作用. 同时,其构筑孔隙率达97%的分级多孔结构,通过物理拦截与活性位点吸附的协同效应,对多种微塑料实现高效捕获. 由图10(b~c)可知,该气凝胶对PS微塑料的吸附容量高达

633.2 mg/g，且对PS、聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）、PET、PP等主流微塑料均能达到较高的吸附效率．此外，该材料在含泥沙、重金属、微生物的复杂水体中仍保持稳定的去除效率，首次循环对微塑料去除率达98.0%~99.9%，多次循环后吸附容量保留率超90%，为纤维素基气凝胶的绿色化学结构调控提供全新路径．Yang等[52]利用Zr^{4+}、Al^{3+}等金属离子与羧甲基纤维素（CMC）的配位作用，构建蜂窝-纤维双网络结构气凝胶．由图10（d）可知，此类材料通过超临界CO_2干燥制备，在80%应变下的压缩强度高达17.31 MPa，解决了传统气凝胶易碎难题．在微塑料去除性能方面，致密的三维网络结构提供丰富的附着位点，通过金属离子与微塑料表面官能团的配位作用及物理拦截效应，进一步提升截留稳定性，可适配复杂环境下的过滤需求．

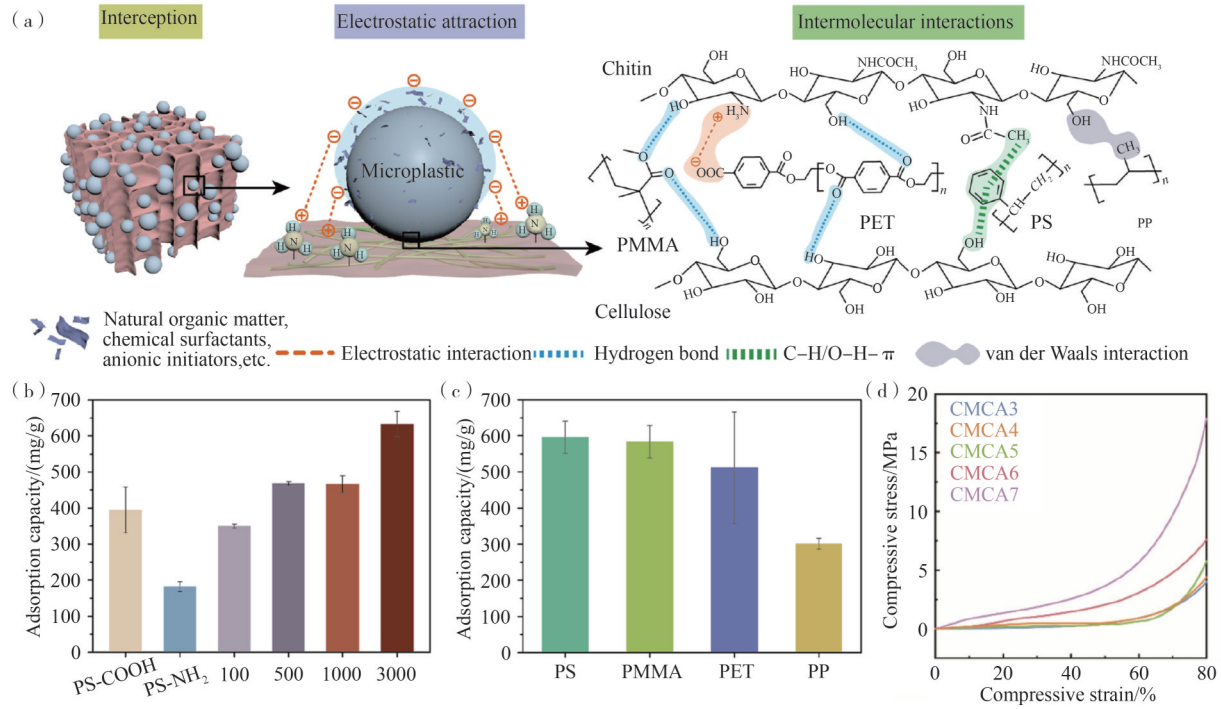


图10　（a）Ct-Cel气凝胶微塑料过滤机理[45]；（b）Ct-Cel气凝胶对不同PS微球的吸附容量[45]；（c）Ct-Cel气凝胶对PS、PMMA、PET、PP微塑料的吸附容量[45]；（d）CMC气凝胶的压缩应力-应变曲线[52]

Figure 10　(a) Mechanism of microplastic filtration by Ct-Cel aerogel[45]; (b) Adsorption capacity of Ct-Cel aerogel for different PS microspheres[45]; (c) Adsorption capacity of Ct-Cel aerogel for PS, PMMA, PET and PP microplastics[45]; (d) Compressive stress-strain curve of CMC aerogel[52]

3.3　构建多级孔与梯度结构

受天然木材层级取向孔道结构的启发，定向冷冻技术成为构建纤维素基气凝胶取向多级孔结构的核心手段．如图11（a）所示，该技术以冰晶为可移除的致孔模板，通过单向温度梯度调控冰晶的定向生长，干燥后即可形成与天然木材轴向孔道高度相似的取向多级孔结构，同时可通过调控工艺参数实现大孔-介孔-微孔复合的多级孔隙分布[53]．Lu等[54]以天然竹材为原料，先通过表面纳米晶化处理制备高活性竹纤维素纳米纤维，再以海藻酸钠为交联基体、钠基蒙脱土（Na-MMT）为功能填料，结合定向冷冻-冷冻干燥工艺与Ca^{2+}交联改性，成功制备具有仿天然木材取向通道结构的全天然纤维素复合气凝胶（BCSM）．该气凝胶通过定向冰晶模板的精准调控，形成轴向有序排列、径向均匀分布的分级多孔结构，其孔隙率高达99%，即使在Na-MMT填充量提升后，孔隙率仍稳定保持在96%以上，孔径主要介于40~100 μm，成功构建“大孔通水、微孔截留”的多级孔道体系．由图11（b~d）可知，该仿木取向结构同时赋予BCSM气凝胶显著的各向异性力学特性与优异的压缩回弹性能．图11（c）清晰展现BCSM气凝胶在压缩回弹过程中的结构形变与回弹机制，取向排列的孔壁结构可通过弹性形变耗散压缩应力，避免骨架的不可逆坍塌．性能测试结果显示，该气凝胶在80%的压缩应变下，轴向抗压强度达208.5 kPa，弹性模量达261.1 kPa，较传统无序结构纤维素基气凝胶提升4倍以上，较同类型无序孔CNF基气凝胶的压缩模量提升60%以上．优异的力学性能与抗压缩疲劳特性，能够保障该气凝胶在长期高压

过滤过程中孔道结构的完整性,避免因骨架坍塌导致的孔道堵塞与通量衰减,为微塑料过滤材料的长期稳定使用提供关键结构支撑. 江南大学付少海团队[55]通过溶剂交换辅助常压干燥,制备大面积非连续孔隙梯度纤维素基气凝胶(CNA),如图11(e)所示,该结构通过梯度孔径设计引导微塑料在材料内部有序分布,同时借助孔隙界面的多重反射效应增强捕获概率. 在微塑料过滤过程中,该非连续孔隙梯度结构展现出独特的传质与捕获优势. 梯度递减的孔径设计,可引导水体中不同粒径的微塑料在气凝胶内部不同深度有序分布,实现表层通量大粒径、中层截留中粒径、底层深度捕获小粒径的梯度过滤模式,从根本上避免传统均一孔气凝胶因微塑料在材料表面大量堆积形成滤饼层而导致孔道堵塞与通量骤降问题.

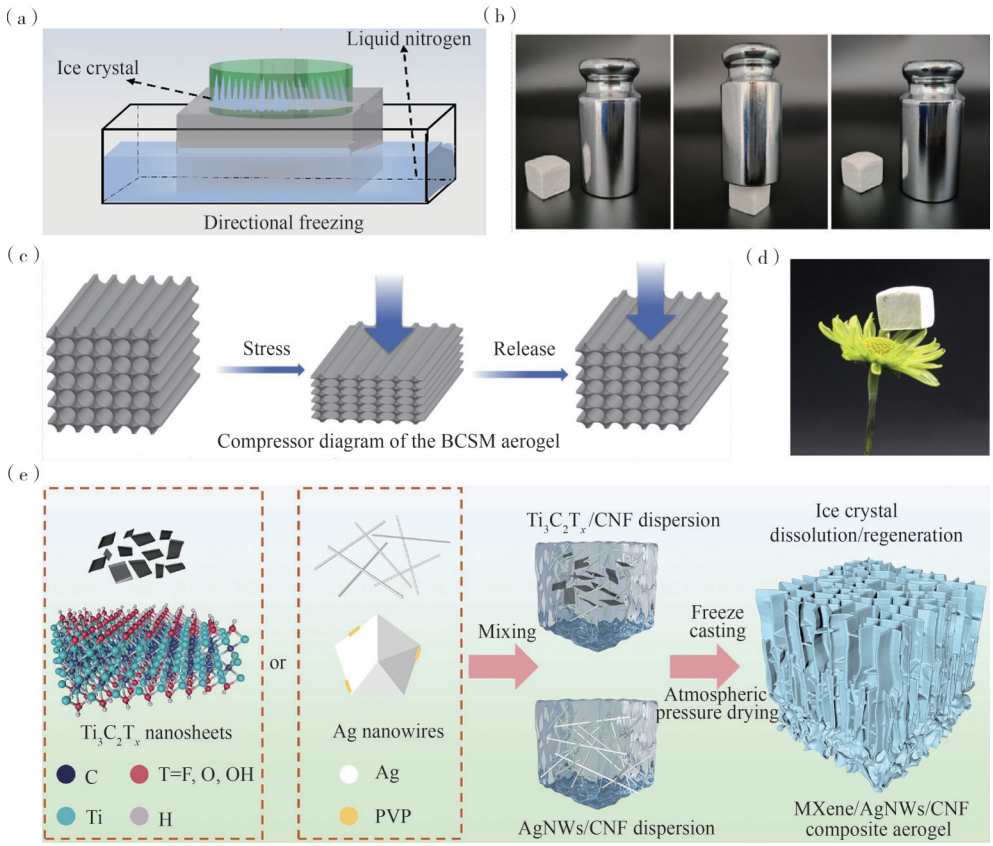


图11 (a)定向冷冻工艺[53];(b)BCSM气凝胶的压缩-回弹[54];(c)BCSM气凝胶压缩工艺[54];(d)将BCSM气凝胶置于花朵上[54];(e)常压干燥CNA制备工艺[55]

Figure 11 (a) Directional freezing process[53]; (b) Compression-rebound of BCSM aerogel[54]; (c) Compression process of BCSM aerogel [54]; (d) BCSM aerogel placed on a flower[54]; (e) Preparation process of CNA dried at atmospheric pressure[55]

3.4 循环再生方法与再生性能

高效的再生方法不仅可降低使用成本,还能减少二次污染. 目前,纤维素基气凝胶的再生方法主要分为物理再生、化学再生和光热再生,其优缺点对比见表2.

表 2 纤维素基气凝胶主要再生方法对比

Table 2 Comparison of main regeneration methods for cellulose-based aerogels

再生方法	原理	优点	缺点
物理再生[56]	通过挤压、洗涤、超声等物理作用 将吸附的微塑料从气凝胶表面剥离	操作简单、成本低 无需化学试剂	对强吸附的微塑料脱附 效果差,易造成孔道堵塞
化学再生[50]	使用有机溶剂、酸碱溶液等化学试剂 破坏气凝胶与微塑料间的相互作用	脱附效率高,可去除 强吸附的微塑料	易造成化学试剂二次 污染,可能破坏气凝胶结构
光热再生[48]	利用气凝胶的光热转换性能,通过光照 产生高温使微塑料分解或挥发	无需化学试剂,可同时 实现微塑料的脱附与降解	能耗较高,可能产生 有害气体

物理再生凭借绿色环保、操作简易、可连续化运行等优势，最契合实际水体修复工程需求．与传统水洗、超声剥离等低效方式不同，Su等[56]开发的半柔性纤维素基复合气凝胶可通过机械挤压触发结构可逆形变，依托分子间动态氢键与配位键协同重构作用，仅需10 s即可实现96%的微塑料脱附效率，脱附动力学速率较传统溶剂再生高出近3个数量级．外力卸载后，气凝胶内部氢键网络可自发重组恢复初始多级孔结构，无需额外试剂与复杂后处理．该材料经100次吸附-脱附循环后，仍可保持80.4%的吸附容量与95.2%的形状回复率，在农田灌溉水、湖泊及海水等真实复杂水体中均具备稳定再生性能，循环过程未出现明显的孔道坍塌与孔隙堵塞现象，为低成本、规模化工程应用提供新路径．化学再生以低盐电解质溶液为介质，依靠离子置换效应屏蔽气凝胶与微塑料表面静电引力，同时弱化分子间氢键作用，使吸附在孔道内部的微塑料平稳脱附解离．该再生方式条件温和，无需强酸强碱与有机溶剂腐蚀，可最大程度保留纤维素基气凝胶原有三维多孔骨架与表面活性位点．Feng等[50]研究发现，以低浓度氯化钠溶液为洗脱剂，通过简单浸泡即可实现改性纤维素基气凝胶的高效再生，经12次连续吸附-脱附循环后，对不同粒径微塑料的去除效率仍维持在94%以上，在长江、黄河等真实水体中再生性能无明显衰减．光热再生是近年兴起的绿色再生技术，通过在纤维素基气凝胶中引入高光热组分，利用宽光谱光能快速转换为界面热能，实现微塑料热解脱附，甚至原位降解．Wang等[48]研究的石墨烯复合纤维素基气凝胶具备优异的光热转换能力，光照下表面温度可快速升至120 ℃以上，高效破除微塑料与材料间的氢键、疏水等相互作用，实现快速再生．该再生方法全程无需化学试剂，可同步完成吸附与降解，8次循环后再生效率仍稳定在90%以上，且碳基填料在纤维素基体中分散均匀，循环过程不易脱落失效．

4　结 论

微塑料污染治理是当前水生态环境保护的重要课题，纤维素基气凝胶凭借高孔隙率、生物相容性及可降解等优势，成为微塑料过滤领域的核心候选材料．现有研究已建立包括溶解再生法等在内的多元制备体系，通过物理拦截与氢键、静电、π-π堆积等协同作用，实现不同类型微塑料的高效捕获．功能化改性策略进一步提升材料的过滤效率、循环稳定性与环境适配性，为其在真实水体中的应用奠定基础．

纤维素基气凝胶的研究虽已形成完整体系，但仍存在需要解决的瓶颈问题：一是规模化制备成本高，传统冷冻干燥和超临界干燥工艺能耗大、周期长，限制其大规模应用；二是复杂水体的干扰机制不明，真实水体中存在泥沙、重金属、有机物等共存污染物会与微塑料竞争吸附位点，影响过滤效率；三是长期循环性能不足，多次使用后吸附位点易被堵塞或失活，导致性能衰减；四是力学性能与湿态稳定性差，纯纤维素基气凝胶在高压过滤和复杂水流条件下易发生骨架坍塌和孔道变形，导致过滤通量骤降和截留效率衰减，严重限制其在实际水处理工程中的应用．未来研究可重点聚焦以下方向：一是深入研究多机制协同作用，阐明复杂水体中共吸附行为，为材料精准设计提供理论支撑；二是开发低成本规模化制备技术，优化绿色溶解与干燥工艺，探索连续化生产路线；三是研发多功能集成改性技术，构建集过滤、增强、抗菌于一体的高性能材料；四是开展全生命周期环境评估，确保材料的可持续性；五是加强集成应用研究，开发模块化过滤装置，探索其在污水处理、饮用水净化等场景的工程应用．纤维素基气凝胶在微塑料污染治理中的规模化应用，有望为水生态环境微塑料去除提供绿色高效的技术路径，为构建可持续的水生态环境治理体系提供重要支撑．

参考文献：

[1] Andrady A L，Neal M A．Applications and societal benefits of plastics[J]．Philosophical Transactions of the Royal Society B：Biological Sciences，2009，364(1526)：1977-1984．

[2] 胡佳玲，张天龙，陈杰，等．微塑料在食品中的来源及其检测技术研究进展[J]．分析测试学报，2021，40(11)：1672-1680．Hu J L，Zhang T L，Chen J，et al．Research progresses on source of microplastics in food and their identification technology[J]．Journal of Instrumental Analysis，2021，40(11)：1672-1680．(in Chinese)

[3] Almroth B M C，Åström L，Roslund S，et al．Quantifying shedding of synthetic fibers from textiles：A source of microplastics released into the environment[J]．Environmental Science and Pollution Research，2018，25(2)：1191-1199．

[4] Laskar N，Kumar U．Plastics and microplastics：A threat to environment[J]．Environmental Technology & Innovation，2019，14：100352．

[5] Meng X G, Yuan J, Huang Q, et al. A review of sources, hazards, and removal methods of microplastics in the environment[J]. Water, 2025, 17(1): 102.

[6] Kosior E, Crescenzi I. Solutions to the plastic waste problem on land and in the oceans[M]//Letcher T M. Plastic waste and recycling. San Diego: Academic Press, 2020: 415-446.

[7] 骆永明,周倩,章海波,等. 重视土壤中微塑料污染研究 防范生态与食物链风险[J]. 中国科学院院刊,2018,33(10):1021-1030.
Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, et al. Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(10): 1021-1030. (in Chinese)

[8] Kirthika V, Bhagya L, Kariyawasam C, et al. Microplastics in aquatic environment: Fate, human exposure, removal and advances of nanotechnology in remediation[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2026, 23(4): 268.

[9] Liu H C, Wen Y, Xu J K. Comparative study of polystyrene microplastic transport behavior in three different filter media: Quartz sand, zeolite, and anthracite[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2024, 265: 104395.

[10] Hachemi C, Enfrin M, Rashed A O, et al. The impact of PET microplastic fibres on PVDF ultrafiltration performance: A short-term assessment of MP fouling in simple and complex matrices[J]. Chemosphere, 2023, 310: 136891.

[11] He L Z, Chen Z Q. Emerging porous materials for adsorptive removal of microplastics and nanoplastics from aquatic environments: A review[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(50): 67457-67488.

[12] Ganesan M, Nallathambi G. Functionalized natural fibre composite filter for the removal of microplastics and heavy metal ions from water[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 21(3): 2747-2764.

[13] Long L Y, Weng Y X, Wang Y Z. Cellulose aerogels: Synthesis, applications, and prospects[J]. Polymers, 2018, 10(6): 623.

[14] Liu S, Li W W, Wang X Y, et al. Permeable, stretchable, and recyclable cellulose aerogel on-skin electronics for dual-modal sensing and personal healthcare[J]. ACS Nano, 2025, 19(3): 3531-3548.

[15] Cai J, Zhang L N. Rapid dissolution of cellulose in LiOH/urea and NaOH/urea aqueous solutions[J]. Macromolecular Bioscience, 2005, 5(6): 539-548.

[16] Gong C, Ni J P, Tian C, et al. Research in porous structure of cellulose aerogel made from cellulose nanofibrils[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 172: 573-579.

[17] Gnanaseelan M, Chen Y A, Luo J J, et al. Cellulose-carbon nanotube composite aerogels as novel thermoelectric materials[J]. Composites Science and Technology, 2018, 163: 133-140.

[18] 张曼,牧丹,张屏,等. 天然多糖作为核酸载体的研究[J]. 高分子通报,2024,37(3):297-308.
Zhang M, Mu D, Zhang P, et al. Studies on natural polysaccharides used as nucleic acid carriers[J]. Polymer Bulletin, 2024, 37(3): 297-308. (in Chinese)

[19] Medronho B, Romano A, Miguel M G, et al. Rationalizing cellulose(in)solubility: Reviewing basic physicochemical aspects and role of hydrophobic interactions[J]. Cellulose, 2012, 19(3): 581-587.

[20] Jiang Z W, Fang Y, Ma Y P, et al. Dissolution and metastable solution of cellulose in NaOH/thiourea at 8 ℃ for construction of nanofibers[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2017, 121(8): 1793-1801.

[21] Li W, Ogawa Y, Perez J, et al. Fivefold helical cellulose trapped in a sulfuric acid framework[J]. Crystal Growth & Design, 2022, 22(1): 20-25.

[22] Khaliq Z, Kim B C. Molecular characterization on the anomalous viscosity behavior of cellulose solutions in *N*, *N*-dimethyl acetamide and lithium chloride[J]. Macromolecular Research, 2016, 24(5): 463-470.

[23] Zhang H, Lang J Y, Lan P, et al. Study on the dissolution mechanism of cellulose by ChCl-based deep eutectic solvents[J]. Materials, 2020, 13(2): 278.

[24] 韦嘉盛,戴磊,贺瓶. 基于纤维素及其衍生物的凝胶材料设计[J]. 复合材料学报,2022,39(7):3084-3103.
Wei J S, Dai L, He P. Design of gel materials with cellulose and its derivatives[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3084-3103. (in Chinese)

[25] Baraka F, Morales A, Velazco-Cabral I, et al. Physically cross-linked cellulose nanofiber(LCNF/CNF)hydrogels: Impact of the composition on mechanical and swelling properties[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2025, 8(1): 151.

[26] Chen X J, Lin J, Wang H W, et al. Epoxy-functionalized polyethyleneimine modified epichlorohydrin-cross-linked cellulose aerogel as adsorbents for carbon dioxide capture[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 302: 120389.

[27] Fan P D, Yuan Y L, Ren J K, et al. Facile and green fabrication of cellulosed based aerogels for lampblack filtration from waste newspaper[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 162: 108-114.

[28] 尹园园, 田秀枝, 翁佛全, 等. 2-(1-氨基-8-萘酚-3, 6-二磺酸钠)-4, 6-二氯-1, 3, 5-三嗪改性微晶纤维素的制备与水解[J]. 化工新型材料, 2015, 43(12): 36-38.
Yin Y Y, Tian X Z, Weng F Q, et al. Preparation and hydrolysis of cellulose modified by 2-(1-amino-8-naphthol-3, 6-disulfonic acid sodium)-4, 6-dichloro-1, 3, 5 triazine[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(12): 36-38. (in Chinese)

[29] Yu Q Q, Yang L Y, Wang S J, et al. Citric acid cross-linked regenerated bacterial cellulose as biodegradable film for food packaging[J]. Cellulose, 2023, 30(16): 10273-10284.

[30] Ma Y B, You X, Rissanen M, et al. Sustainable cross-linking of man-made cellulosic fibers with poly(carboxylic acids)for fibrillation control[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(49): 16749-16756.

[31] Li Y Z, Grishkewich N, Liu L L, et al. Construction of functional cellulose aerogels via atmospheric drying chemically cross-linked and solvent exchanged cellulose nanofibrils[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 366: 531-538.

[32] Sui S Y, Quan H F, Wang J X, et al. Core-shell design for nanocellulosic aerogels by bioinspired spider web-like structure[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 477: 146729.

[33] Darpentigny C, Nonglaton G, Bras J, et al. Highly absorbent cellulose nanofibrils aerogels prepared by supercritical drying[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115560.

[34] Jiao Y, Wan C C, Li J. Synthesis of carbon fiber aerogel from natural bamboo fiber and its application as a green high-efficiency and recyclable adsorbent[J]. Materials & Design, 2016, 107: 26-32.

[35] He S C, Li J T, Cao X D, et al. Regenerated cellulose/chitosan composite aerogel with highly efficient adsorption for anionic dyes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 244: 125067.

[36] Li X F, Ba X R, Dai Y F, et al. Silk nanofibrillar aerogel as sustainable filters for environmental purification[J]. Small, 2025, 21(12): 2500226.

[37] Ma X Y D, Zeng Z H, Wang Z, et al. Robust microhoneycomb-like nanofibrous aerogels derived from cellulose and lignin as highly efficient, low-resistant and anti-clogging air filters[J]. Journal of Membrane Science, 2022, 642: 119977.

[38] Zhuang J, Pan M Z, Zhang Y H, et al. Rapid adsorption of directional cellulose nanofibers/3-glycidoxypropyltrimethoxysilane/polyethyleneimine aerogels on microplastics in water[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 235: 123884.

[39] Yang Y C, Yan W J, Ma J, et al. Fish gill-inspired bidirectional porous polysaccharide aerogels for micro/nanoplastics removal[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(46): 63488-63499.

[40] Tang K H D, Li R H. The effects of plastisphere on the physicochemical properties of microplastics[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2025, 48(1): 1-15.

[41] Zhu G J, Wang J, Wang X T, et al. Aerogels fabricated from wood-derived functional cellulose nanofibrils for highly efficient separation of microplastics[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(38): 13928-13938.

[42] Lindman B, Medronho B, Alves L, et al. The relevance of structural features of cellulose and its interactions to dissolution, regeneration, gelation and plasticization phenomena[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2017, 19(35): 23704-23718.

[43] Wu Y, Ye C H, Liu F T, et al. Highly efficient, recyclable microplastic adsorption enabled by chitin hydrogen bond network rearrangement[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(32): 2311075.

[44] 王洁, 王晓彤, 朱高坚, 等. 纳米纤维素气凝胶构建及其过滤聚苯乙烯微塑料性能研究[J]. 中国造纸学报, 2023, 38(3): 104-112.
Wang J, Wang X T, Zhu G J, et al. Construction of nanocellulose aerogel and its filtration properties for polystyrene microplastics[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2023, 38(3): 104-112. (in Chinese)

[45] Wu Y, Chen S X, Wu J, et al. Revivable self-assembled supramolecular biomass fibrous framework for efficient microplastic removal[J]. Science Advances, 2024, 10(48): eadn8662.

[46] Babu S S, Praveen V K, Ajayaghosh A. Functional π-gelators and their applications[J]. Chemical Reviews, 2014, 114(4): 1973-2129.

[47] Yang J H, Jia W C, Wu L, et al. Compressible lignin-enhanced holocellulose aerogel for adsorption applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2026, 381: 125116.

[48] Wang X C, Song J S, Mao X F, et al. Synthesis of flashed graphene nanocellulose aerogel for microplastic adsorption in

aquatic environment[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2025,13(5):117530.
[49] Liu H Y,Xu T,Cai C Y,et al. Multifunctional superelastic, superhydrophilic, and ultralight nanocellulose-based composite carbon aerogels for compressive supercapacitor and strain sensor[J]. Advanced Functional Materials,2022,32(26):2113082.
[50] Feng Y F,Yu Y Q,Xi T T,et al. Scalable bamboo fiber/microfibrillated cellulose foam via solvent-exchange-assisted ambient drying for highly efficient microplastics capture[J]. Advanced Functional Materials,2026,36(9):e14273.
[51] Zhuang J,Rong N N,Wang X R,et al. Adsorption of small size microplastics based on cellulose nanofiber aerogel modified by quaternary ammonium salt in water[J]. Separation and Purification Technology,2022,293:121133.
[52] Yang Y F,Sui S Y,Lu Y F,et al. Nanoporous carboxymethyl cellulose aerogels with enhanced thermal insulation and mechanical toughness[J]. Carbohydrate Polymers,2025,361:123634.
[53] Zang K L,Wang X M,Liu L Y,et al. Thermal insulation and antibacterial honeycomb aerogel derived from carboxymethyl chitosan for integrated sound absorption[J]. Cellulose,2024,31(6):3573-3588.
[54] Lu Y Y,Qin Z Y,Gao W,et al. An all-natural wood-inspired cellulose nanofiber composite aerogel for superior thermal insulation and flame retardancy[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2025,318:145190.
[55] Mao Y S,Sheng Y H,Fan Z Y,et al. Atmospheric pressure dried discontinuous pore gradient structured CNF-based aerogel for ultra-low reflection,broadband,and super-high EMI shielding[J]. Advanced Functional Materials,2025,35(25):2421492.
[56] Su W T,Wang R M,Yan P F,et al. Compression-triggered instantaneous nanoplastic release from dynamic hydrogen-bonded LDH@cellulose semi-flexible micro-nano aerogel for sustainable water remediation[J]. Advanced Functional Materials,2026,36(33):e26566.

责任编辑：岳荣强