

纤维素气凝胶的研究进展及应用

魏 红, 鲁建鹏, 李谨艺, 王玉福

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年4月19日; 录用日期: 2025年5月11日; 发布日期: 2025年5月23日

摘 要

气凝胶凭借其独特的三维网络结构, 作为目前已知世界上密度最低且微观尺度极小的固体材料, 在材料科学及相关领域引发了广泛关注。纤维素气凝胶无疑是与可持续发展理念相契合的新型材料, 它不仅具备高孔隙率和大比表面积等优异特性, 还具有可被微生物降解以及与多种物质良好兼容等优势。文章介绍了制作纤维素凝胶的方法, 常压干燥, 冷冻干燥, 超临界干燥等特征论述。在应用上, 对纤维素气凝胶所展现的广阔前景进行了探索, 并展望了它的发展前景。

关键词

纤维素, 气凝胶, 干燥, 应用

Research Progress and Applications of Cellulose Aerogels

Hong Wei, Jianpeng Lu, Jinyi Li, Yufu Wang

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

Received: Apr. 19th, 2025; accepted: May 11th, 2025; published: May 23rd, 2025

Abstract

Aerogels, with their unique three-dimensional network structure, have attracted widespread attention in materials science and related fields as the lowest density solid materials known in the world with extremely small microscopic scales. Cellulose aerogels are undoubtedly a new type of material that aligns with the concept of sustainable development; they not only possess excellent characteristics such as high porosity and large specific surface area but also have advantages such as biodegradability and good compatibility with various substances. This article introduces methods for producing cellulose aerogels, discussing features such as ambient pressure drying, freeze-drying, and supercritical drying. In terms of applications, it explores the broad prospects demonstrated by

cellulose aerogels and anticipates their future development to the Hans standard, which illustrates all the formats.

Keywords

Cellulose, Aerogel, Drying, Applications

Copyright © 2025 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

美国著名科学家 Kistler 于 1931 年首次发现气凝胶，他把液体从凝胶中用超临界干燥技术除去，而不会使凝胶网络的结构受到破坏，并研究出第一个三维网络结构气凝胶[1]。该材料以其低密度和高孔隙率而令人印象深刻，从而为气凝胶研究打开了大门。气凝胶是一种轻质高孔的固体材料[2][3]，它通过在特定干燥条件下去除液体溶剂，同时保持凝胶的三维网络结构而形成。应用前景广阔，广泛应用于光电子、吸附催化、隔声、相变等方面，具有较好的应用前景。

2. 纤维素气凝胶的简介

在石油石化资源渐趋枯竭，环境问题备受瞩目的背景下，对可持续、可生物降解、成本低廉且无毒的天然聚合物材料的研究获得有力推动。采用生物基材料被视作实现可持续发展的最有效策略之一，在此情形下，纤维素及其衍生物的研究取得了显著进展。

纤维素作为自然界中含量极为丰富的多糖之一，主要由 1,4- β -糖苷键连接的 β -D-葡萄糖单体构成，其分子式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$ ，此处的 n 代表聚合度。因来源不同，其聚合度通常处于 1000~30,000 这个区间范围。纤维素基气凝胶集众多优良性能于一体，不仅有绿色可重复利用性、生物相容性好、易降解，还具有无机气凝胶和聚合物气凝胶的优点，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。

3. 纤维素气凝胶的制备

纤维素的来源是多种多样的，其制备方法也是千差万别的，这就造成了在微观结构和性质上所得到的纤维素气凝胶的区别。一般情况下，纤维素基气凝胶的制备涵盖三大步骤：一是纤维素原料的溶解、分散加工；二是推动纤维素的凝胶化反应；第三，进行凝胶的干燥过程。

3.1. 纤维素原料的溶解和分散

纤维素原料的溶解和分散有两种途径：直接溶解法与水相分散法。

3.1.1. 直接溶解法

根据组分不同，溶剂可以通过直接溶解工艺的不同，进一步分为含水体系和无水体系。

含水体系：将纤维素加入到氢氧化钠/尿素或氢氧化锂/尿素等溶液中，低温下搅拌，碱金属离子与尿素形成的配合物可破坏纤维素分子间的氢键，可使纤维素实现溶解[4]。

Mader 等人[5]在生物质导电材料研究上取得突破，在渗透阈值很低的情况下，创新采用 NaOH/尿素/水组成的绿色溶剂体系，构建导电纤维素/碳纳米管复合气凝胶，用于研究渗透阈值极低的导电材料。研

究通过调控溶剂体系溶解度,实现 CNT 在纤维素基体中有效分散,其透析阈值低至 0.12 wt%,性能优于传统复合体系。该复合气凝胶卓越的电导率源于 CNT 在三维纤维素网络中精准分布,于微米尺度形成导电通路。它既保留了纤维素材料的生物相容性与生物降解性,又具备 12 S/cm 的导电性,为低成本柔性电子产品、智能传感器及储能材料的开发带来新变革。

无水体系:利用与纤维素分子的相互作用,使离子液显示出极好的溶解性,使纤维素达到溶解的效果。常见的离子液体如 1-丁基吡啶氯盐等,能有效地溶解纤维素,且具有一定的化学稳定性和可调控性,可通过改变取代基等方式来优化其对纤维素的溶解性能[6]。离子液体凭借其作为环境友好型溶剂的创新特性,在生物质材料处理领域尤其是纤维素溶解方面表现出显著技术优势。

3.1.2. 水相分散法

纤维素经过上述工艺,直接溶解,重新生成。在此期间,破坏了原料中高强度、高模量特性的纤维素 I 型晶体结构,解聚了原来排列有序的纤维素分子链,然后将它们重新排列组合到新的环境中,最终生成了强度相对较低的纤维素 II 型晶体。这种结果使最终得到的气凝胶力学性能较差,气凝胶在制备过程中收缩会比较明显,因此气凝胶的机械性能较差。

Heath 和 Thielemans 以纤维素纳米晶体不同的浓度水凝胶为原料,制成气凝胶。制备中的精确调控技术使气凝胶的平均缩水率降至 6.5%。干燥环节采用超临界 CO₂ 干燥法,有效规避传统干燥因表面张力致纳米晶体团聚问题,使气凝胶内多数纳米晶体呈理想单分散态。所得气凝胶微观结构优良,比表面积累 605 m²/g,在依赖高比表面积发挥性能的领域具有极大的潜在应用价值[7],如高效吸附、催化载体等。

3.2. 纤维素的凝胶化

目前,凝胶制取过程中常用的方法有三种,分别是溶胶-凝胶法、水热法和氧化还原法。纤维素气凝胶采用溶胶-凝胶工艺制作时,先在液相体系中均匀分散纤维素,再经其他化学反应如水解、缩合等作用,即成不沉淀胶体。后来,在老化阶段,胶体缓慢聚合成含有液体但已失去流动性的半固体物质。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[8]。

在刘昌宇等人[9]相关研究工作中,选定正硅酸乙酯作为溶质,无水乙醇作为溶剂。在体系中引入催化剂,促使这两种物质间发生反应,引发一系列化学反应,经过溶胶-凝胶转变的过程,最终构建起稳定的凝胶体系。随后,进行干燥操作,随着溶剂分子的脱除,最终成功获得气凝胶材料。

3.3. 凝胶干燥过程

湿凝胶的内部骨架缝隙结构中含有大量的液体[10],之后要用气体替换液体溶剂以获得气凝胶,且需保持原始结构从而获得气凝胶。干燥过程直接影响着气凝胶的多孔结构和性能,若干燥技术不当,在溶剂去除过程中可能会导致 3D 网络结构坍塌、收缩[11]等,没有形成理想的网络多孔结构。

3.3.1. 常压干燥

常压干燥工艺借助以异丙醇等替换水的方式,降低液体表面张力,从而减小毛细压力,切实有效地避免孔隙结构出现变形[12]。此方法操作流程简单,然而却需多次进行溶剂更换。它适用于生产具有高透明度和出色过滤性能的气凝胶。

Zhao 等[13]通过常压干燥法成功制备出了一种以 4-羟基苯磺酸为前驱体的酚醛树脂(PFS)复合材料。在该研究中,4-羟基苯磺酸的酚醛树脂气凝胶前体展现出极为独特的性能,相较于传统的酚醛树脂(PF)气凝胶前体,其凝胶反应速率显著更快。传统针刺酚醛气凝胶复合材料的制备过程往往面临着诸多挑战,

如制备周期长、能耗高以及成本难以控制等问题。而 4-羟基苯磺酸引发的 PFS 快速凝胶化现象的发现, 为攻克这些难题提供了全新的解决思路。它意味着在未来的实际生产中, 可以在更低的能耗条件下, 以更短的制备周期、更低的成本来开发酚醛气凝胶复合材料。

3.3.2. 冷冻干燥

冷冻干燥技术是借助冷冻以及升华这两个过程来除去溶剂, 进而维系气凝胶网络架构的一种方法[14]。在整个处理流程里, 先是通过冷冻让溶剂凝固, 接着升华作用会把固态溶剂直接转化为气态并使其脱离体系, 如此便能切实有效地维护气凝胶网络结构的完整性, 而且该方法可制备出具备大孔径结构的气凝胶。不过, 冷冻干燥过程中成本昂贵, 当前它主要在实验室小规模制备与研究中应用, 很难大规模向工业领域推广[15]。

Zhang 等[16]利用双向冷冻干燥技术成功制备了一种具有良好结构可成形性、高机械强度和卓越绝热性能的双向各向异性聚酰亚胺/细菌纤维素(b-PI/BC)复合气凝胶材料。均匀分布的细菌纤维素抑制了收缩, 保持了结构的完整性, 从而使整个气凝胶具备更高的孔隙率、较低的密度, 并降低了整体的导热系数。同时聚酰亚胺聚合体使复合气凝胶的机械性能得到增强, 增强了复合气凝胶的力学性能。

3.3.3. 超临界干燥

超临界干燥法因可规避溶剂表面张力致结构塌陷, 在制备具稳定三维结构气凝胶方面优势显著, 成理想方案[17]。在操作过程中, 充分利用纳米纤维素凝胶所具有的独特溶解度、扩散性以及低表面张力优势, 以超临界液体替换常规溶剂, 并把干燥介质的温度提升至超临界温度。当达到这一状态后, 干燥介质的表面张力和毛细管力会彻底消除, 进而能够稳固地维持气凝胶的三维多孔结构[18]。鉴于在整个操作进程里, 溶剂几乎不存在显著的表面张力, 使得湿凝胶能够平稳地转变为气凝胶, 并且完好保留自身原有的网络结构。

Matsuyama 等[19]以纸浆为原料, 将 CNF 型水凝胶 - 乙醇溶液与乙二醇中的 Ag 纳米粒子(Ag-NP), 经球磨法充分混合而成。AG-NP/CNF 型复合气凝胶采用超临界二氧化碳干燥技术制备。AG-NP/CNF 型气凝胶具有低至 0.021 g/cm^3 的表面积可达 $31.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 、高达 98.6% 的孔隙率, 并表现出卓越的抑菌特性。

4. 纤维素的应用

近年来, 随着对纤维素气凝胶不断研究, 越来越多的研究人员专注于改善纤维素气凝胶的机械性质等性能, 并大力开发其相关功能。这一系列探索成果备受关注, 显著拓展了纤维素气凝胶在隔热、环保等领域的潜在应用范围, 带来新的机遇。

4.1. 隔热

由于其优异的性能的特点, 纤维素气凝胶成为众多隔热保温材料中最具潜力的一种。Liimatainen 等[20]以叔丁醇 - 水混合溶液为分散介质, 以纤维素纳米纤维为骨架, 以明胶为强化剂, 构建复合气凝胶过滤器, 全部由可再生材料组成。复合晶胶呈清晰网状交联及纳米多孔结构, 孔隙度超 98.8%, 密度为 18 mg/cm^3 。其对 300 nm 粒径粒子过滤效率高, 质量系数超 0.01 Pa^{-1} 的目标值。明胶强化让复合气凝胶过滤器兼具坚固性与柔韧性, 通过调节 CNFs、明胶和叔丁醇配比, 可定制复合晶胶的过滤与机械性能。这种基于纳米纤维素凝胶的超多孔固体用途广泛, 可用于保温隔热, 是极具潜力的绿色材料。

4.2. 吸附材料

纤维素内部存在大量羟基, 这一结构特点使其在水下展现出亲水疏油的独特性质。基于这一特性, 在油水分离领域, 纳米纤维素气凝胶发挥着重要的作用。此外, 纤维素气凝胶具有比表层堆积更大的多孔结

构,对分离物质具有更高的吸附力,使其成为一种优质的材料,可吸附、分离,并可进行废水处理[21]-[24]。在吸附材料领域,传统的亲油纳米颗粒、天然植物纤维等存在诸多不足,像吸油率偏低、回收利用难度大等问题较为突出。Wang 等将 COF 纳米颗粒紧密附着在壳聚糖网络上,制备出对放射性碘的高效吸附共价有机骨架/壳聚糖气凝胶,对静态碘溶液的吸附量为 2211.58 mg/g,对碘蒸气的吸附为 5.62 g/g [25]。

4.3. 超级电容器

超级电容器(SC)是新型电容器,性能介于普通电容器和充电电池间,能够在单个电气周期内进行千次快速充电和放电,而且容量损失小。充电和放电寿命长是正在逐步取代传统电容器的优势。SC 由两个电极、一个电解质和一个隔膜构成,其中的电极物质是很关键的。负载更多活性材料虽能提高能量密度,但电极会变厚致性能恶化,而三维多孔气凝胶制成的电极,有独特结构和超轻等特性,可增强电容[26] [27]。

Shao 等人[28]以亲水 CNF 为疏水性 CNT 的水相分散剂,且不进行任何改性,能够有效防止 CNT 在网络骨架中聚集,最终形成气凝胶后,CNF/CNT (50wt%/50wt)的复合气凝胶压制成薄膜,比电极电容和最大功率密度可达 178 F/g, 13.6 MW/cm²,因此可作为全固态超级电容器的电极材料使用。其特点是 CNT 的所有表面都能与电解质离子接触,而亲水性的 CNF 可作为纳米储存库,从而有效降低离子的传输距离。

4.4. 塑料改性

纤维素气凝胶存在力学性能欠佳、尺寸稳定性不良以及易受真菌降解等缺陷,故而对其进行改性意义重大。部分塑性材料具备力学性能优异、成本低廉以及化学稳定性高等优势,可充当改性剂。

Isaac 等[29]以海洋废弃物生物质为原料,通过简便的冷冻干燥法制备出纤维素气凝胶后,选用聚乳酸(PLA)作为改性剂,运用浸渍法成功制备出轻质且疏水的 PLA 纤维素气凝胶。PLA 的添加赋予气凝胶疏水性,其水接触角处于 100°~125°范围,能够在水中浸泡且保持完整性不变,吸油量可达 34 g/g。与此同时,该气凝胶力学性能得以显著提升,压缩应力增加了 10 倍,可应用于石油泄漏清理的吸附垫或食品包装领域。此外,聚乙烯醇(PVA)的加入能够提高纤维素气凝胶的密度,且降低其孔隙率。

4.5. 生物医学材料

近年来,纤维素气凝胶于伤口敷料等生物医学领域的研究备受关注。Shan 等[30]先将微晶纤维素悬浮液凝胶化以形成水凝胶,随后将其浸入阿莫西林溶液中,使得阿莫西林经孔隙负载至纤维素纤维内,再通过冷冻干燥法制备出纤维素气凝胶,并针对该气凝胶的药物释放特性与抗菌活性展开分析。研究结果显示,该气凝胶能够实现阿莫西林的长期持续释放,且具备优良的抗菌活性。

5. 总结与展望

作为材料科学中的一种新型材料,纤维素气凝胶表现出了巨大的潜能。它们形成了独特的三维纳米网络结构,通过精细的凝胶化工艺制造而成。这种结构赋予纤维素气凝胶一系列卓越的特性,包括高孔隙率,创造出大量相互连接的孔隙,为物质的运输和吸附提供丰富的通道;极低的密度,使其具有显著的重量优势,适用于对重量敏感的应用;以及高比表面积,显著增加与外部物质的接触面积,在吸附和催化等领域展现出卓越的应用潜力。最突破性的进展在于巧妙地将无机气凝胶的优异绝缘性能与生物基材料的环保特性结合在一起。这种融合不仅实现了材料性能的互补提升,还在可持续发展背景下为绿色材料的生长开辟了新途径。

目前已在多个重要领域成功应用纤维素气凝胶。在建筑节能方面,其优异的保温隔热性能,有效降低室内外热量传递,降低空调、暖气等设备能耗,为实现建筑节能减排目标提供有力支撑;在油吸附领域,纤维素气凝胶能快速、大量地吸附水中的油类污染物,因为它的孔隙率高,表面特定,在吸附特性

和环境修复上显示出更好的能力；其独特的微观结构带来超强性能提升的新动力，作为帮助提高电荷储存和传输效率的超级电极材料。

但纤维素气凝胶要想得到发展，并得到广泛应用，仍面临不少严峻的挑战。在制备过程中，在溶剂的置换和干燥过程中，明显地存在着它的效率瓶颈。虽然冷冻干燥和超临界干燥作为常用干燥方式可以保证气凝胶的结构完整性，但在生产成本大幅提高的同时，也限制了扩大生产规模，因为其高度依赖于昂贵的专业设备，并且在整个烘干过程中耗费了更长的时间。因此，迫切需要研发环保、清洁且高效的溶剂体系，并探索低成本、适合大规模应用的工业生产技术。从应用扩展来看，纤维素气凝胶在功能性上还有待进一步完善。例如，在医疗卫生和食品包装等对材料抗菌性能要求较高的领域，其抗菌性不足限制了其更广泛的应用。

展望未来，为了充分发挥纤维素气凝胶的巨大潜力，有必要将材料科学、化学工程、物理学和其他领域的跨学科知识结合起来，进行系统的研究和开发工作。一方面，重点在于选择和替代绿色溶剂，以寻找既满足气凝胶生产工艺要求又环保且经济实惠的新溶剂；另一方面，修饰方法的组合和深入研究不断优化，以通过与抗菌剂和纳米颗粒等其他功能材料的结合，为纤维素气凝胶赋予更多功能，进一步拓展应用边界，并将纤维素气凝胶从实验室研究转化为大规模工业生产和广泛的实际应用。

参考文献

- [1] Kistler, S.S. (1931) Coherent Expanded Aerogels and Jellies. *Nature*, **127**, 741. <https://doi.org/10.1038/127741a0>
- [2] 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>
- [3] 马书荣, 米勤勇, 余坚, 等. 基于纤维素的气凝胶材料[J]. 化学进展, 2014, 26(5): 796-809.
- [4] Qi, H., Liu, J., Gao, S. and Mäder, E. (2013) Multifunctional Films Composed of Carbon Nanotubes and Cellulose Regenerated from Alkaline-Urea Solution. *J. Mater. Chem. A*, **1**, 2161-2168. <https://doi.org/10.1039/c2ta00882c>
- [5] Zaborowska, M., Bodin, A., Bäckdahl, H., Popp, J., Goldstein, A. and Gatenholm, P. (2010) Microporous Bacterial Cellulose as a Potential Scaffold for Bone Regeneration. *Acta Biomaterialia*, **6**, 2540-2547. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.01.004>
- [6] Zhao, J., Lu, C., He, X., Zhang, X., Zhang, W. and Zhang, X. (2015) Polyethylenimine-Grafted Cellulose Nanofibril Aerogels as Versatile Vehicles for Drug Delivery. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7**, 2607-2615. <https://doi.org/10.1021/am507601m>
- [7] Heath, L. and Thielemans, W. (2010) Cellulose Nanowhisker Aerogels. *Green Chemistry*, **12**, 1448-1453. <https://doi.org/10.1039/c0gc00035c>
- [8] 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.
- [9] 刘昌宇, 孙永祥, 张成俊, 等. 二氧化硅气凝胶制备条件对热导率的影响[J]. 热科学与技术, 2022, 21(3): 221-226.
- [10] 王美娟, 慕道炎, 侯海波, 等. 二氧化硅气凝胶的制备及应用研究进展[J]. 四川化工, 2024, 27(6): 5-9.
- [11] Bisson, A., Rigacci, A., Lecomte, D., Rodier, E. and Achard, P. (2003) Drying of Silica Gels to Obtain Aerogels: Phenomenology and Basic Techniques. *Drying Technology*, **21**, 593-628. <https://doi.org/10.1081/drt-120019055>
- [12] Aravind, P.R., Shajesh, P., Soraru, G.D. and Warrier, K.G.K. (2010) Ambient Pressure Drying: A Successful Approach for the Preparation of Silica and Silica Based Mixed Oxide Aerogels. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **54**, 105-117. <https://doi.org/10.1007/s10971-010-2164-2>
- [13] Zhao, X., Chen, L., Su, P., Xiao, L., Zhao, H., Fu, T., et al. (2024) 4-Hydroxybenzenesulfonic Acid Triggers Rapid Preparation of Phenolic Aerogel Composites by Ambient Pressure Drying. *Chemical Engineering Journal*, **479**, Article 147856. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147856>
- [14] Shao, G., Hanaor, D.A.H., Wang, J., Kober, D., Li, S., Wang, X., et al. (2020) Polymer-Derived SiOC Integrated with a Graphene Aerogel as a Highly Stable Li-Ion Battery Anode. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 46045-46056. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12376>
- [15] Barachini, S., Trombi, L., Danti, S., D'Alessandro, D., Battolla, B., Legitimo, A., et al. (2009) Morpho-Functional

- Characterization of Human Mesenchymal Stem Cells from Umbilical Cord Blood for Potential Uses in Regenerative Medicine. *Stem Cells and Development*, **18**, 293-306. <https://doi.org/10.1089/scd.2008.0017>
- [16] Zhang, X., Zhao, X., Xue, T., Yang, F., Fan, W. and Liu, T. (2020) Bidirectional Anisotropic Polyimide/Bacterial Cellulose Aerogels by Freeze-Drying for Super-Thermal Insulation. *Chemical Engineering Journal*, **385**, Article 123963. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123963>
- [17] Wan, J., Zhang, J., Yu, J. and Zhang, J. (2017) Cellulose Aerogel Membranes with a Tunable Nanoporous Network as a Matrix of Gel Polymer Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 24591-24599. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b06271>
- [18] Li, Y., Jiang, H., Han, B. and Zhang, Y. (2019) Drying of Cellulose Nanocrystal Gel Beads Using Supercritical Carbon Dioxide. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **94**, 1651-1659. <https://doi.org/10.1002/jctb.5936>
- [19] Matsuyama, K., Morotomi, K., Inoue, S., Nakashima, M., Nakashima, H., Okuyama, T., *et al.* (2019) Antibacterial and Antifungal Properties of Ag Nanoparticle-Loaded Cellulose Nanofiber Aerogels Prepared by Supercritical CO₂ Drying. *The Journal of Supercritical Fluids*, **143**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.08.008>
- [20] Laitinen, O. and Liimatainen, H. (2024) Gelatin-Reinforced Cellulose Nanofiber Composite Cryogels for Effective Separation of Small Particulate Matter in Air. *Materials & Design*, **238**, Article 112654. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112654>
- [21] Xu, M., Bao, W., Xu, S., Wang, X. and Sun, R. (2015) Porous Cellulose Aerogels with High Mechanical Performance and Their Absorption Behaviors. *BioResources*, **11**, 8-20. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.8-20>
- [22] Yifan, S., and Jing, S. (2022) Preparation and Adsorption Abilities of Biomass Carbon Aerogel Derived from Sweet Potato. *Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology*, **42**, 8-14. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6952.2022.02.002>
- [23] Zhu, J., Wang, X., He, L. and Huang, X. (2023) Preparation and Oil Absorption Performance Evaluation of Superhydrophobic Biomass Composite Aerogels. *Oilfield Chemistry*, **40**, 143-148. <https://doi.org/10.19346/j.cnki.1000-4092.2023.01.023>
- [24] Mulyadi, A., Zhang, Z. and Deng, Y. (2016) Fluorine-Free Oil Absorbents Made from Cellulose Nanofibril Aerogels. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 2732-2740. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b10985>
- [25] Wang, X., Meng, R., Zhao, S., Jing, Z., Jin, Y., Zhang, J., *et al.* (2024) Efficient Adsorption of Radioactive Iodine by Covalent Organic Framework/chitosan Aerogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, **260**, Article 129690. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129690>
- [26] Cao, J., Zhao, Y., Xu, Y., Zhang, Y., Zhang, B. and Peng, H. (2018) Sticky-Note Supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, **6**, 3355-3360. <https://doi.org/10.1039/c7ta10756k>
- [27] Huang, Y., Zeng, Y., Yu, M., Liu, P., Tong, Y., Cheng, F., *et al.* (2017) Recent Smart Methods for Achieving High-energy Asymmetric Supercapacitors. *Small Methods*, **2**, Article ID: 1700230. <https://doi.org/10.1002/smt.201700230>
- [28] Gao, K., Shao, Z., Wang, X., Zhang, Y., Wang, W. and Wang, F. (2013) Cellulose Nanofibers/Multi-Walled Carbon Nanotube Nanohybrid Aerogel for All-Solid-State Flexible Supercapacitors. *RSC Advances*, **3**, 15058-15064. <https://doi.org/10.1039/c3ra42050g>
- [29] Benito-González, I., López-Rubio, A., Gómez-Mascaraque, L.G. and Martínez-Sanz, M. (2020) PLA Coating Improves the Performance of Renewable Adsorbent Pads Based on Cellulosic Aerogels from Aquatic Waste Biomass. *Chemical Engineering Journal*, **390**, Article 124607. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124607>
- [30] Ye, S., He, S., Su, C., Jiang, L., Wen, Y., Zhu, Z., *et al.* (2018) Morphological, Release and Antibacterial Performances of Amoxicillin-Loaded Cellulose Aerogels. *Molecules*, **23**, Article 2082. <https://doi.org/10.3390/molecules23082082>