

引用格式:许梦萍,刘川,俞润昊,等.生物质基气凝胶在水体净化及热保护应用中的研究进展[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2026,44(3):48-57. [Xu Mengping, Liu Chuan, Yu Runhao, et al. Research progress of biomass-based aerogels in water purification and thermal protection applications[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2026, 44(3): 48-57.]

# 生物质基气凝胶在水体净化及热保护 应用中的研究进展

许梦萍<sup>1</sup>, 刘川<sup>1</sup>, 俞润昊<sup>2</sup>, 李蓉<sup>2</sup>, 黄安荣<sup>3</sup>, 左晓玲<sup>2\*</sup>

(1. 贵州民族大学 物理与机电工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州民族大学 材料科学与工程学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 国家复合改性聚合物材料工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550014)

**摘要:** 生物质基气凝胶(BAs)具有原料来源广泛、可生物降解、密度低、比表面积大、孔隙率高等优势,在污染物吸附、热保护等方面应用潜力巨大。通过梳理 BAs 的分类及制备方法(包括溶胶-凝胶法、超临界干燥、3D 打印等),重点分析了其在水体净化、热保护领域的微观作用机制,同时针对当前 BAs 面临的挑战,提出未来可聚焦于低成本干燥工艺(降低结构塌陷)及多功能集成设计(实现协同作用)的研发、稳定填料的引入或可逆结构的构建(增强热稳定性)等方向。

**关键词:** 气凝胶; 生物质材料; 水体净化; 吸附; 热保护

中图分类号: TQ427 文献标识码: A 文章编号: 1004—5570(2026)03—0048—10

DOI: 10.16614/j.gznunj.zrb.2026.03.005

## Research progress of biomass-based aerogels in water purification and thermal protection applications

Xu Mengping<sup>1</sup>, Liu Chuan<sup>1</sup>, Yu Runhao<sup>2</sup>, Li Rong<sup>2</sup>,  
Huang Anrong<sup>3</sup>, Zuo Xiaoling<sup>2\*</sup>

(1. College of Physics and Electromechanical Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. National Engineering Research Center for Compounding and Modification of Polymeric Materials, Guiyang, Guizhou 550014, China)

**Abstract:** Biomass-based aerogel (BAs) has advantages such as wide raw material sources, biodegradability, low density, large specific surface area and high porosity, and has great application potential in pollutant adsorption, thermal protection and other aspects. This paper, by sorting out the classification and preparation methods of BAs (including sol-gel method, supercritical drying, 3D printing, etc.), focuses on analyzing its microscopic mechanism of action in the fields of water purification and thermal protection. At the same time, in response to the current challenges faced by BAs, It is pro-

收稿日期: 2025-08-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(12304482); 贵州省科技计划重点项目(黔科合基础 ZD[2025]025; 黔科合基础 ZK[2022]重点 029), 贵州民族大学科研创新团队项目(GZMUZK[2023]CXTD01)

\* 通信作者: 左晓玲(1989-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 可见光固化技术, E-mail: shanghai0401@163.com.

posed that in the future, efforts can be focused on the research and development of low-cost drying processes (to reduce structural collapse) and multi-functional integrated designs (to achieve synergistic effects), the introduction of stable fillers, or the construction of reversible structures (to enhance thermal stability).

**Keywords:** aerogel; biomass materials; water purification; adsorb; thermal protection

## 0 引言

随着社会与工业化的快速发展,水体污染已成为当前最严峻的全球性环境问题之一<sup>[1-2]</sup>。天然水体质量的不断恶化、可用水资源的日益紧缺,对生态环境及人类健康均构成严重威胁<sup>[3-5]</sup>。而传统的水处理材料(非生物质气凝胶),原料大多取自不可再生资源,且高能耗制备过程中产生的污染及难以降解的废弃物,又会导致二次污染<sup>[6]</sup>。因此,研发高效、可持续的水处理材料十分必要<sup>[7]</sup>。

生物质基气凝胶源自可再生资源,具有可生物降解、低密度、高比表面积、三维多孔结构等特点,是一种环境友好型新材料,其既能作为建筑领域的隔热防护材料,也能作为高效去除水体、空气中重金属等污染物的吸附剂<sup>[8-14]</sup>。如:Cao等<sup>[15]</sup>以壳聚糖和植酸为原料,通过物理交联与定向冻结技术,制备出导热系数低、隔热性能优异的生物质基气凝胶;Priya等<sup>[16]</sup>将生物质废弃物转化为生物气凝胶,不仅实现废弃物资源化,减少填埋压力,同时材料表面丰富的官能团与孔隙结构也能高效吸附去除废水中的污染物。除此外,还有研究结合3D打印技术,精准构建了生物质基气凝胶的蜂窝、仿生等宏观结构,使其在热防护及污水处理的材料应用中被最大化<sup>[17-18]</sup>,这些研究均为全球水体污染的处理及热防护能力的提升提供了一种新的思路。

## 1 生物质基气凝胶

生物质基气凝胶是以生物质(动物、植物、微生物等)的天然高分子为主要骨架,经过系列制备工艺得到的轻质固态材料。基于核心骨架材料的不同,生物质基气凝胶主要分为纤维素基气凝胶<sup>[19]</sup>、壳聚糖基气凝胶<sup>[20]</sup>、蛋白质基气凝胶<sup>[21]</sup>、海藻酸钠基气凝胶<sup>[22]</sup>等。

### 1.1 纤维素基气凝胶

纤维素基气凝胶是以天然纤维素或其衍生物为原料,经溶胶-凝胶后干燥制备的多孔材料,兼具

原料可再生、生物相容性好等优势,其化学改性结构与结构调控均能引入特定的活性位点<sup>[23]</sup>,进而显著拓展功能应用。

在吸附性能方面,纤维素基气凝胶具有三维多孔网络结构的高比表面积,能极大增加与污染物的接触面积<sup>[24]</sup>。其吸附机制既有物理截留与范德华力作用,也有官能团的吸附,即:纤维素分子中的羟基(-OH)可通过氢键结合极性污染物,改性引入的羧基(-COO<sup>-</sup>)或氨基(-NH<sup>3+</sup>)可通过静电作用高效捕获阳离子或阴离子型污染物。Camparotto等<sup>[25]</sup>开发了基于壳聚糖、纳米纤维素与疏水化单宁酸(CS@CNC-HTA)的疏水气凝胶微球。结果显示,当壳聚糖与CNC-HTA比例为1:1时,微球综合性能最佳,孔隙率约达98%,水接触角达93.8°,对西地那非、碱性蓝26及十六烷基吡啶氯化物的吸附容量分别达86、375、390 mg·g<sup>-1</sup>。该研究弥补了疏水气凝胶在溶解有机污染物吸附领域的不足,为开发绿色水处理材料提供了新参考。在隔热与阻燃方面,纤维素基气凝胶的多孔结构可有效抑制热对流与传导,其中热导率能通过调控孔隙分布与密度进行优化。Soto等<sup>[26]</sup>研究显示,小麦秸秆与回收纸浆的复合隔热材料,在密度为80 kg·m<sup>-3</sup>时,导热系数可达0.036 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,在纸浆比例超过30%时,阻燃性能显著提升。此外,氮、磷等阻燃元素的引入也可显著提升纤维素基气凝胶的阻燃性能,它们在受热时能催化纤维素脱水成炭,形成隔热隔氧的膨胀炭层,并释放不可燃气体,实现气相与凝聚相的协同阻燃。可见,纤维素基气凝胶的“结构可调、功能可设计”特性,在环境修复、绿色材料领域有巨大应用潜力。

### 1.2 壳聚糖基气凝胶

壳聚糖(CS)是一种由甲壳素去乙酰化得到的天然多糖,其链上的葡萄糖胺与N-乙酰葡萄糖胺单元富含氨基与羟基。这些官能团不仅赋予材料良好的亲水性,也为其构建气凝胶、实现吸附阻燃等功能提供结构基础<sup>[27]</sup>。

壳聚糖基气凝胶通过结构中的氨基、羟基实现“螯合-屏障强化”双重功能:氨基既可质子化以吸

附阴离子污染物或螯合重金属,也可分解释放不可燃气体实现气相阻燃;蒙脱土与聚磷酸铵的引入,在隔热、催化成炭与延缓氧化后会协同增强凝聚相阻燃。另外,气凝胶自身的高比表面积、丰富的界面也为污染物的吸附提供了大量的活性位点,从而拓宽其功能应用。An 等<sup>[28]</sup>开发的 CNF/CS/PVA/SRrh6G 复合气凝胶,具有超低密度、高比表面积、水下超疏油性(油接触角  $159^\circ$ )等特性,在该气凝胶中嵌入的荧光探针不仅能与  $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Ag}^+$  等多种金属离子及强酸发生颜色与荧光响应(实现可视化检测),同时对  $\text{Fe}^{3+}$  的吸附量也达  $22.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。该研究为开发吸附-检测一体化的智能材料提供了范例。然而,壳聚糖基气凝胶的高孔隙结构却易受水或油类液体渗透(隔热性能下降及机械强度损失),可引入阻燃剂与无机纳米填料、调控冷冻温度梯度引导冰晶的定向生长。Sun 等<sup>[29]</sup>以壳聚糖/蒙脱土为基体,辅以纤维素纳米纤维,通过交联、定向冷冻等工艺,制备出了高强度、耐热、阻燃、超双疏特性的生物质复合气凝胶,该气凝胶在水、油等苛刻环境中仍保持良好的隔热性能。可见,具有可调控的多孔结构、丰富的表面官能团及良好生物相容性的壳聚糖基气凝胶,能为高性能绿色材料的设计与制备、可持续发展目标提供新的解决方案。

### 1.3 蛋白质基气凝胶

蛋白质基气凝胶是以天然蛋白质为原料构建的多孔轻质材料,既有气凝胶的高孔隙率、低密度特性,又有蛋白质的生物相容性、可生物降解性,该气凝胶通过溶剂、疏水处理或基团修饰等方式可实现功能扩展<sup>[30-31]</sup>。

蛋白质基气凝胶复杂的二级与三级结构,在氢键、疏水作用下能形成稳定的三维网络,多肽链侧链上富含的  $-\text{COOH}$ 、 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{SH}$ 、 $-\text{OH}$  等多种官能团,能赋予材料优异的吸附性能(如  $-\text{COOH}$  捕获  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $-\text{NH}_2$  结合阴离子染料、 $-\text{SH}$  强效络合  $\text{Hg}^{2+}$ )及可降解性与阻燃性。另外,蛋白质自组装形成的纳米纤维网络也可增大比表面积(增强物理吸附效果),在环境修复领域有广阔应用前景<sup>[32]</sup>。Prydayesh 等<sup>[33]</sup>研究显示,蛋白质纳米纤维表面丰富的官能团,可作为活性位点高效捕获多种污染物,对重金属离子、放射性物质、有机污染物的去除可提高 3~5 个数量级。此外,蛋白质分子中的酰胺键( $-\text{CONH}-$ )在高温下分解吸热,能释放  $\text{NH}_3$ 、 $\text{CO}_2$  等惰性气体,稀释可燃气体浓度,同时,侧链上的羧

基与氨基还能促进材料脱水炭化,形成多孔炭层(阻隔热氧传递),提升阻燃效果。Shi 等<sup>[34]</sup>将天然绒毛纤维(DF)与蚕丝蛋白(SF)复合,冷冻干燥后制备出了三维增强结构的 DF@SF 气凝胶,该材料在保持良好热绝缘性能的同时,机械性能也显著提升,此研究可为研发高性能绿色隔热材料提供参考。

### 1.4 海藻酸钠基气凝胶

海藻酸钠(SA)是一种由 M/G 单元通过 1→4 糖苷键连接而成的天然聚阴离子多糖,分子中丰富的羧基与羟基,能赋予材料“高效吸附-本征阻燃”的双重功能。在吸附方面,羧基电离后除了能通过静电作用捕获阳离子污染物,还能与  $\text{Ca}^{2+}$  通过“蛋盒”模型交联构建稳固的三维多孔骨架。在阻燃方面,受热时 SA 中的羧酸钠能催化糖环脱水成炭,形成致密炭层,同时糖苷键断裂释放不可燃气体,实现凝-气相协同阻燃。Su 等<sup>[35]</sup>基于海藻酸钠/羧化壳聚糖/蒙脱土(MSC)骨架,通过 PEI 修饰和  $\text{Ca}^{2+}$  交联制得的 MSC-P 气凝胶,在静电吸引、氢键、 $\text{Ca}^{2+}$  桥联等机制下,对亚甲基蓝、刚果红、 $\text{Cu}(\text{II})$  表现出  $723.97$ 、 $1573.21$ 、 $203.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  的高吸附量,且 10 次循环后的去除率也仍保持良好。通常,热量的传递主要有固体传导、气体对流与传导、辐射传热 3 种途径,而海藻酸钠基气凝胶在 3 种途径中均表现出优异的抑制能力。Zhang 等<sup>[36]</sup>通过植酸/金属离子两步交联与反式肉桂酸改性,成功制备了超轻疏水的海藻酸钠基气凝胶,该材料密度仅为  $0.04 \sim 0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,热导率低至  $0.040 \sim 0.045 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (在  $100 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$  温域内隔热性能优异),极限氧指数高达 50.1% 并通过 UL-94 V-0 级,高阻燃性可归因于植酸与金属离子构建的协同阻燃体系,植酸释放的磷自由基捕获气相中的活性自由基,同时金属离子催化藻酸盐脱羧成炭,形成致密保护层,反式肉桂酸改性赋予了材料优异的疏水稳定性,为其实际应用提供了关键保障。

## 2 生物质基气凝胶的制备

图 1 为生物质基气凝胶的制备方法<sup>[37]</sup>。具体为:溶胶-凝胶法是制备的基础阶段,生物质原料溶解于特定溶剂中,在催化剂作用下发生水解-缩聚反应,形成具有纳米纤维结构的水凝胶<sup>[38]</sup>;超临界干燥技术是避免结构坍塌的关键步骤,其利用气液界面张力的消除来实现溶剂的无破坏去除<sup>[39]</sup>。近

年来,3D打印技术的兴起为生物质基气凝胶的制备带来了突破,通过优化生物质墨水的流变特性与固化,实现三维结构定制,为构建复杂几何器件等应用提供新途径。

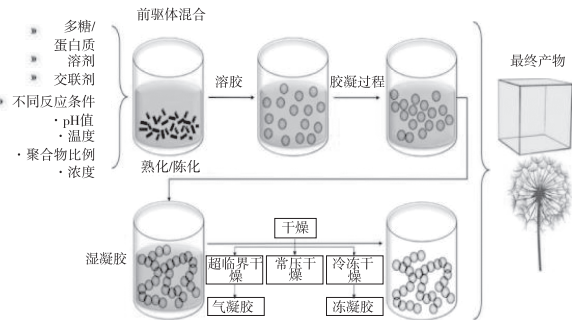


图1 生物质基气凝胶的制备方法<sup>[37]</sup>

Fig. 1 The preparation method of bio-based aerogel<sup>[37]</sup>

## 2.1 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法在无机、有机材料的制备中应用广泛<sup>[40]</sup>。在生物质基气凝胶制备中,通常使用木质纤维素、纤维素、海藻等天然生物质原料,通过水解、酸碱处理去除内部杂质,增强其化学活性(更易与其他化学物质反应),此过程中,生物质原料与金属醇盐或其他无机盐反应,形成具有高化学活性的溶胶,溶胶发生水解-缩合反应后形成分散小粒子。对生物质基气凝胶而言,选择与生物质相容性较好的无机盐作为反应源(如TEOS与生物质的纤维素成分进行反应),能形成可控结构的生物质基溶胶,其含有的生物质成分能起到增强溶胶稳定性、提高气凝胶性能的作用。这源于生物质分子和金属离子之间的化学键合作用及生物质分子之间的物理相互作用(如氢键、范德华力等),共同促进了凝胶的形成,缩聚反应后,凝胶中的固体骨架形成,液相部分被包裹在固体骨架的孔隙中,溶胶稳定性得以增强。通过热处理(如高温煅烧)去除残留有机成分,可有效提升生物质基气凝胶的耐高温性和化学稳定性。此外,浸渍、掺杂等方法引入的氨基、羟基、金属离子等功能组分,还能针对性地增强其吸附性能。虽然溶胶-凝胶法制备的生物质基气凝胶具有很多优点<sup>[41]</sup>,但受原料来源、预处理及反应条件的影响,仍需精确的工艺控制,另外,气凝胶在高温或高湿环境下的稳定性较差,也限制了其在某些极端条件下的应用<sup>[42]</sup>。因此,如何提高生物质基气凝胶的热稳定性、机械强度、环境适应性,是当前研究的重点。

## 2.2 超临界干燥法

传统干燥法制备气凝胶时,溶剂逸出产生的毛

细力会导致结构坍塌,引发团聚、收缩、裂纹,致使比表面积和孔隙率显著下降<sup>[43]</sup>。超临界干燥法(Supercritical drying, SCD)是将干燥介质(如CO<sub>2</sub>)加热至超过临界温度并加压至临界压力,使流体处于超临界状态。在该状态下,不存在液-气界面(毛细力为零),只有液体的溶解能力和气体的低粘度,它们能高效渗透并带走胶体中的溶剂(从根本上避免相变过程中产生的表面张力),从而有效防止结构收缩、形变或纳米粒子团聚<sup>[44]</sup>。该工艺制备出的气凝胶,具有开放式纳米级孔结构,能赋予材料优异的物理化学性能。如Baraka等<sup>[45]</sup>发现纤维素纳米纤维(CNF)与含木质素的木质纤维素纳米纤维(LCNF)在不同浓度(1%~2%)下,经超临界CO<sub>2</sub>干燥或冷冻干燥制备的气凝胶,其结构、形貌、性能均产生了影响。结果显示:超临界干燥样品密度更低、比表面积更高、冷冻干燥收缩最小,可保持规则外观与更高孔隙率;所有气凝胶均呈蜂窝层片孔结构,其中超临界样品孔径分布更窄,冷冻样品因二次冰晶挤压出现粗大开放通道。该研究揭示了“成分-干燥方式-结构-性能”之间的复杂关联,尤其是木质素结合丙酮超临界干燥可在保持高比表面积的同时增强力学性能。虽然SCD在保持精细孔结构方面具有显著优势,但高压设备成本高昂、操作复杂,且对压力、温度、溶剂置换等工艺参数的精准控制要求极高,限制了其在工业上的推广。此外,超临界CO<sub>2</sub>对极性或非极性溶剂的溶解效率有限,需在干燥前进行严格的溶剂交换(如乙醇、丙酮)。因此,设备规模化、精细调控参数、绿色溶剂体系的构建及高极性溶剂的处理方式,是工业化制备生物质基气凝胶的突破点。图2为超临界干燥法示意图<sup>[46]</sup>。

## 2.3 3D打印技术

3D打印技术作为一种增材制造方式,是通过“结构即功能”理念实现复杂宏观造型与纳米孔结构的精准整合,其与SCD结合制得的气凝胶兼具大孔孔道和纳米孔网络结构,所制备的吸附剂及高效隔热材料的性能均优于传统制备的气凝胶材料。步骤:1)采用逐层堆叠材料的方式先将数字模型转化成实体,再根据自身需要三维建模;2)建模后,对模型切片处理并设置打印参数(层厚、填充密度等),打印机根据指令逐层沉积或固化材料(金属、塑料、树脂等);3)通过清洗、打磨(烧结)等处理工序完善打印成品<sup>[47]</sup>。早期的气凝胶主要依赖直写成型(DIW)、冷冻辅助直写(FADIW)等传

统技术,大多存有材料受限、复杂结构保真度差、生物相容性较差等问题,而3D打印技术因与材料设计充分结合,可实现镂空、多孔、拓扑优化等轻量化设计,具有精度更高、几何复杂性更高、时空控制性较好等特点<sup>[48-49]</sup>。图3为3D打印气凝胶步骤及不同时段3D打印气凝胶的照片<sup>[50]</sup>。Liu等<sup>[51]</sup>基

于3D打印技术,以未漂白杨木浆为原料,通过TEMPO氧化-超声法,制备出兼具高效隔热、疏水性优异、机械强度高的木质纤维素纳米纤维气凝胶。可见,3D打印技术能为气凝胶在建筑隔热、定制化设计等领域开辟更广阔的空间。

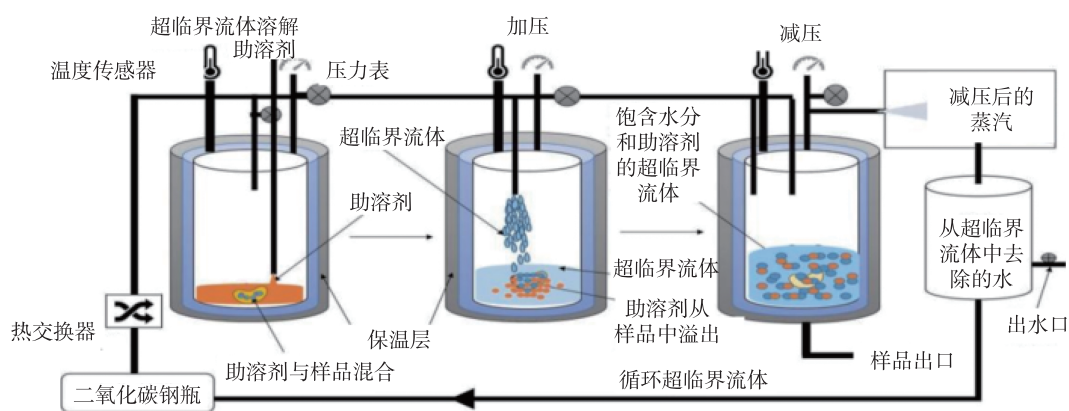


图2 超临界干燥法<sup>[46]</sup>

Fig. 2 The method of supercritical drying<sup>[46]</sup>

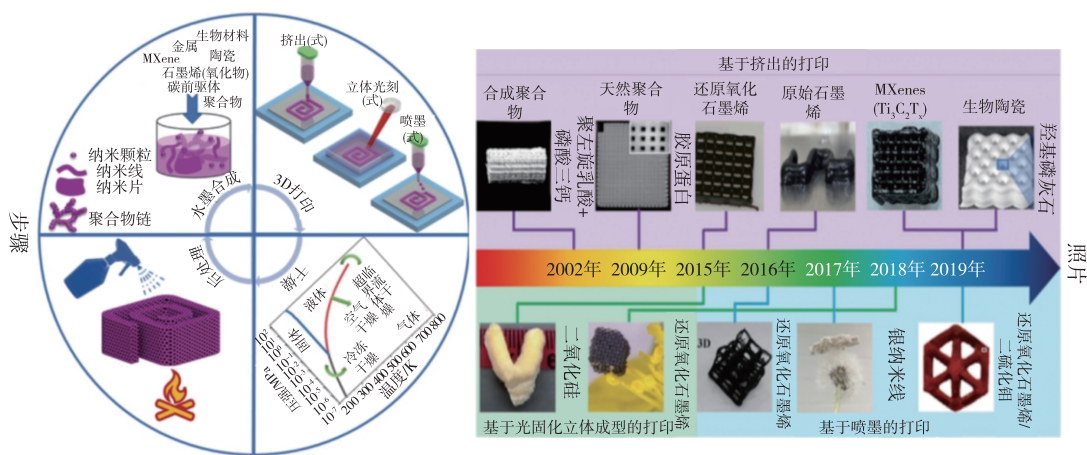


图3 3D打印气凝胶的步骤及不同时段3D打印照片<sup>[50]</sup>

Fig. 3 The steps of 3D printing aerogel and 3D printing photos at different time periods<sup>[50]</sup>

### 3 生物质基气凝胶的应用

#### 3.1 水体净化

生物质基气凝胶是由植物纤维、木质素、海藻等天然可再生材料构成的低密度多孔结构体,其高比表面积及可调孔径结构,在重金属、染料、有机污染物吸附等方面性能卓越<sup>[52-54]</sup>。

污染物通过范德华力和孔道截留被可逆捕获于孔隙界面或通道中,气凝胶的多级孔结构构成了大量的吸附位点并缩短路径<sup>[18]</sup>。与传统碳基吸附剂相比,生物质基气凝胶不仅环保、资源可持续性,

其纤维素、木质素等官能团(如羧基、氨基和酚羟基),还可与重金属离子发生络合或静电结合<sup>[55-56]</sup>。如 Varamesh 等<sup>[57]</sup>的研究充分体现了生物质基气凝胶的设计优势:图4(a)是利用纳米纤维素(CF)、壳聚糖(CS)和柠檬酸(CA)等天然原料,制备了一种用于水污染治理的全生物基气凝胶(FBA);在纳米复合材料方向, Da 等<sup>[58]</sup>构建的CNC/GO复合气凝胶,能够吸附水中的各种污染物,见图4(b);图4(c)中纳米纤维素提供丰富的羟基和部分羧基、壳聚糖引入氨基和羟基、柠檬酸作为交联剂,发生静电相互作用,当吸附亚甲基蓝(MB)时,MB分子中带正电荷的硫和氮基团与

FBA 表面的负电性官能团发生强静电吸引,MB 的氨基与 FBA 的羟基或羧基之间形成氢键,对于 Cu(II) 离子,吸附主要通过羧基和氨基的配位作用实现,Cu(II) 与  $-\text{COO}^-$  和  $-\text{NH}_2$  形成络合物,使 FBA 对 MB 和铜离子的最大吸附量分别达到  $618.6$ 、 $205.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。为进一步拓展材料的多功能化,温英英<sup>[59]</sup>通过单宁酸与硅氧烷在纤维素表面构建了富含 N、O、S 官能团的涂层,所得气凝胶对 Cu(II)、氯仿的吸附量分别达  $45.6$ 、 $108 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,且兼具油水分离能力;图 4(d)是对各种染料如基础蓝 7(BB7)、罗丹明 B 表现出高达  $681$ 、 $516 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  的吸附能力,这源于 CNC 与 GO 表面的官能团 ( $-\text{COO}^-$ 、 $-\text{OSO}_3^-$ ) 通过静电作用吸附了 BB7, BB7

的芳香环与 GO 骨架发生了  $\pi$ - $\pi$  堆积,氨基与羟基形成氢键。在 BB7/MO 二元体系中, BB7 的  $\text{Cl}^-$  与 MO 的  $-\text{SO}_3^-$  的离子交换,此过程经 XPS 分析得以验证。

物理吸附方面,材料的高比表面积与多级孔道结构,共同构成了孔径筛分、范德华力、疏水作用等多种吸附机制的协同,从而实现了对污染物的高效快速去除。化学吸附方面,主要通过官能团的特异性反应实现。羧基、磺酸基等负电性基团与阳离子污染物发生静电吸引,羟基、氨基等极性基团通过氢键作用结合特定污染物。两类机制的共同作用,赋予了材料高效、快速的污染物去除能力。

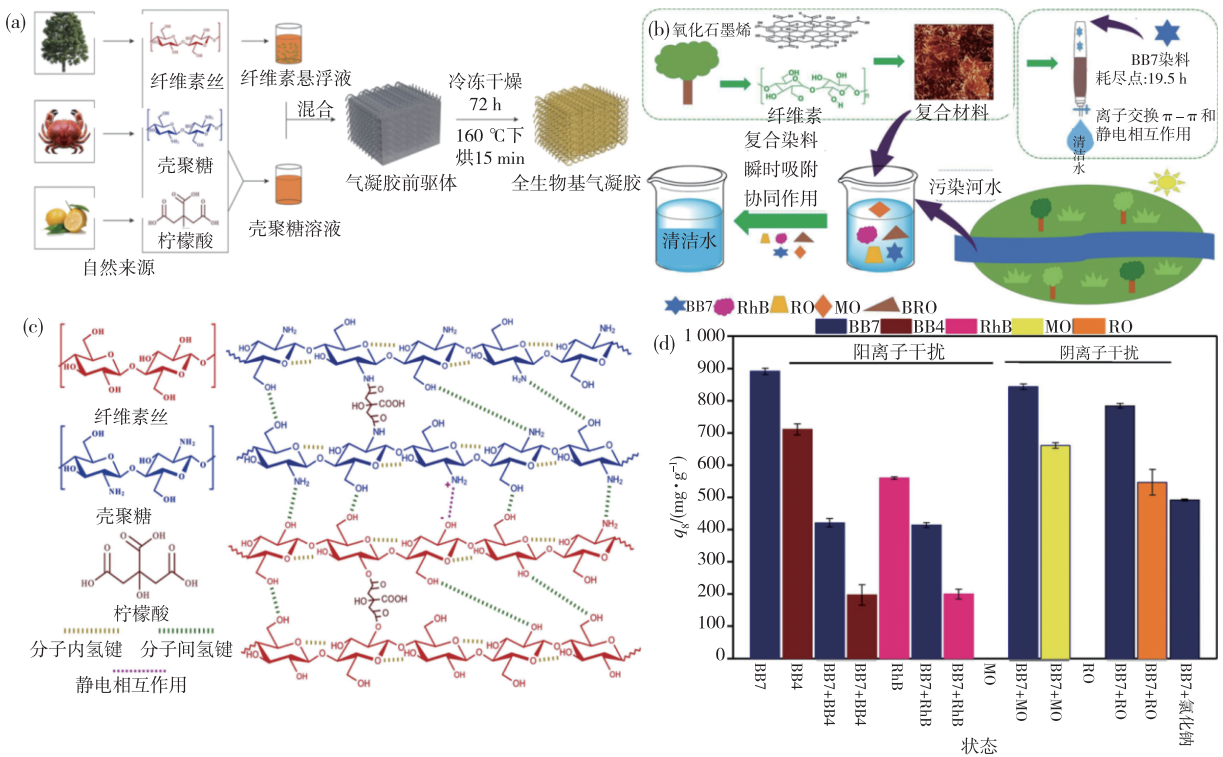


图 4 全生物质气凝胶制备示意图 (a)<sup>[57]</sup>;CNC/GO 用于吸附各种染料示意图 (b)<sup>[58]</sup>;CF、CS 和 CA 的交联机理和相互作用 (c)<sup>[57]</sup>;去除各种染料矩形图 (d)<sup>[58]</sup>

Fig. 4 Schematic illustration of fully biobased aerogels preparation (a)<sup>[57]</sup>;Schematic diagram of CNC/GO for adsorbing various dyes (b)<sup>[58]</sup>;The proposed cross linking mechanism and interactions between CF, CS and CA (c)<sup>[57]</sup>; Rectangular diagram of removing various dyes (d)<sup>[58]</sup>

### 3.2 热保护

生物质基气凝胶具有极低热导率与轻质高孔特性,在气凝胶中引入无机纳米阻燃剂(如硼酸钠、硼酸锌)或磷-氮阻燃体系能显著提升阻燃与隔热性能<sup>[60-62]</sup>。林铭增<sup>[63]</sup>在巴沙木为原料制备的层状复合阻燃气凝胶中,发现阻燃剂均匀分布于孔隙及表面,垂直燃烧评级达 UL-94V-0 级,LOI 高达

90% 以上,核心机理见图 5(a)<sup>[64]</sup>。除此外,开发本征阻燃的全生物质基气凝胶,也可兼顾可持续性与多功能性。Cao 等<sup>[15]</sup>以天然可再生的海藻酸铵(AL)和植酸(PA)为原料,通过氢键交联与定向冷冻干燥技术构建的全生物质基气凝胶(AL/PA 气凝胶),具有超高力学强度、优异阻燃性、良好隔热性,见图 5(b)。PA 与 AL 通过氢键网络互连,不

仅增强了气凝胶的机械强度,也为其燃烧时形成坚固炭层奠定了基础。受热时,PA 释放的含磷化合物会催化海藻酸盐脱水成炭,XPS 检测到的 P-O-C 键也证实了磷与碳骨架的化学键合,从而构建出热稳定性更高的磷掺杂炭层。TG-IR 结果显示,释放的含磷自由基可有效捕获气相中的 H· 和 HO· 自由基,氢键增强的炭层、磷催化成炭与气相自由基捕获的协同,实现了高效阻燃。为进一步拓展生物质基气凝胶的应用前景,在高性能本征阻燃气凝胶的基础上,将其作为功能单元与其它基体复合。如 Yu 等<sup>[65]</sup>设计了一种具有图 5(c) 自膨胀性的全生物质基气凝胶颗粒,并将聚氨酯泡沫填入颗粒间空隙,形成了兼具气凝胶和 RPUF 结构优势定制的“海岛”结构,见图 5(d),即增强了 RPUF 复合材料

的阻燃性能,也提高了其隔热性能及力学性能,该阻燃隔热体系的效能根植于 PA 与明胶在分子层面的协同构建。PA 与明胶通过强氢键相互作用,高温下,PA 作为酸源分解生成聚磷酸,催化明胶脱水交联,形成富碳炭层;明胶作为气源,释放的 NH<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等不可燃气体被包裹于炭层内,膨胀发泡后形成致密多孔的膨胀炭层,进而实现对基体的有效保护。可见,生物质基气凝胶的阻燃效能,源于其本征的多孔隔热结构与被引入的活性阻燃组分(如植酸)的协同作用,通过精妙的分子设计(如氢键交联)、结构调控(如“海-岛”复合),在凝聚相中构建稳固的膨胀炭层,并在气相中抑制燃烧,为绿色安全的高性能隔热材料的制备提供参考<sup>[66]</sup>。

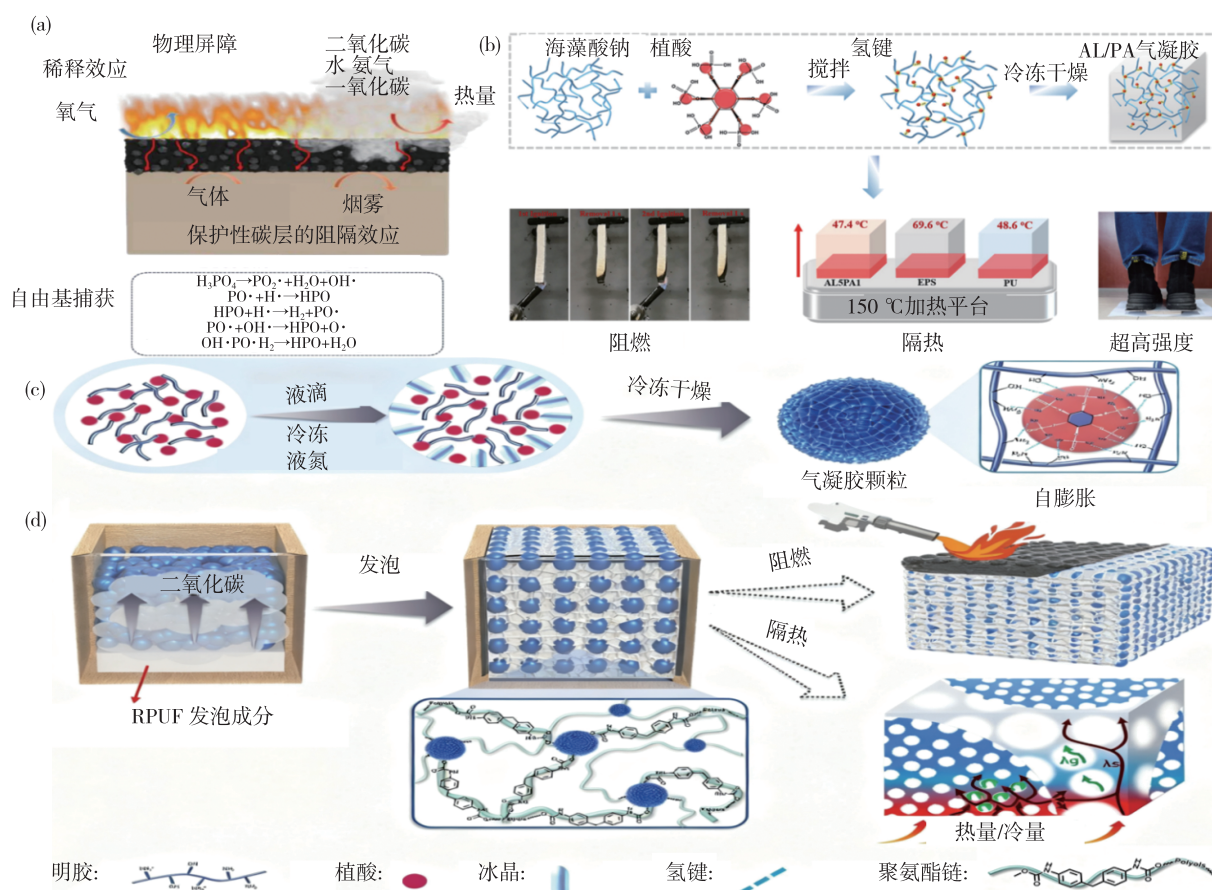


图5 阻燃有机气凝胶可能的阻燃机理 (a)<sup>[64]</sup>; AL/PA 气凝胶制备过程以及各种优异特性 (b)<sup>[15]</sup>; 气凝胶颗粒的制备 (c)<sup>[65]</sup>; 阻燃隔热气凝胶/聚氨酯复合材料的制备 (d)<sup>[65]</sup>

Fig. 5 Possible flame retardant mechanism of flame-retardant organic aerogels (a)<sup>[64]</sup>; The preparation process of AL/PA aerogel and various excellent properties (b)<sup>[15]</sup>; Preparation of Aerogel particles (c)<sup>[65]</sup>; Preparation of Flame-retardant and Heat-Insulating Aerogel/Polyurethane Composites (d)<sup>[65]</sup>

生物质基气凝胶在水体净化、热防护领域的关联与衔接,根系于材料的特性、功能化设计及在实际场景中的协同效应。从材料来看,生物质基气凝

胶普遍具备高孔隙率(通常 > 95%)和三维网络结构,高孔隙结构既可为吸附油类、有机污染物提供界面与空间,也可限制气体分子的运动,有效抑制热对

流与传导,实现良好的隔热性能<sup>[67-69]</sup>。由图6可见,通过康普茶发酵,将水果废弃物作为碳源制备的细菌纤维素气凝胶,具有超低密度( $5.693 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ )和低热导率( $23.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),吸附能力与隔热性能优良<sup>[70]</sup>。疏水改性是衔接水体净化、热防护的关键:甲基三甲氧基硅烷(MTMS)水解后产生的硅羟基(-Si-OH)与细菌纤维素表面的羟基(-OH)发

生缩合反应,形成Si-O-C共价键;MTMS分子之间缩合形成了硅氧烷网络(-Si-O-Si-),并将甲基官能团暴露在表面,使其具备超疏水性,该材料通过增强骨架稳定性以维持长期隔热性能,同时与磷、氮等阻燃组分协同,构建“吸附-阻燃-隔热”一体化功能体系。此外,生物质基气凝胶原料可再生、工艺低碳、部分可回收,符合绿色材料方向。

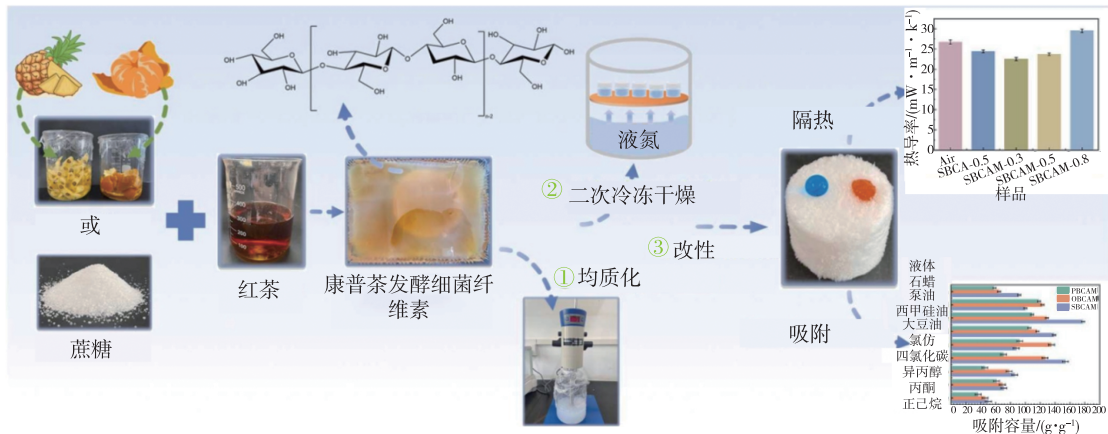


图6 BC制备细菌纤维素气凝胶过程及吸附、隔热性能<sup>[70]</sup>

Fig. 6 The process of preparing bacterial cellulose aerogel based on BC and the demonstration of its adsorption and heat insulation properties<sup>[70]</sup>

## 4 总结与展望

本文系统总结了生物质基气凝胶优异的吸附性和隔热性,梳理了其在水体净化(去除重金属及有机污染物)与高温热防护领域的优势。发现高孔隙率结构虽有利于污染物吸附,但亲水特性易导致遇水坍塌,且功能单一性也限制了其对污染物的吸附隔热协同能力。此外,高成本的超临界干燥技术,也制约了其规模化推广。为此,开发低成本干燥工艺(降低结构塌陷风险)、推进多功能集成设计(实现疏水/亲水调控)、提升热稳定性(引入高温稳定填料或构建可逆碳化结构)等可作为未来研究的方向。

## 参考文献:

- [1] Soffian M S, Halim F Z A, Aziz F, et al. Carbon-based material derived from biomass waste for wastewater treatment [J]. *Environmental Advances*, 2022, 9: 100259.
- [2] 许文龙, 陈爽, 张津红, 等. 羧甲基纤维素-石墨烯复合气凝胶的制备及吸附研究 [J]. *材料工程*, 2020, 48(9): 77-85.

- [3] Yang Weiwei, Yan Chunyan, Wei Yifan. Green optimization product design of suspended fillers based on water-environmental materials [J]. *Iranian Journal of Science and Technology*, 2024, 48(5): 3805-3815.
- [4] Das K P, Chauhan P, Staudinger U, et al. Exploring sustainable adsorbents to mitigate micro-/nano-plastic contamination: perspectives on electrospun fibrous constructs, biochar, and aerogels [J]. *Environmental Science: Advances*, 2024, 3: 1217-1243.
- [5] 朱陈佳, 钱青青, 于晓菡. 工业生产环境中的水污染修复技术研究 [J]. *皮革制作与环保科技*, 2025, 6(19): 8-10.
- [6] 张凯婷, 谢雨薇, 冯明宝. 金属纳米酶在水处理领域应用的研究进展 [J]. *环境化学*, 2026, 45(5): 1-16.
- [7] 陈清, 赵健, 程虎虎, 等. 石墨烯三维结构组装体制备及光热水蒸发和水处理研究进展 [J]. *物理化学学报*, 2022, 38(1): 12-25.
- [8] Zhang Tao, Sun Jie, Zhou Hao, et al. Biomass cellulose aerogel composites with functional integration for thermal insulation applications [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2024, 109(1): 110-118.
- [9] Liu Yanyang, Ke Yangli, Shang Qigao, et al. Fabrication of multifunctional biomass-based aerogel with 3D hierarchical porous structure from waste reed for the synergetic ad-

- sorption of dyes and heavy metal ions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451:138934.
- [10] Jadhav S, Sarawade P. Recent advances and prospective of reinforced silica aerogel nanocomposites and their applications [J]. *European Polymer Journal*, 2024, 206:112766.
- [11] Chen Linfeng, Yu Xiaoxiao, Gao Mengyue, et al. Renewable biomass-based aerogels; from structural design to functional regulation [J]. *Chemical Society Reviews*, 2024, 53(14):7489-7530.
- [12] Sen S, Singh A, Bera C, et al. Recent developments in biomass derived cellulose aerogel materials for thermal insulation application; a review [J]. *Cellulose*, 2022, 29(9):4805-4833.
- [13] 甄彩霞, 敖林喆, 曹卫艳, 等. 低共熔溶剂解构玉米秸秆制备生物质气凝胶应用研究[J]. *广州化工*, 2025, 53(11):175-179.
- [14] 黄丽欣. 壳聚糖基气凝胶对废水中重金属的富集性能及其衍生炭的催化性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2025.
- [15] Cao Min, Liu Bowen, Zhang Lin, et al. Fully biomass-based aerogels with ultrahigh mechanical modulus, enhanced flame retardancy, and great thermal insulation applications [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 225:109309.
- [16] Priya A K, Alghamdi H M, Kavinkumar V, et al. Bioaerogels from biomass waste: an alternative sustainable approach for wastewater treatment [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 282(4):136994.
- [17] Liu Wei, Dai Chen, He Linheng, et al. Biomass aerogel: an emerging eco-friendly material for adsorbing pollutants in water [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 513:162977.
- [18] Setyawan H, Fauziyah M, Tomo H S S, et al. Fabrication of hydrophobic cellulose aerogels from renewable biomass coir fibers for oil spillage clean-up [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(12):5228-5238.
- [19] 马文龙, 陈强, 杨凯璐, 等. 纳米纤维素气凝胶在空气净化领域的研究进展 [J]. *纺织科技进展*, 2025, 47(7):11-16.
- [20] 黄仙金, 杨志喆, 王军, 等. 纤维素/壳聚糖基复合气凝胶吸附材料的研究进展 [J]. *云南化工*, 2025, 52(1):1-4.
- [21] 高明钊. 蛋白质纳米纤维气凝胶去除水中汞与染料的性能研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [22] 涂德贵. 海藻酸钠基复合气凝胶的制备及其水处理研究 [J]. *辽宁化工*, 2023, 52(10):1435-1440.
- [23] Syeda H I, Yap P S. A review on three-dimensional cellulose-based aerogels for the removal of heavy metals from water [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807:150606.
- [24] 李婧曼, 杨伟丽, 王晓军, 等. 纤维素基空气过滤材料的制备及性能研究 [J]. *中国造纸*, 2025, 44(10):209-216.
- [25] Camparotto N G, De Figueirdo N T, Mastelaro V R, et al. Hydrophobization of aerogels based on chitosan, nanocellulose and tannic acid; improvements on the aerogel features and the adsorption of contaminants in water [J]. *Environmental Research*, 2023, 220:115197.
- [26] Soto M, Rojas C, Cardeenas-Ramirez J P. Characterization of a thermal insulating material based on a wheat straw and recycled paper cellulose to be applied in buildings by blowing method [J]. *Sustainability*, 2022, 15(1):58.
- [27] 王晨飞. 壳聚糖基阻燃隔热气凝胶的构筑及其性能研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2025.
- [28] An Congcong, Zhang Ming, Xiao Zhihao, et al. Lignocellulose/chitosan hybrid aerogel composited with fluorescence molecular probe for simultaneous adsorption and detection of heavy metal pollutants [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(6):111205.
- [29] Sun Yan, Chu Youlu, Deng Chao, et al. High-strength and superamphiphobic chitosan-based aerogels for thermal insulation and flame retardant applications [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 651:129663.
- [30] 韩明泽. 蛋白基生物质气凝胶的制备及空气过滤性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2025.
- [31] 韦凝思. 蛋白质基复合材料的制备及其水体重金属离子去除性能的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [32] Lin Shengnan, Liu Wangcheng, Fu Xuewei, et al. Protein-based materials for sustainable, multifunctional air filtration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 335:126252.
- [33] Prydayesh M, Mezzenga R. Protein nanofibrils for next generation sustainable water purification [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1):3248.
- [34] Shi Yiling, Miao Yi, Li Lele, et al. Efficient thermal insulation through all-biomass silk fibroin composite aerogel 3D-reinforced by natural down-fiber [J]. *Materials Today Physics*, 2024, 40:101323.
- [35] Su Haize, Qiu Weipeng, Deng Tianren, et al. Fabrication of physically multi-crosslinked sodium alginate/carboxylated-chitosan/montmorillonite-base aerogel modified by polyethyleneimine for the efficient adsorption of organic dye and Cu (II) contaminants [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330:125321.

- [36] Zhang Ruike, Fu Yan, Qin Wangping, et al. Preparation of a novel bio-based aerogel with excellent hydrophobic flame-retardancy and high thermal insulation performance [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141 (21): e55416.
- [37] Nita L E, Ghilan A, Rusu A G, et al. New trends in bio-based aerogels [J]. *Pharmaceutics*, 2020, 12 (5): 449.
- [38] 程璐, 谭德明, 冯威. 气凝胶的制备及其在环保领域的应用研究进展 [J]. *成都大学学报(自然科学版)*, 2024, 43 (2): 172-179.
- [39] 李建平, 孙艳荣, 李智, 等. CO<sub>2</sub> 超临界干燥制备亲水 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的研究 [J]. *建筑技术*, 2020, 51 (12): 1467-1471.
- [40] Bokov D, Jalil A T, Chupradit S, et al. Nanomaterial by sol-gel method; synthesis and application [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 2021 (1): 5102014.
- [41] 范佳敏, 秦岩, 傅华东, 等. 酚醛树脂气凝胶的溶胶-凝胶法制备及合成机理 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38 (8): 113-121.
- [42] Xu Le, Zhu Wenxia, Chen Zhiwei, et al. Double-network MK resin-modified silica aerogels for high-temperature thermal insulation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15 (37): 44238-44247.
- [43] Xu Xiaochao, Zou Jiabin, Xiao Zhen, et al. Crystalline ZnO aerogel microspheres for boosting photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction [J]. *Fuel*, 2025, 398: 135519.
- [44] Shahzamani M, Bagheri R, Masoomi M, et al. Effect of drying method on the structure and porous texture of silica-polybutadiene hybrid gels; supercritical vs. ambient pressure drying [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2017, 460: 119-124.
- [45] Baraka F, Ganesan K, Milow B, et al. Cellulose nanofiber aerogels; effect of the composition and the drying method [J]. *Cellulose*, 2024, 31 (16): 9699-9713.
- [46] Pravalika K, Chakrorty S, Singhal R S. Supercritical drying of food products; an insightful review [J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 343: 111375.
- [47] Boyer C, Blasco E, Ke Chenfeng. Advanced 3D/4D printing for functional materials innovation [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8 (23): 2301869.
- [48] Zhou Ying, Hao Kangan, Liu Chuan, et al. 3D printed hydrogels with time/temperature-dependent photoluminescence for multi-information dynamic display [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6 (3): 2012-2021.
- [49] Liu Chuan, Hao Kangan, Yu Runhao, et al. Hydrogels with UCST behavior and UV/temperature-induced multicolor fluorescence for synergistic coding and encryption [J]. *Science China Materials*, 2024, 67 (11): 3710-3718.
- [50] Tetik H, Wang Ying, Sun Xiao, et al. Additive manufacturing of 3D aerogels and porous scaffolds; a review [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31 (45): 2103410.
- [51] Liu Chuhan, Li Meichun, Liu Xinyue, et al. 3D printing of customized lignocellulose nanofibril aerogels for efficient thermal insulation [J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 78: 103841.
- [52] Paul J, Qamar A, Ahankari S S, et al. Chitosan-based aerogels; a new paradigm of advanced green materials for remediation of contaminated water [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 338: 122198.
- [53] Zheng Shuaimin, Lei Junting, Kumar Annamareddy S H, et al. Review on thermoelectric aerogels and their preparation methods and innovative applications [J]. *Engineered Science*, 2025, 36: 1683.
- [54] Gao Feiyu, Qiu Zeming, Hou Yong, et al. Novel aerogel of aminated MXene composite orange peel biomass for ultrahigh capacity of V(V) adsorption [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 697: 134472.
- [55] Qiu Shuxian, Li Qiaoling, Li Xiaoying, et al. Biomass-derived carbon materials for the adsorption of organic pollutants [J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2024, 8 (3): 2300340.
- [56] Gomex M, Pizarro J, Castillo X, et al. Development of mesoporous materials from biomass ash with future applications as adsorbent materials [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, 299: 110085.
- [57] Varamesh A, Abraham B D, Wang Hui, et al. Multifunctional fully biobased aerogels for water remediation; applications for dye and heavy metal adsorption and oil/water separation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 457: 131824.
- [58] Da Silva P M M, Camparotto N G, Neves T F, et al. Instantaneous adsorption and synergic effect in simultaneous removal of complex dyes through nanocellulose/graphene oxide nanocomposites; batch, fixed-bed experiments and mechanism [J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2021, 16: 100584.
- [59] 温英英. 高效木质基吸附剂的制备及其水体污染物净化研究 [D]. 南昌: 南昌工程学院, 2019.
- [60] Nazari N, Bahramian A R, Allahbakhsh A. Thermal storage achievement of paraffin wax phase change material systems with regard to novolac aerogel/carbon monofilament/zinc borate form stabilization [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104741.

(下转第65页)