



纳米纤维素气凝胶微观形貌调控机制及其应用性能综述

焦鹏飞,赵毅丽,李营战

(浙江理工大学纺织科学与工程学院(国际丝绸学院),杭州 310018)

摘要: 纳米纤维素是一种来源广泛、生物相容性优异的可再生纳米材料,由其构建的气凝胶(Nanocellulose aerogels, NCA)兼具低密度($<0.1\text{ g/cm}^3$)与高孔隙率($>90\%$)等特性,在吸附分离、保温隔热及电磁屏蔽等领域展现出巨大应用潜力;纳米纤维素气凝胶的吸附容量、力学强度、导热系数等关键应用性能与其孔径大小及分布、网络致密性、纤维排列方式等微观结构特征密切相关,对其微观形貌进行调控是优化性能的核心所在。该文系统梳理了影响纳米纤维素气凝胶微观形貌的因素,包括纳米纤维素的种类、表面化学基团以及干燥工艺等,并总结了相应的调控方法;综述了纳米纤维素微观形貌与吸附、隔热、电磁屏蔽等应用性能之间的关系;总结了当前微观形貌调控技术所面临的挑战,包括规模化制备难度大、纳米纤维素易聚集等问题,并对未来发展方向进行了展望,包括深化微观形貌调控机制的研究、实现形貌与功能的协同调控以及加速其产业化进程等。

关键词: 纳米纤维素;气凝胶;微观形貌调控;制备工艺

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2026)09-0592-13

引文格式: 焦鹏飞,赵毅丽,李营战. 纳米纤维素气凝胶微观形貌调控机制及其应用性能综述[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2026,55(5):592-604.

Reference Format: JIAO Pengfei,ZHAO Yili,LI Yingzhan. Review on the micromorphology regulation mechanisms and application performance of nanocellulose aerogels[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2026,55(5):592-604.

Review on the micromorphology regulation mechanisms and application performance of nanocellulose aerogels

JIAO Pengfei,ZHAO Yili,LI Yingzhan

(College of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk), Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Nanocellulose is a renewable nanomaterial with wide sources and excellent biocompatibility. Aerogels constructed from nanocellulose, termed nanocellulose aerogels (NCAs), combine properties such as low density ($<0.1\text{ g/cm}^3$) and high porosity ($>90\%$), demonstrating great application potential in fields including adsorption and separation, thermal insulation, and electromagnetic interference shielding. The key application-related properties of NCAs—such as adsorption capacity, mechanical strength, and thermal conductivity—are closely related to their micromorphology characteristics, including pore size and distribution, network density, and fiber alignment. Therefore, precise regulation of their micromorphology is essential for performance optimization. This article systematically reviews the factors influencing the microstructure of NCAs, such as the type of nanocellulose, surface chemical groups, and

收稿日期: 2025-12-02 网络出版日期: 2026-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52103045);浙江省自然科学基金项目(LZYQ25E030001);浙江理工大学基本科研业务费专项项目(24202104-Y)

作者简介: 焦鹏飞(2001—),男,甘肃陇西人,硕士研究生,主要从事纳米纤维素气凝胶方面的研究。

通信作者: 李营战,E-mail:yingzhanli@zstu.edu.cn

drying processes, and summarizes corresponding control methods. It also examines the relationship between the micromorphology of NCAs and their performance in applications such as adsorption, thermal insulation, and electromagnetic shielding. Furthermore, the review addresses current challenges in micromorphology regulation, including difficulties in large-scale preparation and the tendency of nanocellulose to aggregate. Finally, it outlines future research directions, emphasizing the need to deepen the understanding of micromorphology control mechanisms, achieve synergistic regulation of morphology and functionality, and accelerate the industrialization process of NCAs.

Key words: nanocellulose; aerogels; micromorphology control; preparation process

0 引 言

气凝胶是一种以气体为分散介质的具有连续三维多孔结构的材料,具有低密度($0.003\sim 0.500\text{ g/cm}^3$)、高比表面积(Specific surface area, SSA)、高孔隙率($80\%\sim 99.9\%$)、低热导率及易化学改性等特性,这些优越的特性使其在高效保温、催化剂载体、能源存储、生物医用材料及环境修复等领域具有重要应用潜力^[1]。根据成分组成,气凝胶可以分为 3 类:以二氧化硅气凝胶为代表的无机气凝胶,以酚醛树脂气凝胶为代表的有机合成高分子气凝胶,和以纤维素气凝胶为代表的天然高分子气凝胶^[2]。虽然二氧化硅气凝胶具有较高的 SSA,但其串珠状结构导致机械性能较差,限制了实际应用;有机高分子气凝胶通常以石油基高分子为原料,缺乏可再生性;而具有丰富的材料来源、生物可降解性、无毒性的纤维素气凝胶近年来受到广泛研究和应用^[3]。

以纳米纤维素为原料制备纤维素气凝胶的过程通常涉及将纳米纤维素分散液经过交联或功能化改性后,形成湿凝胶,并通过冷冻干燥、超临界 CO_2 干燥或常压干燥等方法获得最终产品^[4]。纳米纤维素的优异性能与其 SSA 呈正相关,因此,提高纤维素气凝胶的 SSA 是提升应用性能的关键。然而,纳米纤维素纤维表面富含极性基团(如羟基、羧基、磺酸基等),导致纤维间存在强烈的氢键相互作用^[5]。此外,在冷冻诱导的纳米纤维素悬浮液凝胶化过程中,冰晶生长产生的挤压效应迫使纳米纤维素纤维向冰晶边界迁移,导致局部区域固含量急剧增加。上述因素最终导致纳米纤维素聚集,尽管所制备的纳米纤维素气凝胶具有三维多孔结构,但其内部骨架常呈现二维片状结构,丧失了纳米纤维素固有的微纳尺度特征,造成其 SSA 相对较低^[6-7]。纳米纤维素气凝胶因其独特的微观结构和优异的性能,在多个领域展现出广泛的应用前景。然而,制备过程中纳米纤维素的聚集问题以及微观形貌的不可控性限制了其性能的进一步提升。

本文总结了纳米纤维素在干燥过程中聚集的成因,系统归纳了纳米纤维素长径比、固含量、纤维表面化学基团及干燥工艺等因素对气凝胶微观形貌的影响,为高 SSA 气凝胶的构筑提供理论依据;系统综述了纳米纤维素气凝胶的微观结构特征与其在吸附分离、隔热、电磁屏蔽等领域应用性能之间的关系,以探究纤维素气凝胶材料的微观形貌与其宏观功能性应用之间的联系。

1 纳米纤维素气凝胶的微观形貌调控方法

1.1 纳米纤维素气凝胶聚集的原因

纳米纤维素气凝胶在制备过程中极易发生聚集现象,导致其高 SSA 特性丧失,进而影响气凝胶的结构与性能^[8]。聚集现象的主要原因在于纳米纤维素表面含有大量羟基、羧基、磺酸基等极性基团,这些功能基团使得纤维之间易通过强氢键相互作用发生自组装和聚集,尤其是在固含量提高的情况下,原有的“微纳”结构会受到破坏^[9]。此外,纳米纤维素气凝胶的制备通常涉及冷冻形成冰凝胶,之后再通过冷冻干燥、超临界 CO_2 干燥等特殊干燥方式以维持其三维多孔结构,但在冷冻过程中,水转化为冰晶时所产生的挤压效应会迫使纳米纤维素向冰晶边缘移动导致局部固含量急剧增加,进一步加剧了纤维素的聚集现象^[10]。因此,深入研究纳米纤维素气凝胶制备过程中的聚集行为,对理解其形成机制及实现结构与性能的调控至关重要。基于对聚集机制的深入认识,可通过优化干燥方式(如冷冻干燥、超临界干燥)或引入化学交联等策略,有效抑制过度聚集,从而制备出结构稳定、性能优异的气凝胶材料。

1.1.1 纳米纤维长径比和固含量对气凝胶微观形貌的影响

纤维素作为自然界储量丰富的天然高分子之一,是由 $\beta\text{-D-葡萄糖}$ 单体通过 $\beta\text{-1,4-糖苷}$ 键连接而成的线性高分子^[11]。由于纤维素分子内和分子间存在极强的氢键相互作用,使得其能够层层组装成

纤维素束、微原纤及细胞壁等多级结构,通过物理机械剥分、化学水解或生物酶水解等方法破坏天然纤维素分子链之间的氢键相互作用,可获得直径在纳米尺度、长度在微米至厘米尺度的纳米纤维素^[12]。根据制备的纳米纤维素的长径比和结晶度不同,可将其分为低长径比的纤维素纳米晶体(Cellulose nanocrystals,CNC)(见图 1(a))^[13]和高长径比的纤维素纳米纤维(Cellulose nanofibers,CNF)(见图 1(b))^[14]。此外,除了植物通过光合作用合成纤维素外,某些木醋杆菌属可利用葡萄糖(或其他糖类)为原料,通过生物代谢合成的细菌纳米纤维素(Bacterial nanocellulose,BNC)(见图 1(c)),其纤维直径通常为 20~100 nm,具有较高的长径比^[15]。

纳米纤维素的长径比对其制备的纤维素气凝胶的微观结构具有重要影响,当以小长径比的 CNC 为原料制备纳米纤维素气凝胶时,需要提高 CNC 的固含量或通过化学改性增强其网络结构的稳定性。然而,高固含量和过度的化学交联会导致 CNC 的聚集,使气凝胶内部呈现出二维片状结构(见图 1(d))^[16];当以具有较高长径比的 CNF 为原料制备纤维素气凝胶时,CNF 之间不仅能够通过氢键和其

他分子间相互作用形成非共价键,且出现物理缠结现象。在仅使用 CNF(质量分数约 0.8%)的情况下,仍可制备出纳米纤维素气凝胶,但其力学性能和耐溶剂性能较差。CNF 基纳米纤维素气凝胶的骨架呈三维网状结构,其纳米纤维间的聚集程度较 CNC 基气凝胶更低。这一结构在赋予材料高孔隙率的同时,也导致了骨架初始强度偏弱。因此,为了提升机械性能,通常需要通过物理或化学方法对 CNF 进行交联,以强化网络结构(见图 1(e))^[17]。BNC 因其在生物合成过程中形成的固有三维网络,能够在干燥后直接形成结构规整度极高的天然气凝胶(图 1(f))^[18]。纳米纤维素的长径比与固含量显著调控其微观形貌,并直接影响应用性能,一般而言,具有高长径比的纳米纤维素能够通过物理缠结和氢键相互作用形成纤维网络结构,使得制备的气凝胶具有较高的 SSA;而低长径比的纳米纤维素则往往需要大量的化学交联来提高其网络结构的稳定性,这会导致聚集严重,最终 SSA 较低;随着纤维素固含量的增加,虽然能够提升气凝胶的机械强度,但固含量的升高也会增强纳米纤维素的聚集趋势,从而导致气凝胶的聚集和 SSA 降低(见表 1)。

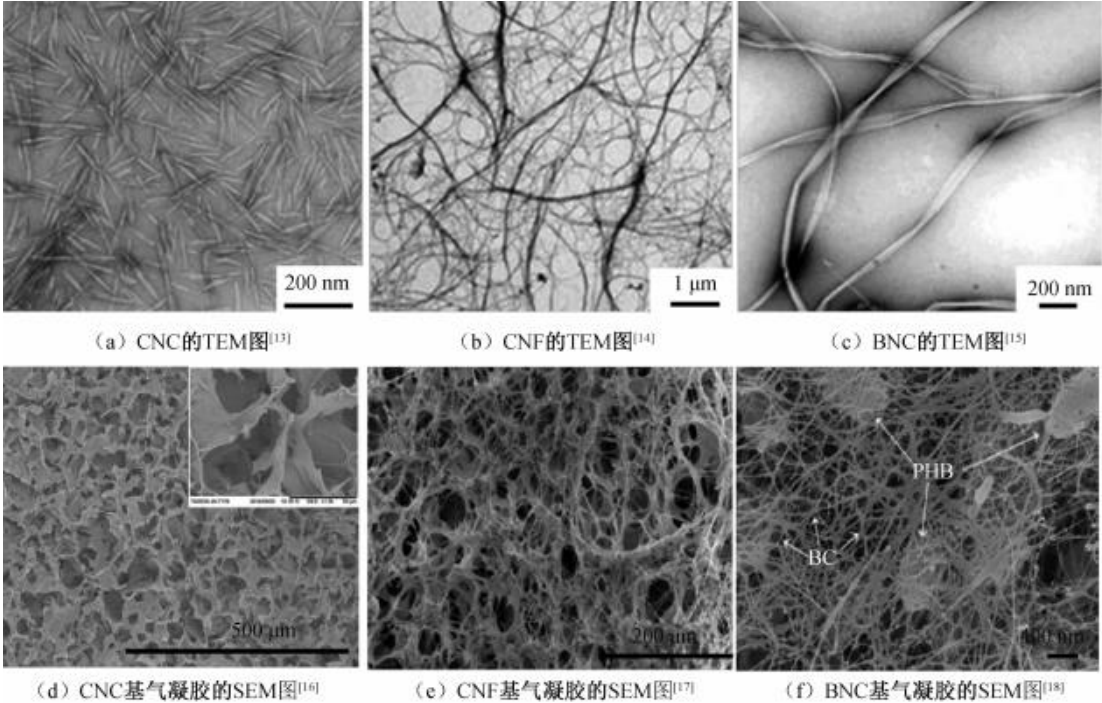


图 1 不同种类纳米纤维素的透射电镜图及纳米纤维素气凝胶的扫描电镜图

1.1.2 纳米纤维素表面化学性质对气凝胶微观形貌的影响

纳米纤维素分子链表面的羟基、羧基或磺酸基等极性基团导致纤维间具有较强的氢键相互作用,是纳米纤维素悬浮液在干燥过程中发生纤维

聚集的主要驱动力。为了解决这一问题,通常采用化学、物理或生物方法对纳米纤维素进行表面改性,通过调节纤维表面基团的极性以削弱纤维聚集的倾向以及提升气凝胶网络的机械稳定性^[28]。Cao 等^[29]采用不同极性基团(如氨基、环氧

基团、碳碳双键)的有机硅氧烷对纤维素纳米纤维进行改性,并与未改性的纯纳米纤维素进行对比,在接枝率相似条件下,有机硅氧烷的功能性基团能够有效调控凝胶网络的氢键强度;随着氢键

强度的降低,气凝胶的 SSA 从 44.36 m²/g 提高至 99.37 m²/g,纳米纤维的聚集程度得到了有效抑制(见图 2);同时改善了气凝胶的隔热性能和压缩回弹性能。

表 1 纤维素种类及固含量对纳米纤维素气凝胶性能影响的统计表

材料	固含量/%	密度/ (mg·cm ⁻³)	孔隙率 /%	SSA/ (m ² ·g ⁻¹)	干燥方法	应力/kPa	热导率/ (mW·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	参考文献
CNF*	1.0(质量分数)	14.0	99.0	284.0	FD (-196℃)	3.2	—	[19]
CNF	2.0(质量分数)	20.0	98.0	66.0	FD (-180℃)	203.0	—	[20]
CNC	0.5(质量分数)	5.6	99.6	—	FD	8.0	—	[21]
CNF	0.5(质量分数)	4.0	99.8	42.0	FD (-196℃)	—	—	[22]
CNF	0.6(质量分数)	8.0	99.5	30.0	FD (-20℃)	—	—	[23]
CNF*	1.5(质量分数)	18.0	98.9	>30.0	AD (70℃)	29.0	—	[24]
CNF	1.3(体积分数)	—	≈99.0	≈20.0	FD (-196℃)	—	≈19	[25]
CNF	2.0(质量分数)	23.0	≈99.0	≈99.0	FD (-80℃)	≈160.0	18	[26]
BNC	0.5(质量分数)	5.7	99.0	—	FD (-196℃)	15.0	23.4	[27]

注:FD 表示干燥气凝胶的方式为冷冻干燥;* 表示制备气凝胶过程存在溶剂交换。

除了调节纳米纤维素表面基团的极性外,还可通过引入正电荷或负电荷增强纳米纤维间的静电斥力,从而进一步削弱其聚集倾向,实现气凝胶微观结构的有效调控^[30-31]。Choi 等^[32]以 NaOH 和 2,3-环氧丙基三甲基氯化铵(GMA)为反应试剂,异丙醇为溶剂,对 CNF 进行季铵化处理。通过季铵化处理在 CNF 上引入阳离子基团,发现当含量达到 340 μmol/g 时,干燥后的气凝胶可经搅拌重新分散为原纤维(直径保持 4.9~5.1 nm)。这证明阳离子基团的引入显著提高了 CNF 的再分散性能。因此,通过在纳米纤维素表面引入非极性基团或增强纳米纤维素纤维间的静电斥力,可有效抑制纳米纤维的聚集,进而在制备过程中保持其微观结构,并制备出具有高 SSA 的纳米纤维素气凝胶。

1.2 干燥方法对纳米纤维素气凝胶微观形貌的调控

在制备纳米纤维素气凝胶的过程中,如何在保持其三维网络结构的同时实现内部溶剂的有效干燥,是制备纳米纤维素气凝胶的关键步骤之一。目前,冷冻干燥、超临界 CO₂ 干燥以及常压干燥是常用的气凝胶干燥方法^[33]。

1.2.1 冷冻干燥

在纳米纤维素气凝胶的干燥过程中,通常需通过冷冻将纳米纤维素悬浮液转变为冰凝胶,以实现气凝胶网络结构的固定。然而,冷冻过程中,冰晶的生长会将纳米纤维素挤压至其边界处,导致局部固含量急剧上升(即“挤压效应”)。同时,由于纤维素纳米纤维间存在极强的氢键相互作用,使其发生自组装和聚集。经干燥移除冰模板后形成孔道,而孔壁的纳米纤维素则聚集成二维片状结构,导致所制备的纳米纤维素气凝胶难以发挥纳米纤维素高 SSA 的特性。

通过降低凝胶化过程中的温度,可在一定程度上减小冰晶尺寸,进而降低“挤压效应”导致的纤维聚集,实现对气凝胶多级孔径结构和 SSA 的调控^[34]。如 Mao 等^[35]研究发现,通过控制冷冻温度可以有效调节气凝胶的孔隙结构(图 3(a)),在 -20℃ 冷冻条件下,由于缓慢生长形成的大尺寸冰晶,挤压纤维素纳米纤丝发生严重聚集,制备的气凝胶内部的孔径约 250 μm;而在 -196℃ 的冷冻条件下,由于冰晶形成速率加快,抑制了大尺寸冰晶的形成,

从而制备的气凝胶孔径约为 20 μm(图 3(b))。尽管通过调控冷冻温度可以实现气凝胶孔径的减小,

但由于制备过程中温度梯度的存在,冰模板法制备的气凝胶孔径通常仍大于 10 μm^[36]。

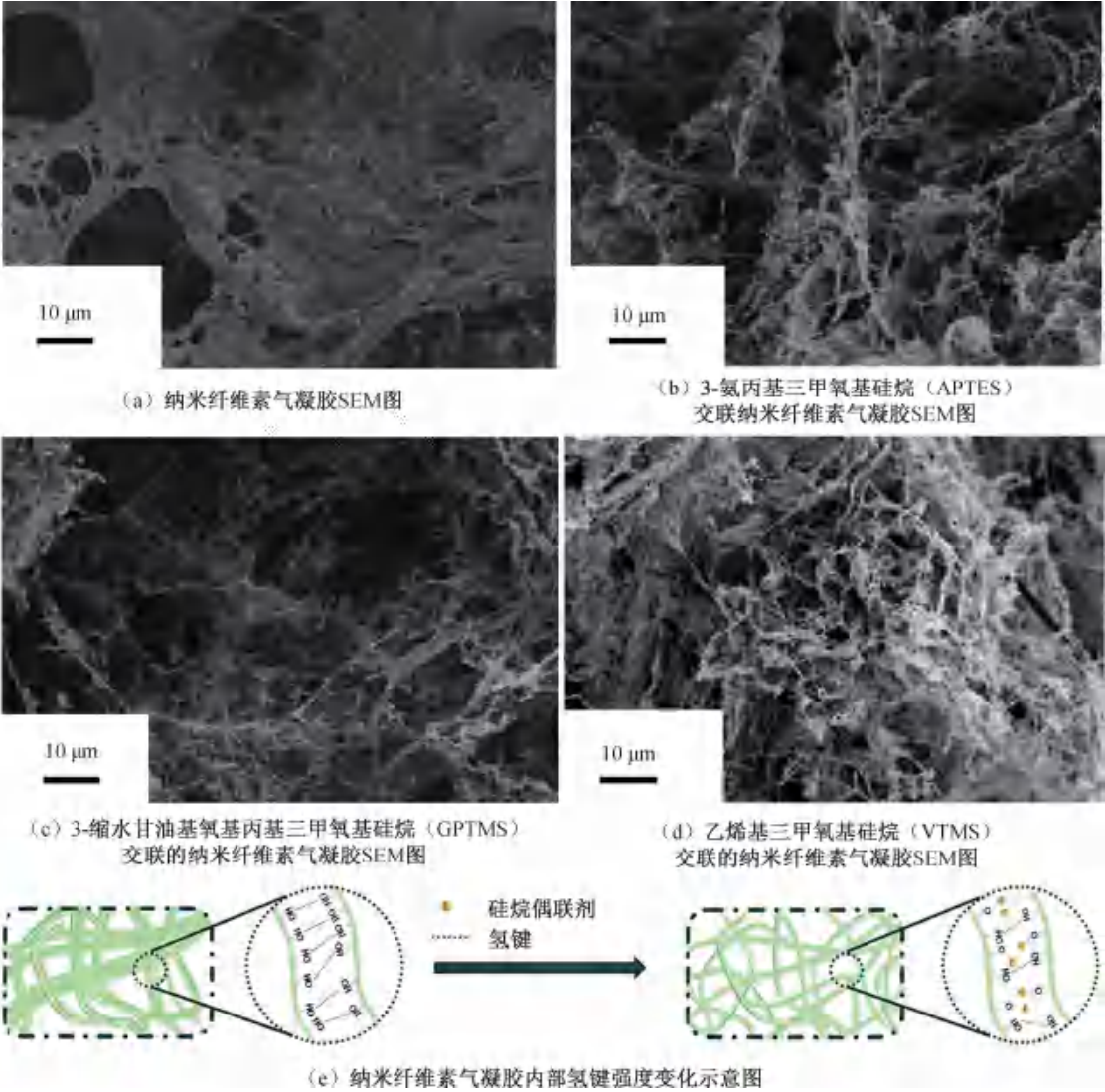
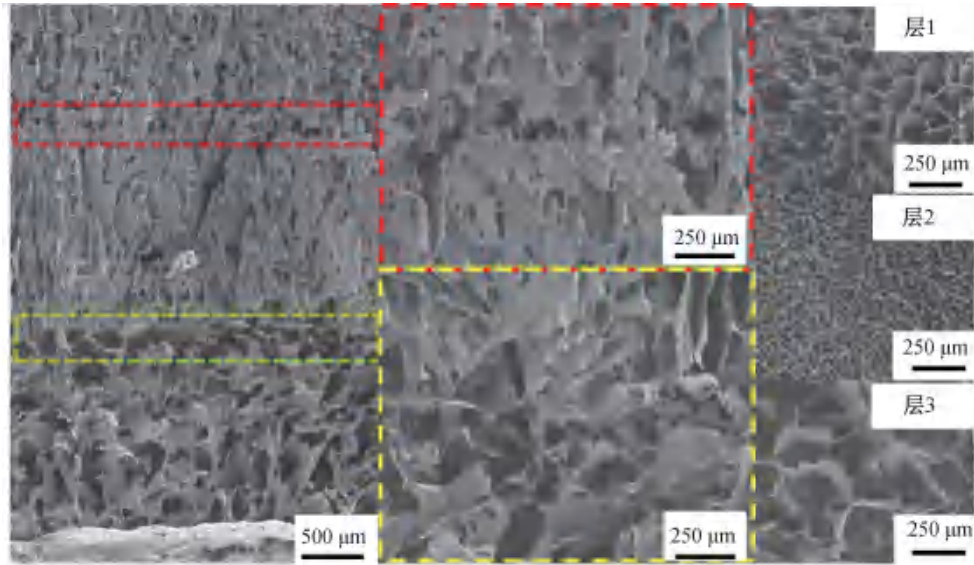


图 2 不同极性基团接枝的纳米纤维素气凝胶的 SEM 图及内部氢键强度变化示意图^[29]

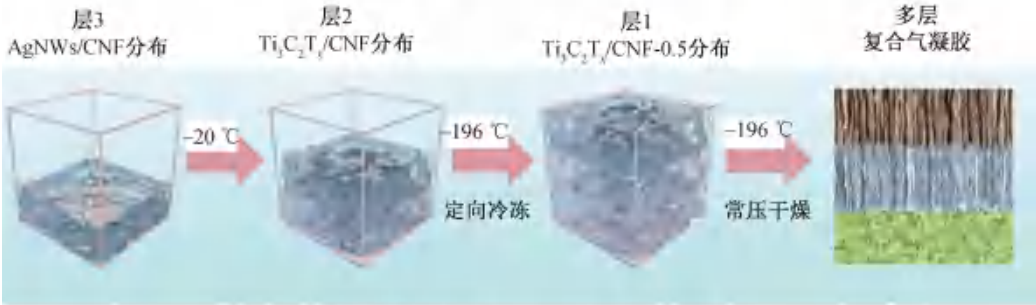
除调控冷冻速率外,也可采用在冷冻过程中不易形成大尺寸晶体的溶剂替代纤维素悬浮液中的水,这样能有效减弱因“挤压效应”导致的聚集现象。例如,利用叔丁醇(TBA)置换纤维素悬浮液中的水分,经冷冻干燥后可以得到具有三维网络结构和高 SSA 的纤维素气凝胶。Mavlan 等^[37]的研究表明:随着 TBA 用量的增加,纳米纤维素气凝胶的微观形貌由片状聚集结构转变为网状结构;当 TBA 添加质量分数从 0% 增加到 20% 时,SSA 从 2.34 m²/g 升高到 23.83 m²/g。因此,通过调控冷冻速率与溶剂组成,可以调节纳米纤维素气凝胶的微观形貌并提高 SSA。

冷冻干燥主要包括冷冻和低温真空干燥 2 个阶段,其中气凝胶孔径的形成主要是由冷冻过程中所

形成的冰晶决定的。通过冷冻干燥法制备气凝胶的优势在于可通过定向冷冻(图 4(a))调控气凝胶材料的孔结构^[38]。如 Chen 等^[33]比较了不同冷冻温度(−196、−30 ℃和 −18 ℃)及冷冻方式(传统冷冻和定向冷冻)对纳米纤维素气凝胶形态和微观结构的影响进行了比较,研究结果表明,−30 ℃下的定向冷冻是调控气凝胶结构的有效方法,能诱导形成独特的各向异性微观结构(横向蜂窝状孔和纵向通道(图 4(b))),这种结构直接决定了材料优异的压缩强度、高吸水率和快速的纵向液体传输能力。研究同时指出,尽管定向冷冻技术具有灵活调控的优势,但冷冻干燥过程本身固有的冰晶生长问题,仍是导致气凝胶网络倾向于形成低 SSA 二维片状结构的主要原因。

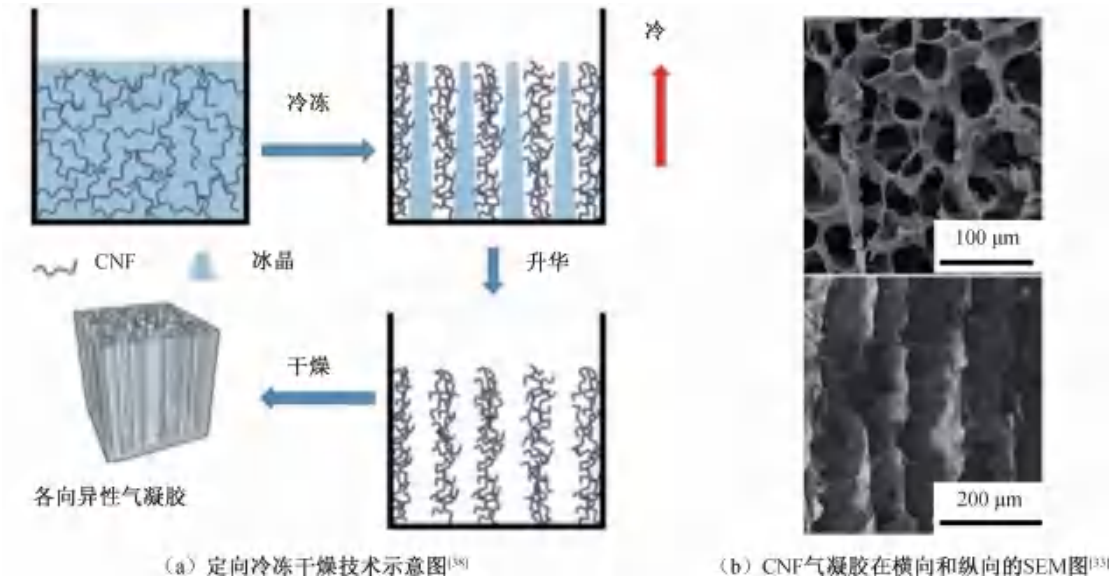


(a) 不同冷冻温度下气凝胶轴向截面和径向的SEM图像



(b) 不同冷冻温度制备纳米纤维素气凝胶的示意图

图 3 不同冷冻温度下纳米纤维素气凝胶的 SEM 图和制备示意图^[35]



(a) 定向冷冻干燥技术示意图^[38]

(b) CNF气凝胶在横向和纵向的SEM图^[33]

图 4 冷冻干燥制备纳米纤维素气凝胶示意图

1.2.2 超临界 CO₂ 干燥

与冷冻干燥不同,超临界 CO₂ 干燥是利用超临界流体特殊的溶解度、扩散性和较低的表面张力,将纳米纤维素凝胶中的溶剂进行置换。在进行超临界

CO₂ 干燥之前,通常是将纳米纤维素悬浮液冷冻成冰凝胶后,再将其内部难溶于超临界 CO₂ 或处理条件较为苛刻的原生溶剂(通常为水)置换为乙醇、丙酮等能与超临界 CO₂ 互溶的介质。再经超临界

CO₂ 干燥可以制备出纳米纤维素气凝胶。由于将凝胶内部的水置换成极性较低的有机溶剂,可以减弱纤维素纳米纤维氢键相互作用,使制备出的纳米纤维素气凝胶具有较高的 SSA。Zu 等^[39]采用乙醇作为置换介质,通过超临界 CO₂ 干燥制备了纳米纤维素气凝胶。所得气凝胶表现出相互连接的三维纳米网络结构,孔隙更均匀,SSA 可达 299 m²/g,远高于冷冻干燥法制备的样品(103 m²/g)。尽管使用超临界 CO₂ 干燥法制备的纳米纤维气凝胶能更好地保留其微纳结构,但该方法对高压容器的依赖以及使用有机溶剂的限制,降低了其可扩展性。冷冻干燥和超临界 CO₂ 干燥均面临依赖特殊设备和干燥效率较低的问题,因此近年来易于操作、能耗低的常压干燥技术逐渐成为研究热点。

1.2.3 常压干燥

在常压干燥过程中,由溶剂挥发产生的毛细管压力是导致凝胶孔壁受力和塌缩的主要原因(图 5(a))^[38]。根据杨-拉普拉斯方程^[24],通过减小溶剂的表面张力,增大溶剂与纤维素之间的接触角以及增大孔半径均可降低毛细管压力。杨-拉普拉斯方程表达式为:

$$P=\frac{2\sigma\cos\theta}{r}$$

(1)

其中: P 为毛细管压力,Pa; σ 为表面张力,N/m; θ 为接触角,(°); r 为孔半径, μm 。

增大孔径可能导致制备的纤维素气凝胶的

SSA 降低,通常在通过化学交联增强纤维素凝胶网络的机械强度的前提下,采用溶剂置换降低溶剂的表面张力,在常压烘箱干燥的条件下实现纤维素气凝胶的干燥。与超临界 CO₂ 干燥类似,在降低凝胶干燥过程中的毛细管压力的同时,也会减弱纳米纤维之间的氢键相互作用,降低干燥过程中的纳米纤维聚集。Li 等^[40]通过冷冻、解冻及溶剂交换,将凝胶内部的水替换为表面张力更低的 2-丙醇,在常压下干燥,成功获得无明显收缩的气凝胶(见图 5(b)),该气凝胶的孔隙率大于 98%,密度仅为 0.018 g/cm³。Toivonen 等^[41]通过真空过滤使用 2-丙醇和辛烷进行溶剂交换,随后进行常压干燥,获得厚度约为 25 μm 的透明纳米纤维素气凝胶膜,该气凝胶膜孔径为 10~30 nm,其 SSA 为 208 m²/g;用水重新润湿纳米纤维素气凝胶膜,并在常压干燥后得到厚度约 12 μm 的透明且压实的纳米纤维素气凝胶膜(见图 5(c)),这种差异是由于水的高毛细管压力诱导气凝胶膜发生再次聚集形成透明膜所致。Li 等^[24]使用 3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷(GPTMS)和聚乙烯亚胺(PEI)增强 CNF 凝胶网络的机械稳定性(见图 5(d)),并用丙酮代替凝胶中的水以降低溶剂表面张力。在 CNF 表面,水解后的 GPTMS 的硅羟基与纤维素分子链的羟基之间发生共价交联。同时,由于 GPTMS 的环氧基团和 PEI 的胺基之间发生相互作用,使凝胶网络的交联密度增加。这种改进的交联 3D 网络有助于凝胶孔壁在

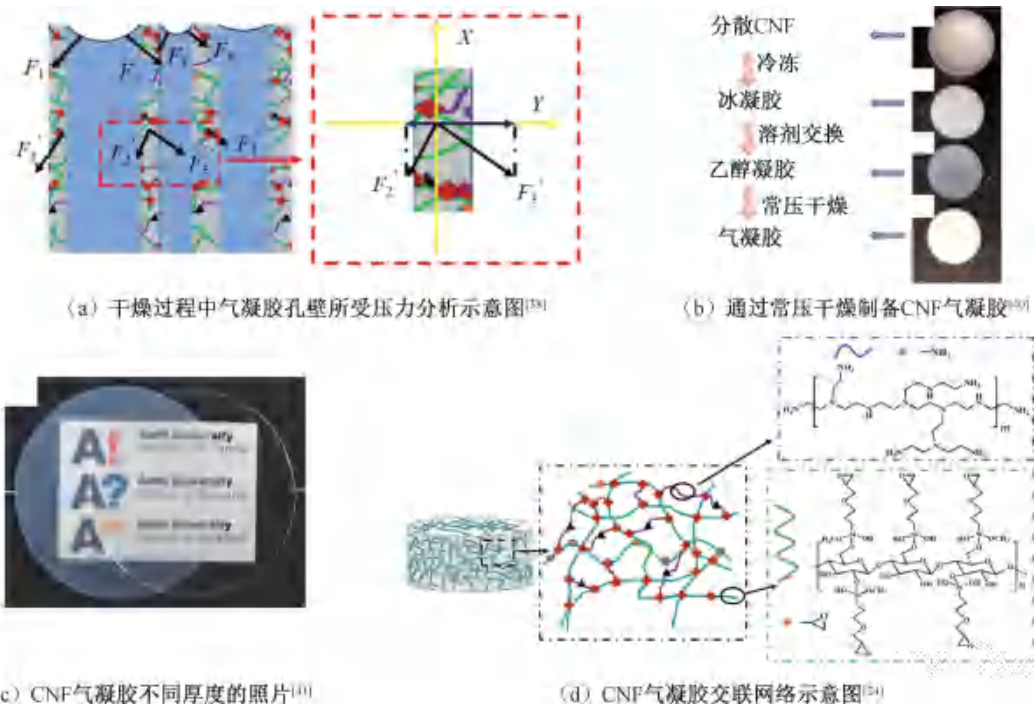


图5 常压干燥制备纳米纤维素气凝胶示意图

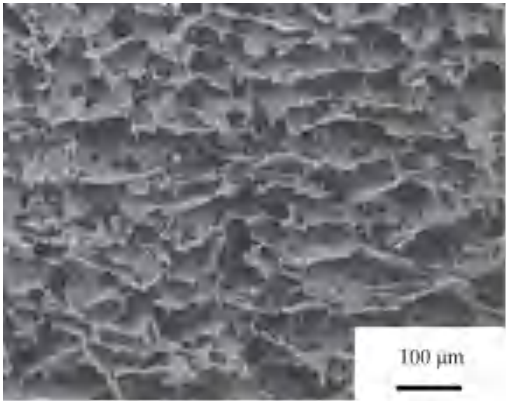
干燥过程中抵抗毛细管压力,所制备的纳米纤维素气凝胶的 SSA 是冷冻干燥制得的 4.3 倍。但是,目前对于常压干燥制备纤维素气凝胶的研究较少,仍存在溶剂置换困难、收缩率高和有机溶剂回收的难题。

2 纳米纤维素气凝胶的应用研究进展

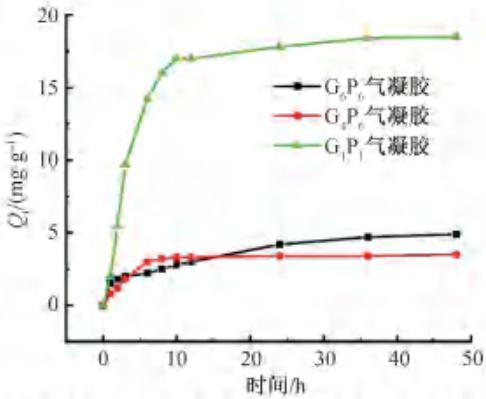
2.1 吸附领域的应用

纳米纤维素气凝胶凭借高孔隙率、高 SSA 和易于调控的化学性质,在吸附分离领域展现出广阔的应用前景。如调控纳米纤维素气凝胶表面的亲疏水性,可实现对油水混合物的吸附分离^[42];在其表面接枝特定基团(如氨基、巯基等)可实现对 Cu^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cr^{3+} 等金属离子的吸附^[43];在其表面接枝阳离子可实现对阴离子蛋白质、染料等的吸附^[44]。此外,通过控制干燥过程中冷冻的方式,可实现其内部孔径的调控^[45],因此纳米纤维素气凝胶在吸附分离领域的应用性能近年来被广泛研究。Cheng 等^[46]采用 GPTMS 和 PEI 对 CNF 进行改性,并通过模具冷冻干燥得到块状气凝胶,该气凝胶对 Cu^{2+} 具有较好的吸附性能,吸附量可达 138.0 mg/g;但由于

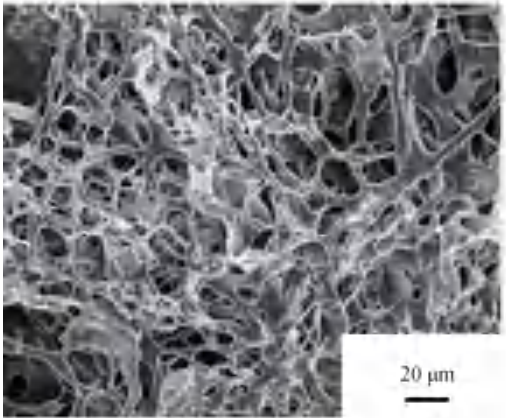
冰晶“挤压效应”导致其内部纳米纤维聚集现象严重(图 6(a))。此外,如图 6(b)所示,不同 GPTMS 与 PEI 配比制备的气凝胶对 Cu^{2+} 的吸附性能存在显著差异。其中 G_1P_1 样品虽然具备一定吸附能力,但其 SSA 相对较低,限制了活性位点的充分暴露,因此其对 Cu^{2+} 的吸附性能仍有进一步提升空间。Tang 等^[47]采用相同的交联策略对 CNF 进行化学交联改性,并将改性后 CNF 悬浮液滴入液氮中,通过抑制冰晶的过度生长,有效减轻了纳米纤维的聚集(图 6(c)),其中 CGP_3 的吸附能力最好,对 Cu^{2+} 的吸附量提升至 163.4 mg/g。如图 6(d)所示,在探究气凝胶的含量对其吸附能力的影响实验中,选取 CGP_1 为研究对象,当 CGP_1 气凝胶的含量增加时,污染物的去除率和平衡吸附容量同步升高。通过提高冷冻速率以调控冰晶尺寸,可以减小纳米纤维素气凝胶内部纳米纤维的聚集,提升其在吸附领域的应用性能。Hu 等^[45]以 GPTMS 为原料,在碱性条件下通过水解缩聚制备出聚硅氧烷乳液,并以其作为交联剂对纳米纤维素进行交联改性,通过液氮快速冷冻制备了纳米纤维素气凝胶。该气凝胶的



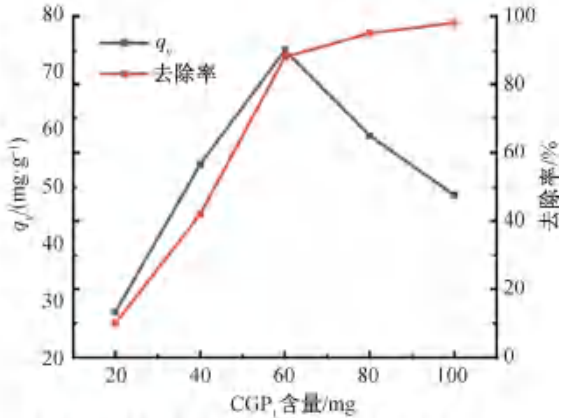
(a) 模具冷冻的纳米纤维素气凝胶的SEM图^[46]



(b) 模具冷冻的纳米纤维素气凝胶吸附的动力学曲线^[46]



(c) 纳米纤维素气凝胶微球的SEM图^[47]



(d) CGP_1 含量对吸附能力和去除率影响的折线图^[47]

图 6 采用 GPTMS 和 PEI 修饰纳米纤维素并冷冻干燥制备气凝胶的 SEM 图和吸附图

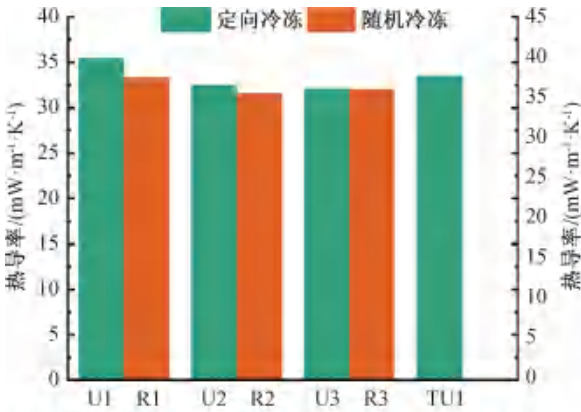
SSA 可达 $30.5\text{ m}^2/\text{g}$,是采用同样交联改性但通过冰箱冷冻制备气凝胶($7.8\text{ m}^2/\text{g}$)的 4 倍。在对亚甲基蓝(MB)的吸附试验中,网状气凝胶的吸附容量达到 120 mg/g 。

综上所述,在纳米纤维素气凝胶的吸附应用中,其微观结构(如孔径大小、孔隙连通性及 SSA)是决定吸附性能的关键因素。通过优化制备工艺,特别是调控冷冻过程中的传热速率,以抑制冰晶过度生长,可以有效构建具有精细网络结构和高 SSA 的气凝胶,从而显著降低扩散阻力并增加有效吸附位点^[48]。未来,通过进一步结合定向冷冻、3D 打印等先进成型技术,有望实现对气凝胶微观结构的精密调控,从而开发出针对重金属离子、有机污染物及 CO_2 等目标吸附质的高效选择性吸附材料,推动其在环境修复和气体分离等领域的实际应用^[49]。

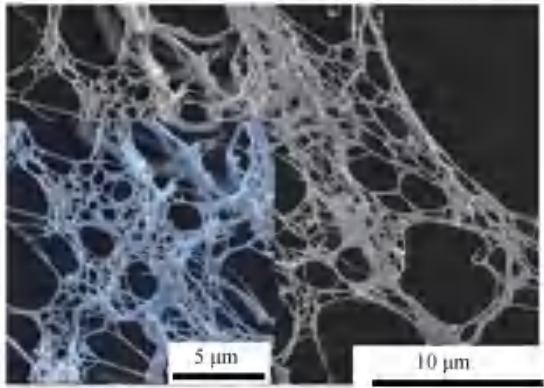
2.2 保温隔热领域的应用

纳米纤维素气凝胶因其高孔隙率和低密度特性,在保温隔热领域也具有重要应用潜力。其低密度赋予其较低的热传导性能;同时,高孔隙率能够有效固定空气,减小热对流,因此纳米纤维素气凝胶具有较低热导率^[50]。Ahmadi Heidari 等^[51]利用酿酒

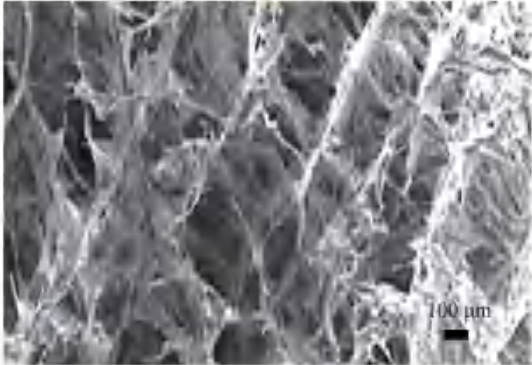
业废弃谷物(BSG)提取的 CNF,经 2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧自由基介导的氧化和冷冻干燥后制备纳米纤维素气凝胶,孔径约为 $10\text{ }\mu\text{m}$,密度为 0.031 g/cm^3 ,热导率为 $37.7\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (见图 7(a)—(b))。Teng 等^[52]使用乙烯基三甲氧基硅烷(VTMO)对纳米纤维素进行硅化修饰,因 VTMO 改性后纤维表面的羟基被有机硅烷覆盖,增强了凝胶的机械性能,降低了纤维间的氢键相互作用,制备的气凝胶密度为 0.021 g/cm^3 ,孔隙率高达 99.71% ,导热系数为 $26.5\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$,孔径约为 $6\text{ }\mu\text{m}$ (图 7(c))。为进一步验证其热管理性能,在图 7(d)所示实验装置中采用不同材料作为屋顶进行对比测试,结果表明,改性气凝胶能够显著降低热传递,表现出优异的隔热性能。因此,通过调控纳米纤维素气凝胶的微观结构,如降低密度,提升 SSA 和孔隙率,可以降低其热导率,制备出具有优异隔热性能的材料。这为生物环保和可再生的保温隔热材料的研究和开发提供了新的思路和方法。但纳米纤维素易燃的性质,需要在使用过程中提升其阻燃性能^[53]。例如 Li 等^[54]从天然马尾藻中提取纤维素纳米纤维和海藻酸盐作为原材料,通过自下而上逐层冷冻法制备出一种马尾藻纤维素阻燃结构材料,所



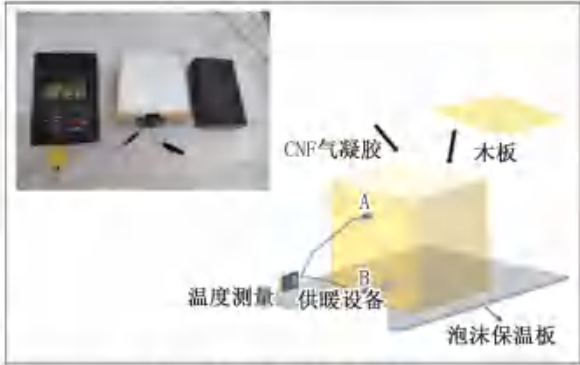
(a) BSG-CNF单向和随机冷冻获得气凝胶的热导率直方图^[51]



(b) BSG-CNF气凝胶的SEM图^[51]



(c) 硅烷改性CNF气凝胶的SEM图^[52]



(d) 小型木屋试验装置示意图^[52]

图 7 BSG-CNF 气凝胶和 VTMO 改性气凝胶的热导率和 SEM 图

得气凝胶兼具优异的力学性能(约 297 MPa)、热稳定性(约 200 °C)、低热膨胀系数(约 $7.17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)以及优异的阻燃性能。该气凝胶在明火下具备自熄特性,无火焰蔓延,远优于天然松木和纯纳米纤维素材料。仅添加 3% 海藻酸钙时,其热释放、烟释放量便远低于纯纳米纤维素材料及聚酰胺(PA)、聚乙烯(PE)等商用石油基塑料,燃烧后会形成致密炭渣层隔绝空气与热量,且 CO_2 释放温度延迟约 100 °C,仅缓慢失重无剧烈放热燃烧,产物以 CO_2 为主无大量有毒有害气体释放。

2.3 电磁屏蔽领域的应用

在电磁屏蔽(EMI)领域,纳米纤维素气凝胶凭借其独特的三维多孔结构和优异的机械柔韧性,成为理想的轻量化柔性电磁屏蔽材料载体^[55]。如通过将导电纳米材料负载于其多孔网络中,能够构建高效的导电网络,并催生多重电磁波损耗机制,进而显著提升电磁屏蔽效能^[56]。Mao 等^[35]在纤维素悬浮液中加入银纳米线(Ag NWs),通过冰晶溶解/再生和常压干燥,制备了具有不连续孔隙结构的复合纳米纤维气凝胶,结果表明,具有有序孔隙结构的第一层(孔径为 120 μm)和第二层(孔径为 40 μm)表现出优异的电磁波传输与吸收性能,而第三层无序孔隙结构在平均孔径小于 345 μm 时,无论材料介电性能如何均展现出显著的电磁波反射特性。Liu 等^[57]采用芳纶纳米纤维(ANF)、CNF、过渡金属碳氮化物(MXene)纳米片制备出多功能复合气凝胶,通过氢键和静电相互作用形成双网络架构,形成高度多孔的结构,这种高度多孔的结构使得气凝胶在 60% 应变下表现出 0.48 MPa 的卓越压缩应力以及在 X 波段宽带屏蔽效果超过 90 dB(吸收贡献大于 90%),纳米纤维素气凝胶的多孔形貌,包括孔径尺寸与分布,深刻影响着电磁屏蔽性能。通过调控多孔结构,并引入高导电组分,能够实现形貌与功能的协同增效,大

幅提升对电磁波的吸附与耗散能力,显著增强 EMI 屏蔽效能。未来研究可进一步探索多孔结构与功能纳米材料的协同设计,以开发兼具超轻、柔性、高效电磁屏蔽性能的新型纳米纤维素基复合材料。

2.4 生物医学领域的应用

纳米纤维素气凝胶凭借着易化学改性、高孔隙率、安全无毒、优异的生物相容性,在药物递送、组织工程和伤口敷料等领域成为理想材料^[58]。如图 8 所示,Li 等^[59]通过比较不同分子量(400、600、1000)的 PEG 及 PEG/ β -CD 对纳米纤维素气凝胶的共改性效果发现,随 PEG 分子量增加,气凝胶的 SSA 由 6.1765 m^2/g 增至 28.7629 m^2/g 。在气凝胶的质量浓度与细胞存活率的实验中,随着气凝胶质量浓度从 0 增加到 20 $\mu\text{g}/\text{mL}$,不同分子量的 PEG 对细胞存活率的影响很小,细胞存活率始终保持在高水平,略有下降趋势(图 8(a))。在加入 β -CD 后(图 8(b)),细胞存活率随质量浓度增加仍保持较高水平,但整体略高于纯 PEG,对分子量差异的敏感性减小。如图 8(c)所示,在载药伊马替尼(Imatinib)试验中,仅添加 PEG 的气凝胶载药量从 125 mg/g 增至 316 mg/g ,而 PEG/ β -CD 改性气凝胶则从 175 mg/g 提高至 364 mg/g ,可见,在添加同等 PEG 分子量的气凝胶中加入 β -CD 的吸附效果更好。Yu 等^[60]分别采用冷冻干燥法和超临界 CO_2 干燥法制备了以 L-抗坏血酸-2-磷酸(Asc-2P)为模型药物的羧甲基纤维素气凝胶。相较于冷冻干燥制备的气凝胶(5~18 m^2/g),超临界 CO_2 干燥的气凝胶具有更精细的网络结构和更大的 SSA,可达 30~143 m^2/g 。冷冻凝胶的孔隙率可达 95% 以上,而气凝胶的孔隙率介于 85%~95%。通过超临界 CO_2 干燥制备的气凝胶表现出更高的载药量。上述结果说明,通过化学修饰以及提高 SSA,可有效提升纳米纤维素气凝胶的药物负载性能,展现出其在生物医学领域具有重要的应用潜力。

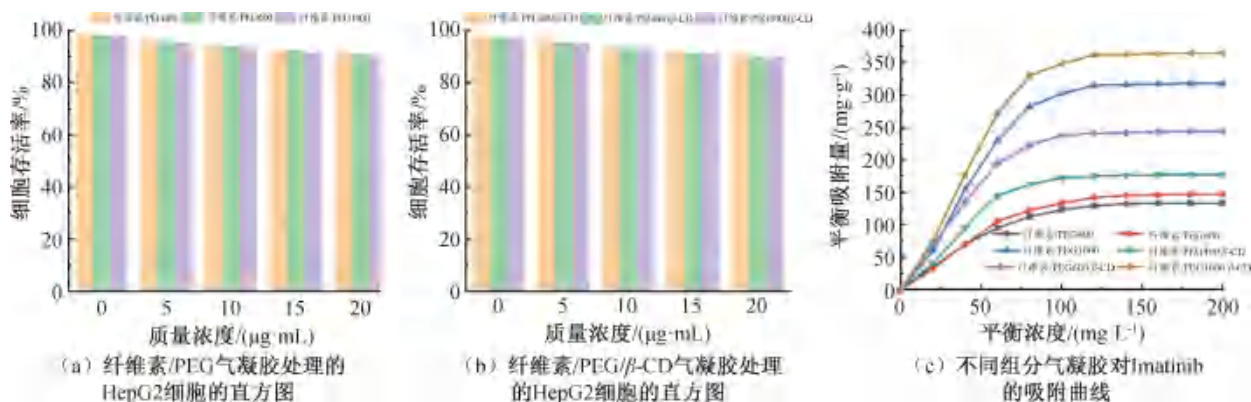


图 8 纳米纤维素/PEG 气凝胶和纳米纤维素/PEG/ β -CD 气凝胶的细胞存活率以及对 Imatinib 的吸附量^[59]

3 结 论

作为天然高分子材料,纳米纤维素气凝胶不仅具备传统无机气凝胶的低热导率、高 SSA、高孔隙率和轻质等特性,更因其原料固有的优异生物相容性、可降解性以及丰富的表面可修饰基团,展现出广阔的应用潜力。通过对纤维素链进行表面化学改性,可有效降低其极性,并减少冷冻过程中形成的冰晶尺寸,从而提升材料的 SSA。这一改进使其在吸附、隔热及电磁材料等领域具有广泛的应用潜力。此外,通过物理共混或化学修饰对气凝胶进行功能化改性,还能赋予其抗菌、超疏水、导电、导磁等特殊性能,进一步拓展其在上述领域的应用前景。然而,纤维素气凝胶制备过程中纳米纤维素的聚集问题,以及对特殊设备的依赖,是限制其应用性能提升和规模化应用的主要因素。基于此提出以下建议:

- a)深入探究纳米纤维素气凝胶制备过程中纳米纤维素的聚集机制,并探索调控气凝胶微观结构以提升其 SSA 的技术,是优化其应用性能的关键。
- b)在掌握纳米纤维素气凝胶微观形貌调控理论的基础上,实现其微观形貌与功能的协同调控(如引入特定功能性基团在调控凝胶网络氢键强度的同时赋予其功能性),有望进一步拓展纳米纤维素气凝胶的应用性能与范围。
- c)尽管超临界 CO₂ 干燥能够制备具有纳米蛛网结构的纤维气凝胶,但其对设备的依赖及高成本问题难以满足规模化生产需求。深入探索常压干燥工艺在纳米纤维素气凝胶制备中的应用,以获得低收缩率、良好机械性能及高 SSA 的产物,有望显著降低其制备成本,加速其产业化进程。

参考文献:

[1] Tan L, Tan W, Tian Y, et al. Fabrication of multifunctional cellulose aerogel materials with one-dimensional (fiber), two-dimensional (film), and three-dimensional (structure) structures based on ambient drying technology[J]. Chemical Engineering Journal, 2026, 530: 173773.

[2] Li X T, Wang L Z, Wang J Y, et al. Preparation of nanocellulose aerogel and its adsorption properties: a review[J]. Cellulose, 2026, 33(3): 1213-1237.

[3] Sandeep A, Pradyumn P, Aditya S, et al. Recent developments in nanocellulose-based aerogels in thermal applications: a review [J]. ACS Nano, 2021, 15(3): 3849-3874.

[4] Paul J, Ahankari S S. Nanocellulose-based aerogels for water purification: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 309:

120677.

[5] Wu Y Q, Yao L H. Preparation of nanocellulose aerogels by ice-templating: structure regulation and performance study [J]. Industrial Crops and Products, 2025, 237: 122201.

[6] Nargatti K I, Subhedar A R, Ahankari S S, et al. Nanocellulose-based aerogel electrodes for supercapacitors: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 297: 120039.

[7] Gao J K, Wang J Q, Cai M M, et al. Advanced superhydrophobic and multifunctional nanocellulose aerogels for oil/water separation: a review [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 300: 120242.

[8] Yang J J, Han X S, Yang W S, et al. Nanocellulose-based composite aerogels toward the environmental protection: Preparation, modification and applications[J]. Environmental Research, 2023, 236: 116736.

[9] Zhang H M, Shen H, Tu L X, et al. Development of a biomass fiber aerogel for absorption, thermal insulation and energy conservation[J]. Separation and Purification Technology, 2026, 390: 136747.

[10] Prasad C, Jeong S G, Won J S, et al. Review on recent advances in cellulose nanofibril based hybrid aerogels: Synthesis, properties and their applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261 (Part 1): 129460.

[11] Li D, Wang Y H, Long F, et al. Solvation-controlled elastification and shape-recovery of cellulose nanocrystal-based aerogels[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12 (1): 1549-1557.

[12] Zhou M, Chen D Z, Chen Q Q, et al. Reversible surface engineering of cellulose elementary fibrils: from ultralong nanocelluloses to advanced cellulosic materials[J]. Advanced Materials, 2024, 36(21): 2312220.

[13] Chu Y L, Sun Y, Wu W B, et al. Dispersion properties of nanocellulose: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 250: 116892.

[14] Han J Q, Lu K Y, Yue Y Y, et al. Nanocellulose-templated assembly of polyaniline in natural rubber-based hybrid elastomers toward flexible electronic conductors[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 128: 94-107.

[15] Wan C C, Jiao Y, Wei S, et al. Functional nanocomposites from sustainable regenerated cellulose aerogels: a review[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 359: 459-475.

[16] Zhang Y, Yin M L, Lin X H, et al. Functional nanocomposite aerogels based on nanocrystalline cellulose for selective oil/water separation and antibacterial applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 371: 306-313.

[17] 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.

[18] Ding R, Hu S J, Xu M Y, et al. The facile and controllable synthesis of a bacterial cellulose/polyhydroxybutyrate

- composite by co-culturing *Gluconacetobacter xylinus* and *Ralstonia eutropha*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 252: 117137.
- [19] Sehaqui H, Zhou Q, Berglund L A. High-porosity aerogels of high specific surface area prepared from nanofibrillated cellulose (NFC)[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71 (13): 1593-1599.
- [20] Pääkkö M, Vapaavuori J, Silvennoinen R, et al. Long and entangled native cellulose I nanofibers allow flexible aerogels and hierarchically porous templates for functionalities[J]. *Soft Matter*, 2008, 4(12): 2492-2499.
- [21] Yang X, Cranston E D. Chemically cross-linked cellulose nanocrystal aerogels with shape recovery and superabsorbent properties[J]. *Chemistry of Materials*, 2014, 26(20): 6016-6025.
- [22] Cervin N T, Aulin C, Larsson P T, et al. Ultra porous nanocellulose aerogels as separation medium for mixtures of oil/water liquids[J]. *Cellulose*, 2012, 19(2): 401-410.
- [23] Jiang F, Hsieh Y L. Super water absorbing and shape memory nanocellulose aerogels from TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils via cyclic freezing-thawing[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(2): 350-359.
- [24] 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.
- [25] Sakai K, Kobayashi Y, Saito T, et al. Partitioned aires at microscale and nanoscale; thermal diffusivity in ultrahigh porosity solids of nanocellulose[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20434.
- [26] Jiménez-Saelices C, Seantier B, Cathala B, et al. Spray freeze-dried nanofibrillated cellulose aerogels with thermal superinsulating properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 157: 105-113.
- [27] Huang Y Y, Yang H X, Yu Y H, et al. Bacterial cellulose biomass aerogels for oil-water separation and thermal insulation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11 (5): 110403.
- [28] Punia B S, Harussani M M, Ilyas R A, et al. Surface modifications of cellulose nanocrystals; Processes, properties, and applications[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 130: 107689.
- [29] Cao Y W, Chen X Y, Li Y Z, et al. Regulating and controlling the microstructure of nanocellulose aerogels by varying the intensity of hydrogen bonds[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(4): 1581-1590.
- [30] Isogai A, Zhou Y X. Diverse nanocelluloses prepared from TEMPO-oxidized wood cellulose fibers: Nanonetworks, nanofibers, and nanocrystals[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2019, 23(2): 101-106.
- [31] Mehran G, Fugen D, Ivanova E P, et al. Surface modifications of nanocellulose; From synthesis to high-performance nanocomposites[J]. *Progress in Polymer Science*, 2021, 119: 101418.
- [32] Choi Y H, Shin S J, Im W. Effect of quaternization on the re-dispersion properties of cellulose nanofibrils after drying[J]. *Industrial Crops & Products*, 2025, 228: 120915.
- [33] Chen Y M, Zhou L J, Chen L, et al. Anisotropic nanocellulose aerogels with ordered structures fabricated by directional freeze-drying for fast liquid transport[J]. *Cellulose*, 2019, 26 (11): 6653-6667.
- [34] Ji Q H, Li Z Q, Su L X, et al. Preparation, functional modification and industrial application of nanocellulose aerogels- comprehensive review[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2025, 193: 107591.
- [35] 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.
- [36] Mueller S, Sapkota J, Nicharat A, et al. Influence of the nanofiber dimensions on the properties of nanocellulose/poly (vinyl alcohol) aerogels [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(13): 41740.
- [37] Mavlan M, Chang T, Feng R D, et al. Mechanochemical esterification of cellulose nanofibers lyophilized from eutectic water-tert-butanol mixtures [J]. *Cellulose*, 2023, 30 (14): 8805-8817.
- [38] Chen Y M, Zhang L, Yang Y, et al. Recent progress on nanocellulose aerogels; preparation, modification, composite fabrication, applications[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33 (11): 2005569.
- [39] Zu G Q, Shen J, Zou L P, et al. Nanocellulose-derived highly porous carbon aerogels for supercapacitors[J]. *Carbon*, 2016, 99: 203-211.
- [40] Li Y Y, Tanna V A, Zhou Y L, et al. Nanocellulose aerogels inspired by frozen tofu[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(8): 6387-6391.
- [41] Toivonen M S, Kaskela A, Rojas O J, et al. Ambient-dried cellulose nanofibril aerogel membranes with high tensile strength and their use for aerosol collection and templates for transparent, flexible devices [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(42): 6618-6626.
- [42] Ji Q H, NAN T B, SU L X, et al. Nanocellulose-derived aerogels; Preparation strategies, hydrophobic modifications and applications in oil-water separation [J]. *Environmental Research*, 2025, 286(3): 122970.
- [43] Zhang X J, Tian Y L, Chen H H, et al. Study on the adsorption behavior of a cellulose nanofibril/tannic acid/polyvinyl alcohol aerogel for Cu(II), Cd(II), and Pb(II) heavy metal ions[J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(14): 1063.
- [44] Rashad A, Ojansivu M, Afyounian E, et al. Effects of chemical pretreatments of wood cellulose nanofibrils on protein adsorption and biological outcomes[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(6): 9173-9188.

[45] Hu X D, Tang W, Huang F H, et al. Liquid bridge inspired 3D mesh-like nanocellulose aerogel cross-linked by "spot welding" [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 515: 163414.

[46] Cheng H, Li Y Z, Wang B J, et al. Chemical crosslinking reinforced flexible cellulose nanofiber-supported cryogel[J]. Cellulose, 2018, 25(1): 573-582.

[47] Tang C X, Brodie P, Li Y Z, et al. Shape recoverable and mechanically robust cellulose aerogel beads for efficient removal of copper ions[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 392: 124821.

[48] 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; e26566.

[49] Wang Y X, Zhang J R, Xu T, et al. Bioinspired hollow fibers with efficient transport channels for wide humidity atmospheric water harvesting[J]. Advanced Functional Materials, 2026; e74928.

[50] Cai C Y, Zhao X, Dong G X, et al. Engineering nanocellulose composites for next-generation thermoregulation: harnessing the structure-property nexus for diverse applications [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2026, 168: 101150.

[51] Ahmadi Heidari N, Fathi M, Hamdami N, et al. Thermally insulating cellulose nanofiber aerogels from brewery residues [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11 (29): 10698-10708.

[52] Teng T, Tu L X, Chen Y, et al. Optimizing sustainable construction: enhancing thermal insulation performance and energy savings with surface-modified cellulose nanofiber aerogels[J]. Cellulose, 2024, 31(14): 8695-8710.

[53] Sun J H, Zhang Y T, Wang Y F, et al. Cryopolymerization-enabled superelastic and thermomechanically robust silica-sheathing nanofibrous aerogels for solar-thermal regulatory cooling[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35 (31): 2425527.

[54] Li D H, Han Z M, Shao M, et al. A robust, biodegradable, and fire-retardant cellulose nanofibers-based structural material fabricated from natural sargassum[J]. Advanced Materials, 2025, 37(9): 2417617.

[55] Zhang Y L, Liu A, Tian Y Y, et al. Direct-ink-writing printed aerogels with dynamically reversible thermal management and tunable electromagnetic interference shielding [J]. Advanced Materials, 2025, 37(35): 2505521.

[56] Fei Y, Liang M, Yan L W, et al. Co/C@cellulose nanofiber aerogel derived from metal-organic frameworks for highly efficient electromagnetic interference shielding [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 392: 124815.

[57] Liu S J, Zhang T Y, Tan B W, et al. Dual-network aramid nanofibers/cellulose Nanofibers/MXene aerogels for lightweight, pulse electromagnetic interference shielding[J]. Composites Science and Technology, 2025, 272: 111373.

[58] Tan J, Fang Y J, Wang K C, et al. Carbon nanotube reinforced carbonized cellulose aerogels for enhanced hemostasis and accelerated skin wound healing[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(37): 2417798.

[59] Li Y, Liu X Y, Liu Z M, et al. Fabrication of controllable structure of nanocellulose composite aerogel for targeted drug delivery[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 358: 123518.

[60] Yu S J, Budtova T. Creating and exploring carboxymethyl cellulose aerogels as drug delivery devices[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 332: 121925.

团队介绍

李营战学术团队专注于纳米纤维素的绿色环保制备、功能化改性和应用研究,主持国家自然科学基金、浙江省自然科学基金优青项目、浙江省自然科学基金探索项目、浙江省教育厅项目等 6 项,在纳米纤维素环保水解、纳米纤维素气凝胶功能化改性和高效制备等方面取得了较好的成果。近年来,已发表 SCI 论文 40 余篇,申请国家发明专利 15 件。积极开展企业服务工作,近年来主持企业委托项目多项。积极协助本科生参与各类学科竞赛,指导“新苗”项目 3 项,“国创”项目 1 项。

(责任编辑:张会巍)