

For citation: Wu Jinsong. Research progress on the preparation technology of nanofibre materials // Grand Altai Research & Education — Выпуск 1 (26)'2026 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2026.01) — EDN: <https://elibrary.ru/MHLQZZ>

UDK 621.315.614.1

RESEARCH PROGRESS ON THE PREPARATION TECHNOLOGY OF NANOFIBRE MATERIALS

Wu Jinsong¹

1 Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China
E-mail: 1321747719@qq.com ; meishunqi@vip.sina.com

Abstract. This paper reviews three main nanofibre preparation techniques: air-jet spinning, electrospinning, and methods for preparing composite nanofibres. By comparing and analysing the principles, process parameters and product characteristics of different preparation techniques, the advantages and limitations of each technique are discussed. At the same time, the characterisation methods of nanofibre materials and their application research progress in antibacterial packaging, photocatalysis, energy storage and other fields are systematically introduced. The study shows that air-jet spinning has advantages such as high production efficiency and good safety, while electrospinning performs excellently in controlling fibre morphology. Composite nanofibres can significantly enhance material performance through functional modification, providing technical support for the large-scale application of nanofibre materials.

Keywords: Nanofibres; Air-jet spinning; Electrospinning; Composite materials; Preparation techniques

纳米纤维材料制备技术研究进展

吴锦松¹

1 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 中国武汉 430073
E-mail: 1321747719@qq.com ; meishunqi@vip.sina.com

摘要: 本文综述了几种主要的纳米纤维制备技术: 气喷纺丝技术, 静电纺丝技术, 离心纺织技术以及复合纳米纤维的制备方法. 通过对比分析不同制备技术的原理, 工艺参数及产物特性, 探讨了各技术的优势与局限性. 同时, 系统介绍了纳米纤维材料的表征手段及其在抑菌包装, 光催化, 能源存储等领域的应用研究进展. 研究表明, 气喷纺丝技术具有制备效率高, 安全性好等优势, 而静电纺丝技术在纤维形貌控制方面表现优异. 复合纳米纤维通过功能化改性可显著提升材料性能, 为纳米纤维材料的规模化应用提供了技术支撑.

关键词: 纳米纤维; 气喷纺丝; 静电纺丝; 离心纺织; 复合材料; 制备技术

0 引言

纳米纤维是指直径在纳米尺度范围内 (通常为 1-1000nm) 的一维纳米材料, 具有高比表面积, 高孔隙率, 优异的机械性能等独特优势, 在过滤分离, 生物医用, 能源存储, 催化传感等领域具有广泛的应用前景 [1]. 近年来, 随着纳米技术的快速发展, 纳米纤维材料的制备技术也取得了显著进步. 目前, 纳米纤维的制备方法主要包括静电纺丝法, 气喷纺丝法, 模板法, 自组装法等 [2]. 其中, 静电纺丝技术因其设备简单, 操作方便, 适用范围广等优点, 成为制备纳米纤维最常用的方法之一. 然而, 静电纺丝存在制备效率低, 需要高压电场, 溶剂选择受限等缺点. 为解决这些问题, 研究人员开发了气喷纺丝技术, 该技术利用高速气流将聚合物溶液拉伸成纳米纤维, 具有制备效率高, 安全性好, 适用范围广等优势 [3]. 此外, 为赋予纳米纤维特定的功能, 研究人员还开发了多种复合纳米纤维的制备方法,

如将无机纳米粒子 (如 TiO_2 , ZnO 等) 负载到纳米纤维上, 制备具有光催化, 抗菌等功能的复合纳米纤维材料 [4;5]. 近年来, 将纳米纤维集合体通过加捻 (twisting) 制成连续纱线, 成为纳米纤维从膜材料向纺织结构材料转化的关键技术. 静电纺丝, 离心纺丝, 气喷纺丝 (SBS) 均可与气流加捻, 机械加捻, 水涡旋加捻等传统纺织加捻技术结合, 实现纳米纤维纱线的连续化制备. 其中, 离心纺丝与气喷纺丝的产量可达静电纺丝的数十倍, 更适合纳米纤维纱线的规模化生产, 且无需高压电场, 安全性与工艺兼容性更优. 加捻可显著提升纳米纤维集合体的抗拉强度, 柔韧性与结构稳定性, 使纳米纤维可直接用于织造, 突破了传统纳米纤维膜难以纺织加工的局限 [6]. 本文将综述气喷纺丝技术, 静电纺丝技术, 离心纺织技术以及复合纳米纤维的制备方法, 分析各技术的特点及应用, 为纳米纤维材料的进一步研究和应用提供参考.

1 气喷纺丝技术

1.1 气喷纺丝技术原理

气喷纺丝 (Solution Blow Spinning, SBS) 是一种利用高速气流将聚合物溶液拉伸成纳米纤维的技术. 其基本原理是: 聚合物溶液在高压气体的剪切力作用下, 从喷嘴处被拉伸成细流, 溶剂在气流中快速挥发, 最终形成纳米纤维沉积在收集器上 [3]. 气喷纺丝系统主要由注射泵, 同轴结构的喷嘴, 气泵和收集器四个部分组成. 与静电纺丝技术相比, 气喷纺丝技术具有以下优势: (1) 制备效率高, 进料速度可达静电纺丝的 10 倍以上; (2) 不需要高压电源, 操作安全性高; (3) 对聚合物溶液的导电性没有要求, 适用范围更广; (4) 制备环境温和, 有利于保持生物活性物质的活性 [3]. 沈超怡 [3] 的研究表明, 气喷纺丝制备的 PCL 纳米纤维平均直径为 348.13nm, 而静电纺丝制备的纤维直径为 436.62nm, 气喷纺丝得到的纤维直径更小且分布更集中.

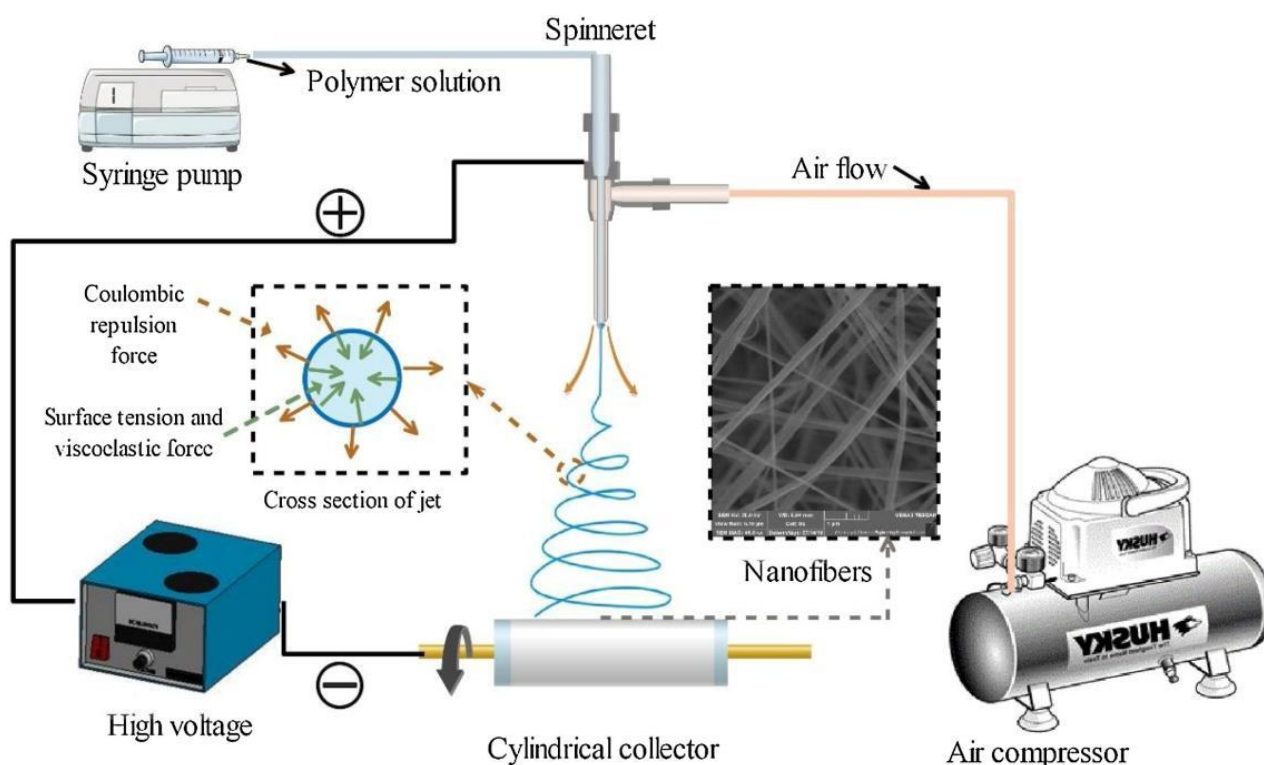


图 1 气喷纺丝装置示意图 [3]

Fig. 1. Schematic diagram of the composition and working principle of a lithium-ion battery [3]

1.2 气喷纺丝工艺参数

气喷纺丝的工艺参数对纳米纤维的形貌和性能有重要影响. 主要工艺参数包括进料速度, 气压, 喷头与收集器距离, 溶液浓度等 [3]. 研究表明, 进料速度设置为 5mL/h, 气压为 0.12 MPa, 喷头与收集器距离为 20cm 时, 可制备出形貌良好的 PCL 纳米纤维.

在气喷纺丝过程中, 纤维形貌受湍流气压影响呈现卷曲形态, 而静电纺丝纳米纤维则呈现直线形态. 通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察可以发现, 气喷纺丝制备的纳米纤维具有良好的连续纤维结构, 纤维直径分布均匀 (如图 2 所示). 衰减全反射-傅里叶变换红外光谱 (ATR-FTIR) 分析表明, 气喷纺丝和静电纺丝制备的 PCL 纳米纤维具有相同的化学结构, 均在 1732cm^{-1} 处出现 C=O 伸缩振动特征峰, 在 1293cm^{-1} 处出现 C-C 和 C-O 伸缩振动特征峰 [3].

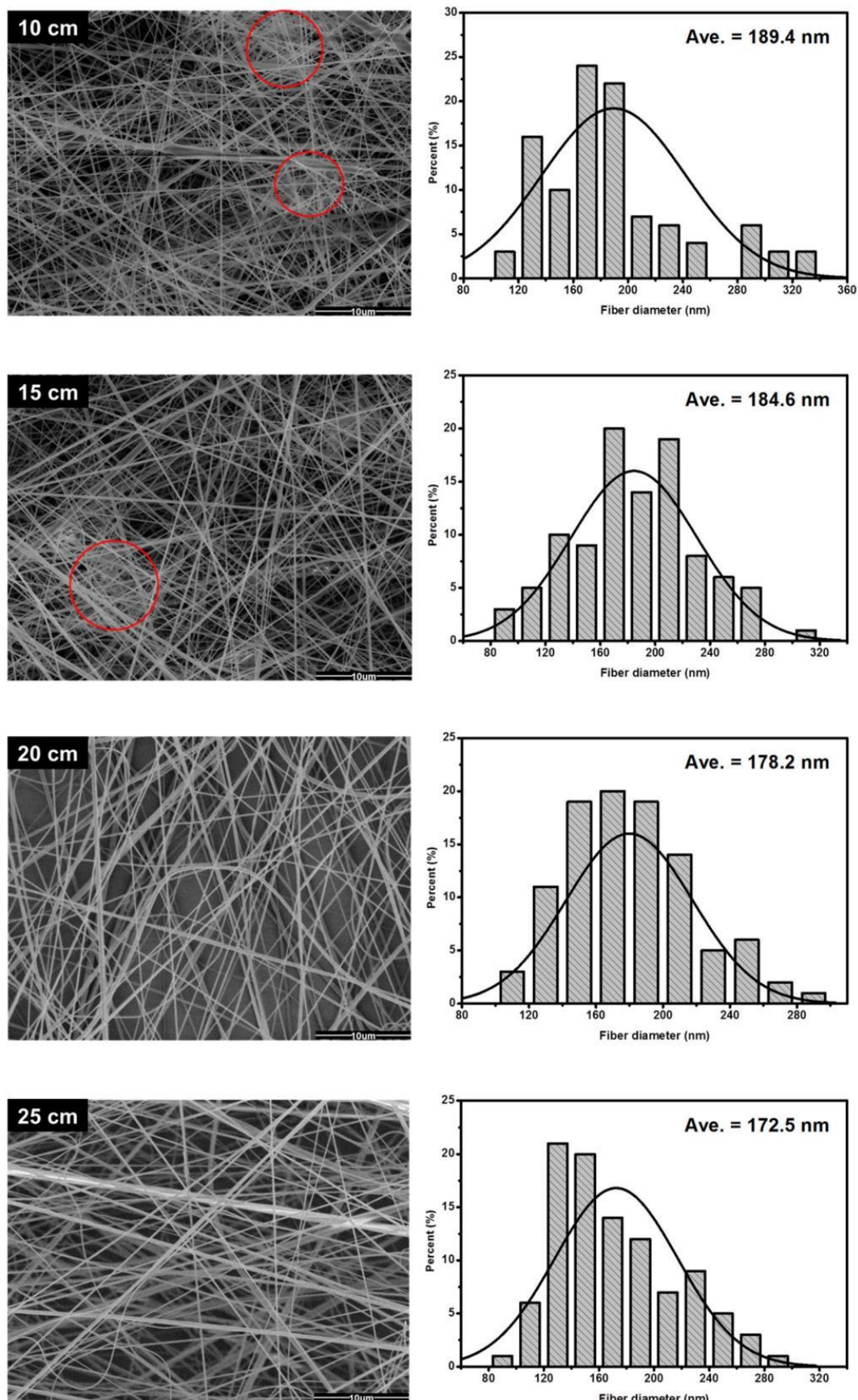


图 2 不同接收距离下气喷纺丝 PCL 纳米纤维的 SEM 图像和直径分布 [3]

Fig. 2. SEM images and diameter distribution of gas-spun PCL nanofibres at different receiving distances [4]

2 静电纺丝技术

2.1 静电纺丝技术原理

静电纺丝 (Electrospinning) 是一种利用高压电场将聚合物溶液或熔体拉伸成纳米纤维的技术. 其基本原理是: 在高压电场作用下, 聚合物溶液表面形成泰勒锥, 当电场力克服溶液表面张力时, 溶液被拉伸成细射流, 在飞向收集器过程中溶剂挥发, 最终形成纳米纤维 [4;5]. 静电纺丝系统主要由高压电源, 注射泵, 喷丝头和收集器组成.

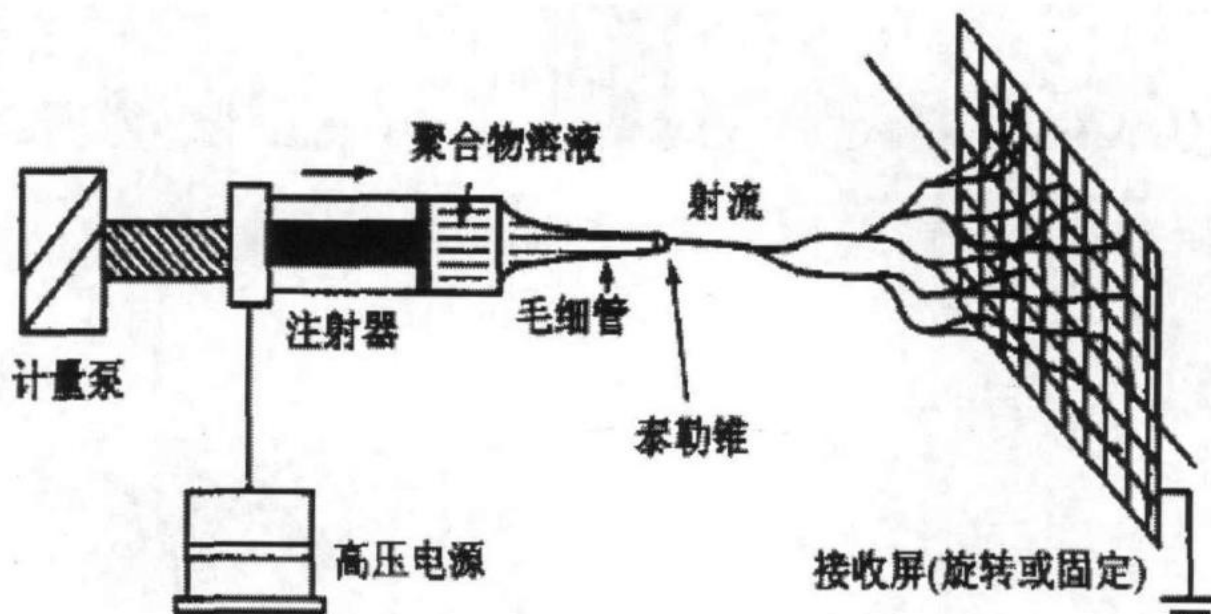


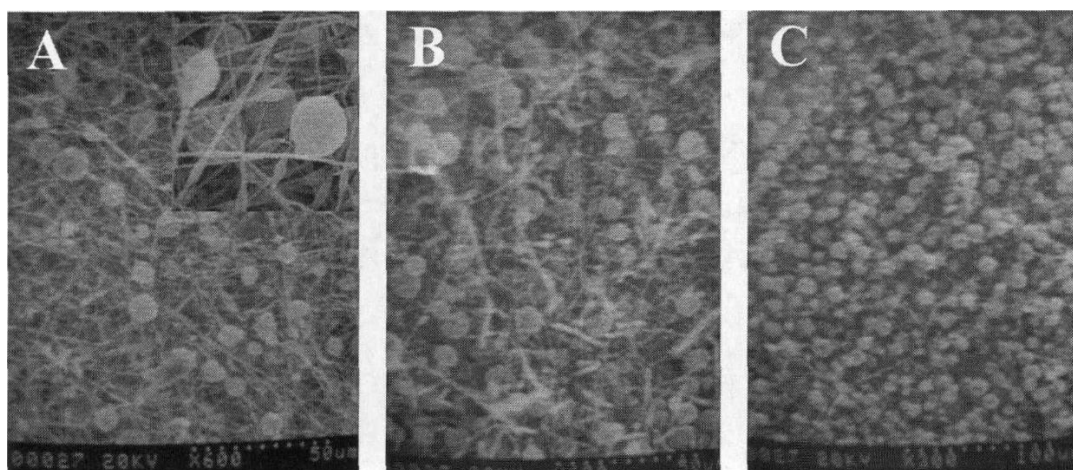
图 3 静电纺丝的工作原理图 [4]

Fig. 3. The working principle of electrospinning [4]

2.2 静电纺丝制备复合纳米纤维

静电纺丝技术可用于制备有机-无机复合纳米纤维. 降伟莹 [4] 采用静电纺丝和溶胶-凝胶相结合的方法, 以聚丙烯腈 (PAN) 为载体, 钛酸正丁酯为钛源, 制备了 TiO_2/PAN 复合纳米纤维. 首先将 PAN 粉末溶于 N,N-二甲基甲酰胺 (DMF) 中, 然后加入无水乙醇, 冰醋酸和钛酸正丁酯, 室温下搅拌得到粘稠的 PAN 溶胶. 随后进行静电纺丝, 施加 12-15kV 电压, 接收距离为 15cm, 得到前驱体纤维毡. 最后通过水热处理使钛酸正丁酯水解, 在纤维表面生成 TiO_2 纳米粒子.

扫描电镜观察显示, 经过水热处理后, 纤维表面生成了大量球状 TiO_2 粒子, 粒子直径约为纤维直径的 1/3-1/2 (如图 4 所示). 随着尿素浓度的增加, TiO_2 粒子数量增多, 分布更加均匀. X 射线衍射 (XRD) 分析表明, 水热处理后样品在 $2\theta=25.3^\circ, 37.8^\circ, 48.0^\circ, 53.9^\circ, 55.1^\circ$ 等处出现了 TiO_2 锐钛矿相的特征衍射峰, 证实了 TiO_2 的成功生成 [4].

图 4 TiO₂/PAN 复合纳米纤维的 SEM 图像 [4]Fig. 4. SEM images of TiO₂/PAN composite nanofibres [4]

2.3 静电纺丝制备碳纳米纤维

付沙威 [5] 采用静电纺丝技术制备了碳纳米纤维 (CNFs) 及其复合材料. 以 PAN 为原料, 通过静电纺丝制备 PAN 纳米纤维, 然后经过预氧化和碳化过程得到碳纳米纤维. 预氧化在空气中进行, 温度为 280°C, 使 PAN 纤维形成稳定的梯形结构; 碳化在氮气氛围中进行, 温度为 800°C, 使纤维转化为碳纳米纤维. 扫描电镜观察显示, 碳纳米纤维直径约为 200-300nm, 表面光滑, 纤维之间没有粘连 [5].

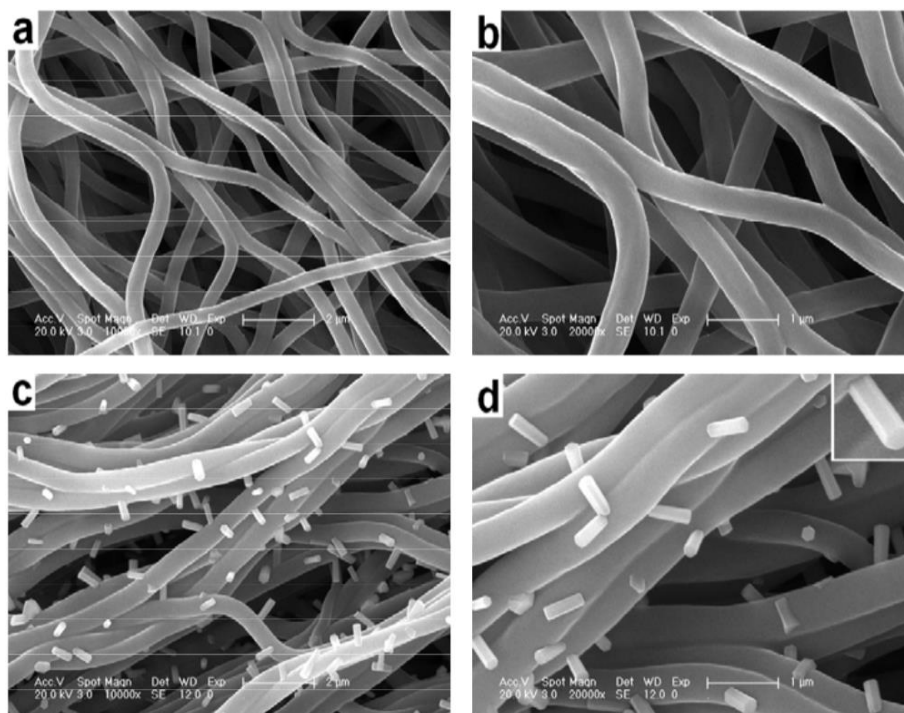


图 5 场发射扫描电镜照片: (a) 碳纤维, 放大倍数 12,000; (b) 碳纤维, 放大倍数 20,000; (c) CFs/ZnO 复合物, 放大倍数 10,000; (d) CFs/ZnO 复合物, 放大倍数 20,000 [5]

Fig. 5. SEM images of field emission: (a) carbon fibre, magnification 12,000; (b) carbon fibre, magnification 20,000; (c) CFs/ZnO composite, magnification 10,000; (d) CFs/ZnO composite, magnification 20,000 [5]

3 离心纺丝技术

3.1 离心纺丝技术原理

离心纺丝 (Centrifugal Spinning) 以高速旋转产生的离心力为主要成纤动力, 将聚合物溶液 / 熔体从旋转喷丝盘中甩出, 经拉伸细化与溶剂挥发 / 冷却固化形成微纳米纤维. 该技术产量可达传统静电纺丝的数十倍至上百倍, 具有设备成本低, 适用材料广, 无需高压电场, 工艺绿色安全等优势, 适合工业化连续生产. 通过优化转速, 温度, 辅助气流等参数, 可精准调控纤维直径与取向性; 配合气流辅助加捻, 摩擦加捻等方式, 可直接将离心纺丝纤维制备成连续纳米纤维纱线, 大幅提升材料力学性能与纺织加工性. 所制纤维兼具均匀直径, 高孔隙率与良好力学特性, 在过滤材料, 生物医用, 电池隔膜, 高性能纺织品等领域具备广阔应用前景 [6].

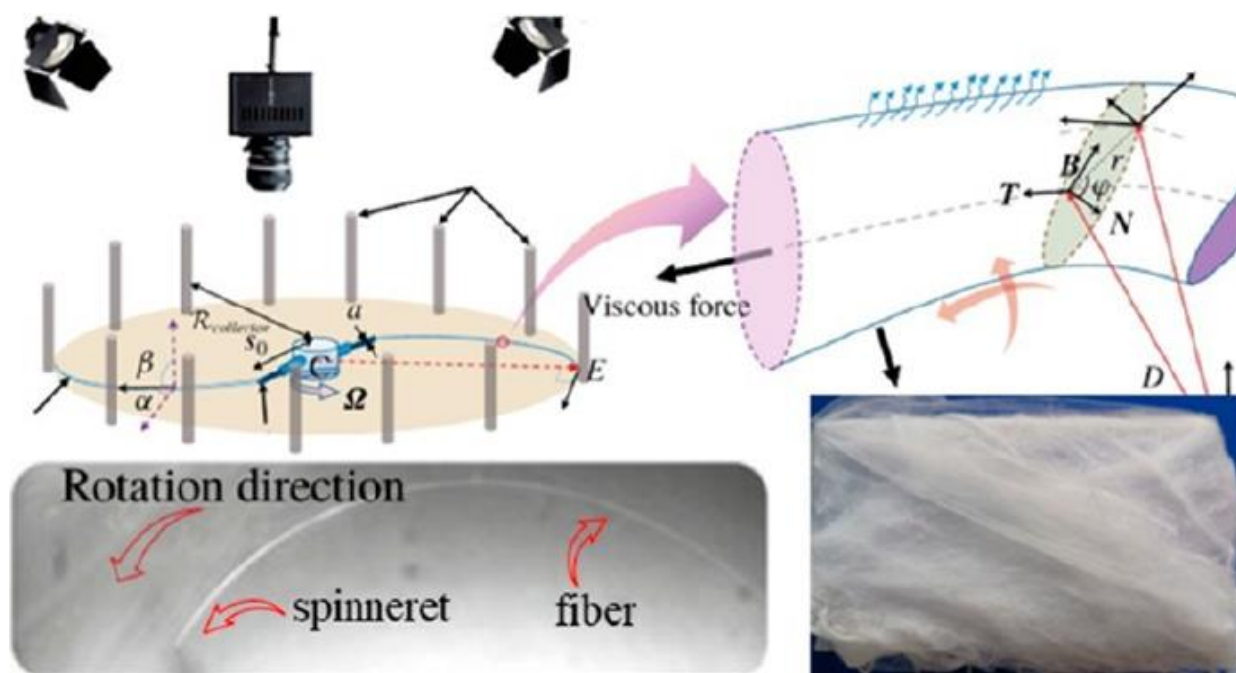


图 5 离心纺织技术原理图 [6]

Fig. 5. Schematic Diagram of Centrifugal Spinning Technology [6]

3.1 熔融离心纺丝技术机理与工艺优化

熔融离心纺丝以高速旋转离心力为核心动力, 将聚合物加热熔融后送入旋转纺丝盘, 熔体在离心力作用下克服表面张力与粘性阻力, 从盘体通道甩出并被快速拉伸细化, 经冷却固化形成微纳米纤维 [7]; 设备经优化确定 10° 纺丝盘倾角, 采用主从动轮传动将最高转速提升至 8000rpm, 配合网罩与辅助气流可改善熔体分散与纤维取向 [8]. 工艺上, 温度与转速是关键调控参数, PP 在 230°C , PET 在 330°C , 转速 5000rpm 时成型最优, 转速升高纤维直径显著减小, 但过高易导致纤维断裂; 5m/s 辅助气流可大幅提升纤维取向性, 旋转收集辊筒能进一步牵伸细化纤维 [9]. 制得的 PP 纤维经亲水改性可制备高孔隙率, 高弹性气凝胶 [8], 适配生物医用假腔填充需求, 该技术具备高效, 无溶剂, 绿色的工业化应用潜力.

4 纳米纤维的表征方法

4.1 形貌表征

扫描电子显微镜 (SEM) 是观察纳米纤维形貌和直径分布的主要手段. 通过 SEM 可以直观地观察纤维的表面形貌, 直径大小, 分布均匀性以及是否存在串珠或粘连等缺陷 [3;5]. 透射电子显微镜 (TEM) 可用于观察纤维的内部结构和纳米粒子在纤维中的分布情况. 沈超怡 [3] 通过 TEM 观察到 THY/HP β CD 包合物被成功掺入 PCL/CS 纳米纤维基底中 [10].

静电纺丝是指带电的分子介质, 在电场中由于受电荷的运动变化以及分离, 细化小介质挥发过程等就能获得固态的超细纤维. 该方法制造的锂离子动力电池薄膜 [11], 具有厚度较薄, 孔隙率大, 孔径小, 渗透率大, 比表面积大等优点.

4.2 结构表征

X 射线衍射 (XRD) 用于分析纳米纤维的晶体结构和物相组成 [12]. 沈超怡 [3] 的研究表明, 气喷纺丝和静电纺丝制备的 PCL 纳米纤维均在 $2\theta=21.5^\circ$ 和 23.7° 处存在衍射峰, 代表半结晶结构. 降伟莹 [4] 通过 XRD 证实了 TiO₂ 锐钛矿相的形成 [13], 特征峰位于 $2\theta=25.3^\circ$ (101), 37.8° (004), 48.0° (200), 53.9° (105) 和 55.1° (211) 处.

红外光谱 (FTIR) 用于分析纳米纤维的化学结构和官能团 [14]. 沈超怡 [3] 的研究显示, PCL 纳米纤维在 1732cm^{-1} 处出现 C=O 伸缩振动峰, 在 1293cm^{-1} , 1240cm^{-1} , 1169cm^{-1} 处出现 C-C 和 C-O 伸缩振动峰. 降伟莹 [4] 通过红外光谱观察到 Ti-O-Ti 键在 $500-700\text{cm}^{-1}$ 处的特征吸收峰, 证实了 TiO₂ 的形成.

4.3 热性能表征

热重分析 (TGA) 用于评价纳米纤维的热稳定性 [15]. 沈超怡 [3] 的研究表明, 气喷纺丝和静电纺丝制备的 PCL 纳米纤维的主要热降解阶段在 $250-450^\circ\text{C}$ 范围内, 气喷纺丝膜的最大失重速率温度 (Tdmax) 为 397.9°C , 静电纺丝膜为 395.5°C , 两者热稳定性性能相近. 差示扫描量热法 (DSC) 可用于分析纳米纤维的熔融行为和结晶度 [13].

4.4 机械性能表征

万能材料试验机用于测试纳米纤维膜的拉伸性能, 包括弹性模量, 拉伸强度和断裂伸长率. 沈超怡 [3] 的研究表明, 静电纺丝 PCL 纳米纤维的弹性模量 (9.25 MPa) 和断裂伸长率 (98.04%) 显著高于气喷纺丝膜 (3.90 MPa 和 79.24%), 表明静电纺丝制备的纳米纤维具有更高的延展性. 这可能是由于不同的纤维直径和孔隙率导致的 [14].

5 纳米纤维材料的应用

5.1 抑菌包装材料

纳米纤维材料在农产品抑菌包装领域具有广阔的应用前景. 沈超怡 [3] 制备的负载 THY/HP β CD 包合物的 PCL/CS 纳米纤维膜具有良好的抑菌性能和缓

释效果. 百里酚 (THY) 是一种天然植物源抗菌剂, 具有广谱抗菌活性, 但存在易挥发, 水溶性差等缺点. 通过 HP β CD 包封和纳米纤维负载, 可以实现 THY 的缓慢释放, 延长抗菌作用时间. 释放动力学研究表明, THY 的释放遵循 Korsmeyer-Peppas 模型, 释放指数为 0.05-0.34, 表明释放过程主要由 Fickian 扩散驱动 [3].

5.2 光催化材料

TiO₂ 和 ZnO 等半导体纳米粒子负载的复合纳米纤维在光催化降解有机污染物方面具有重要应用. 降伟莹 [4] 制备的 TiO₂/PAN 复合纳米纤维对有机污染物具有良好的光催化降解效果. 复合纤维的疏水性使其能够漂浮在水面上, 有利于光催化反应的进行和催化剂的回收再利用. 付沙威 [5] 制备的 CNFs/ZnO 复合材料同样表现出优异的光催化性能, 碳纳米纤维作为载体提高了电子传输效率.

5.3 能源材料

纳米纤维材料在能源领域也有重要应用. 气喷纺丝技术可用于制备高性能的纳米纤维电极材料, 用于燃料电池, 超级电容器等能源存储器件 [3]. 这些纳米纤维电极具有较大的比表面积, 优异的电子传导性和离子扩散性能, 可以显著提高能源存储器件的能量密度和功率密度. 研究表明, 利用静电气喷纺丝 (EBS) 技术制备的 PVA/PTFE 多孔碳纳米纤维-CNTs-硫复合材料, 在锂硫电池中表现出优异的电化学性能, 初始放电容量高达 1302.9mAh/g [3].

6 结束语

本文综述了纳米纤维材料的主要制备技术及其应用研究进展. 主要结论如下:

(1) 气喷纺丝技术具有制备效率高, 操作安全性好, 适用范围广等优势. 研究表明, 气喷纺丝的进料速度可达静电纺丝的 10 倍, 制备的纳米纤维直径更小且分布更集中. 气喷纺丝技术在农产品抑菌包装领域展现出良好的应用前景.

(2) 静电纺丝技术在纤维形貌控制和机械性能方面表现优异. 通过静电纺丝结合水热/溶剂热法, 可以制备具有特定功能的复合纳米纤维材料, 如 TiO₂/PAN 复合纤维和碳纳米纤维/ZnO 复合材料等.

(3) 离心纺丝技术具有生产效率高, 设备成本低, 适用体系广等优势. 研究表明, 离心纺丝的产量可达传统静电纺丝的数十倍甚至上百倍, 制备的纳米纤维直径均匀, 分布集中, 且可适配高黏度聚合物体系. 离心纺丝技术在农产品抑菌保鲜包装领域展现出良好的应用前景.

(4) 复合纳米纤维通过功能化改性可显著提升材料性能. 将无机纳米粒子 (如 TiO₂, ZnO) 负载到纳米纤维上, 可赋予材料光催化, 抗菌等特殊功能, 拓展了纳米纤维材料的应用领域.

(5) 在纳米纤维宏量制备方向, 静电纺丝纤维直径均匀, 形貌可控, 但产量低, 规模化难度大; 离心纺丝依靠离心力成纤, 设备简单, 产量极高, 可直接制备三维纳米纤维结构; 气喷纺丝 (SBS) 借助高速气流拉伸, 兼具设备简易, 安全性高, 纤维直径可调等优势, 三者与加捻技术结合后, 均具备制备高性能纳米纤维纱线的

潜力. 其中气喷纺丝与离心纺丝在工业化量产层面更具优势, 是推动纳米纤维材料从实验室走向产业应用核心技术路线 [16].

展望未来, 纳米纤维材料制备技术的发展趋势包括: (1) 开发高效, 低成本的规模化制备技术; (2) 实现纳米纤维结构的精确调控; (3) 开发多功能复合纳米纤维材料; (4) 拓展纳米纤维材料在生物医学, 环境保护, 新能源等领域的应用. 随着制备技术的不断进步和应用研究的深入, 纳米纤维材料必将在更多领域发挥重要作用. (5) 未来纳米纤维制备技术的核心发展方向为: 高效规模化制备, 结构精准调控, 纳米纤维与传统纺织流程融合, 多功能纱线开发. 将气喷纺丝, 离心纺丝等宏量制备技术与环锭纺, 涡流纺等传统加捻装备集成, 可实现纳米纤维从纤维到纱线再到织物的全流程连续化生产, 是推动纳米纤维材料在生物医学, 环境工程, 新能源与智能纺织领域规模化应用的关键路径 [16].

参考文献

- [1] 黄争鸣. 纳米纤维的静电纺丝技术 [J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(5): 1-6.
- [2] 李从举, 崔振铎, 赵莉. 纳米纤维的制备与应用研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(4): 1-5.
- [3] 沈超怡. 基于气喷纺丝的生鲜农产品纳米纤维包装材料制备技术与性能分析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2024. 28(02):37-58.
- [4] 降伟莹. TiO₂/PAN 复合纳米纤维材料的制备及表征 [D]. 长春: 东北师范大学, 2009.
- [5] 付沙威. 电纺碳纳米纤维及其复合材料的制备与性质研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
- [6] Long Chen, Shunqi Mei, Kelvin Fu, and Jian Zhou. Spinning the Future: The Convergence of Nanofiber Technologies and Yarn Fabrication. ACS Nano, 2024, 18 (24): 15358–15386.
- [7] 李先芄. 熔融离心纺丝工艺装备优化与应用研究 [D]. 东华大学, 2025. DOI: 10.27012/d.cnki.gdhuu.2025.001166.
- [8] Jeong W., Shin H., Lee J., et al. Hydro-Torsional Compaction for Scalable Production of Aramid Nanofiber Threads with Densely Assembled Double-Helical Nanostructures. [J]. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 2025, e72889. DOI: 10.1002/ADMA.72889.
- [9] Wu Y., Liu C., Yu J., et al. Single Nanofiber Mechanics: Guiding Principles for Robust and Multifunctional Nanofiber Materials. [J]. ACS nano, 2024, DOI: 10.1021/ACS.NANO.5C21501.
- [10] Riccardis D.F.M., Prontera T.C. Direct Use in Electrochemical Energy Devices of Electrospun Nanofibres with Functional Nanostructures [J]. Compounds, 2025,6(1):3-3. DOI: 10.3390/COMPOUNDS6010003.
- [11] 兰谢冬, 秦统, 吕苗. 无针静电纺丝技术制备 PAN 纳米纤维膜材料研究 [J]. 宝钢技术, 2025, (02):33-38.
- [12] 杨海贞, 马闯, 周泽林, 等. 静电纺丝碳纳米纤维复合材料的制备及应用进展 [J]. 印染, 2024, 50(06):84-88.
- [13] 杨思奥, 左凌楠, 王晓晖, 等. 静电纺丝技术在血管组织工程中的研究进展 [J]. 河北医科大学学报, 2024, 45(01):82-88.
- [14] Homer A.J.W., Lisenko M., Hauzerova S., et al. Thermally Stabilised Poly (vinyl alcohol) Nanofibrous Materials Produced by Scalable Electrospinning: Applications in Tissue Engineering [J]. Polymers, 2024, 16(14):2079-2079. DOI: 10.3390/POLYM16142079.
- [15] Huang J., Li Z., Liu F., et al. Preparation of microcellular polycaprolactone/cellulose nanocrystal/carbon black conductive composites using the Pickering emulsion method combined with supercritical batch foaming technology [J] Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(43): DOI: 10.1002/APP.54582.
- [16] Martinek J., Mokrejš P., Pavlačková J., et al. Characterization of Fibers Prepared by Centrifugal Spinning from Biotechnologically Derived Chicken Gelatin [J]. Foods, 2024, 13(16):2630-2630. DOI: 10.3390/FOODS13162630.

References

- [1] Huang Zhengming. Electrospinning technology of nanofibers [J]. High-tech fiber and application, 2003, 28(5): 1-6.

- [2] Li Congju, Cui Zhenduo, Zhao Li. Research progress on the preparation and application of nanofibers [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2005, 21(4): 1-5.
- [3] Shen Chaoyi. Research on the preparation technology and performance analysis of nanofiber packaging materials for fresh agricultural products based on air-jet spinning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024. 28(02):37-58.
- [4] Xie Weiying. Preparation and characterization of TiO₂/PAN composite nanofiber materials [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2009.
- [5] Fu Shawei. Research on the preparation and properties of electrospun carbon nanofibers and their composite materials [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012.
- [6] Long Chen, Shunqi Mei, Kelvin Fu, and Jian Zhou. Spinning the Future: The Convergence of Nanofiber Technologies and Yarn Fabrication. ACS Nano, 2024, 18 (24): 15358–15386.
- [7] Li Xianpeng. Research on the optimization and application of melt centrifugal spinning process equipment [D]. Donghua University, 2025. DOI: 10.27012/d.cnki.gdhuu.2025.001166.
- [8] Jeong W., Shin H., Lee J., et al. Hydro-Torsional Compaction for Scalable Production of Aramid Nanofiber Threads with Densely Assembled Double-Helical Nanostructures. [J]. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 2025, e72889. DOI: 10.1002/ADMA.72889.
- [9] Wu Y., Liu C., Yu J., et al. Single Nanofiber Mechanics: Guiding Principles for Robust and Multifunctional Nanofiber Materials. [J]. ACS nano, 2024, DOI: 10.1021/ACS.NANO.5C21501.
- [10] Riccardis D.F.M., Prontera T.C. Direct Use in Electrochemical Energy Devices of Electrospun Nanofibres with Functional Nanostructures [J]. Compounds, 2025,6(1):3-3. DOI: 10.3390/COMPOUNDS6010003.
- [11] Lan Xie Dong, Qin Tong, Lu Miao. Research on the preparation of PAN nanofiber membrane materials by needle-free electrospinning technology [J]. Baosteel Technology, 2025, (02):33-38.
- [12] Yang Haizhen, Ma Chuang, Zhou Zelin, etc. Progress in the preparation and application of electrospinning carbon nanofiber composite materials [J]. Printing and dyeing, 2024, 50(06):84-88.
- [13] Yang Siao, Zuo Lingnan, Wang Xiaohui, etc. Research progress of electrospinning technology in vascular tissue engineering [J]. Journal of Hebei Medical University, 2024, 45(01):82-88.
- [14] Homer A.J.W., Lisnenko M., Hauzerova S., et al. Thermally Stabilised Poly (vinyl alcohol) Nanofibrous Materials Produced by Scalable Electrospinning: Applications in Tissue Engineering [J]. Polymers, 2024, 16(14):2079-2079. DOI: 10.3390/POLYM16142079.
- [15] Huang J., Li Z., Liu F., et al. Preparation of microcellular polycaprolactone/cellulose nanocrystal/carbon black conductive composites using the Pickering emulsion method combined with supercritical batch foaming technology [J] Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(43): DOI: 10.1002/APP.54582.
- [16] Martinek J., Mokrejš P., Pavlačková J., et al. Characterization of Fibers Prepared by Centrifugal Spinning from Biotechnologically Derived Chicken Gelatin [J]. Foods, 2024, 13(16):2630-2630. DOI: 10.3390/FOODS13162630.