

纳米纤维素的制备及其气凝胶研究进展

徐子博^{a,b} 路紫阳^{a,b} 张 阳^a 李长弓^a 吴 思^a 刘冷杉^a 曹新旺^{a,b}

武汉纺织大学 a. 生物质纤维与生态染整湖北省重点实验室;

b. 纺织科学与工程学院, 湖北 武汉 430200

摘要: 纳米纤维素作为一种储量丰富的绿色生物质纳米材料, 兼具高比表面积及优异的力学性能和生物可降解性, 在材料领域展现出重要的研究价值与应用潜力。先概述国内外纤维素提取的研究现状, 随后探讨纳米纤维素的制备以及纳米纤维素气凝胶的研究进展, 最后展望未来绿色低碳工艺, 以及智能功能复合和产业链协同构建的发展方向, 旨在为推动纳米纤维素替代传统化石基材料、助力可持续发展提供理论参考。

关键词: 纤维素提取; 纳米纤维素; 功能化应用; 生物可降解性; 气凝胶

中图分类号: TB383. 1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)07-0024-06

Preparation of nanocellulose and research progress on its aerogel

Xu Zibo^{a,b}, Lu Ziyang^{a,b}, Zhang Yang^a, Li Changong^a, Wu Si^a, Liu Lingshan^a, Cao Xinwang^{a,b}

a. Hubei Key Laboratory of Biomass Fibers and Eco-Dyeing & Finishing;

b. School of Textile Science and Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, Hubei, China

Abstract: As an abundant green biomass nanomaterial, nanocellulose features a high specific surface area, along with excellent mechanical properties and biodegradability, showing significant research value and application potential in materials field. Firstly, the research status of cellulose extraction at home and abroad was summarized. Then, the preparation of nanocellulose and the research progress of nanocellulose aerogel were discussed. Finally, the development directions of green and low-energy-consumption processes, as well as intelligent functional composites and collaborative construction of industrial chains were prospected, aiming to provide a theoretical reference for promoting the replacement of traditional fossil-based materials with nanocellulose and supporting sustainable development.

Keywords: cellulose extraction; nanocellulose; functional application; biodegradability; aerogel

随着化石资源的日益枯竭与环境问题的凸显, 开发绿色可再生生物基材料已成为材料科学领域重要的研究方向。纤维素是自然界中储量非常丰富的

天然高分子多糖, 对其进行纳米化处理得到的纳米纤维素^[1-3], 兼具纳米尺度效应、高比强度、高比表面积、生物相容及可降解等优异特性^[4], 被认为是

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52173026)

收稿日期: 2026-01-24

作者简介: 徐子博, 男, 2002 年生, 在读硕士研究生, 研究方向为功能纺织品, 3264093547@qq.com

通信作者: 曹新旺, 博士, 副教授, 研究方向为功能纺织品的开发与应用, aswang1984@163.com

极具潜力的新型纳米生物质材料。以纳米纤维素为基元构筑的三维多孔纳米纤维素气凝胶,兼具传统气凝胶的低密度、纳米材料的高孔隙率和大比表面积优势,以及纤维素本身的绿色环保属性,在高效吸附、隔热保温、能源存储、传感器和生物医学等领域应用前景广阔,被誉为“第三代生物质气凝胶”^[4-6]。纳米纤维素具有性能稳定、可回收利用等特点,故而是制备气凝胶的理想材料^[7]。气凝胶是一种密度极低的多孔结构材料,其孔隙率超过 90%。凭借独特的多孔结构,气凝胶展现出低热导率、低介电常数、高吸声性及选择性吸附去污等特性。这些特性的集成赋予了气凝胶多功能性,使得其在诸多领域具有广泛的应用潜力^[8]。然而,传统气凝胶多存在脆性大、制备困难等不足。纳米纤维素气凝胶凭借优秀的力学性能和隔热性以及制备工艺环保等特性而备受关注,是一种极具潜力的传统气凝胶替代材料。此外,纳米纤维素气凝胶应用前景广阔,涵盖太阳能电池、建筑隔热、航空航天、废水处理和医疗等领域^[9]。

基于此,本研究将系统阐述纳米纤维素的主要制备方法,以及其气凝胶的研究进展,分析当前存在的关键科学问题与未来发展趋势,以期对纳米纤维素气凝胶的深入研究与高值化应用提供参考。

1 纳米纤维素的制备方法

常用的纳米纤维素制备方法主要分为 3 种——机械法、化学法和生物法^[10]。和常规纤维素一样,可对纳米纤维素进行多种形式的化学改性。在纳米纤维素分子链上引入不同的化合物,可形成相应的衍生物,能在保留纳米纤维素固有属性的前提下,赋予纳米纤维素疏水、抗菌、荧光、吸附等新功能,同时提升纳米纤维素的相容性。此外,由于纤维素分子结构中的羟基被取代,故纳米纤维素的吸湿性、耐磨性和稳定性等将发生改变。

1.1 机械法

机械法主要通过高压均质法、超声波法和研磨法等对常规纤维素材料进行处理,即利用机械做功,有效地破坏纤维素的内部结构。高强度的机械作用可以有效地减小纤维素的直径,使纤维素达到纳米级尺寸,成为纳米纤维素^[11]。其中,高压均质法基

于高压均质设备产生的破坏力瓦解纤维素的内部结构,制得纳米纤维素;超声波法利用超声设备产生的强剪切力,将纤维素加工成纳米纤维素。

机械法可单独使用,还可与其他方法联合使用,从而提高纳米纤维素的提取效率^[12]。Verma 等^[13]先用 NaOH 碱液处理黄麻纤维,然后以 600 r/min 的速度对碱液处理后的黄麻纤维进行球磨(处理时间为 8 h),再联合超声波法,最终获得直径为 500 nm 的纳米纤维素。此外,优化球磨速度还可使纳米纤维素的直径降至 100 nm。张玉梅等^[14]以甘蔗渣为原料,先对其进行羧基化处理,然后通过高压均质法制备甘蔗渣纳米纤维素,所得直径在 3~10 nm,形状为纤丝状。

1.2 化学法

目前,酸水解被认为是将常规纤维素转化为纳米结构的一种有效方法。水解纤维素的常用酸主要有硫酸(H_2SO_4)、盐酸(HCl)和磷酸(H_3PO_4)等,其中,硫酸水解制备纳米纤维素具有更高的水解效率和更好的分散性^[15]。硫酸与纤维素反应时,纤维素分子结构中的无定形区水解,相对稳定的结晶区保留,产物即为纳米纤维素^[16]。

黄楠等^[17]利用单因素正交试验并结合响应面法(RSM)探讨了纳米纤维素的制备工艺。他们以硫酸为试剂,以荷叶梗为原料,所得纳米纤维素的最高产率为 65.61%,最佳工艺条件为水解时间 3.5 h、水解温度 49℃、料液比 5:100(g/mL)。

陈素艳等^[18]以黄秋葵酒渣为原料,对其进行硫酸水解。通过单因素正交试验和响应面法得到水解最佳工艺条件为硫酸质量分数 45%、水解时间 2 h、水解温度 60℃、浴比 1:17(g/mL),其纳米纤维素的最高产率为 21.07%。

Zhao 等^[19]以废竹浆为原料,先通过二水合草酸水解,再进行高压均质处理,得到羧基化纳米纤维素。其中,二水合草酸回收后可重新用于水解废竹浆。通过响应面法对变量进行优化,得到最佳工艺条件为水解时间 5.1 h、水解温度 92℃、草酸质量浓度 1.65 g/mL。经过 4 次再结晶-再利用循环后,草酸仍保持良好的水解性和反应效率,且所得纳米纤维素的产率、结构和热稳定性没有显著变化。

吴雨阳等^[20]采用过氧化氢-乙酸(HPAA)对香蒲叶进行预处理,随后用酸水解法制备出纳米纤维

素。所得香蒲叶综纤维素纳米纤维呈细长形,且因其分子链上引入了功能化的羧基基团,故热稳定性良好。

离子液体是由有机阳离子(如咪唑鎓、季铵盐、吡啶鎓等)与无机或有机阴离子(如四氟硼酸根、六氟磷酸根、卤素离子等)通过离子键结合形成的一种液态盐类。相较于常见的酸碱试剂,离子液体更加环保,且具有生物可降解性,同时毒性较低。离子液体与纤维素反应,可以有效地破坏纤维素分子结构中的氢键,从而制得纳米纤维素^[21]。低共熔溶剂(DES,也叫深共晶溶剂)通常由氢键供体和氢键受体,按照一定的物质的量比经适度加热或机械研磨形成。DES与离子液体物理化学性质相似,但DES相对于离子液体,制备成本更低,合成更轻松,更适合大规模使用^[22]。

Wu等^[23]以乳酸/氯化胆碱体系为溶剂、桉木浆为原料,采用机械超声辅助分散法制备纳米纤维素。研究发现,当反应时间为3 h、反应温度为100℃时,纳米纤维素的产率高达89%,这是因为处理过程中纤维素发生了酯化反应,这使得纤维素没有被过度水解。

Ji等^[24]分别采用环保二元羧酸[n (氯化胆碱): n (草酸/乳酸)=1.0:1.0]和三元羧酸[n (氯化胆碱): n (草酸/乳酸): n (氯化铝)=1.0:1.0:0.1]2种DES进行预处理,并结合机械法,从花生壳中分离得到木质素纳米纤维素(LNC),其中木质素纳米颗粒的直径为30~53 nm。

使用化学试剂2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧自由基(TEMPO)氧化也是一种常见的纳米纤维素制备方法。在TEMPO氧化过程中,纤维素分子链上的羟基被转化成羧基和醛,制备的纳米纤维素被称为TEMPO氧化纤维素纳米纤维,其具有极佳的分散性和较高的纵横比,且尺寸均匀。然而,相对于其他化学法,TEMPO氧化所需的制备时间较长,效率较低^[25]。Facchinelli等^[26]在室温的水溶液中,使用低浓度的次氯酸盐和高碘酸盐作为主要氧化剂,同时以TEMPO作为反应催化剂,从柑橘废弃物中获得了直径和长度分别为3~5 nm和1~2 μm的疏水纳米纤维素,其部分无定形区域呈现分子链缠结倾向。

1.3 生物法

制备纳米纤维素的生物法主要是酶解法,该方

法以内切葡聚糖酶为主导。内切葡聚糖酶优先作用于纤维素无定形区域,能够将常规纤维素降解为分子链更短的聚合物,并促使底物溶胀,进而推动后续水解。内切葡聚糖酶能随机打断常规纤维素分子链,降低链段的聚合度;外切葡聚糖酶作用于纤维素分子链的非还原端,生成纤维二糖; β -葡萄糖苷酶的作用是水解纤维二糖,生成葡萄糖。这3种酶协同作用,能保障纤维素水解反应持续高效地进行^[27]。

Jin等^[28]采用高剪切辅助酶解法提取玉米皮纳米纤维素,得到最佳工艺的条件为纤维素酶液质量分数0.1%、乙酸-乙酸钠缓冲液pH值4.8、反应温度50℃、剪切处理时间20 min、酶解处理时间24 h。所得纳米纤维素呈细长结构,表面光滑。王璐等^[29]以罗布麻韧皮为原料,采取TEMPO氧化法与超声波法相结合的策略,制备了罗布麻纳米纤维素。

2 纳米纤维素气凝胶的制备方法与研究进展

气凝胶兼具高比表面积、发达孔结构与细小构筑单元等特点,适用于吸附、催化等场景。自首次合成以来,气凝胶受到学术界的广泛关注。经过近百年的发展,气凝胶的组分选择范围持续扩大,种类不断增加^[30]。气凝胶的制备方法日益丰富,溶胶-凝胶法是目前气凝胶最主流的制备工艺,即首先配制气凝胶前驱体溶液,接着该体系内组分形成胶体颗粒并持续聚集,逐步构筑三维无序网络骨架,最后经干燥处理获得气凝胶。

目前,气凝胶制备中常用的干燥方法有3种,分别为超临界干燥、冷冻干燥和常压干燥^[31]。

气凝胶的形成过程涉及物理交联和化学交联2种机制。物理交联主要由分子内部或分子之间的氢键以及分子之间的物理缠结引起。化学交联通常需要添加交联剂才能实现。一般来说,化学交联比物理交联更快,因此化学交联能产生更稳定的结构^[32]。理想条件下,采用惰性气体可直接置换湿态气凝胶孔道内的初始液相,消除液-气界面引发的毛细作用力,避免三维无序网络骨架结构在干燥过程中发生塌陷;但该直接置换方式难以在纳米尺度孔道内实现,现阶段主要依靠超临界干燥、冷冻干燥等手段避免毛细力的破坏现象。

超临界二氧化碳干燥法利用压力和温度的作用使二氧化碳达到超临界点,并在三维无序网络骨架结构中交换溶剂。此法的优点是可以溶解一些有机溶剂或非挥发性成分,但也存在一些缺点,如加工周期长、工艺复杂、溶剂置换成本高。冷冻干燥是制备气凝胶的另一种常用方法,即在一定的低压低温条件下,冰凝胶内部的冷冻溶剂从固态升华为气态。常压干燥法通过表面修饰或溶剂交换等手段,降低气凝胶干燥过程中的毛细管力,从而在常压下实现气凝胶的制备。虽然常压干燥法制备的气凝胶性能略逊于超临界二氧化碳干燥法,但前者的成本低,适合大规模生产。通过超临界二氧化碳干燥法获得的气凝胶具有高比表面积和低密度等特点。通过冷冻干燥法获得的气凝胶因冰晶会膨胀而具有良好的结构可控性和大的孔结构^[33]。

纳米纤维素气凝胶拥有传统纤维素气凝胶的优点,具备丰富的孔结构,同时具有纳米纤维素可再生、绿色、生物相容性好等特性,可用作复合材料的支架。

Alvira 等^[34]通过在纳米纤维素和聚乙烯醇分子之间建立氢键,形成了稳定的三维无序网络骨架结构。所得纳米纤维素/聚乙烯醇复合气凝胶具有 99% 的高孔隙率、 10 mg/cm^3 的低密度、 $(871.43 \pm 37.5) \text{ MPa} \cdot \text{cm/g}^3$ 的高比模量和 $36.1 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的低导热系数,是极端环境中绝缘体的理想选择。

Li 等^[35]基于与二元有机硅烷交联结合的方法,制备出 MXene/羧甲基纤维素钠复合气凝胶。且研究表明:当 MXene 质量分数为 90% 时,该复合气凝胶在低密度 (19.75 mg/cm^3) 下显示出优异的电磁屏蔽效率 (45.8 dB),密度归一化屏蔽效率达到 $11\,595 \text{ dB} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ 的高水平;有机硅烷交联可赋予气凝胶内部三维网络结构极大的弹性和压缩性,还有助于气凝胶形成超疏水表面,使得该复合气凝胶的接触角达到 151.5° ;此外,该复合气凝胶在浸入水中或被压缩 100 次后,仍可保持较高的电磁干扰屏蔽性能。

Jaouahar 等^[36]将纤维素放入 H_2SO_4 /尿素中进行官能化,然后通过机械除颤和冷冻干燥,制备出含硫酸盐的纳米纤维素气凝胶 (S-NC)。由于 S-NC 具有高孔隙率 (99.30%),且分子结构中含有硫酸盐半酯官能团,故而表现出 $26.1 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的低导热性

和明显的阻燃性。对 S-NC 进行微尺度燃烧量热分析,结果显示总热释放量为 1.68 kJ/g 。在 95% 的相对湿度条件下, S-NC 的水分缓冲能力为 0.63 g/g 。

Ma 等^[37]制备了芳纶纳米纤维/纳米纤维素衍生碳气凝胶,并发现该气凝胶具备超轻质特性 (密度 3.46 mg/cm^3),以及优异的压缩性能 (能经历 95% 的压缩应变) 和弹性 (90% 拉伸应变循环 500 次,应力保持率为 81.38%; 50% 拉伸应变循环 10 000 次,应力保持率为 96.15%)。纳米纤维素衍生碳气凝胶在柔性压阻传感器和各向异性隔热材料的应用中表现出优异的多功能性,包括理想的灵敏度 (48.74 kPa^{-1}) 和瞬时响应时间 (40 ms),其各向异性系数为 3.69、径向导热系数为 $12.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

Zhu 等^[38]使用定向冷冻干燥策略制备了基于纤维素纳米纤维 (CNF)、海藻酸钙 (CA) 和硼酸 (BA) 的各向异性复合气凝胶。CA 和 BA 作为双交联剂,与 CNF 的定向多孔结构结合,为气凝胶提供了良好的力学强度。CA 和 BA 还作为阻燃剂,赋予了气凝胶优异的阻燃性能 (极限氧指数达 44.20%、阻燃等级为 V-0 且低热释放)。此外,这种复合气凝胶还具有出色的隔热性能,导热系数约为 $30.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

Jia 等^[39]基于溶胶-凝胶、环境压力干燥和高温处理工艺,合成了 SiC 纳米线/SiOC 复合气凝胶 (SCA),并通过控制 SiC 纳米线含量获得了具备低导热系数 [$40.0 \sim 42.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 和优异力学性能 (压缩强度为 $4.37 \sim 5.45 \text{ MPa}$) 的 SCA。且研究发现,随着 SiC 纳米线含量的增加,SCA 的电磁波吸收能力逐渐提高,最佳反射损耗为 53.64 dB、有效吸收带宽为 3.88 GHz。

Zhao 等^[40]制备了聚乙烯亚胺 (PEI) 接枝纤维素纳米纤维气凝胶 (CNFs-PEI),并将其用作药物递送系统。他们以水溶性水杨酸钠 (NaSA) 作为模型药物,对 CNFs-PEI 的载药与释药性能进行研究,发现 CNFs-PEI 载药量高达 287.39 mg/g ,且具有缓释与控释特性,释药行为高度依赖环境 pH 值与温度。凭借独特的环境 pH 值和温度响应性,以及优异的生物可降解性与生物相容性, CNFs-PEI 作为新一代药物控释载体极具应用前景,其可为传统合成高分子药物递送系统提供简便、安全的替代方案。

Jiamjirangkul 等^[41]将纤维素纳米晶 (CNCs) 增强木质素基复合气凝胶膜,并以 H_2SO_4 为准固态电

解质,制备超级电容器。在该体系中,水溶性高支化生物高分子——碱性木质素(AL)与聚乙二醇二缩水甘油醚(PEGDGE)发生交联,同时将CNCs引入膜材。这种复合方式不仅提升了材料的力学完整性与柔韧性,还改善了材料的离子电导率和储能性。研究发现,含3%(质量分数)CNCs的木质素基复合气凝胶膜具有优异的柔韧性、离子电导率和比电容。

3 结论与展望

纳米纤维素凭借高比表面积及优异的力学性能和生物可降解性,已成为绿色材料领域的研究热点。纳米纤维素的制备工艺主要包括机械法、化学法和生物法。未来,需攻克规模化制备成本高、疏水性基体分散性差等难题,重点开发低能耗绿色工艺,拓展智能响应等功能,并构建统一的行业标准。相信随着技术的升级,纳米纤维素有望成为替代化石基材料的核心绿色材料,助力可持续发展。

纳米纤维素气凝胶凭借超轻质、高孔隙率、高比表面积、绿色可降解、易功能化等优势,已从实验室走向产业化应用,在隔热保温、环境治理、新能源、生物医学、过滤等五大领域展现出重要的应用价值和广阔的应用前景。未来,以低成本规模化制备、多功能复合或改性、极端环境适配为突破方向,纳米纤维素气凝胶有望成为支撑“双碳”目标与新材料升级的关键生物质基材。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 王晓惠,崔萌. 基于微波辅助法从玉米秸秆中提取纤维素的研究[J]. 长春师范大学学报, 2024, 43(2): 92-98.
- [2] El Khayat Driaa Y, Maarir H, Mennani M, et al. Ultrasound, pulsed electric fields, and high-voltage electrical discharges assisted extraction of cellulose and lignin from walnut shells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 292: 139319.
- [3] 孔伟帅,孙颖,王佳怡,等. 汉麻纤维素的提取及其纳米纤维的制备与表征[J]. 毛纺科技, 2024, 52(12): 9-15.
- [4] Liu S, Tian Z J, Ji X X, et al. Preparation and modification of nanocellulose using deep eutectic solvents and their applications[J]. Cellulose, 2024, 31(4): 2175-2205.
- [5] 杨立娜,余科金,王胜男,等. 大豆种皮纳米纤维素提取工艺优化及其性能分析[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 173-183.
- [6] Hossain S, Jalil M A, Islam T, et al. A low-density cellulose rich new natural fiber extracted from the bark of jack tree branches and its characterizations[J]. Heliyon, 2022, 8(11): e11667.
- [7] Zhang N, Xu X K, Zhang S M, et al. Graphene oxide enhanced nanocellulose/chitosan biodegradable aerogel pad for fresh pork preservation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(12): 4768-4780.
- [8] Chhajed M, Verma C, Gupta P, et al. Multifunctional esterified nanocellulose aerogel: impact of fatty chain length on oil/water separation and thermal insulation[J]. Cellulose, 2023, 30(3): 1717-1739.
- [9] Yang Y S, Dang B K, Wang C, et al. Ultrastrong lightweight nanocellulose-based composite aerogels with robust superhydrophobicity and durable thermal insulation under extremely environment[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 323: 121392.
- [10] 廖海洋,毕雪蓉,李佳蔚,等. 三组分低共熔溶剂制备黄麻纳米纤维素的研究[J]. 棉纺织技术, 2023, 51(5): 42-47.
- [11] Thakur V, Guleria A, Kumar S, et al. Recent advances in nanocellulose processing, functionalization and applications: a review[J]. Materials Advances, 2021, 2(6): 1872-1895.
- [12] Ilyas R A, Sapuan S M, Ishak M R, et al. Sugar palm nanofibrillated cellulose (*Arenga pinnata* (Wurmb.) Merr): effect of cycles on their yield, physic-chemical, morphological and thermal behavior[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 379-388.
- [13] Verma Y K, Singh A K, Paswan M K, et al. Importance of functionalized jute fibers in the field of nano cellulose for the preparation of biodegradable nano composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 80: 254-257.
- [14] 张玉梅,周伟,邹颖,等. 甘蔗渣纤维素纳米纤维的

- 制备与表征[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(8): 63-70.
- [15] Chen Y W, Lee H V, Juan J C, et al. Production of new cellulose nanomaterial from red algae marine biomass *Gelidium elegans* [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 151: 1210-1219.
- [16] Wang Y C, Liu H B, Wang Q, et al. Recent advances in sustainable preparation of cellulose nanocrystals via solid acid hydrolysis: a mini-review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127353.
- [17] 黄楠, 李亚洁, 钟雨杰, 等. 荷梗纤维素纳米晶须的制备及其表征分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(9): 220-232.
- [18] 陈素艳, 卢妍, 吴光斌, 等. 黄秋葵酒渣纳米纤维素的制备工艺及表征分析[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(17): 113-120.
- [19] Zhao H F, Sun L F, Yu Y C, et al. Low-cost, scale production of nanocellulose from bamboo wastes via a recyclable and stable strategy [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2025, 15(5): 7799-7808.
- [20] 吴雨阳, 王天骄, 李丽琼, 等. 香蒲叶综纤维素纳米纤维的制备及表征[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(3): 38-43.
- [21] Haron G A S, Mahmood H, Noh M H, et al. Ionic liquids as a sustainable platform for nanocellulose processing from bioresources: overview and current status [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(3): 1008-1034.
- [22] Okwuwa C C, Adam F, Mohd Said F, et al. Cellulose dissolution for edible biocomposites in deep eutectic solvents: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 427: 139166.
- [23] Wu X Y, Yuan Y, Hong S, et al. Controllable preparation of nano-cellulose via natural deep eutectic solvents prepared with lactate and choline chloride [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 194: 116259.
- [24] Ji Q H, Su L X, Li Z Q, et al. Preparation of peanut shell lignin nanocellulose by aluminum trichloride acid deep eutectic solvent pretreatment [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2025, 15(12): 18991-19012.
- [25] Deng W F, Zhang Y D, Wu M Y, et al. Cost-effective preparation of highly amorphous cellulose nanofibrils with TEMPO oxidation promoted by mild molten salt hydrate pretreatment [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 205: 117455.
- [26] Facchinelli T, D'Amato E, Bettotti P, et al. Nanocellulose with hydrophobic properties by a one-step TEMPO-periodate oxidation of citrus waste [J]. Cellulose, 2024, 31(18): 10895-10913.
- [27] Qi Y G, Guo Y Z, Liza A A, et al. Nanocellulose: a review on preparation routes and applications in functional materials [J]. Cellulose, 2023, 30(7): 4115-4147.
- [28] Jin H Y, Tian Y H, Teng L Q, et al. Enzymatic extraction and characterization of nanocellulose from cornhusk fiber [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2025, 27(7): 3119-3127.
- [29] 王璐, 伍丽琼, 王晨孜孜, 等. TEMPO 氧化法制备罗布麻纳米纤维素纤维[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(7): 11-16.
- [30] Nie L F, Li S D, Cao M J, et al. A brief review of preparation and applications of monolithic aerogels in atmospheric environmental purification [J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 149: 209-220.
- [31] Kong X F, Nie R M, Yuan J J. A review of shape stabilized aerogel-based phase change materials for preparation, classification and applications [J]. Energy and Built Environment, 2025, 6(2): 230-247.
- [32] Ji Q H, Li Z Q, Su L X, et al. Preparation, functional modification and industrial application of nanocellulose aerogels - a comprehensive review [J]. Biomass and Bioenergy, 2025, 193: 107591.
- [33] Mai T, Wang P L, Ma M G. Promising cellulose-based aerogel composites: preparation methods and advanced applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 281: 111559.
- [34] Alvira P, Tomas-Pejó E, Ballesteros M, et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(13): 4851-4861.
- [35] Li J D, Liang C Y, Lin C W, et al. Lightweight, superhydrophobic, and superelastic MXene/carboxymethylcellulose sodium composite aerogels for efficient and multifunctional electromagnetic interference shielding [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 506: 160274.

(下转第 36 页)

速度、测试长度)、预张力器绕丝方式、仪器维护及物检室环境等因素对涤纶 POY 动态热应力测试结果的影响,并确定了相关测试参数,以为生产质量的控制提供准确、可靠的数据参考。所得主要结论如下:

(1)测试温度是影响涤纶 POY 动态热应力测试结果的关键参数。温度可提供分子链运动所需的能量,使被冻结的取向结构得以松弛。研究基于温度梯度对比,确定 165 °C 为最佳测试温度。在此温度下,测得的动态热应力数值稳定,能有效反映产品的内在质量,便于生产工艺参数的确定。

(2)测试速度对动态热应力的测量结果影响显著。研究确定,测试速度宜在 100~150 m/min。此速度区间既能避免试样低速时高分子链段过度松弛,又能防止高速时数据因系统波动与线密度效应而出现异常,还实现了测试效率与准确性的最佳平衡。

(3)在保证测试数据具有参考意义的前提下,确定测试长度为 50 m。该长度既能充分反映涤纶 POY 的品质,又能最大限度地节约测试时间。

(4)操作应规范标准化。为保证测试数据准确,绕丝方式应统一,即预张力器导丝轮处采用顺时针绕丝。同时,仪器的日常维护和定期保养对测试结果的准确性也有一定的影响,建议定期采用无水乙醇对导丝轮、罗拉等关键部件进行清洁维护。

(5)测试时,应严格执行国家标准的实验室温

湿度要求,即控制温度在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度在 $(65 \pm 5)\%$,同时还需控制空调风速,避免气流导致试样抖动而引发张力不稳定。

总之,在涤纶 POY 动态热应力测试中,排除环境与仪器干扰是获得可靠数据的前提,采用合适的测试参数是确保数据反映涤纶 POY 质量真实水平的核心。下一步,可采用正交试验等多元统计方法探究多因子间的交互作用,建立更精确的工艺窗口预测模型,使得测试结果能更精准地反映涤纶 POY 的内在质量,从而为稳定生产、提升产品质量提供“参数控制”到“模型预测”的技术支撑。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 胡岚. 影响 POY 长丝动态热应力的因素分析[J]. 合成技术及应用, 2011, 26(4): 35-37.
- [2] 宣一岷. 用动态热应力仪评价 POY 内在质量[J]. 合成技术及应用, 2000, 15(2): 52-53.
- [3] 周丹. 影响 POY 动态热应力测试因素的探讨[J]. 合成纤维, 2024, 53(6): 16-18.
- [4] 王雪. POY 热应力测试条件选择的影响因素分析[J]. 聚酯工业, 2020, 33(4): 43-45.
- [5] Jia X L, Zhou Z H, Guo D H, et al. Low-density, large-sized SiCnw/SiOC composite aerogels with excellent thermal insulation, microwave absorption, and thermostability[J]. Ceramics International, 2024, 50(18): 33315-33324.
- [6] Zhao J Q, Lu C H, He X, et al. Polyethylenimine-grafted cellulose nanofibril aerogels as versatile vehicles for drug delivery[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(4): 2607-2615.
- [7] Jiamjirangkul P, Pongsanon P, Pangon A. Cellulose nanocrystals-reinforced lignin-based composite gel membranes: flexible and environmentally friendly quasi-solid polymer electrolytes for supercapacitors[J]. MRS Communications, 2026, 16(2): 340-347.
- [8] Jaouahar M, Ablouh EL H, Hanani Z, et al. Comprehensive characterization of hygroscopic, fire-retardant and thermally insulating sulfated nanocellulose aerogel[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 506: 160236.
- [9] Ma Y Y, Liu R X, Lei Y, et al. A lightweight, supercompressible and superelastic aramid nanofiber/nanocellulose-derived carbon aerogel with in-plane micro-wrinkle honeycomb structure for thermal insulation[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 230: 139-150.
- [10] Zhu J T, Wang Y Y, Zhao X Y, et al. Anisotropic composite aerogel with thermal insulation and flame retardancy from cellulose nanofibers, calcium alginate and boric acid[J]. International Journal of Biological

(上接第 29 页)