

湿法纺气凝胶纤维的制备、性能研究与应用进展

李龙鑫 魏祎程 刘呈坤

西安工程大学 纺织科学与工程学院, 陕西 西安 710048

摘要:系统梳理了湿法纺气凝胶纤维的制备工艺, 涵盖纺丝液设计、凝固浴参数调控、牵伸及干燥策略, 重点分析了无机、有机、复合气凝胶纤维的结构性能特点, 探讨了湿法纺气凝胶纤维在保温隔热、智能可穿戴、生物医用、相变储能等领域的创新应用, 指出湿法纺丝虽在精准调控气凝胶纤维多孔结构方面优势明显, 但面临的高能耗干燥、力学性能局限及多功能集成不足等瓶颈仍有待突破。研究为未来湿法纺气凝胶纤维的工业化开发与性能优化提供理论参考。

关键词: 湿法纺丝; 气凝胶纤维; 制备工艺; 结构性能

中图分类号: TS 151

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)06-0022-10

Preparation, performance research and application progress of wet-spun aerogel fibers

Li Longxin, Wei Yicheng, Liu Chengkun

School of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract: The preparation process of wet-spun aerogel fibers was systematically reviewed, which covered spinning solution design, coagulation bath parameter control, and drawing and drying strategies. The structural and performance characteristics of inorganic, organic and composite aerogel fibers were analyzed. The innovative applications of wet-spun aerogel fibers in fields such as thermal insulation, smart wearables, biomedical uses, and phase-change energy storage were discussed. It was pointed out that although wet spinning had obvious advantages in precisely regulating the porous structure of aerogel fibers, bottlenecks such as high-energy consumption in drying, mechanical property limitations, and multifunctional integration still needed to be overcome. The research provides theoretical references for the industrial development and performance optimization of wet-spun aerogel fibers in the future.

Keywords: wet-spinning; aerogel fiber; preparation process; structural property

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划科技资源开放共享平台项目(2020-PT-043)

收稿日期: 2025-04-11

作者简介: 李龙鑫, 男, 2000年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为湿法纺丝气凝胶纤维的制备及其在热管理方面的应用, 2649113599@qq.com

通信作者: 刘呈坤, 教授, 主要研究方向为功能微纳米纤维材料的制备及应用, liuchengkun@xpu.edu.cn

气凝胶是一种具有超低密度与高度交联网络结构的纳米多孔材料,其网络骨架中充满大量气态分散介质。基于这一结构特征,气凝胶具有高孔隙率、高比表面积及出色的隔热性能等特性,在保温隔热^[1-2]、吸附分离^[3]、生物医用^[4-6]、光电催化^[7]、储能^[8]、传感^[9-11]等诸多领域展现出良好的应用前景,被认为是“21 世纪的奇迹材料”^[12]。然而,传统的块状气凝胶存在明显的缺陷,如:脆性大,极易破碎,缺乏灵活性,无法满足弯曲及变形需要。这些缺陷导致其难以进行复杂设计,从而实际应用受限^[13]。

Sung 等^[14]研究发现,材料的强度与其体积存在反比关系。换言之,体积较小的纤维材料与传统块状材料相比具有相对较高的强度。基于这一理论,Meng 等^[15]提出将传统的气凝胶转化为具有高纵横比的纤维(亚微米或纳米纤维)时,其各方面性能有望显著提高。气凝胶纤维既具有气凝胶低密度、高孔隙率、高比表面积的特点,又具有良好的柔韧性、灵活性和可织性。此外,纤维状的气凝胶还能够规避气凝胶材料干燥时因厚度大而干燥时间过长等问题^[16],并且气凝胶纤维还可形成纤维聚集体或织制成纺织品。因此,气凝胶纤维是传统气凝胶材料的理想替代品,能够作为可穿戴服装的超保温材料,扩大气凝胶材料的应用领域。

尽管已有多位学者对气凝胶纤维的制备与应用展开了系统性研究,如孙弘瑞等^[17]综述了国内外气凝胶纤维的各种制备工艺及其应用,史文路等^[18]系统对比了不同材料体系气凝胶纤维的生产工艺、特性差异及其在智能可穿戴领域的创新实践。然而,针对湿法纺丝工艺,探讨影响气凝胶纤维结构与性能因素的相关研究仍相对匮乏。为此,本文基于国内外现有相关研究文献,重点介绍湿法纺丝制备气凝胶纤维的关键制备流程与工艺、结构调控与性能优化策略,以及其研究进展与应用潜力,并指出当前湿法纺丝气凝胶纤维领域面临的主要挑战,为后续相关研究提供参考。

1 湿法纺气凝胶纤维概述

气凝胶纤维在催化、储能、保温等领域具有巨大的应用潜力。目前,制备气凝胶纤维的工艺主要有湿法纺丝、反应纺丝^[19]和冷冻纺丝^[20]3 种,具体纺

丝工艺流程如图 1 所示^[21-23]。

湿法纺丝是通过特定的装置将含有气凝胶前驱体的溶液挤至凝固浴中,使溶液中的聚合物或分子发生相分离并形成水凝胶纤维,再经干燥等处理去除溶剂,制得湿法纺丝气凝胶纤维的一种工艺。反应纺丝是在纺丝过程中同步触发化学反应,如原位聚合、交联或溶胶凝胶化等反应的一种工艺。相较于湿法纺丝,该方法制备的气凝胶纤维易产生结构缺陷,且常需增加额外的处理流程。冷冻纺丝基于低温快速冻结原理,将纺丝液(如溶胶或纳米材料悬浮液)浸入液氮等低温介质中急速固化,利用冰晶生长构建定向孔隙框架,再通过冷冻干燥去除溶剂,最终形成高比表面积的多孔结构纳米纤维。该方法虽能够实现纤维的微观有序性,但对冷冻速率和干燥条件要求严苛,存在能耗高、周期长的问题,且纤维力学性能易因冰晶分布不均而受到影响。湿法纺丝工艺能够实现气凝胶纤维的高效连续制备,且能够精确便捷地控制纤维孔隙结构,进而拓宽其应用领域。因此,湿法纺丝工艺逐渐成为大规模、连续制备气凝胶纤维的重要方法^[24]。近年来,越来越多的研究人员致力于多功能湿法纺丝气凝胶纤维的设计和制备。气凝胶纤维具有独特的性能,利用湿法纺丝工艺可将其与其他材料复合,制备具有阻燃绝热性能、传感能力、光/电/热响应效应、吸附性能等各种功能的气凝胶纤维。

图 2 展示了湿法纺丝气凝胶纤维的独特结构及其应用的多功能性^[25-28]。

湿法纺丝气凝胶纤维主要分为湿法纺无机气凝胶纤维、湿法纺有机气凝胶纤维和湿法纺复合气凝胶纤维。

1.1 湿法纺无机气凝胶纤维

1931 年,Kistler^[29]以硅酸钠为硅源、盐酸为催化剂,通过溶胶-凝胶法和超临界干燥技术制备出二氧化硅气凝胶,开创了气凝胶研究的先河。然而,直至 20 世纪 80 年代,气凝胶的研究才逐渐受到重视。随着材料科学与技术的不断发展,人们开始探索将气凝胶制备成纤维状材料,以满足不同领域的需求。最初,研究人员主要是将湿法纺丝技术与气凝胶技术相结合,制备无机气凝胶纤维。如,Qi 等^[30]通过湿法纺丝工艺制备出具有高抗拉强度和高压压缩模量且可伸缩的石墨烯气凝胶纤维。

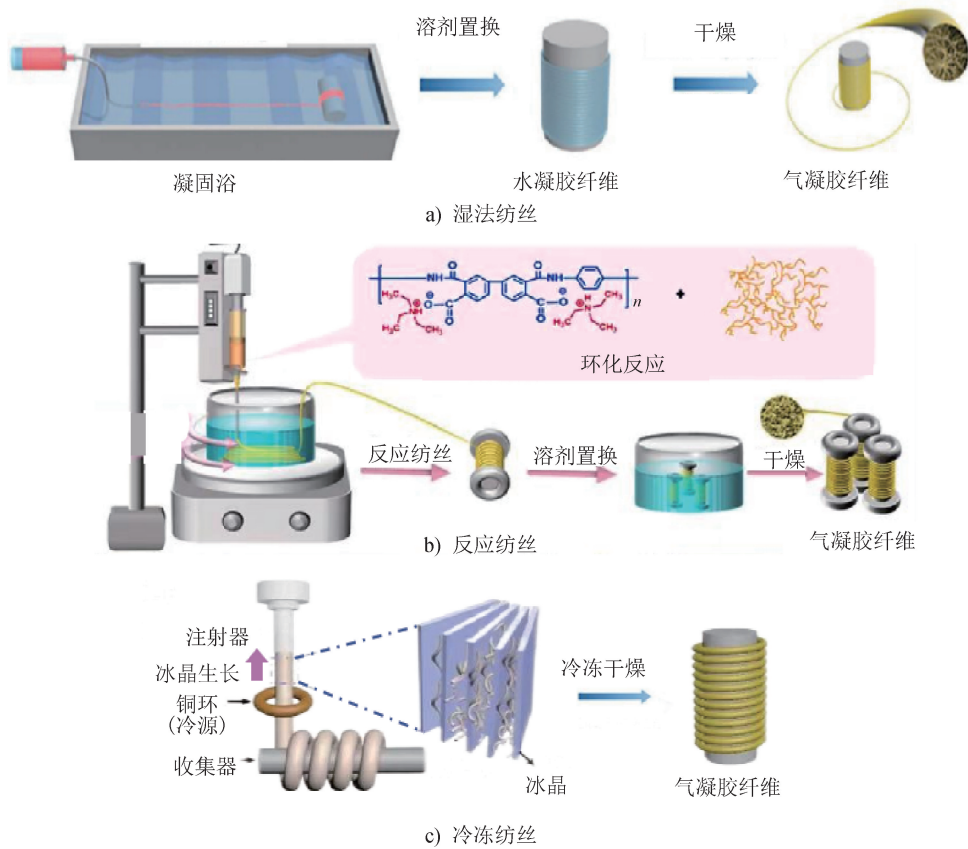


图1 湿法纺丝、反应纺丝与冷冻纺丝的工艺流程

Fig. 1 Process flows of wet spinning, reaction spinning and freeze spinning

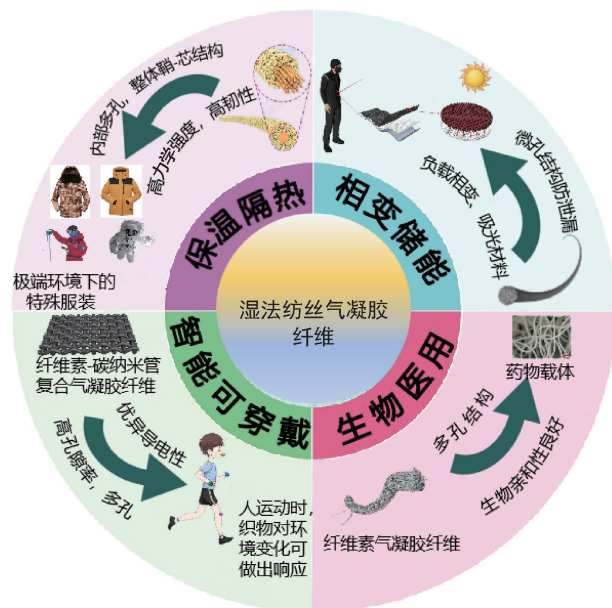


图2 湿法纺丝气凝胶纤维的独特结构及其应用的多功能性

Fig. 2 Unique structure of wet-spun aerogel fibers and their multifunctionality in applications

Li 等^[31]通过对湿法还原氧化石墨烯水凝胶纤维进

行化学镀镍处理,制备镍/石墨烯气凝胶纤维。该纤维具有优异的电热响应性和电磁屏蔽性能,在 12.5~20.0 GHz 带宽下的电磁屏蔽效率超过 30 dB。二氧化硅气凝胶材料的研究出现较早,但直至 2017 年,二氧化硅气凝胶材料才首次通过湿法纺丝与超临界干燥技术结合实现纤维化^[32]。二氧化硅气凝胶纤维的热导率低、比表面积高、化学稳定性良好,在吸附、催化和传感等领域表现出巨大的发展潜力。随着制备技术的不断进步与制备成本的逐渐降低,无机气凝胶纤维有望应用于更多的领域。

1.2 湿法纺有机气凝胶纤维

与湿法纺有机气凝胶纤维相比,湿法纺无机气凝胶纤维存在力学性能与可加工性较差等问题。基于此,湿法纺有机气凝胶纤维受到越来越多的关注。20 世纪 80 年代, Hair 等^[33]首次以间二苯酚和甲醛为原料,经单体缩聚制得有机气凝胶。其后,随着技术的发展,对有机气凝胶纤维的探索越来越深入。Li 等^[34]将湿法纺丝技术与冷冻干燥技术相结合,制备

出具有超高孔隙率、超低密度和优异力学性能的芳纶纳米纤维基气凝胶纤维,并系统探讨了凝固浴温度与纺丝前驱体固含量对纤维形态和力学性能的影响。其制备的芳纶纳米纤维基气凝胶纤维拉伸强度高达 8.1 MPa。张君妍等^[35]使用 NaOH/尿素/硫脲复合溶剂在低温下直接溶解未经干燥的原生湿态细菌纤维素(BC),然后通过湿法纺丝和冷冻干燥工艺制备出具有高比表面积和优异力学性能的 BC 气凝胶纤维,该气凝胶纤维断裂强度高达(9.36±1.68) MPa。与 BC 水凝胶纤维的(3.28±0.14) MPa 相比,断裂强度大幅提高。

1.3 湿法纺复合气凝胶纤维

随着湿法纺丝技术的不断成熟,以及人们对气凝胶纤维功能化与应用多样化需求的提升,单一成分的气凝胶纤维已难以满足特定的功能需求。研究者们尝试将不同特性的材料复合,制备综合性能更优异的气凝胶纤维。表 1 为近几年部分有机、无机、复合气凝胶纤维的种类归纳。Bai 等^[36]通过湿法纺丝与冻融循环技术,制备出一种添加聚乙二醇(PEG)和纳米氧化锌(nano-ZnO)的聚乙烯醇(PVA)/海藻酸钠(SA)/nano-ZnO 气凝胶纤维。研究结果显示,添加 PEG 和 nano-ZnO 后,复合气凝胶纤维的热导率显著提高,比不添加 PEG 和 nano-ZnO 的 PVA/SA 气凝胶纤维高 9 倍,达 0.340 2 W/(m·K),同时具有优异的抗菌性能,能有效抑制大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌的生长。王庭丽等^[37]通过同轴湿法纺丝技术,结合溶剂置换与冷冻干燥工艺,制备出含微晶纤维素(MCC)多孔气凝胶核层和热塑性聚氨酯(TPU)壳层的气凝胶纤维——MCC/TPU 气凝胶纤维。与无 TPU 壳层的 MCC 气凝胶纤维相比,该气凝胶纤维的断裂强力提高了 246%,断裂伸长率提高了 11.027%,同时热分解温度也有所提升,具有更好的力学性能和热稳定性。

采用普通湿法纺丝技术制备的气凝胶纤维大都力学性能较差,这限制了其实际应用。通过同轴湿法纺丝技术,以高强度材料作为壳层、功能性材料作为核层,制备壳核结构复合气凝胶纤维,能够大幅提升气凝胶纤维的力学性能。壳核结构气凝胶纤维能够在确保纤维原有性能的前提下,提高其力学强度。Liu 等^[38]以坚韧且不易燃的芳纶纳米纤维(ANF)作为壳层、Ti₃C₂T_x 作为核层,制备出多功能核壳结构

表 1 有机、无机、复合气凝胶纤维的种类归纳

Tab. 1 Summary of the types of organic, inorganic, and composite aerogel fibers

纤维名称	种类	文献
石墨烯气凝胶纤维	无机气凝胶纤维	[30]
镍/石墨烯气凝胶纤维	无机气凝胶纤维	[31]
芳纶纳米纤维基气凝胶纤维	有机气凝胶纤维	[34]
BC 气凝胶纤维	有机气凝胶纤维	[35]
PVA/SA/nano-ZnO 气凝胶纤维	复合气凝胶纤维	[36]
MCC/TPU 气凝胶纤维	复合气凝胶纤维	[37]

的 ANF@MXene 复合气凝胶纤维。该气凝胶纤维的拉伸强度高达 502.9 MPa,相比于传统的 MXene 纤维,力学性能大幅提升。Sun 等^[39]通过同轴湿法纺丝技术制备出聚合物封装的气凝胶纤维,其强度达 5.83 MPa,高于凯夫拉气凝胶纤维和聚酰亚胺气凝胶纤维。该研究还表明,通过逐步凝固的工艺能够在芯层和多孔鞘层之间形成多孔气凝胶网络结构,从而获得高孔隙率和良好力学性能的气凝胶纤维。由现有研究可知,通过调控和优化湿法纺丝工艺参数,能够赋予气凝胶纤维良好的纤维成形性,改善其力学性能,进而扩大气凝胶纤维的应用领域。

2 湿法纺气凝胶纤维的制备

湿法纺丝工艺是将聚合物溶解在适当的溶剂中,先形成均匀的纺丝液,再通过喷头将纺丝液挤入凝固浴中,在凝固浴的作用下,纺丝液中的溶剂与凝固浴中的沉淀剂发生双扩散,使聚合物从溶液中沉淀出来并形成纤维的工艺。湿法纺丝技术能够将传统静态的、缓慢的溶胶-凝胶过渡过程与动态的、快速且连续的纤维纺丝工艺相结合,提高气凝胶纤维规模化生产的可能性。

2.1 纺丝液的制备

纺丝液制备是湿法纺丝工艺的关键环节,其影响纺丝液的稳定性与工艺可行性,进而影响最终纤维的质量。前驱体溶解是制备纺丝液的重要步骤。前驱体的化学性质、溶解程度以及其溶解后形成的纺丝液的流动性与稳定性,在很大程度上决定了后续湿法纺丝得到的纤维的品质。前驱体材料性质不同,其溶解方式与溶解条件也不相同。合适的溶解

方式有利于提高纺丝质量和纤维性能。不同前驱体材料用溶剂及其溶解方式如表 2 所示。

表 2 不同前驱体材料用溶剂及其溶解方式

Tab. 2 Solvents and dissolution methods for different precursor materials

前驱体材料	溶剂	溶解方式	文献
芳纶纳米纤维/MXene	二甲基亚砜	去质子化、搅拌溶解	[38]
凯夫拉	二甲基亚砜	烘箱加热、搅拌溶解	[40]
微晶纤维素	氯化锌/去离子水	70 °C 下搅拌溶解	[28]
琼脂糖/丝素蛋白	去离子水	微波反复加热	[41]
BC	NaOH/尿素/硫脲	低温条件下搅拌溶解	[35]

张君妍等^[35]使用 NaOH/尿素/硫脲复合溶剂直接低温溶解原生湿态 BC, 获得透明的 BC 纺丝液。因前驱体采用的是高纯度、高聚合度、高强度与高结晶度的 BC, 故制备的 BC 气凝胶纤维与其他纤维素气凝胶相比具有更优异的力学性能, 其断裂强度和弹性模量分别高达 (9.36 ± 1.68) MPa 和 (176 ± 17.55) MPa。蒋鹏杰^[41]将琼脂糖溶液与从蚕丝中分离纯化得到的丝素蛋白溶液混合, 制得复合纺丝液, 再经湿法纺丝和冷冻干燥制得复合气凝胶纤维。研究结果显示, 添加丝素蛋白溶液能够提高气凝胶纤维的力学性能, 制得的复合气凝胶纤维断裂强度高达 2 MPa, 断裂伸长率为 40%。

部分功能材料因难以直接配制成纺丝溶液, 或直接纺丝存在困难, 通常需先转化为分散性良好的材料, 再溶解于适宜的溶剂中, 以免材料自身发生团聚。以 MXene、碳纳米管、石墨烯等材料为例, 其结构特性及层间微弱的范德瓦尔斯力作用, 导致仅采用湿纺工艺难以制备出连续的纤维。但可将这些材料分散于多种溶剂中以形成纺丝液, 进而通过湿法纺丝工艺制备出宏观连续的纤维。

2.2 凝固浴中凝固

湿法纺丝过程中, 纺丝液通过喷丝头挤出形成细流, 直接进入凝固浴中。在凝固浴中, 纺丝液中的溶剂被非溶剂或凝固剂替换, 从而使聚合物析出形成初生纤维。这一过程中, 凝固浴扮演着至关重要的角色, 其不仅影响纤维的形成, 还直接决定了纤维的微观结构和宏观性能。

对于湿法纺丝制备多孔气凝胶纤维而言, 溶剂与凝固剂、溶剂与聚合物的相互作用对聚合物的析出速率及纤维的最终表面性能具有重要影响。当聚合物在溶剂中表现出很强的溶解性时, 聚合物链与溶剂分子间会产生强烈的相互作用, 促使聚合物链

被溶剂充分溶剂化并发生膨胀, 分子间的相互作用增强。此情况下, 聚合物在溶剂中的高溶解度有利于形成高孔隙率的纤维结构。这是因为, 在强溶解性的纺丝液中, 溶剂与聚合物间的强相互作用阻碍了凝固剂向纤维内部区域的渗透, 从而减缓了纤维的凝固速度。相反, 在溶解性较差的聚合物/溶剂体系中, 聚合物链倾向于收缩并相互聚集, 导致其与溶剂的相互作用减弱。此时, 溶剂与非溶剂之间的交换速率增大, 使得纤维内部结构变得致密^[42]。湿法纺丝过程中, 纤维的形成经历了溶液从喷丝孔喷出后, 在凝固浴中扩散与凝固的阶段。这一过程为控制纤维的微观结构和物理性能提供了一定的可能性。如 Liu 等^[43]通过调控湿法纺丝工艺中的针管口径、凝固浴条件, 并结合后期的冷冻干燥技术, 成功制备出一系列粒径可控的纳米级凯夫拉气凝胶纤维。通过调节扩散速率以及控制溶剂与非溶剂之间的交换行为, 可以实现相分离过程的精确控制, 进而影响气凝胶纤维的密度、孔隙结构和力学性能。

2.3 牵伸

湿法纺丝制备气凝胶纤维过程中, 牵伸比(即纤维在凝固或后续处理阶段的拉伸比例)是纤维微观结构、力学性能及功能特性的关键工艺影响参数。当采用较小的牵伸比时, 纤维内部溶剂的挥发速率相对缓慢, 这使得凝胶网络形成过程中容易产生较大的孔洞结构; 而当牵伸比较大时, 纤维的孔径会相应减小, 同时比表面积增大。然而, 过度牵伸也可能带来不利影响, 如导致分子链发生断裂或形成结构缺陷。尤其是对于刚性较大的气凝胶前驱体而言, 过度牵伸还可能引发微裂纹的产生, 进而破坏纤维整体结构的完整性。牵伸不仅会对气凝胶纤维的力学性能产生显著影响, 还会改变其微观形貌和内部结构。Liu 等^[44]通过扫描电子显微镜(SEM)成像技

术,对采用不同牵伸比拉伸的聚苯并咪唑/钴离子气凝胶纤维的横截面和表面进行了比较分析。研究表明,随着牵伸比的逐渐增大,纤维内部的三维网络结构骨架逐渐收紧,孔隙尺寸也随之减小。

2.4 溶剂置换

湿法纺丝制备气凝胶纤维过程中,溶剂置换是关乎最终材料性能优劣的核心环节。水凝胶纤维中所含的挥发性溶剂在干燥阶段会因表面张力的作用而产生较大的毛细力,这极易导致纤维内部的纳米孔道在干燥过程中发生塌缩,进而对气凝胶纤维的性能造成不利影响。因此,在对水凝胶纤维进行干燥处理前,需通过溶剂置换的方法用低表面张力的溶剂逐步取代原始溶剂,从而有效降低纤维的表面张力,使干燥后的气凝胶纤维网络结构更稳定。值得注意的是,溶剂置换过程中,所使用溶剂的种类及不同溶剂的比例差异,也会对后续气凝胶纤维的结构和性能产生不同的影响。陈纤等^[45]通过调节溶剂置换浴中叔丁醇与水的比例,成功实现对气凝胶纤维微观结构的调控。研究结果显示,当溶剂置换浴中叔丁醇和水的体积比为 1:1 时,气凝胶纤维内部呈蓬松网状结构,其比表面积可达 $165.4 \text{ m}^2/\text{g}$,断裂强度为 4.8 MPa 。随着溶剂置换浴中水所占体积分数的增加,气凝胶纤维的比表面积逐渐减小,纤维密度相应提高,内部孔结构显著减少,力学强度有所提高。当完全以水作为溶剂置换液时,气凝胶纤维在冷冻过程中收缩明显,孔结构发生坍塌,纤维内部变得更加紧密,此时气凝胶纤维的断裂强度高达 328.7 MPa ,但尽管力学性能得到显著提升,纤维的孔结构却因坍塌而遭到破坏,内部的三维网络结构也不复存在。

2.5 干燥

干燥过程是水凝胶纤维成功转变为气凝胶纤维不可或缺的步骤。干燥的主要目的是利用空气或二氧化碳置换水凝胶网络中的液体,即以一種確保原始凝胶网络不坍塌并得以完整保留的方式,将多余液体提取出来。

目前,气凝胶纤维的干燥主要采用 3 种方法,即常压干燥、冷冻干燥和超临界干燥。常压干燥是在特定环境压力条件下对湿凝胶进行干燥处理。这一过程通常需要经过多步骤的溶剂置换,以缓解毛细力作用,或提升纳米结构克服毛细力的能力^[46]。该

干燥技术的效果在很大程度上依赖于对内部凝胶表面的改性处理。如,王虹等^[47]通过表面疏水改性与纤维增强复合的协同策略,成功实现了 SiO_2 气凝胶的常压低成本干燥。与冷冻干燥和超临界干燥相比,常压干燥的显著优势在于成本低。冷冻干燥则是先将水凝胶纤维在低温低压条件下冷冻,使纤维中的水分转化为固态的冰。随后,在真空环境中,使冰直接升华为水蒸气,从而去除水分,最终留下具有多孔结构的气凝胶纤维。这种方法能够在不破坏气凝胶纤维内部结构的情况下完成干燥,较好地保持纤维的原有特性。超临界干燥法是目前获取气凝胶纤维时,对纤维结构破坏最小、效果最显著的方法。以超临界二氧化碳为例,在超临界状态下,它既具备气体的扩散性,又具有液体的密度。因此,它可以在无明显气-液界面的情况下,将凝胶中的溶剂置换出来,从而有效避免普通干燥过程中因溶剂表面张力导致的凝胶孔结构坍塌问题。从微观结构来看,相较于冷冻干燥,超临界干燥法制备的气凝胶纤维的多孔结构更好。

湿法纺丝过程中,气凝胶纤维的纺丝参数、工艺条件以及干燥方式不同,将赋予气凝胶纤维不同的结构和功能特性。结合不同的应用需求,通过创新、改善并优化气凝胶纤维的制备工艺、条件和流程,能够进一步拓展气凝胶纤维的应用领域。

3 湿法纺气凝胶纤维的功能及其应用

通过将传统气凝胶的三维多孔网络结构转化为纤维形态,能够突破块体气凝胶脆性大、应用受体积限制的瓶颈。作为柔性多孔材料的代表,气凝胶纤维凭借轻质、高孔隙率以及功能可设计性强等优势,成为功能化纤维领域的研究热点。在众多气凝胶纤维制备技术中,湿法纺丝技术优势明显。其工艺成熟、成本可控,能够精准调控纤维结构,因而成为规模化生产气凝胶纤维的核心方法。湿法纺制的气凝胶纤维,因具备工艺兼容性好、结构可控性强以及多场景适配等特点,在热管理、环境治理、柔性电子等多个领域展现出巨大的应用潜力。此外,基于湿法纺丝工艺,气凝胶纤维在保持自身原有结构和功能的基础上,还可通过整合其他组分或引入二次加工的方法,进一步拓展和优化其功能,实现多样化

发展。

3.1 保温隔热

气凝胶具备纳米级多孔网络结构,呈现出超低密度与超高孔隙率的特性,其中的空气占比极大,而静止空气的导热系数低,气凝胶也因此成为热管理领域一种新兴的隔热材料。采用湿法纺丝工艺将气凝胶制成纤维,不仅完整保留了其原有的多孔特性,还赋予材料良好的柔韧性与可加工性。这使得气凝胶纤维在对高效隔热有需求,同时对材料轻质与灵活性有严格要求的热管理场景中,展现出巨大的应用潜力。

Li 等^[48]将湿法纺丝与冷冻干燥技术相结合,以有机可溶性聚酰亚胺作为基体,成功制备出可控多孔结构的高强度聚酰亚胺气凝胶纤维(PAF)。这种纤维的孔隙率高、力学性能和热稳定性优异。研究结果显示,在 25 °C 的环境温度下,PAF 织物的导热系数低至 0.052 W/(m·K),远低于传统聚合物泡沫。Liu 等^[43]将凯夫拉纤维制成纳米纤维分散液,再采用湿法纺丝技术将其制成水凝胶纤维,接着通过干燥工艺,制备出一种具有高保温性能的凯夫拉气凝胶纤维。试验显示:该凯夫拉气凝胶纤维能在 -196 °C 和 300 °C 的极端温度下长时间隔热保温,且力学性能较好;在 -60 °C 环境下,该凯夫拉气凝胶纤维的保温能力是棉纤维的 2.8 倍;相比市售的优质中空纤维和超细纤维,该凯夫拉气凝胶纤维的保温性能更优。Du 等^[49]采用湿法纺丝工艺,以正硅酸乙酯为前驱体,成功开发出二氧化硅气凝胶纤维。该纤维材料展现出优异的隔热特性,能够在较宽的温度范围内保持性能稳定,同时还具备良好的柔韧性。Jin 等^[40]通过湿法纺丝和冷冻干燥技术的结合,采用扁平化针头开发出肌肉化凯夫拉气凝胶带状纤维。这种独特的结构显著提升了纤维的力学强度和绝热性能。纤维横截面呈纺锤状,具备纳米多孔结构,孔隙率高达 94.8%。由这种气凝胶纤维制成的织物,热导率仅为 37 W/(m·K),热重分析结果显示其初始分解温度接近 500 °C,热稳定性十分优异。此外,该织物还具备优异的力学性能、阻燃性能及绝热效率,使得这种气凝胶纤维在高温隔热和智能热管理领域的应用潜力不容忽视。

3.2 智能可穿戴

当前,纺织领域应用的气凝胶纤维大多以绝缘

材料作为基体,这限制了它们在导电需求较高场景中的应用。气凝胶材料具备高孔隙率和良好的透气性,且密度极低。若采用气凝胶材料制备智能可穿戴设备,将能够显著减小设备质量,大幅降低佩戴者的负担,尤其适合长时间运动场景下使用。因此,气凝胶材料在智能可穿戴领域优势显著。借助湿法纺丝工艺,可将石墨烯、碳纳米管或导电高分子等掺杂到气凝胶的前驱体溶液中,并通过调整后续纺丝工艺参数,制备具有高导电性的气凝胶纤维。所得纤维既能保持气凝胶纤维特有的微观结构,还具有导电性能,进而实现气凝胶纤维在智能可穿戴领域的广泛应用。

He 等^[50]通过向海藻酸钠溶液中掺杂 Fe₃O₄ 纳米颗粒,以及在纤维表面喷涂银纳米线,制得导电气凝胶纤维,然后采用该气凝胶纤维设计制备火灾预警(SFA)电子织物。将 SFA 电子织物与报警灯、低压直流电源相连后发现,该 SFA 电子织物暴露在火焰环境中,其电阻会迅速降低,警报灯在 2~3 s 内迅速被触发,系统展现出超灵敏的火灾预警反应。此外,研究人员还采用垂直燃烧试验,对比了该 SFA 电子织物与商业棉织物的阻燃性能。结果显示,棉织物遇火 2 s 即被点燃并完全燃烧,而 SFA 电子织物与火焰接触 5 s 仍难以点燃,这充分显示出其优异的阻燃性能。

Huang 等^[51]将芳纶纳米纤维(ANF)与碳纳米管(CNT)共混溶液经质子化处理后,通过湿法纺丝工艺制得 ANF/CNT 水凝胶纤维,再通过原位聚合在纤维表面及内部构建聚吡咯(PPy)导电层,形成具有双导电网络的 ANF/CNT/PPy 气凝胶纤维。该材料中,内部 CNT 能够强化 ANF 骨架并构建主导电通路,而 PPy 涂层则通过界面导电优化导电网络协同性。该 ANF/CNT/PPy 气凝胶纤维的多孔结构赋予纤维可调控的压缩/拉伸依赖性电阻响应,且在酸、碱、盐环境中电阻率变化率小于 10%,稳定性优异。

3.3 生物医用

湿法纺丝制备的生物基气凝胶纤维独特的结构特性使其具备卓越的药物递送性能。这种纤维具有多孔网络结构,不仅孔隙率高,而且纳米级表面占比高,这为药物负载提供了理想的基质条件。具体而言,药效分子能够以非晶态的形式嵌于三维骨架

中,这一特性可显著改善难溶性药物的释放性能。此外,纤维内部高度贯通的孔洞结构,极大地增加了材料与体液的接触面积,构建起高效的药物溶出与扩散通道,确保了药物递送的效果。

Rostamitabar 等^[28]使用湿法纺丝与超临界 CO₂ 干燥技术,成功开发出用于生物医学领域的纤维素气凝胶纤维(CAF)。这种气凝胶纤维展现出高比表面积(100~180 m²/g)和高孔隙率(87.5%)特征,从而表现出优异的吸湿性与吸水能力。在药物负载试验中,研究人员将模型药物——罗丹明 B(RB)、荧光素(FL)和甲基蓝(MB)依次浸渍到 CAF 上。试验结果显示,负载药物的纤维能够实现药物的立即释放,药物加载效率最高可达 36.4%。此外,CAF 还具有产品结构多样性,既能够形成编织网状结构,也可制成针刺非织造布,在生物医学纺织品领域展现出广阔的应用前景。

3.4 相变储能

调温相变纤维材料通过感知环境温度波动表现出智能热响应特性^[52]。当温度发生改变时,该纤维可动态调节自身的能量吸收与释放行为。基于这一特性,其在人体热能管理及可穿戴功能织物领域展现出重要的技术价值。然而,目前相变纤维材料仍面临一些亟待解决的问题,如相变材料易发生泄漏、能量储存的稳定性欠佳等。

气凝胶纤维因具有高孔隙率和大纳米孔径,内部结构蕴含着非凡的毛细力。其自身的毛细管效应,为相变材料的集成提供了孔级空间,能够作为相变材料的良好载体框架,将相变材料封装于纤维内部,进而有效防止相变材料泄漏。

Liu 等^[44]采用湿法纺丝工艺,先将溶于二甲苯的芳纶纳米纤维溶液通过喷丝头挤入凝固浴中,形成凝胶纤维,再经过溶剂置换和冷冻干燥处理,最终得到 KNF 气凝胶纤维。他们还通过调节相关工艺参数,实现了对该气凝胶纤维直径、孔隙结构以及力学性能的有效控制。制得的气凝胶纤维比表面积高达 240 m²/g,并且在极端温度(-196 ℃或 300 ℃)以及室温条件下,均表现出优良的隔热性能。其后,他们又借助复合工艺将 PEG 整合到凯夫拉气凝胶基质内部,成功开发出新型 PEG/凯夫拉复合相变气凝胶纤维。该材料的三维多孔网络结构与强毛细吸附效应协同作用,能够有效抑制相变组

分在相态转变过程中的外溢现象,其相变潜热值达 162 J/g,表现出优异的能量储存性能。Zhang 等^[53]运用同轴湿法纺丝和逐步凝结的方法,制备出一种多功能纤维素纳米纤维/多壁碳纳米管气凝胶纤维。该材料在多孔气凝胶芯层外构建了致密多孔保护层,力学强度可达 2.62 MPa,同时导热系数低至 0.049 W/(m·K),具有优良的机械支撑能力与隔热性能。通过负载 PEG 形成复合相变纤维后,该材料表现出 128.6 J/g 的高相变焓值,证实了其优良的热能储存与调控能力。这种核壳结构不仅有效避免了相变材料泄漏问题,还能协同实现电/光热加热及热电转换功能,达成将力学性能—热能存储—主动热管理多维度集成的目标,为智能热管理纺织系统提供了创新性的解决方案。

4 结论与展望

目前,湿法纺丝工艺在气凝胶纤维的制备领域占据关键地位。该工艺优势显著,一方面能够实现气凝胶纤维的连续化与规模化生产,并且可以精准调控纤维的多孔结构;另一方面,通过对纺丝液设计、凝固浴参数以及牵伸与干燥策略等关键工艺进行优化,能够制备出不同性能的无机、有机及复合气凝胶纤维,实现多材料、多结构高性能气凝胶纤维的制备与应用。

尽管湿法纺气凝胶纤维在结构可控性与功能多样性方面展现出显著优势,但在实际应用过程中,仍面临一些挑战。如需要攻克规模化生产技术难题,包括干燥过程中能耗高、纤维连续化生产过程中稳定性欠佳等。同时,现有纤维的强度和柔韧性有待进一步提高,以满足复杂场景下的耐久性需求。

未来,研发更高效且环保的湿法纺丝工艺势在必行,同时要积极探索材料复合设计的新路径,不断拓展气凝胶纤维的功能多样性。此外,要大力推动低成本材料和绿色工艺的研究,加速气凝胶纤维从实验室研究迈向实际应用的进程,使其在可穿戴设备、新能源及极端环境防护等领域发挥更大的价值。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] ZHAO S Y, SIQUEIRA G, DRDOVA S, et al. Additive manufacturing of silica aerogels [J]. *Nature*, 2020, 584: 387-392.
- [2] GUO J R, FU S B, DENG Y P, et al. Hypocrystalline ceramic aerogels for thermal insulation at extreme conditions [J]. *Nature*, 2022, 606: 909-916.
- [3] PEYDAYESH M, SUTER M K, BOLISSETY S, et al. Amyloid fibrils aerogel for sustainable removal of organic contaminants from water [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(12): 1907932.
- [4] LI X B, LI Q, FEI J B, et al. Self-assembled dipeptide aerogels with tunable wettability [J]. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 2020, 59(29): 11932-11936.
- [5] ZHANG K X, JIAO X Y, ZHOU L P, et al. Nanofibrous composite aerogel with multi-bioactive and fluid gating characteristics for promoting diabetic wound healing [J]. *Biomaterials*, 2021, 276: 121040.
- [6] YANG G H, HUANG Z Z, MCCARTHY A, et al. Super-elastic carbonized mushroom aerogel for management of uncontrolled hemorrhage [J]. *Advanced Science*, 2023, 10(16): 2207347.
- [7] DU R, WANG J Y, WANG Y, et al. Unveiling reductant chemistry in fabricating noble metal aerogels for superior oxygen evolution and ethanol oxidation [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1590.
- [8] NYSTRÖM G, MARAIS A, KARABULUT E, et al. Self-assembled three-dimensional and compressible interdigitated thin-film supercapacitors and batteries [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 7259.
- [9] WANG L, ZHANG M Y, YANG B, et al. Highly compressible, thermally stable, light-weight, and robust aramid nanofibers/Ti₃AlC₂ MXene composite aerogel for sensitive pressure sensor [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8): 10633-10647.
- [10] WU J H, FAN X Q, LIU X, et al. Highly sensitive temperature-pressure bimodal aerogel with stimulus discriminability for human physiological monitoring [J]. *Nano Letters*, 2022, 22(11): 4459-4467.
- [11] CHEN Z H, ZHUO H, HU Y J, et al. Wood-derived lightweight and elastic carbon aerogel for pressure sensing and energy storage [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(17): 1910292.
- [12] HÜSING N, SCHUBERT U. Aerogels-airy materials: chemistry, structure, and properties [J]. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 1998, 37(1/2): 22-45.
- [13] VÍCTOR-ROMÁN S, SIMÓN-HERRERO C, ROMERO A, et al. CNF-reinforced polymer aerogels: influence of the synthesis variables and economic evaluation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 262: 691-701.
- [14] SUNG W J, HYUN S H, KIM D H, et al. Fabrication of mesoporous titania aerogel film *via* supercritical drying [J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(15): 3997-4002.
- [15] MENG S, ZHANG J Y, CHEN W P, et al. Construction of continuous hollow silica aerogel fibers with hierarchical pores and excellent adsorption performance [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, 273: 294-296.
- [16] SIMÓN-HERRERO C, CAMINERO-HUERTAS S, ROMERO A, et al. Effects of freeze-drying conditions on aerogel properties [J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(19): 8977-8985.
- [17] 孙弘瑞, 赵燕. 气凝胶纤维制备方法及应用研究 [J]. *化纤与纺织技术*, 2022, 51(7): 15-17.
- [18] 史文路, 张波, 曲丽君, 等. 气凝胶纤维制备及其智能纺织品应用进展 [J]. *棉纺织技术*, 2024, 52(12): 91-97.
- [19] POHL H A. Reaction spinning of fibers [J]. *Textile Research Journal*, 1958, 28(6): 473-477.
- [20] SHAO G F, HANAOR D A H, SHEN X D, et al. Freeze casting: from low-dimensional building blocks to aligned porous structures; a review of novel materials, methods, and applications [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(17): 1907176.
- [21] SHENG Z Z, LIU Z W, HOU Y L, et al. The rising aerogel fibers: status, challenges, and opportunities [J]. *Advanced Science*, 2023, 10(9): 2205762.
- [22] LI M M, WU Z Q, CHEN X, et al. Continuous and strong polyimide aerogel fibers enhanced by Para-aramid nanofibers prepared *via* a “Reaction Spinning” for thermal insulation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 486: 150255.
- [23] XUE T T, ZHU C Y, FENG X L, et al. Polyimide aerogel fibers with controllable porous microstructure for super-thermal insulation under extreme environments [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, 4(5): 1118-

- 1128.
- [24] GUO X, ZHANG Y X, LI J, et al. Wet spinning technology for aerogel fiber: pioneering the frontier of high-performance and multifunctional materials [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2024, 6(6): 1669-1709.
- [25] ZHU C Y, XUE T T, MA Z C, et al. Mechanically strong and thermally insulating polyimide aerogel fibers reinforced by prefabricated long polyimide fibers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(9): 12443-12452.
- [26] CHEN Y A, ZHANG C Z, TAO S M, et al. High-performance smart cellulose nanohybrid aerogel fibers as a platform toward multifunctional textiles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 466: 143153.
- [27] ZHANG D, LIANG Q Q, ZHANG T, et al. A dual gelation strategy under gravity-enhanced orientation to construct super-strong and tough bacterial cellulose phase change fiber for wearable heat supply [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(3): 2413361.
- [28] ROSTAMITABAR M, SUBRAHMANYAM R, GURIKOV P, et al. Cellulose aerogel micro fibers for drug delivery applications [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2021, 127: 112196.
- [29] KISTLER S S. Coherent expanded aerogels and jellies [J]. *Nature*, 1931, 127: 741.
- [30] QI Y X, XIA Y X, LI P, et al. Plastic-swelling preparation of functional graphene aerogel fiber textiles [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2023, 5(6): 2016-2027.
- [31] LI G Y, HONG G, DONG D P, et al. Multiresponsive graphene-aerogel-directed phase-change smart fibers [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(30): 1801754.
- [32] PICO D, MEYER E H, LÜKING A, et al. SILICA-AERO: production of lightweight silica aerogel fibers for excellent heat insulating application [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, 60: 91-96.
- [33] HAIR L M, PEKALA R W, STONE R E, et al. Low-density resorcinol-formaldehyde aerogels for direct-drive laser inertial confinement fusion targets [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1988, 6(4): 2559-2563.
- [34] LI M M, CHEN X, LI X T, et al. Controllable strong and ultralight aramid nanofiber-based aerogel fibers for thermal insulation applications [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, 4(5): 1267-1277.
- [35] 张君妍, 孟思, 陈文萍, 等. 高力学强度细菌纤维素气凝胶纤维的连续化制备 [J]. *高分子学报*, 2021, 52(1): 69-77.
- [36] BAI Z J, ZHANG H, ZHU H T, et al. PVA/sodium alginate multi-network aerogel fibers, incorporated with PEG and ZnO, exhibit enhanced temperature regulation, antibacterial, thermal conductivity, and thermal stability [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 317: 121037.
- [37] 王庭丽, 宋理阳, 臧雪妍, 等. 微晶纤维素-热塑性聚氨酯核壳结构气凝胶纤维的制备及性能 [J]. *南通大学学报(自然科学版)*, 2024, 23(2): 12-20.
- [38] LIU L X, CHEN W, ZHANG H B, et al. Super-tough and environmentally stable aramid nanofiber@MXene coaxial fibers with outstanding electromagnetic interference shielding efficiency [J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 111.
- [39] SUN H, MU W, CUI X, et al. Polymer-encapsulated aerogel fibers prepared via coaxial wet spinning with stepwise coagulation for thermal insulation [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(1): 552-559.
- [40] JIN Y Y, TANG Y T, CAO W H, et al. Muscular Kevlar aerogel tapes attractive to thermal insulation fabrics [J]. *Frontiers in Materials*, 2023, 9: 1091830.
- [41] 蒋鹏杰. 琼脂糖基复合气凝胶纤维的制备及其性能研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- [42] ILLANGAKOON U E, MAHALINGAM S, MATHARU R K, et al. Evolution of surface nanopores in pressurised gyrosun polymeric microfibers [J]. *Polymers*, 2017, 9(10): 508.
- [43] LIU Z W, LYU J, FANG D, et al. Nanofibrous Kevlar aerogel threads for thermal insulation in harsh environments [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(5): 5703-5711.
- [44] LIU T M, XIONG S Q, SUN Q C, et al. Redox responsive sol-gel transition: a new concept for continuous spinning of high-performance and recyclable aerogel fibers [J]. *Chemistry of Materials*, 2023, 35(18): 7605-7614.
- [45] 陈纤, 李猛猛, 赵昕, 等. 纳米芳纶气凝胶纤维的制备与微观结构调控 [J]. *纺织学报*, 2021, 42(11): 17-23.
- [46] STEINER S A, AEGERTER M A, KOEBEL M M, et al. Glossary of aerogel terminology [M] // *Springer Handbook of Aerogels*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 1745-1762.

(下转第 52 页)