

同轴静电纺丝法制备CNT/Ag-/TPU纳米复合纤维膜及其性能研究

付 佳, 高馨雨, 姜 旻*

嘉兴大学材料与纺织工程学院, 浙江 嘉兴

收稿日期: 2025年9月17日; 录用日期: 2025年10月7日; 发布日期: 2025年10月16日

摘 要

静电纺丝技术是制备纳米级复合纤维的有效手段, 其产品在医用材料、柔性传感器等领域展现出广阔的应用前景。纳米纤维膜因其柔软、低模量、易变形等特性而备受关注。制备方法主要包括单针、同轴、多针阵列及无针静电纺丝。本研究首先采用单针静电纺丝法优化了制备热塑性聚氨酯(TPU)纤维膜的工艺参数。在此基础上, 利用同轴静电纺丝技术, 以纳米银/TPU (Ag-/TPU)为壳层, 碳纳米管/TPU (CNT/TPU)为核层, 成功制备了具有核壳结构的纳米复合纤维膜。通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)、扫描电子显微镜(SEM)、热重分析(TGA)、差示扫描量热法(DSC)及光学视频接触角仪对复合纤维膜的化学结构、微观形貌、热性能和润湿性进行了系统表征。研究结果成功证实了一种核壳结构纳米复合纤维的制备可行性。

关键词

聚氨酯, 同轴静电纺丝, 纳米银, 碳纳米管, 核壳结构

Preparation of CNT/Ag-/TPU Nanocomposite Fiber Membrane by Coaxial Electrospinning and Its Performance Study

Jia Fu, Xinyu Gao, Yang Jiang*

College of Materials and Textile Engineering, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang

Received: September 17, 2025; accepted: October 7, 2025; published: October 16, 2025

Abstract

Electrospinning technology is a common method for preparing nanoscale composite fibers, and the resulting fiber membranes have been widely used in fields such as medical materials and flexible

*通讯作者。

文章引用: 付佳, 高馨雨, 姜旻. 同轴静电纺丝法制备 CNT/Ag-/TPU 纳米复合纤维膜及其性能研究[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(4): 416-425. DOI: 10.12677/amc.2025.134043

sensors. Nanofiber membranes have attracted significant attention due to their softness, low modulus, and ease of deformation. The main preparation methods include single-needle, coaxial, multi-needle array, and needleless electrospinning. In this study, thermoplastic polyurethane (TPU) fiber membranes were first prepared using single-needle electrospinning to determine the optimal process parameters. Subsequently, a core-shell structure nanocomposite fiber membrane was fabricated via coaxial electrospinning, with a silver nanoparticle/TPU (Ag-/TPU) solution as the shell layer and a carbon nanotube/TPU (CNT/TPU) solution as the core layer. The chemical structure, micromorphology, thermal properties, and wettability of the prepared nanocomposite fiber membrane were characterized by using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), Thermogravimetric Analysis (TGA), Differential Scanning Calorimetry (DSC), and optical video contact angle measurements. The research results successfully demonstrated the feasibility of the fabrication of a core-shell structure nanocomposite fiber.

Keywords

Polyurethane, Coaxial Electrospinning, Nanosilver, Carbon Nanotubes, Core-Shell Structure

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. 绪论

传统的聚合物纤维制备方法，如熔融纺丝和溶液纺丝，所生产的纤维直径通常在微米级别[1]。为了提升纺织品的性能并拓展其应用领域，开发更细直径的纳米纤维已成为研究热点。静电纺丝技术能够在强静电场作用下，将聚合物溶液或熔体拉伸成直径为几十到几百纳米的纤维。这种技术制备的纳米纤维膜具有极高的比表面积、高孔隙率和优异的生物相容性，因此在过滤、传感、药物递送和组织工程等领域显示出巨大的应用潜力[2]。静电纺丝技术的核心装置包括高压电源、纺丝液供给系统和接收装置。根据喷丝头设计不同，可分为单针、多针、无针以及同轴静电纺丝等[3]。同轴静电纺丝作为一种改进技术，使用内外双通道的同轴喷头，能够将两种不同的纺丝液同时纺出，形成具有核壳结构的复合纤维。这种独特的结构使得不同功能的材料得以有效结合，例如将一种功能材料封装在核层，而壳层则提供保护或另一种功能，从而实现多功能一体化，极大地拓展了纳米纤维的应用前景[4]。

聚氨酯(TPU)作为一种嵌段共聚物，其分子链由柔性的软段和刚性的硬段交替构成，这种独特的微相分离结构赋予了 TPU 优异的弹性、耐磨性和生物相容性[5]-[7]。通过静电纺丝技术制备的 TPU 纳米纤维膜，不仅保持了 TPU 材料本身的优良性能，还因其纳米级的多孔网络结构，在柔性电子器件和医用敷料等领域备受青睐[8]。为了进一步提升材料的性能，研究人员常在聚合物基体中引入功能性纳米填料[9]-[11]。碳纳米管(CNTs)作为一种一维纳米材料，拥有卓越的力学性能和导电性，是构建高性能复合材料的理想填料[12] [13]。而纳米银(Ag)材料则因其广谱、高效的抗菌性能而广为人知[14] [15]。将这两种纳米材料与 TPU 结合，有望制备出兼具优异力学、导电及抗菌性能的多功能复合纤维膜。

本课题旨在利用同轴静电纺丝技术，将具有高导电性的碳纳米管和具有抗菌活性的纳米银分别与 TPU 共混，制备具有核壳结构的 CNT/Ag-/TPU 纳米复合纤维膜。其中，CNT/TPU 作为核层以增强纤维的力学与导电性能，Ag-/TPU 作为壳层赋予材料表面抗菌性。通过系统研究纺丝工艺参数对纤维形貌的影响，并对最终制备的复合纤维膜进行结构、形貌、热学及表面性能的表征，以期新型柔性可穿戴设备和多功能医用敷料的开发提供一种新的材料方案。

2. 实验部分

2.1. 实验原料与试剂

实验所用主要原料和试剂信息如表 1 所示。

Table 1. Reagents used in the experiment
表 1. 实验所用试剂

试剂名称	分子式或缩写	规格	来源
聚氨酯	TPU	1185A	德国巴斯夫公司
四氢呋喃	THF	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
N,N-二甲基甲酰胺	DMF	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
碳纳米管	CNTs	高纯多壁	佳材科技
银纳米线	AgNWs	10,000 ppm, 30 nm	南京先丰纳米材料科技有限公司

2.2. 实验仪器

实验所用主要仪器设备信息如表 2 所示。

Table 2. Instruments and equipment used in the experiment
表 2. 实验所用仪器和设备

仪器或器具名称	规格	来源
静电纺丝一体机	SS-3656H	北京永康乐业科技发展有限公司
静电纺丝机	ET-2535H	北京永康乐业科技发展有限公司
同轴静电纺丝针头	内径 23#, 外径 18#	北京永康乐业科技发展有限公司
数控超声波清洗器	KQ-300DE	昆山市超声仪器有限公司
傅立叶变换红外光谱仪	Vertex 70	德国 Bruker 公司
差示扫描量热仪	DSC Q20	德国 TA 公司
热失重仪	TGA Q50	德国 TA 公司
光学视频接触角仪	DSA30S	德国 KRÜSS 公司
台式扫描电子显微镜	BV100103	北京中科科仪股份有限公司
万能材料拉力机	UTM2503	深圳三思纵横科技股份有限公司
台式电热恒温鼓风干燥箱	DHG-9203A	上海精宏实验设备有限公司

2.3. 聚氨酯纳米纤维膜的制备

首先进行单针静电纺丝实验以优化纺丝液浓度。将 TPU 颗粒溶解于 DMF 与 THF 的混合溶剂(体积比 2:1)中, 配制成质量分数为 10%、12%、14%和 16%的纺丝溶液, 磁力搅拌至完全溶解后静置 12 小时以消除气泡。采用单针静电纺丝工艺, 设定纺丝电压为 12 kV, 接收距离为 10 cm, 推注速率为 0.1 mm/min,

以确定最佳的 TPU 纺丝溶液浓度。

2.4. 同轴静电纺丝制备复合纤维膜

纺丝溶液的配制:

核层溶液: 取优化后的 16% TPU 纺丝溶液, 加入质量分数为 1% 的 CNTs, 经超声分散 1 小时后静置备用。

壳层溶液: 取 16% TPU 纺丝溶液, 加入 0.2% 的 AgNWs 溶液(10,000 ppm), 磁力搅拌至均匀分散后静置备用。

静电纺丝工艺: 采用同轴静电纺丝装置, 以 1% CNT/16% TPU 为核层溶液, 0.2% Ag-/16% TPU 为壳层溶液。使用内径为 23 号(0.33 mm)、外径为 18 号(0.90 mm)的同轴喷头。设定纺丝电压为 17 kV, 接收距离为 16 cm, 滚筒转速为 140 rpm。固定壳层溶液推注速率为 0.1 mm/min, 分别调节核层溶液推注速率为 0.033 mm/min、0.025 mm/min、0.02 mm/min 和 0.03 mm/min, 以研究不同核壳比对纤维性能的影响。

2.5. 性能表征

微观形貌: 使用台式扫描电子显微镜(SEM)观察纤维膜的表面形貌。样品需进行喷金处理。

化学结构: 利用傅立叶变换红外光谱仪(FTIR), 在 $400\sim4000\text{ cm}^{-1}$ 范围内对样品进行扫描, 分析官能团结构。

DSC 分析: 使用差示扫描量热仪(DSC), 在氮气氛围下, 以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率将样品从 30°C 升温至 250°C , 再降温至 -50°C , 分析材料的玻璃化转变温度和熔融、结晶行为。

TGA 分析: 使用热重分析仪(TGA), 在氮气氛围下, 以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率将样品从室温加热至 800°C , 分析材料的热稳定性。

润湿性: 采用光学视频接触角仪测量水滴在纤维膜表面的接触角, 以评估其亲疏水性。

3. 结果与讨论

3.1. 纳米纤维膜的形貌分析

3.1.1. 聚氨酯纤维膜的形貌

为了获得均匀的纤维形貌, 首先对不同浓度的 TPU 纺丝液进行了单针静电纺丝实验。图 1 展示了不同浓度下 TPU 纳米纤维的 SEM 图像。从图 1 中可以看出, 当 TPU 浓度为 10% 和 12% 时(图 1(a), 图 1(b)), 由于溶液粘度较低, 聚合物链的缠结不足以抵抗电场力引起的表面张力, 导致射流在拉伸过程中发生断裂, 形成了大量的串珠状结构, 纤维直径极不均匀。当浓度增加到 14% 时(图 1(c)), 串珠现象明显减少, 但纤维直径依然存在一定不均匀性。而当浓度达到 16% 时(图 1(d)), 溶液粘度适中, 能够形成稳定连续的泰勒锥和射流, 从而制备出表面光滑、无珠粒且直径分布相对均匀的纳米纤维。因此, 后续实验均选用 16% 的 TPU 浓度作为基础。

3.1.2. 复合纤维膜的形貌

图 2 展示了分别将 AgNWs 和 CNTs 与 16% TPU 共混后, 通过单针静电纺丝制备的纤维膜的 SEM 图像。从图 2(a)和图 2(b)可以看出, 无论是加入 0.2% 的 AgNWs 还是 1% 的 CNTs, 所制备的复合纤维膜均保持了良好的三维多孔网络结构, 纤维表面光滑、无明显珠粒, 表明低含量的纳米填料并未显著影响 TPU 的可纺性。

图 3 为采用同轴静电纺丝法制备的 Ag-/CNT/TPU 核壳结构纤维膜的 SEM 照片, 其中壳层速率固定为 0.1 mm/min, 核层速率则进行了调整。由图 3 可见, 所有同轴纺丝制备的纤维膜均呈现出连续、均一

的三维网络形态。纤维表面整体光滑，但相较于纯 TPU 纤维，可见少量微小的凸起。这可能是由于部分纳米粒子(AgNWs 或 CNTs)在纺丝过程中少量分布于壳层表面，或是核层溶液流速的变化引起纳米粒子在核内发生轻微团聚所致。其中，当核层速率最低时(图 3(c)，0.02 mm/min)，纤维表面的凸起最少，直径也相对更细、更均匀。这表明通过同轴静电纺丝法，可以成功制备出形貌均一的 Ag-/CNT/TPU 核壳结构复合纤维膜。

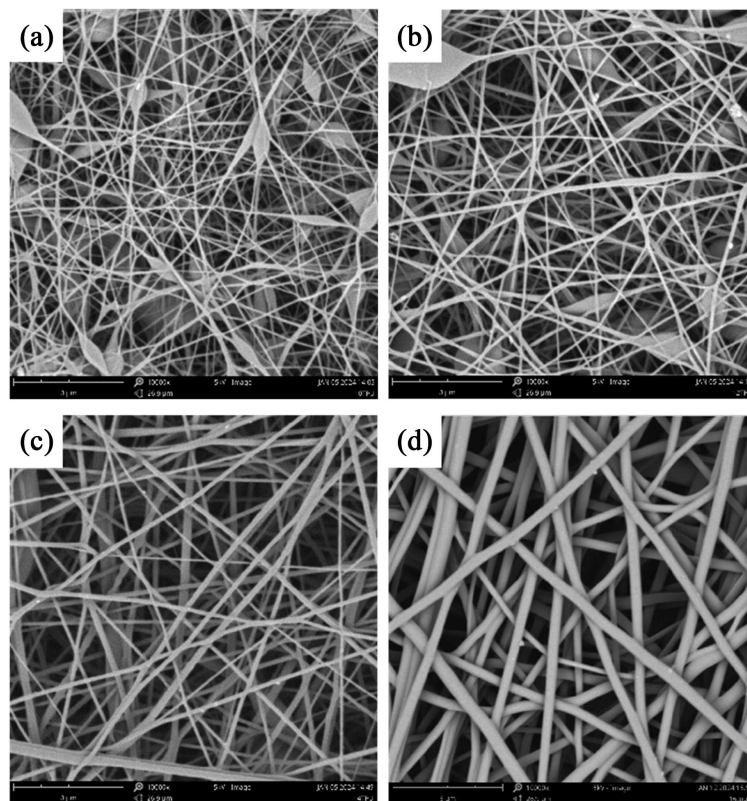


Figure 1. SEM electron microscope images of TPU electrospun fibers at different concentrations: (a) 10% TPU; (b) 12% TPU; (c) 14% TPU; (d) 16% TPU (scale length is 2 μm)

图 1. 不同浓度 TPU 静电纺丝纤维的 SEM 电镜照片: (a) 10% TPU; (b) 12% TPU; (c) 14% TPU; (d) 16% TPU (标尺长度为 2 μm)

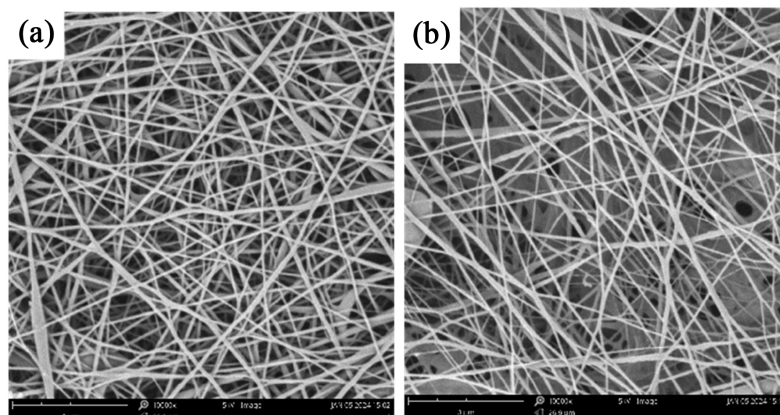


Figure 2. Morphological characteristics of the solution-spun fibers in the core layer and shell layer: (a) Ag-/TPU; (b) CNT/TPU

图 2. 核层和壳层溶液纺丝纤维的形貌特征: (a) Ag-/TPU; (b) CNT/TPU

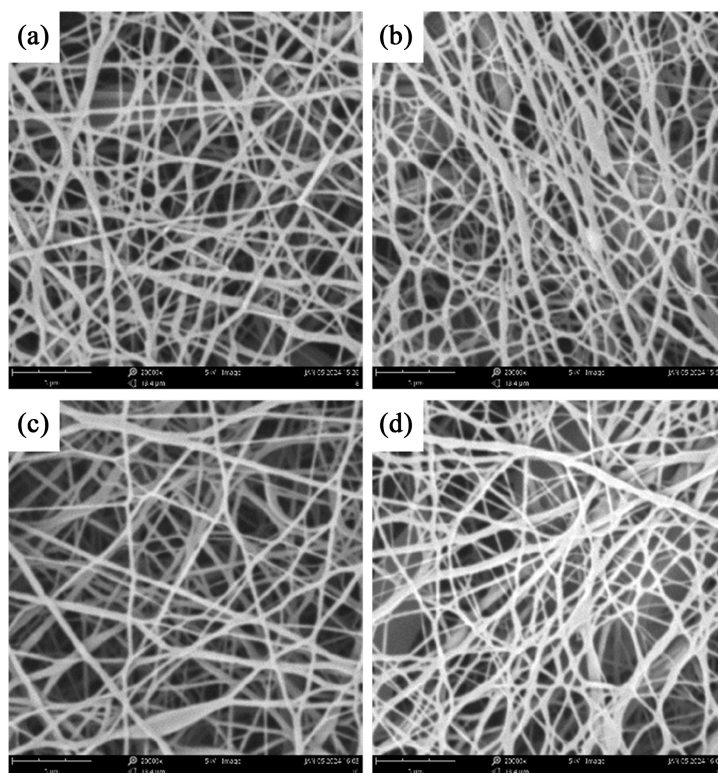


Figure 3. Morphological images of Ag-/CNT/TPU coaxial nanofiber membranes: (a) With a core layer velocity of 0.033 mm/min; (b) With a core layer velocity of 0.025 mm/min; (c) With a core layer velocity of 0.02 mm/min; (d) With a core layer velocity of 0.03 mm/min

图 3. Ag-/CNT/TPU 同轴纳米纤维膜的形貌图: (a) 核层速率为 0.033 mm/min; (b) 核层速率为 0.025 mm/min; (c) 核层速率为 0.02 mm/min; (d) 核层速率为 0.03 mm/min

3.2. 纳米纤维膜的 FTIR 分析

为了探究纳米填料的引入及同轴纺丝过程是否影响 TPU 的化学结构, 对四种纤维膜进行了 FTIR 测试, 结果如图 4 所示。在图 4 的光谱中, 所有样品均未在 $2273\sim 2242\text{ cm}^{-1}$ 范围内出现异氰酸酯基(-NCO)的特征峰, 说明 TPU 聚合反应完全, 无单体残留。图中 3330 cm^{-1} 处的吸收峰对应 N-H 键的伸缩振动, 1708 cm^{-1} 处的强峰为氨基甲酸酯中羰基(C=O)的吸收峰, 1521 cm^{-1} 处为 N-H 弯曲振动与 C-N 伸缩振动的耦合峰(酰胺 II 带), 这些都是 TPU 的典型特征吸收峰。对比四条曲线可以发现, 无论是添加了 AgNWs、CNTs, 还是经过同轴纺丝, 复合纤维膜的红外光谱与纯 TPU 相比几乎没有变化, 表明该制备过程为物理共混, 未改变 TPU 的分子主链结构。

3.3. 纳米纤维膜的 DSC 分析

TPU 的性能很大程度上取决于其软硬段的微相分离结构。通过 DSC 测试可以分析纳米填料对 TPU 相结构的影响。图 5 展示了四种纤维膜的一次升温 and 一次降温 DSC 曲线。

从升温曲线(图 5(a))可以看出, 四种纤维膜的玻璃化转变温度(T_g)基本一致, 约为 52°C 。纯 TPU 的熔融温度(T_m)为 194.04°C 。加入 AgNWs 后, T_m 略微升高至 194.74°C 。而加入 CNTs 以及同轴复合后, T_m 分别显著提升至 195.94°C 和 197.02°C 。这表明纳米粒子的加入, 尤其是 CNTs, 能够起到异相成核的作用, 提高了 TPU 硬段的结晶完整性。

从降温曲线(图 5(b))来看, 纯 TPU 和 Ag-/TPU 的结晶温度(T_c)均为 104°C 左右, 表明 AgNWs 对 TPU

硬段的结晶行为影响不大。然而, CNT/TPU 的 T_c 显著升高, 说明 CNTs 促进了硬段的结晶。有趣的是, 同轴核壳纤维的 T_c 虽然也高于纯 TPU, 但却比 CNT/TPU 低了约 7°C 。这可能是因为核壳结构中, 分别位于核层和壳层的 CNTs 与 AgNWs 之间产生了某种协同效应, 或者界面相互作用影响了 CNTs 对硬段结晶的促进作用。综合升降温曲线分析, 可以推测 AgNWs 更倾向于分布在 TPU 的非晶区(软段), 而 CNTs 则主要影响结晶区(硬段)。

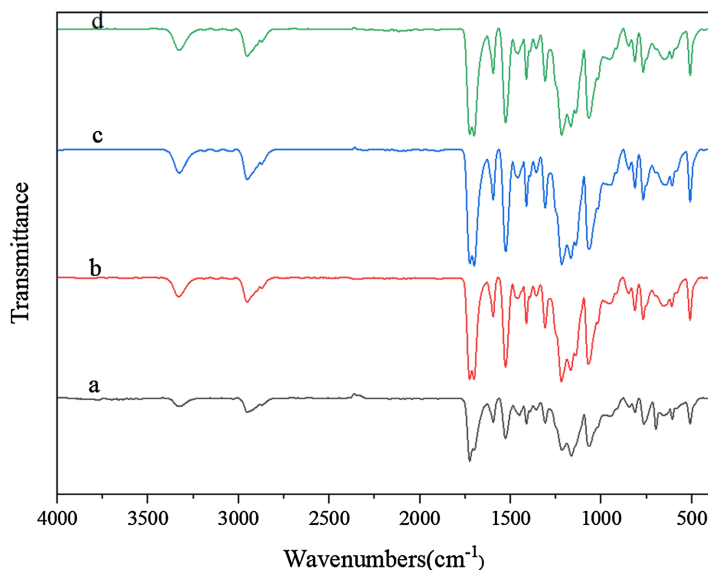


Figure 4. FTIR spectra of the nanofiber membranes (a is TPU; b is Ag-/TPU; c is CNT/TPU; d is Ag-/CNT/TPU)

图 4. 纳米纤维膜的 FTIR 图谱(a 为 TPU; b 为 Ag-/TPU; c 为 CNT/TPU; d 为 Ag-/CNT/TPU)

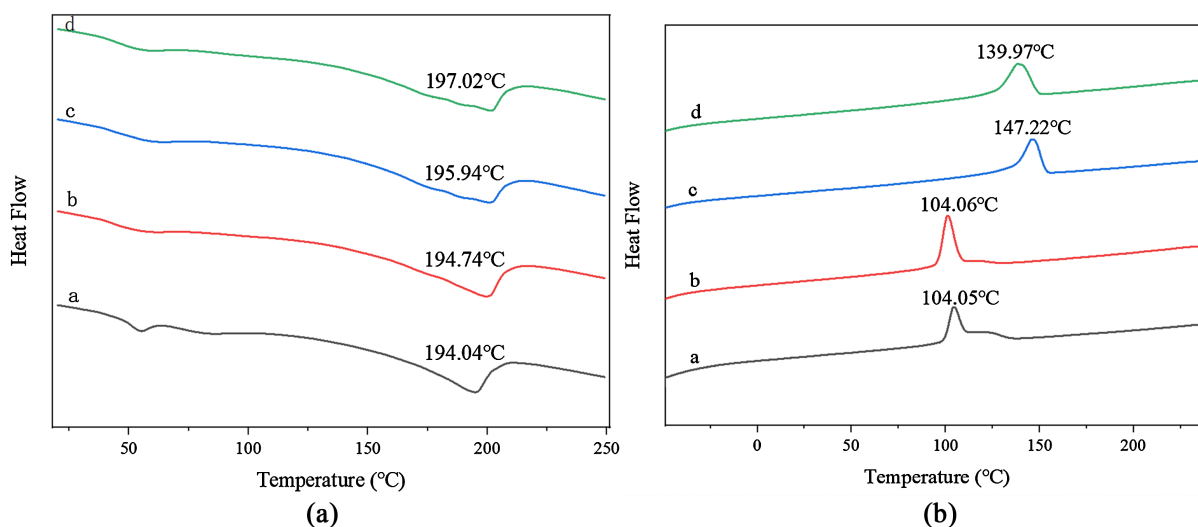


Figure 5. DSC curves of the nanofiber membrane: (a) The first heating curve; (b) The first cooling curve (a is TPU; b is Ag-/TPU; c is CNT/TPU; d is Ag-/CNT/TPU)

图 5. 纳米纤维膜的 DSC 曲线: (a) 一次升温曲线; (b) 一次降温曲线(a 为 TPU; b 为 Ag-/TPU; c 为 CNT/TPU; d 为 Ag-/CNT/TPU)

3.4. 纳米纤维膜的热失重分析

为了评估复合纤维膜的热稳定性, 进行了 TGA 测试, 结果如图 6 所示。由 TG 和 DTG 曲线可知,

纯 TPU 膜的最大分解温度(Td)为 404.79℃。加入 AgNWs 和 CNTs 后, Ag-/TPU 的 Td 为 406.79℃, CNT/TPU 的 Td 为 403.31℃, 而同轴复合纤维膜的 Td 为 406.33℃。可以看出, 无论是单独添加 AgNWs、CNTs, 还是通过同轴纺丝制备复合纤维膜, 其最大热分解温度与纯 TPU 相比仅有 1℃~2℃的微小变化。这表明, 在本实验所用的添加量下, 这两种纳米填料对 TPU 基体的整体热稳定性基本没有产生显著影响。

3.5. 纳米纤维膜的润湿性分析

纤维膜表面的润湿性是决定其在许多应用中性能的关键因素。图 7 展示了四种纤维膜的水接触角测试结果。纯 16% TPU 纤维膜的接触角为 $126.39^\circ \pm 4.50^\circ$, 表现出较强的疏水性。加入 CNTs 后, CNT/TPU

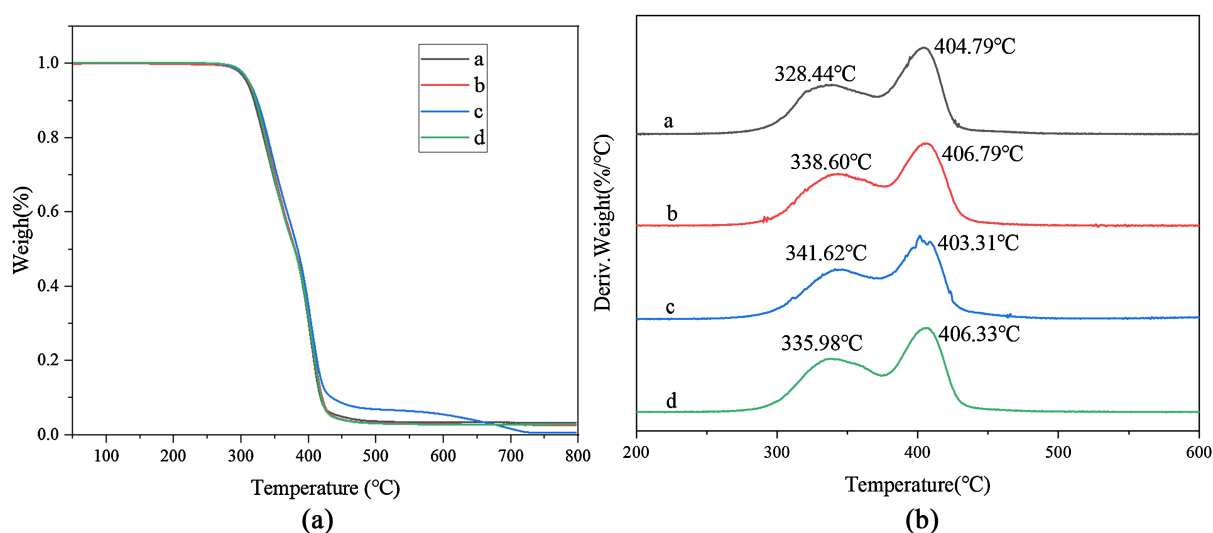


Figure 6. TG and DTG curves of the nanofiber membrane: (a) TG curves; (b) DTG curves (a is TPU; b is Ag-/TPU; c is CNT/TPU; d is Ag-/CNT/TPU)

图 6. 纳米纤维膜的 TG 和 DTG 曲线: (a) TG 曲线; (b) DTG 曲线(a 为 TPU; b 为 Ag-/TPU; c 为 CNT/TPU; d 为 Ag-/CNT/TPU)

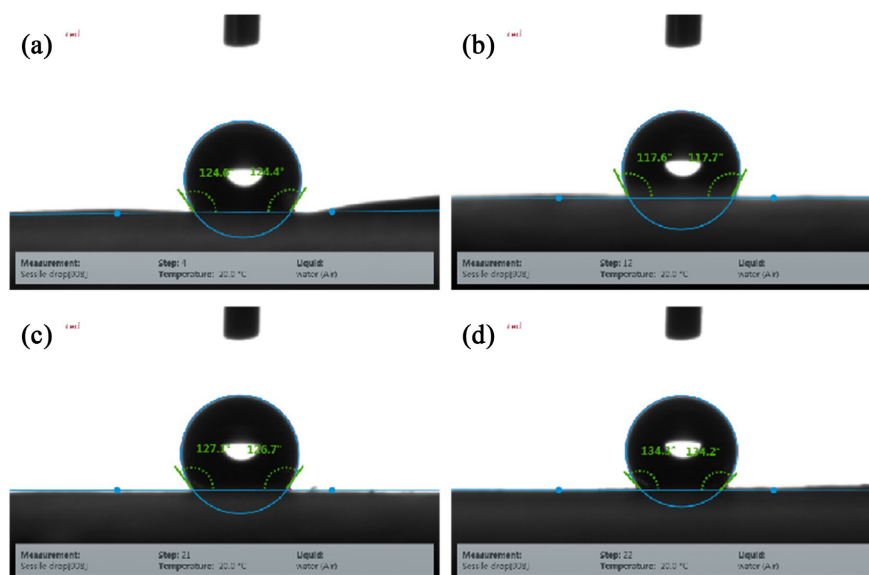


Figure 7. Contact angle of (a) TPU, (b) Ag-/TPU, (c) CNT/TPU, and (d) Ag-/CNT/TPU nanofiber membranes

图 7. (a) TPU、(b) Ag-/TPU、(c) CNT/TPU 和(d) Ag-/CNT/TPU 纳米纤维膜的接触角

纤维膜的接触角($126.49^{\circ} \pm 1.10^{\circ}$)基本不变。而加入 AgNWs 后, Ag-/TPU 的接触角减小至 $117.69^{\circ} \pm 0.50^{\circ}$, 疏水性有所减弱, 这可能是因为银纳米粒子上可能存在的亲水性表面活性剂或其对纤维表面规整性的轻微破坏所致。值得注意的是, 同轴法制备的 Ag-/CNT/TPU 复合纤维膜的接触角增大至 $133.57^{\circ} \pm 2.6^{\circ}$, 表现出更强的疏水性。这可能是因为同轴纺丝制备的纤维直径更细(如图 3 所示), 根据 Wenzel 和 Cassie-Baxter 模型, 更精细的纳米结构和增加的空气捕捉层能够显著增强表面的疏水性能, 即所谓的“纳米效应”。

4. 结论

本研究采用同轴静电纺丝方法, 成功制备了以 Ag-/TPU 为壳层、CNT/TPU 为核层的核壳结构纳米复合纤维膜。研究确定了 16% 是制备均匀 TPU 纳米纤维的最佳纺丝液浓度, 所制备的复合纤维膜呈现出形貌均一的三维网络结构。通过 FTIR 和 TGA 分析证实, 纳米填料的引入为物理复合过程, 未改变 TPU 的化学结构, 也未显著影响其热稳定性。DSC 测试表明, CNTs 倾向于在 TPU 硬段中起到异相成核作用, 且在核壳结构中 Ag-共同对聚氨酯硬段结晶产生协同影响。此外, 所有纤维膜均表现出疏水性, 其中同轴法制备的复合纤维膜因其更精细的纳米结构而具有更强的疏水效果。此项工作为制备多功能核壳结构纳米纤维提供了有效途径, 未来可对其力学、抗菌及生物相容性等性能进行深入测试, 以拓展其在电子皮肤、医疗保健及纺织品等领域的应用。

基金项目

浙江省教育厅一般科研项目(编号: Y202353046); 嘉兴大学大学生科研训练计划项目(SRT)(编号: 8517231015)。

参考文献

- [1] 赵胜利, 黄勇. 高压静电场纺丝的研究与进展[J]. 纤维素科学与技术, 2002, 10(3): 49-53.
- [2] 严国荣. 静电纺丝纳米纤维的应用研究进展[J]. 上海纺织科技, 2018, 46(5): 1-6.
- [3] Li, D., McCann, J.T. and Xia, Y. (2004) Use of Electrospinning to Directly Fabricate Hollow Nanofibers with Functionalized Inner and Outer Surfaces. *Small*, **1**, 83-86. <https://doi.org/10.1002/sml.200400056>
- [4] 刘力菲, 李伟, 黄潇楠. 静电纺丝纳米纤维的制备与应用[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 58-63.
- [5] 郁为民, 宫涛. 聚氨酯弹性体的发展概况与应用前景[J]. 聚氨酯工业, 1998, 13(1): 1-5.
- [6] 方剑, 徐卫林. 聚氨酯树脂应用及研究[J]. 武汉科技学院学报, 2003, 16(6): 58-63.
- [7] 王玉浩, 马万彬, 周彦粉, 等. 静电纺聚氨酯纳米纤维膜的制备及其性能研究[J]. 塑料工业, 2019, 47(8): 151-155.
- [8] He, J., Li, A., Wang, W., Cui, C., Jiang, S., Chen, M., *et al.* (2023) Multifunctional Wearable Device Based on an Antibacterial and Hydrophobic Silver Nanoparticles/Ti₃C₂T_x MXene/Thermoplastic Polyurethane Fibrous Membrane for Electromagnetic Shielding and Strain Sensing. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **62**, 9221-9232. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00214>
- [9] Yuan, Q., Jiang, H., Gao, T., Zhang, S., Jia, S., Wu, T., *et al.* (2023) Efficient Fabrication of Highly Stretchable and Ultra-sensitive Thermoplastic Polyurethane/Carbon Nanotube Foam with Anisotropic Pore Structures for Human Motion Monitoring. *Journal of Materials Chemistry A*, **11**, 7447-7456. <https://doi.org/10.1039/d3ta00364g>
- [10] Wang, W., Ma, Y., Wang, T., Ding, K., Zhao, W., Jiao, L., *et al.* (2022) Double-Layered Conductive Network Design of Flexible Strain Sensors for High Sensitivity and Wide Working Range. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14**, 36611-36621. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c08285>
- [11] 李蓓. 导电高分子纳米纤维膜的制备及其应变传感性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [12] 欧阳兆飞. 静电纺丝制备聚氨酯/碳纳米管/纳米银复合纤维及其在电化学传感器中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [13] 孙书情, 卓志宁, 阳范文, 等. TPU/碳纳米管导电复合材料的制备与性能[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(6): 42-44.

-
- [14] 李刚, 彭皓, 薛云升, 等. CNTs/AgNWs/CNTs/TPU 纳米纤维膜应变传感器的制备及性能[J]. 纺织科学与工程学报, 2023, 40(4): 75-79.
- [15] 肖世健, 樊飞, 陈琦, 等. 载银介孔二氧化硅聚醚砜纳米复合膜的制备及其性能研究[J]. 化工新型材料, 2025, 53(7): 115-120, 127.