

# 棉纤维素气凝胶的研究进展及应用

鲁建鹏, 白如玉, 张菲菲, 李谨艺

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年4月8日; 录用日期: 2026年4月28日; 发布日期: 2026年5月9日

## 摘要

棉纤维素气凝胶是以天然棉纤维/棉浆/废棉为原料的第三代生物质气凝胶。相较于第一代二氧化硅气凝胶和第二代石油基高分子气凝胶, 其兼具新一代气凝胶原料可再生性、可生物降解性、成本低廉以及传统气凝胶低密度、高孔隙率、高比表面积等优异特性, 在绿色多孔材料领域展现出巨大研究和应用潜力。本文综述棉纤维素原料DES预处理, 溶胶-凝胶过程, 干燥工艺等特征论述。以及在应用上, 重点介绍其在油水分离、吸附净化、保温隔热等领域的应用现状, 并对其在绿色功能材料领域的发展前景进行展望, 为棉纤维素气凝胶的进一步研究与应用提供参考。

## 关键词

棉纤维素, 第三代气凝胶, DES预处理, 干燥工艺

# Research Progress and Applications of Cellulose Aerogels from Cotton

Jianpeng Lu, Ruyu Bai, Feifei Zhang, Jinyi Li

School of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: April 8, 2026; accepted: April 28, 2026; published: May 9, 2026

## Abstract

Cotton cellulose aerogel is the third-generation biomass aerogel made from natural cotton fibers/cotton pulp/waste cotton. Compared with the first-generation silica aerogel and the second-generation petroleum-based polymer aerogel, it combines the excellent properties of the new generation of aerogel raw materials such as renewability, biodegradability, and low cost, as well as the low density, high porosity, and high specific surface area of traditional aerogel. It shows great research and application potential in the field of green porous materials. This article reviews the characteristics of DES pretreatment of cotton cellulose raw materials, sol-gel process, drying process,

etc. In terms of application, this paper focuses on introducing its current application status in fields such as oil-water separation, adsorption purification, and thermal insulation, and looks forward to its development prospects in the field of green functional materials, providing a reference for the further research and application of cotton cellulose aerogel.

## Keywords

Cellulose of Cotton Fiber, The Third-Generation Aerogel, DES Preprocessing, Drying Process

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

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

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



Open Access

## 1. 引言

气凝胶最早于 1931 年由美国化学家 Samuel Stephens Kistler 首次通过超临界干燥法成功制备出并命名为二氧化硅气凝胶(第一代气凝胶) [1]。因具备低密度、高孔隙率、高比表面积及优异的隔热、吸附性能,已成为功能材料领域的研究热点。传统第一代无机气凝胶脆性大、力学性能差[2],第二代有机气凝胶多依赖石油基原料,存在不可降解、环境相容性差等问题,难以满足绿色可持续发展需求[3]。棉纤维素来源广泛、可再生、可生物降解,是构建新型生物质气凝胶的理想基体[4]。以棉纤维素为原料制备的气凝胶,既能保留传统气凝胶的优异特性,又具备环境友好、生物相容性好、成本低廉等优势,在能源环保、生物医药、保温隔热、智能传感等领域展现出巨大应用潜力[5]。本文系统综述棉纤维素气凝胶的制备工艺、结构调控、性能优化及最新应用进展,分析当前研究存在的瓶颈与挑战,并对其未来发展方向进行展望,为推动新型绿色生物质气凝胶的开发与工业化应用提供参考。

## 2. 纤维素及棉纤维素

### 2.1. 纤维素

纤维素是自然界中储量最丰富的天然高分子多糖,是由葡萄糖分子通过  $\beta$ -1,4 糖苷键连接而成的直链多糖。纤维素广泛存在于植物细胞壁、棉花、木材、秸秆、藻类等以及各类农林废弃物中,具有可再生、可降解、生物相容性好等优点。其分子式为  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , 此处的  $n$  代表聚合度。因为其分子由大量  $\beta$ -D-葡萄糖苷单元通过糖苷键连接而成,因此其分子间存在强氢键作用,使其具备更好的力学强度和化学稳定性,不溶于水和一般有机溶剂[6]。纤维素除自身优点外还兼具无机气凝胶(第一代气凝胶)和聚合物气凝胶(第二代气凝胶)的优点,如低密度、高孔隙率、高比表面积(SSA)等。纤维素基气凝胶的功能应用范围在这些特点上得到了很大范围的扩充,在生物质材料、纺织、化工、生物医药等领域具有巨大研究潜力与价值[7]。

### 2.2. 棉纤维素

棉纤维素是纯度最高、结晶度高、力学性能优异的天然纤维素,主要来源于储量丰富的棉花及棉纺织品废料,其纤维素含量可达 90%~95%,相较于传统的气凝胶原料,棉纤维素成本更低廉且作为气凝胶制备原料,与传统原料相比棉纤维素在具有优异的物理性质(高孔隙率、低密度)的同时,还兼具绿色可再生和生物可降解性,与同为天然纤维素原料的木材、秸秆、藻类等植物纤维素相比,棉纤维素纯度更高、杂质更少、易于提纯,加工性能更佳等优势,是制备新一代高性能绿色生物质材料的理想原料,在绿色

气凝胶、功能膜、生物医药等新兴领域具有重要研究价值[8]。

### 3. 棉纤维素气凝胶的制备

棉纤维素气凝胶的制备通常以棉纤维或者棉浆为原料主要分为以下步骤：一是棉纤维素原料的预处理、溶解与提取；二是棉纤维素的溶胶-凝胶化成型；第三，进行凝胶的干燥过程。

#### 3.1. 棉纤维素的预处理、溶解和提取

棉纤维的预处理即破坏其致密的结晶结构，提高溶解性与反应活性在整个气凝胶制备过程中极其重要，其能够直接影响材料的结构性能。现如今有通过离子液体、碱/硫脲/尿素体系和深共熔溶剂(DES)预处理棉纤维。

##### 3.1.1. DES 预处理棉纤维

深共熔溶剂(DES)是一种绿色、无毒、可二次回收的氢键供体-受体体系，在对棉纤维的预处理过程中通过强氢键作用可以高效破坏纤维素分子间/内氢键从而瓦解其致密的结晶区，酸性 DES 可以水解部分无定形区并脱除杂质提高纤维素的纯度与反应活性，能够显著提升后续的纤维素溶解和提取效率。

Liu 等人[9]研究掌握了一种能绿色温和解决原棉纤维中强氢键的方法，该研究以纤维素纯度达 95% 的棉纤维为原料，选用氯化胆碱/二水草酸摩尔比 1:1 的 DES 体系，在 800 W 微波、80℃条件下预处理 3 min，后续再经 1200 W、20 kHz 超声处理 30 min，获得了产率 74.2 % 的 CNCs，该产率远高于传统酸水解法 21.5%~46.7%的产率[10]。经表证，所制得 MwDES-80 CNCs 的直径为 3~25 nm，长度 100~350 nm，相对结晶度可达 82%，热降解起始温度 320℃最大降解温度 354℃，结晶结构保持纤维素 I 型，且表面带有羧基官能团，使其可以在水溶液中分散。

该研究首次采用微波辅助低共熔溶剂(MwDES)预处理在与高强度超声处理相结合的工艺，实现棉花纤维中强氢键的断裂和 CNCs 的高效绿色制备，与传统制备 CNCs 依赖强酸水解相比，该方法更绿色环保，大幅改善环境污染和设备腐蚀等问题。为生物质资源的高效预处理和纤维素绿色工业化生产提供了重要技术支撑和理论参考。

##### 3.1.2. 碱/硫脲/尿素体系预处理棉纤维

碱/硫脲/尿素水溶液体系是一种绿色高效的纤维素低温处理体系，由 NaOH 提供碱性环境，硫脲与尿素作为氢键供体/受体来破坏棉纤维分子间/内的强氢键网络，提高纤维素的溶解性，与强酸水解纤维素比较成本也是更加低廉且操作条件更温和，成为棉纤维资源化利用与改性的重要技术手段之一[11]。

Yang 等人[12]研究了以 NaOH/硫脲/尿素水溶液为绿色溶剂，采用双螺杆挤出机在-2℃实现棉短绒纤维素的高效溶解，经湿法纺丝制备再生纤维素纤维。该溶剂系统制备成本低且副产品无毒等优点。研究发现，该纤维素纺丝液具有典型的剪切稀化流变特性，凝胶化温度达 30.2℃，稳定性优异；优化喷丝拉伸比 0.90、凝固浴为 7.6 wt% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/15.2 wt% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>且温度 15℃时，纤维基础性能较佳，而后续拉伸比(DR<sub>1</sub>)是调控纤维结构与性能的核心因素，随 DR<sub>1</sub>提升至 1.34，纤维结晶度、晶区取向度显著提高，微孔更细小且沿纤维轴定向伸长，拉伸强度达 2.22 cN/dtex，优于商用粘胶纤维(2.13 cN/dtex)，但 DR<sub>1</sub>过高(1.45)会因取向晶区破坏导致性能下降[13]。

该研究提供了一种反应温度更低、反应时间更短、能耗更低且不生成有毒副产物的更加绿色高效的纤维素加工路线，为纤维素绿色工业化提供了可替代方案。

#### 3.2. 凝胶化处理

气凝胶制备过程中凝胶化是形成三维网状湿凝胶骨架的核心步骤，根据不同气凝胶原料其主要的凝

胶处理的方法有三种,分别是无机气凝胶主流的凝胶化方法溶胶-凝胶法、适用于有机和纤维素等气凝胶主流的聚合物交联/自组装法以及多用于纤维素等生物气凝胶所常用的相分离诱导凝胶化法。凝胶化这一过程在气凝胶独特的三维多孔结构的形成中起着决定性作用,是后续制备出具有优异性能的纤维素气凝胶的关键步骤,主要适用于纤维素气凝胶的凝胶方法如下[14][15]。

### 3.2.1. 聚合物交联/自组装法

分物理与化学交联两类。物理交联[16]通过高分子链的氢键、缠结、自组装形成网络(如PVA与纳米粘土形成氢键冷冻自组装);化学交联[17]则引入交联剂(三嗪衍生物、 $\gamma$ 辐射),使高分子官能团发生共价交联,或通过单体/低聚体的聚合/共聚反应形成链状/枝状网络,最终实现凝胶化,该方法制备的凝胶基体具有良好弹性。

Morozova等人[18]研究通过烯丙基化改性甲基纤维素(MC),在光引发剂与紫外光作用下实现化学交联凝胶,对比了室温交联溶液(xsol-MC)与80°C交联fibril凝胶(xfib-MC)的性能。xsol-MC为透明水凝胶,升温至80°C体积大幅收缩,弹性源于链构象熵;xfib-MC锁定fibril结构,呈不透明状,体积随温变仅50%,弹性依赖fibril弯曲模量,二者为可调性能水凝胶设计提供了新路径。

### 3.2.2. 相分离诱导凝胶化法

相分离诱导凝胶化法:先将高分子前驱体在溶剂中充分溶胀、舒展开形成均相溶胶,再通过加入非溶剂(水、乙醇)、调控温度等引发非溶剂诱导相分离,使高分子链重新搭接、聚集,结合轻微交联作用形成三维凝胶网络,可通过调整取代度、非溶剂类型调控凝胶形貌[19]。

Tialiou等人[20]利用羟丙基纤维素(HPC)的热响应特性,通过温度诱导相分离(TIPS)结合二乙烯砜交联,制备出梯度多孔相分离凝胶。凝胶顶层在低于最低临界溶解温度(LCST)下交联,形成大孔结构;中底层在LCST附近交联,孔径渐小且更致密。冷冻处理可引入孔连通性,凝胶呈现梯度力学性能,底层可耐受80%压缩,为过滤、组织工程等领域提供新型功能材料。

## 3.3. 湿凝胶的干燥处理

在凝胶化处理后湿凝胶的内部三维骨架结构中存在着大量的溶剂,干燥过程就是通过气体替换湿凝胶三维骨架结构中的溶剂并保留其本身的三维结构以获得气凝胶。干燥过程的核心目的是为了克服溶剂蒸发过程所产生的毛细管力来避免骨架收缩而坍塌。现如今主流的干燥方法主要有超临界干燥法、冷冻干燥法和常压干燥法三种[21]。

### 3.3.1. 超临界干燥法(SCD)

超临界干燥法是气凝胶制备过程中最经典的干燥方法,也是目前为止制备高性能气凝胶的主流手段,能最大程度保留湿凝胶的原始骨架结构[22]。其旨在通过将湿凝胶中的溶剂替换为超临界流体(常用 $\text{CO}_2$ ,也可用乙醇、丙酮),利用超临界流体无气液界面、无毛细管力的特性,直接从超临界态变为气态脱除,彻底避免骨架收缩坍塌[23]。

Wang等人[24]以硝酸铀酰为前驱体,结合溶胶-凝胶法与 $\text{CO}_2$ 超临界干燥技术,通过两种工艺路线制备出 $\text{UO}_2$ 气凝胶,探究了热处理温度对其结构形貌及催化性能的调控规律并阐明合成机理。前驱体经凝胶化、溶剂置换和超临界干燥制得后,路线1经1000°C~1300°C空气热处理生成 $\text{U}_3\text{O}_8$ 气凝胶,再600°C氢还原得 $\text{UO}_2$ ;路线2简化工艺,450°C空气热处理后直接600°C~1500°C氢还原获 $\text{UO}_2$ ,900°C时其孔隙率达95.25%,高温下呈花状簇结构。结构表征证实,前驱体经相转变生成 $\text{U}_3\text{O}_8$ ,再氢还原实现 $\text{U}^{6+} \rightarrow \text{U}^{4+}$ 转化为高结晶度 $\text{UO}_2$ 。催化测试表明,路线2 1000°C制备的花状 $\text{UO}_2$ 气凝胶活性最优,对TMB氧化催化稳定性好,对TCH24 h降解效率达72.19%,该方法也为贫铀废料资源化利用提供了新途径。

### 3.3.2. 冷冻干燥法(FD)

冷冻干燥法适用于亲水型生物基气凝胶的制备过程,其主要依托于冷冻固化后升华来达到脱除溶剂的目的[25]。通过将湿凝胶快速冷冻,使孔隙中的溶剂形成冰晶,利用冰晶的支撑作用减少骨架坍塌;再在高真空条件下,使冰晶直接升华为气态脱除,保留凝胶的多孔结构。

莫泉棠等人[26]研究了以 TEOS 为硅源,采用酸碱两步法结合冷冻干燥技术制备 SiO<sub>2</sub> 气凝胶,探究了 n (TEOS):n (水)对其结构与保温隔热性能的影响,解决了制备中结构塌陷问题并实现低成本制备。结果表明,水摩尔比显著影响气凝胶孔隙结构与性能,水量不足会导致 TEOS 水解不充分、颗粒团聚,水量过量则易引发骨架坍塌。当 n (TEOS):n (水) = 1:11 时为最优配比,此时气凝胶形成均匀三维网状纳米孔结构,比表面积达 589 m<sup>2</sup>/g,导热系数低至 0.035 W/(m·K),热稳定性和隔热性能均为最佳,为其工业化应用提供了有效工艺参考。

### 3.3.3. 常压干燥法(APD)

常压干燥法是气凝胶生产工业化最具有潜力的干燥方法,通过改性湿凝胶骨架、调控干燥条件实现常压下低收缩干燥,能够大幅降低设备和操作成本。其通过凝胶表面改性(硅烷化、酯化等)降低骨架与溶剂的表面张力,同时结合溶剂置换(将高表面张力的溶剂替换为低表面张力的乙醇、正己烷、乙醚等),减少干燥过程中毛细管力对骨架的破坏;部分体系会加入干燥控制剂,调控溶剂挥发速率[27]。

Wu 等人[28]提出一种双网络阻燃纤维素气凝胶的常压干燥制备策略,以细菌纤维素(BC)和海藻酸钠(SA)为基材,通过戊二醛(GLD)与 Ca<sup>2+</sup>双重交联构建双网络结构,引入蒙脱土(MMT)纳米片增强性能。该策略通过低温溶剂置换与离子交联协同作用,使气凝胶在常压干燥下体积收缩率仅 3.54%,大幅降低制备成本与时间。所得气凝胶孔隙率达 89%~95%,热导率低至 0.043 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,极限氧指数(LOI)最高 69.3%,达 UL-94 V-0 级阻燃标准。MMT 与双网络协同催化形成致密炭层,兼具物理阻隔与气相阻燃作用,力学性能优异且循环稳定性好,为纤维素气凝胶的高效阻燃改性及规模化生产提供新路径。

## 4. 棉纤维素气凝胶的应用

棉纤维素气凝胶凭借其高孔隙率、低密度、生物可降解性以及环境友好等特性,使其能够在多个领域都展现出广泛的应用潜力。

### 4.1. 保温隔热领域

棉纤维素因其高孔隙率结构,使其可以作为建筑外墙保护层、冷链运输等场景的保温材料、防止保暖面料等。其极低的热导率能有效地阻隔热量传递,且环保无毒,契合绿色与可持续发展前景。Sun 等人[29]以天然管状木棉纤维为原料,结合蒙脱土(MMT)与磷酸氢二铵((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>),通过简单混合-过滤-常压干燥工艺制备出兼具保温隔热、阻燃及高力学性能的管状纤维素气凝胶。该气凝胶保留木棉纤维独特管状结构,密度仅 41 mg/cm<sup>3</sup>,compressive 强度高达 32 MPa,热导率低至 0.054 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,保温效果较非管状浆粕气凝胶提升 37.4℃。阻燃方面,(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 分解产生的 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 催化纤维素脱水成炭,与 MMT 协同形成致密炭层,气凝胶极限氧指数达 43.9%,热释放速率和总热释放量较纯纤维素气凝胶分别降低 73.33%和 49.31%,实现自熄且低烟毒释放。其阻燃机制源于外层致密炭层与内部管状结构的双重阻隔,抑制热、氧及挥发性物质传递。该气凝胶制备成本低、工艺简便,在建筑外墙保温、车辆内饰等领域具有广阔应用前景。

### 4.2. 吸附分离领域

棉纤维素气凝胶在吸附分离领域的应用原理主要是依靠高比表面积与多孔结构的物理吸附作用以及

结合表面官能团的化学/物理吸附作用[30]。Cheng 等人[31]以回收棉纤维和废纸纤维素为原料,通过混合-冷冻-真空干燥工艺,并添加聚酰胺-表氯醇(PAE)增强,经甲基三甲氧基硅烷(MTMS)气相硅烷化改性,成功制备出疏水型棉纤维气凝胶(PC)和棉-纤维素复合气凝胶(CC),用于溢油及有机溶剂吸附处理。该类气凝胶孔隙率高达 99.43%~99.66%,水接触角超 130°,0.25 wt%浓度的 PC 气凝胶对机油吸附容量超 100 g/g,CC1-1 气凝胶对二氯甲烷吸附容量达 94.3 g/g,远优于商用吸附剂。吸附原理基于高孔隙率的物理吸附与疏水表面的疏水-疏水相互作用,吸附动力学符合伪一级模型,且吸附容量与溶剂密度正相关。材料可通过蒸馏实现吸附剂再生,5 次循环后仍保持良好吸附性能,兼具低成本、环境友好、机械稳定性佳等优势,为溢油污染治理提供了高效可行的解决方案。

## 5. 总结与展望

棉纤维素气凝胶作为第三代生物质气凝胶的典型代表,兼具了天然生物质材料的可再生、可生物降解、绿色低成本优势与传统气凝胶的低密度、高孔隙率、高比表面积等核心特性,在绿色功能材料领域开辟了全新发展空间。其制备工艺已形成“预处理-溶胶-凝胶-干燥”的完整技术体系,预处理阶段的深共熔溶剂(DES)微波辅助法与碱/硫脲/尿素低温体系,实现了棉纤维素的绿色高效改性与溶解,规避了传统强酸水解带来的环境与设备问题;凝胶化过程可通过溶胶-凝胶法、聚合物交联/自组装法或相分离诱导法精准调控三维网络结构;干燥工艺则在超临界干燥、冷冻干燥与常压干燥的基础上不断优化,既保证了气凝胶结构完整性,又推动了工业化生产成本降低。在应用层面,棉纤维素气凝胶凭借优异的结构与性能,已在保温隔热、吸附分离等领域展现出显著实用价值,尤其在建筑外墙保温、车辆内饰阻燃、溢油污染治理等场景中,实现了功能性与环保性的统一,为解决能源浪费、环境污染等实际问题提供了有效技术路径。

然而,当前棉纤维素气凝胶的研究与应用仍面临诸多瓶颈。在制备工艺方面,DES 预处理的规模化应用仍受限于溶剂回收效率,碱/硫脲/尿素体系的低温控制要求增加了能耗,常压干燥过程中材料结构收缩与性能衰减的平衡问题尚未完全解决;在材料性能层面,纯棉纤维素气凝胶的力学强度偏低、耐水性能不足,限制了其在复杂环境中的长期使用;在产业化进程中,缺乏标准化的生产流程与性能评价体系,且部分改性试剂成本较高,导致产品性价比难以与传统材料竞争。这些问题成为制约棉纤维素气凝胶从实验室走向工业化应用的关键障碍。

未来,棉纤维素气凝胶的发展应聚焦于“工艺优化-性能提升-功能拓展-产业落地”四大核心方向。在制备技术上,需进一步开发高效、低能耗的预处理方法,优化 DES 溶剂的循环利用工艺,探索更温和的凝胶化条件,同时完善常压干燥的改性技术,实现结构收缩率与性能保留率的精准调控,降低工业化生产成本。在性能优化方面,可通过复合改性(如引入蒙脱土、碳纳米管等增强相)提升力学强度与耐环境稳定性,或通过表面功能化修饰(如接枝特定官能团)赋予材料靶向吸附、智能响应等特性,拓展应用场景。在功能拓展上,除现有保温隔热、吸附分离领域外,可向生物医药(如药物载体、伤口敷料)、能源存储(如超级电容器电极基体)、智能传感等高端领域延伸,挖掘其在高附加值场景中的应用潜力。

## 参考文献

- [1] Kistler, S.S. (1931) Coherent Expanded Aerogels and Jellies. *Nature*, **127**, 741-741. <https://doi.org/10.1038/127741a0>
- [2] Almeida, C.M.R., Ghica, M.E. and Durães, L. (2020) An Overview on Alumina-Silica-Based Aerogels. *Advances in Colloid and Interface Science*, **282**, Article 102189. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102189>
- [3] Lermontov, S.A., Malkova, A.N., Sipyagina, N.A., Straumal, E.A., Maksimkin, A.V., Kolesnikov, E.A., et al. (2019) Properties of Highly Porous Aerogels Prepared from Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Polymer*, **182**, Article 121824. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.121824>

- [4] Ma, X., Dong, B., Xie, F., Yang, H., Wang, C., Bittencourt, C., *et al.* (2025) A Novel Cost-Effective Kapok Fibers and Regenerated Cellulose-Based Carbon Aerogel for Continuous Oil/Water Separation. *Separation and Purification Technology*, **353**, Article 128435. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128435>
- [5] Huang, C., Cheng, X., Chen, B., *et al.* (2022) Preparation of Aerogel-Like Silica Foam with the Hollow-Sphere-Based 3D Network Skeleton by the Cast-in Situ Method and Ambient Pressure Drying. *Nano Letters*, **22**, 9290-9296. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c02768>
- [6] Zhang, X., Zhang, Y., Qu, Y.N., *et al.* (2021) Three-Dimensional Reticulated, Spongelike, Resilient Aerogels Assembled by SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nanowires. *Nano Letters*, **21**, 4167-4175. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c04917>
- [7] Wang, J. and Liu, S. (2019) Remodeling of Raw Cotton Fiber into Flexible, Squeezing-Resistant Macroporous Cellulose Aerogel with High Oil Retention Capability for Oil/Water Separation. *Separation and Purification Technology*, **221**, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.097>
- [8] King, J.A., Hine, P.J., Baker, D.L., Shi, Y., Liu, X., Lu, J., *et al.* (2026) Understanding Novel Biocomposites Comprising of Short Cellulose Fibres in a Hybrid Cellulose/silk Fibroin Matrix. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **202**, Article 109459. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109459>
- [9] Liu, Y., Guo, B., Xia, Q., Meng, J., Chen, W., Liu, S., *et al.* (2017) Efficient Cleavage of Strong Hydrogen Bonds in Cotton by Deep Eutectic Solvents and Facile Fabrication of Cellulose Nanocrystals in High Yields. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5**, 7623-7631. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00954>
- [10] Amiri, H. and Karimi, K. (2013) Efficient Dilute-Acid Hydrolysis of Cellulose Using Solvent Pretreatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **52**, 11494-11501. <https://doi.org/10.1021/ie4017368>
- [11] Jin, H., Zha, C. and Gu, L. (2007) Direct Dissolution of Cellulose in NaOH/Thiourea/Urea Aqueous Solution. *Carbohydrate Research*, **342**, 851-858. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2006.12.023>
- [12] Yang, Y., Zhang, Y., Dawelbeit, A., Deng, Y., Lang, Y. and Yu, M. (2017) Structure and Properties of Regenerated Cellulose Fibers from Aqueous NaOH/Thiourea/Urea Solution. *Cellulose*, **24**, 4123-4137. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1418-3>
- [13] 卢洪超, 夏钰豪, 米勤勇, 等. 凝固浴温度对再生纤维素材料结构与性能的影响研究[J]. 高分子学报, 2023, 54(7): 1064-1073.
- [14] 付哲, 苑兴洲, 韩乔, 等. 纤维素气凝胶的制备及其应用进展[J]. 石油化工高等学校学报, 2024, 37(1): 52-58.
- [15] Malakooti, S., Zhao, E., Tsao, N., Bian, N., Soni, R.U., Doulah, A.S.U., *et al.* (2020) Synthesis of Aerogel Foams through a Pressurized Sol-Gel Method. *Polymer*, **208**, Article 122925. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122925>
- [16] Nosiglia, M.A., Colley, N.D., Danielson, M.K., Palmquist, M.S., Delawder, A.O., Tran, S.L., *et al.* (2022) Metalation/Demetallation as a Postgelation Strategy to Tune the Mechanical Properties of Catenane-Crosslinked Gels. *Journal of the American Chemical Society*, **144**, 9990-9996. <https://doi.org/10.1021/jacs.2c03166>
- [17] Takeshita, S., Sadeghpour, A., Malfait, W.J., Konishi, A., Otake, K. and Yoda, S. (2019) Formation of Nanofibrous Structure in Biopolymer Aerogel during Supercritical CO<sub>2</sub> Processing: The Case of Chitosan Aerogel. *Biomacromolecules*, **20**, 2051-2057. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b00246>
- [18] Morozova, S., Coughlin, M.L., Early, J.T., Ertem, S.P., Reineke, T.M., Bates, F.S., *et al.* (2019) Properties of Chemically Cross-Linked Methylcellulose Gels. *Macromolecules*, **52**, 7740-7748. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b01401>
- [19] Zhang, Y., Hu, B., Wang, H., Guo, J., Guan, F., Zou, F., *et al.* (2026) Development of a Multi-Module Cryogenic Spinning Technology Based on Coupled E-Solvent Effect and Cryogenically Induced Phase Separation for the Fabrication of Polymeric Aerogel Fibers. *Chemical Engineering Journal*, **527**, Article 171932. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.171932>
- [20] Tialiou, A., Athab, Z.H., Woodward, R.T., Biegler, V., Keppler, B.K., Halbus, A.F., *et al.* (2023) Fabrication of Graded Porous Structure of Hydroxypropyl Cellulose Hydrogels via Temperature-Induced Phase Separation. *Carbohydrate Polymers*, **315**, Article 120984. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120984>
- [21] 王宝和, 李群. 气凝胶制备的干燥技术[J]. 干燥技术与设备, 2013, 11(4): 18-26.
- [22] 陈龙武, 甘礼华, 岳天仪, 等. 超临界干燥法制备 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的研究[J]. 高等学校化学学报, 1995, 16(6): 840-843.
- [23] 沈伟韧, 贺飞, 赵文宽, 等. 超临界干燥法制备 TiO<sub>2</sub> 气凝胶[J]. 催化学报, 1999, 20(3): 365-367.
- [24] Wang, W., Sheng, Z., Chen, Y., Wei, C., Li, S., Geng, X., *et al.* (2025) Preparation of UO<sub>2</sub> Aerogel by Sol-Gel Method Combined with Supercritical Drying and Its Catalytic Properties. *Journal of Alloys and Compounds*, **1043**, Article 184305. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.184305>
- [25] 付哲, 苑兴洲, 韩乔, 等. 纤维素气凝胶的制备及其应用进展[J]. 石油化工高等学校学报, 2024, 37(1): 52-58.
- [26] 莫泉棠, 董奕宁, 姜雯悦, 等. 冷冻干燥法制备 SiO<sub>2</sub> 气凝胶及其保温隔热性能研究[J]. 化工新型材料, 2025,

---

53(S2): 305-309.

- [27] Zhang, X., Gao, Y., Wang, X., Li, Y., Wang, S., Huang, Z., *et al.* (2024) A Flexible, Thermal-Insulating, and Fire-Resistant Bagasse-Derived Cellulose Aerogel Prepared via a Refrigerator Freezing Combined Ambient Pressure Drying Technique. *Chemical Engineering Journal*, **498**, Article 155466. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2024.155466>
- [28] Wu, Z., Gao, Y., Nie, S., Zhao, D. and Cheng, X. (2025) Dual-Network Thermal-Insulating and Flame-Retardant Cellulose Aerogel Fabricated via Ambient Pressure Drying. *Polymers*, **17**, Article 2377. <https://doi.org/10.3390/polym17172377>
- [29] Sun, J., Wu, Z., An, B., Ma, C., Xu, L., Zhang, Z., *et al.* (2021) Thermal-insulating, Flame-Retardant and Mechanically Resistant Aerogel Based on Bio-Inspired Tubular Cellulose. *Composites Part B: Engineering*, **220**, Article 108997. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108997>
- [30] Ma, X., Dong, B., Xie, F., Yang, H., Wang, C., Bittencourt, C., *et al.* (2025) A Novel Cost-Effective Kapok Fibers and Regenerated Cellulose-Based Carbon Aerogel for Continuous Oil/Water Separation. *Separation and Purification Technology*, **353**, Article 128435. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128435>
- [31] Cheng, H., Gu, B., Pennefather, M.P., Nguyen, T.X., Phan-Thien, N. and Duong, H.M. (2017) Cotton Aerogels and Cotton-Cellulose Aerogels from Environmental Waste for Oil Spillage Cleanup. *Materials & Design*, **130**, 452-458. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.082>