

CNT包覆三维聚乙烯-聚丙烯(ES)/PET非织造基柔性压力传感器的制备及性能

高星 张蕊 应迪 郑莹莹 王建 邹专勇

Preparation and performance of CNT impregnating 3D ethylene-propylene side by side (ES)/PET nonwoven-based flexible pressure sensors

GAO Xing, ZHANG Rui, YING Di, ZHENG Yingying, WANG Jian, ZOU Zhuanyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240620.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于微结构的柔性压力传感器设计、制备及性能

Design, fabrication and performance of flexible pressure sensors based on microstructures

复合材料学报. 2021, 38(10): 3133–3150 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210520.004>

基于纳米银颗粒-聚多巴胺-碳纳米管导电材料的三明治型柔性应变传感器

Sandwich flexible strain sensor based on silver nanoparticles-polydopamine-carbon nanotube conductive material

复合材料学报. 2022, 39(12): 5835–5845 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211223.003>

基于微纳米纤维的多层次微结构设计制备及其传感应用

Design, fabrication and sensing application of hierarchical microstructures based on micro/nano fibers

复合材料学报. 2024, 41(1): 207–218 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230531.003>

基于多向冷冻法制备的高灵敏度柔性电容式压力传感器

High-sensitive flexible capacitive pressure sensor based on multi-directional freezing method

复合材料学报. 2023, 40(5): 2680–2687 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220705.004>

碳纳米管复合亚麻纤维柔性传感材料的制备

Preparation of flexible sensing material of flax fiber combined carbon nanotubes

复合材料学报. 2021, 38(7): 2244–2253 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201020.001>

纳米材料在柔性压阻式压力传感器中的研究进展

Research progress of nanomaterials in flexible piezoresistive pressure sensors

复合材料学报. 2023, 40(7): 3722–3737 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230225.001>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240620.003

CNT 包覆三维聚乙烯-聚丙烯 (ES)/PET 非织造基柔性压力传感器的制备及性能



分享本文

高星¹, 张蕊¹, 应迪¹, 郑莹莹², 王建^{*1,2}, 邹专勇^{1,2}

(1. 绍兴文理学院 浙江省清洁染整技术研究重点实验室, 绍兴 312000; 2. 绍兴文理学院 绍兴市高性能纤维及制品重点实验室, 绍兴 312000)

摘要: 为克服柔性传感器在灵敏度较低、生产流程复杂以及透气性不足等方面的挑战, 本研究通过针刺-热熔技术制备了一种三维聚乙烯-聚丙烯 (Ethylene-propylene side by side, ES)/聚酯 (PET) 纤维非织造材料。随后, 利用碳纳米管 (CNT) 对该材料进行浸渍处理, 成功开发了一种性能优异的 CNT 包覆三维 ES/PET 非织造基压力传感器, 并对比分析了不同 CNT 浸渍时间和浸渍次数对传感器性能的影响。研究结果显示, 该 CNT 包覆三维 ES/PET 非织造基柔性压力传感器具有高达 0.375 kPa^{-1} 的灵敏度和 $0\sim 214.526 \text{ kPa}$ 的检测范围。经过 2 100 次压缩循环, 传感器展现了优异的稳定性和可重复性, 响应时间为 48 ms, 恢复时间为 122 ms。在实际应用中, 该传感器能够精确识别如呼吸、吞咽、手指弯曲等人体细微生理活动, 在运动、医疗、虚拟现实等多个领域具有潜在的广泛应用。

关键词: 碳纳米管; ES 纤维; PET 纤维; 三维非织造材料; 柔性压力传感器

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)04-1943-10

Preparation and performance of CNT impregnating 3D ethylene-propylene side by side (ES)/PET nonwoven-based flexible pressure sensors

GAO Xing¹, ZHANG Rui¹, YING Di¹, ZHENG Yingying², WANG Jian^{*1,2}, ZOU Zhuanyong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Shaoxing Key Laboratory of High Performance Fibers & Products, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: To address the challenges associated with low sensitivity, complex production processes, and insufficient breathability of flexible sensors, this study developed a three-dimensional nonwoven material made of ethylene-propylene side by side (ES)/polyester (PET) fibers through needle punching and thermal bonding techniques. The material was then impregnated with carbon nanotubes (CNT), leading to the successful development of a high-performance CNT impregnating three-dimensional thermally bonded nonwoven-based pressure sensor. The impact of different CNT impregnation processes on sensor performance was comparatively analyzed. The findings indicate that the three-dimensional ES/PET nonwoven-based flexible pressure sensor exhibits a high sensitivity of up to 0.375 kPa^{-1} and a detection range of $0\sim 214.526 \text{ kPa}$. After 2 100 compression cycles, the sensor demonstrate excellent stability and repeatability, with a response time of 48 ms and a recovery time of 122 ms. In practical applications, this sensor can accurately identify subtle physiological activities such as breathing, swallowing, and finger bending, showing potential for widespread use in sports, medical, and virtual reality fields.

收稿日期: 2024-04-29; 修回日期: 2024-06-12; 录用日期: 2024-06-13; 网络首发时间: 2024-06-21 13:04:52

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240620.003>

基金项目: 浙江省教育厅一般科研项目 (Y202351466); 国家级大学生创新创业训练计划 (202310349047)

General Scientific Research Project of Zhejiang Education Department (Y202351466); National Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates (202310349047)

通信作者: 王建, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为纤维新材料及柔性智能可穿戴纺织品 E-mail: jwang@usx.edu.cn

引用格式: 高星, 张蕊, 应迪, 等. CNT 包覆三维聚乙烯-聚丙烯 (ES)/PET 非织造基柔性压力传感器的制备及性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 1943-1952.

GAO Xing, ZHANG Rui, YING Di, et al. Preparation and performance of CNT impregnating 3D ethylene-propylene side by side (ES)/PET nonwoven-based flexible pressure sensors[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(4): 1943-1952(in Chinese).

Keywords: carbon nanotubes; ES fiber; PET fiber; three-dimensional nonwoven materials; flexible pressure sensor

科技的快速发展带动了智能可穿戴设备市场需求的增加,从而使传感器技术在这一领域备受关注^[1]。传统刚性传感器由于质地硬、成本高、与织物集成性差,无法满足用户对可穿戴器件的舒适性和低价格需求^[2-4]。相比之下,柔性传感器因其轻便、可折叠的特性而备受瞩目,更符合用户对智能可穿戴传感器的舒适性和经济性需求^[5]。目前,常见的柔性传感器按照信号转换机制可以分为电容式^[6]、压电式^[7]以及压阻式三大类。其中,由于压阻式传感器结构简单^[8]、易于制备、灵敏度高^[9]和稳定性强^[10]等特点,在近年来吸引了众多研究人员的浓厚兴趣。

然而,目前电阻式压力传感器大多采用薄膜^[11]或凝胶^[12]等形式,这些材料特性极大地影响了透气性^[13]和穿戴舒适度。Ding等^[14]开发的传感器采用三维无序多孔结构的敏感材料,可置于胸口下方,实时监测用户在睡眠期间的呼吸和心跳等生理信号。这表明,具备多孔结构的三维无序材料^[15]能够让传感器在保持轻量和高灵活性^[16]的同时,有效解决透气性和舒适度问题^[17]。同时,碳纳米管具有低成本^[18]、高导电^[19]和高导热^[20]等特性,Zhao等^[21]将碳纳米管(CNT)用作填充材料^[22],开发了CNT修饰的压阻传感器。这种传感器既保留了基材的柔性和稳定性,又提高了传感性能和耐用性,这使得CNT成为理想的填充材料之一。

因此,本研究采用自制的高透气三维聚乙烯-聚丙烯(Ethylene-propylene side by side, ES)/聚酯(PET)非织造材料作基材,并用CNT对其修饰,制备了具备三维纤维网状结构的高透气性压阻式传感器。通过调整CNT浸渍时间和浸渍次数,比较分析了不同浸渍工艺对传感器性能的影响。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

CNT(5wt%水性浆,深圳市德恒科技有限公司),氢氧化钠(NaOH, AR, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司),去离子水(自制),ES纤维、PET纤维(市售)。

1.2 三维ES/PET非织造材料的制备

图1为3D ES/PET非织造基布制备流程图,将ES纤维和PET纤维以质量比5:95的混合比例,

按照梳理、铺网、预针刺、热烘等工序,使用针刺教育用实验生产线(常熟万龙机械有限公司)制备出三维ES/PET非织造材料。

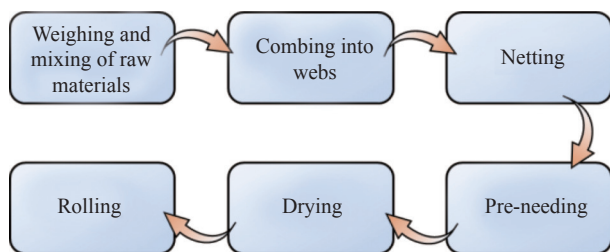


图1 3D 聚乙烯-聚丙烯(ES)/聚酯(PET)非织造基布制备流程图

Fig. 1 Flow chart of 3D ethylene-propylene side by side (ES)/polyester (PET) nonwoven fabric preparation

1.3 CNT传感器样品制备

1.3.1 前处理

将NaOH和去离子水以1:20的质量比加入烧杯并搅拌,使用超声波清洗机(深圳福洋科技集团有限公司)超声10 min,得到均一的NaOH溶液(溶液温度保持在45℃以下,防止水分大量挥发影响浓度)。将基材(裁剪为2 cm×2 cm小块)浸入NaOH溶液,持续机械搅拌30 min,然后使用去离子水充分清洗后,80℃烘干备用。

1.3.2 CNT溶液制备

将CNT水性浆和去离子水以1:10的质量比加入烧杯并搅拌,常温下继续超声15 min,使CNT均匀分散于水溶液中。

1.3.3 传感器制备

将经过前处理的基材浸入碳纳米管的水溶液中,设置不同的浸渍时间和浸渍次数,随后将样品取出,轻轻按压去除多余的溶液,然后放置80℃烘箱(XMTD-8222,上海精宏实验设备有限公司)烘焙60 min。利用导电银胶将铜丝固定于样品两端正反面作为传感器引脚,并确保其连接牢固。从而制得CNT浸渍三维ES/PET非织造基柔性压力传感器,具体制备流程如图2所示。

1.4 测试与表征

采用SU-3800型扫描电子显微镜(日本Hitachi公司),在10 kV电压下观察织物表面CNT分布情况。采用DMM6500系列数字万用表(美国Keithley仪器公司)连接传感器,通过SC-50型电子测力计(深圳深测仪器有限公司)对传感器均匀加压,将电阻变化数据上传至电脑并处理可得压强-相对

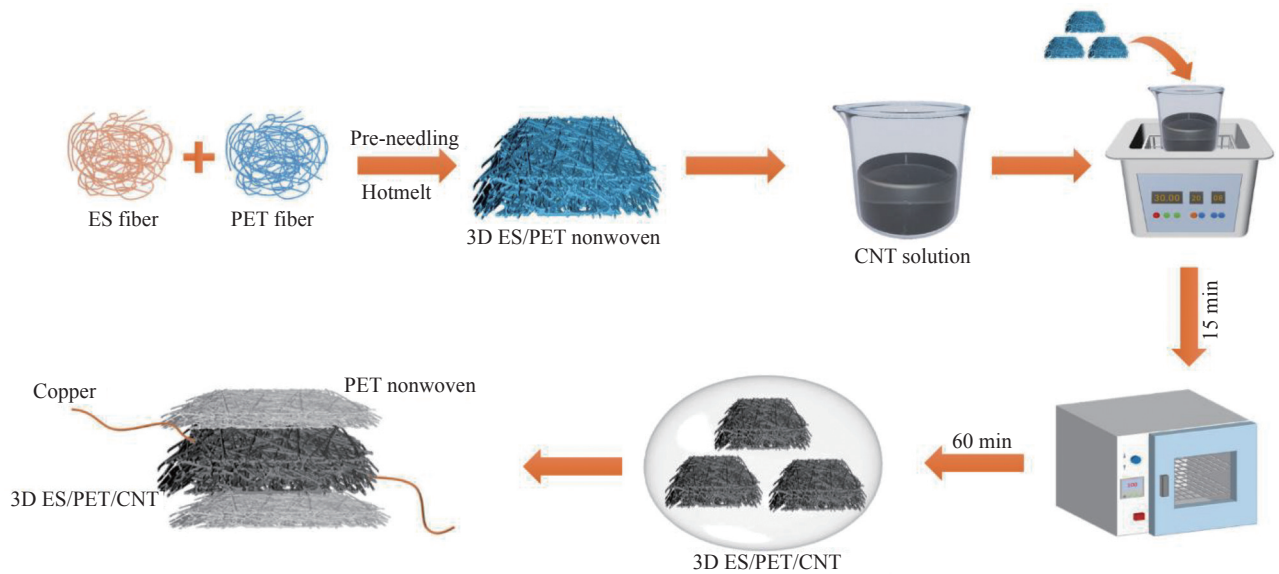


图 2 碳纳米管 (CNT) 浸渍三维 ES/PET 非织造基压力传感器制备流程图

Fig. 2 Preparation flow chart of carbon nanotubes (CNT) impregnating 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor

电阻变化曲线, 计算即可得出传感器灵敏度, 可用以下公式表示^[6]:

$$S = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta P}$$

(1)

其中: S 为灵敏度; R_0 为初始电阻; ΔR 为电阻增量; ΔP 为压强增量。采用手指点击传感器, 测定了传感器对压力的响应/恢复时间。为评估传感器的耐久性, 将传感器置于自制的步进电动机中央, 并对其施加约 0.6 kPa, 进行了 2 100 次循环压力测试。为评估传感器的实际应用性能, 将其固定在人体的手指关节、喉部和胸口等部位, 监测其不同运动状态下的响应性能。

2 结果与讨论

所制备的 ES 纤维含量为 5wt% 的三维 ES/PET

非织造材料物理力学性能测试结果见表 1, 可知, 所制备的三维 ES/PET 非织造材料厚度较薄、强力和伸长率高, 透气性能优异, 比较适合于做柔性可穿戴传感器的基底材料。

2.1 CNT 包覆三维 ES/PET 传感器的表征与分析

图 3 为三维 ES/PET 非织造布实物图。其中, 图 3(a) 为三维 ES/PET 非织造基布浸渍 CNT 前后实物图。浸渍前三维 ES/PET 非织造基布为白色, 表面光洁; 浸渍 CNT 后的非织造基布由白色转为黑灰色, 这是由于 CNT 在纤维表面沉积的结果。图 3(b) 是织物侧面厚度展示图, 浸渍 CNT 后三维 ES/PET 非织造材料的厚度约为 5.6 mm。如图 3(c)、图 3(d) 所示, 将传感器完全弯曲和压缩, 当撤去外力之后, 仍能恢复到初始状态, 展现了该材料具有出色的柔韧性和弹性。

表 1 三维 ES/PET 非织造布性能测试

Table 1 Performance testing of 3D ES/PET nonwoven

Performance	Thickness/mm	Surface density/ (g·(100 cm ²) ⁻¹)	Permeability/ (mm·s ⁻¹)	Breaking strength/N	Elongation at break/%	Breaking strength/ (cN·cm ⁻²)
1 [#]	5.63	2.32	1 990	53.50	103.20	1.07
2 [#]	5.69	2.61	2 380	63.30	116.50	1.27
3 [#]	5.62	2.56	2 210	70.00	113.90	1.40
Average value	5.65	2.50	2 193.33	62.27	111.20	1.25

图 4 为非织造材料在 CNT 溶液中浸渍不同时间的 SEM 图像。从图中可以看出, 纤维均匀分布, 非织造材料具有三维网状结构。随着 CNT 浸渍时间的增加, 其在纤维表面的分布状态有所不同。

图 4(a) 为未浸渍 CNT 的非织造材料表面形貌, 此时纤维表面光滑, 纤维间无序交错, 存在接触和重叠。图 4(b)~4(d) 展示了非织造材料分别在 CNT 溶液中浸渍 5 min、10 min、15 min 的 SEM

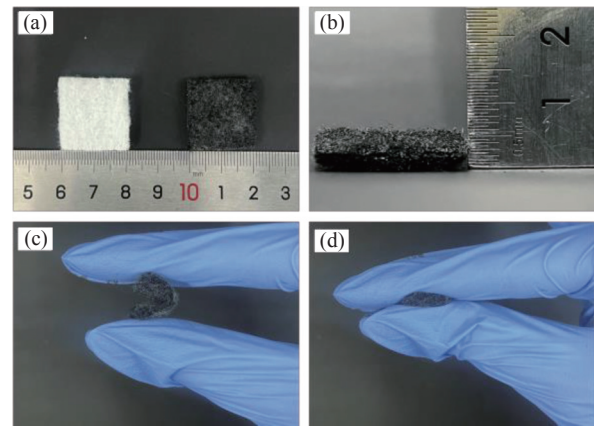


图3 三维 ES/PET 非织造布实物图: (a) 浸渍碳纳米管 (CNT) 前后非织造布实物图; (b) CNT 包覆三维 ES/PET 非织造布厚度; (c) 弯曲状态; (d) 挤压状态

Fig. 3 3D ES/PET nonwoven physical picture: (a) Physical drawings of the fabric before and after carbon nanotubes (CNT) impregnation; (b) Thickness of CNT impregnating 3D ES/PET nonwoven; (c) Bending; (d) Extrusion

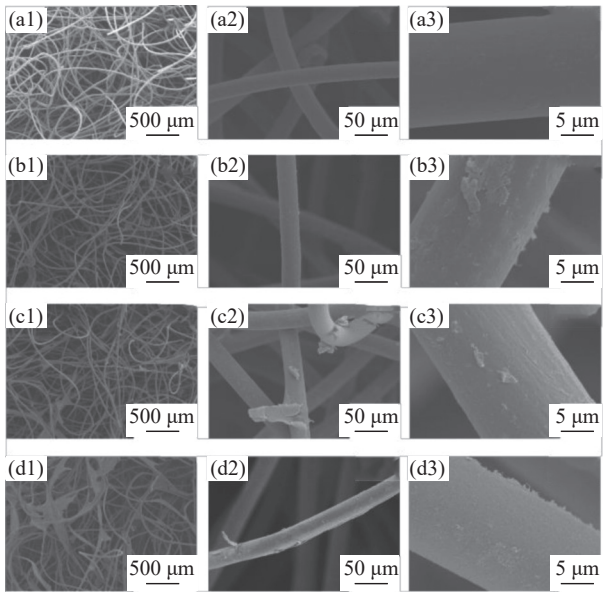


图4 非织造材料在 CNT 溶液中浸渍不同时间的 SEM 图像: ((a1)~(a3)) 未经过浸渍处理; ((b1)~(b3)) 浸渍 5 min; ((c1)~(c3)) 浸渍 10 min; ((d1)~(d3)) 浸渍 15 min

Fig. 4 SEM images of nonwoven materials immersed in CNT solution for different durations: ((a1)~(a3)) Untreated; ((b1)~(b3)) Immersed for 5 min; ((c1)~(c3)) Immersed for 10 min; ((d1)~(d3)) Immersed for 15 min

图像。浸渍 5 min 的样品表面吸附了少量 CNT, 并初步形成膜层。然而, CNT 分布不均匀, 存在明显的团聚现象, 使得表面看起来较为粗糙。对于浸渍 10 min 的样品, 其纤维表面的 CNT 膜较完整, 仅有少量竖直方向的纹理, 同时观察到一些横向的 CNT 团聚。浸渍 15 min 的样品, 其非织造纤维间已形成了部分 CNT 网络结构, 纤维表面的

CNT 膜层完整度和厚度均有明显提升, 且未观察到大规模的 CNT 团聚现象, 显示出在纤维表面的 CNT 分布更为细腻且均匀。

图 5 为非织造材料在 CNT 溶液中浸渍不同次数的 SEM 图像。图 5(a)~5(d) 展示了浸渍 15 min 并分别循环浸渍 1 次、2 次、3 次、4 次处理的非织造材料表面形貌。对于浸渍 2 次的样品, 相较于只浸渍 1 次的样品, CNT 的吸附量有所增加。然而, 在这一阶段, 可以观察到部分 CNT 团聚, 形成球体状和块状物, 附着在纤维表面。浸渍 3 次后的纤维表面显示出更高的完整性和 CNT 的分散均匀性, CNT 膜在纤维表面分布更均匀, 呈现出一定数量的竖直纹理。浸渍 4 次的样品中, 纤维表面 CNT 完整性开始下降, 出现了大量的 CNT 团聚, 导致纤维间的空隙减小, 趋向于被 CNT 填充。

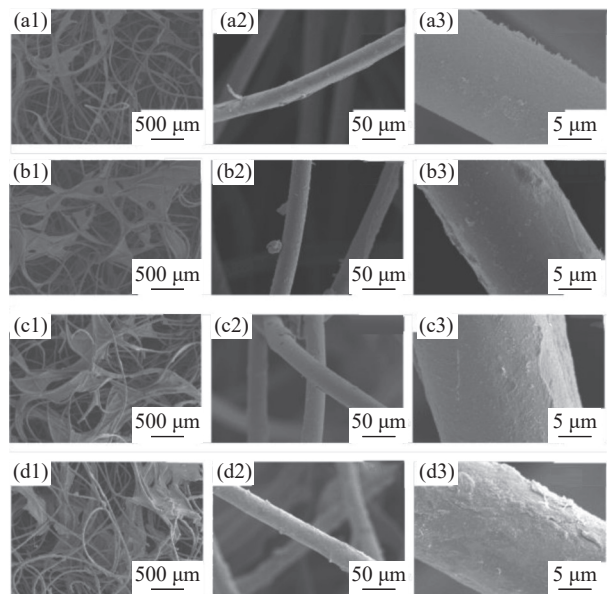


图5 非织造材料在 CNT 溶液中浸渍不同次数的 SEM 图像: ((a1)~(a3)) 浸渍 15 min 1 次; ((b1)~(b3)) 浸渍 15 min 2 次; ((c1)~(c3)) 浸渍 15 min 3 次; ((d1)~(d3)) 浸渍 15 min 4 次

Fig. 5 SEM images of nonwoven materials immersed in CNT solution for different cycle numbers: ((a1)~(a3)) Immersed for 15 min, one cycle; ((b1)~(b3)) Immersed for 15 min, two cycles; ((c1)~(c3)) Immersed for 15 min, three cycles; ((d1)~(d3)) Immersed for 15 min, four cycles

2.2 CNT 包覆三维 ES/PET 传感器的性能分析与传感机制

通过上述 CNT 浸渍不同时间所制得的传感器压力-电阻响应曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 在浸渍时间为 5 min、10 min、15 min 条件下制备的 CNT 包覆三维 ES/PET 非织造基压力传感器灵

敏度分别为 0.065、0.113、0.127 kPa⁻¹。压力加载初期 (<1 kPa) 的灵敏度随浸渍时间的延长呈增加趋势, 线性关系良好。经过 CNT 浸渍 15 min 所制备的传感器灵敏度最高。随着浸渍时间的增加, 纤维表面形成的 CNT 膜完整度逐渐提高, 表面从粗糙转变为更加细腻和平整。这一变化导致在压力作用下, 纤维间的接触点增多, 从而增加了导电通路, 进而使得电阻值显著变化。

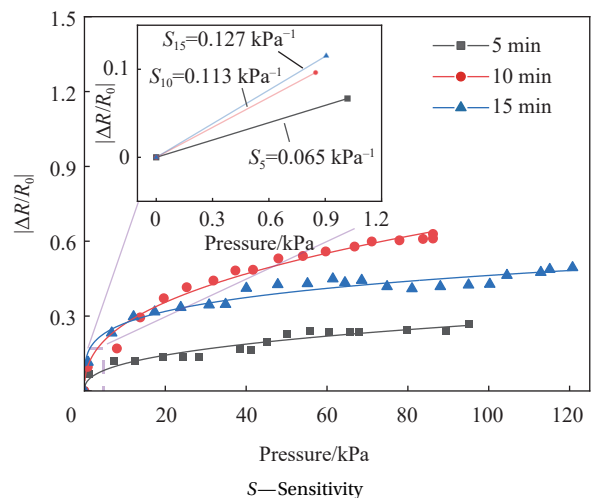


图 6 CNT 浸渍不同时间所制备出三维 ES/PET 非织造基压力传感器的相对电阻 ($\Delta R/R_0$) 变化曲线

Fig. 6 Relative resistance ($\Delta R/R_0$) change curves of the 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor prepared by immersing CNT for different durations

图 7 为 CNT 浸渍 15 min 所制备三维 ES/PET 非织造基压力传感器的灵敏度曲线图。可知, CNT 浸渍 15 min 的传感器在压力较小范围内 (0~0.905 kPa) 的灵敏度平均为 0.127 kPa⁻¹。随着压力的增加, 灵敏度迅速下降。在 0.905~30.841 kPa 范围内, 平均灵敏度为 0.0047 kPa⁻¹, 在较大压力范围内 (30.841~120.559 kPa), 平均灵敏度为 0.0017 kPa⁻¹, 这是由于压力增加, 传感器电阻变化减小, 趋于饱和, 灵敏度随之下降。基于这一结果, 选择了 15 min 的浸渍时间进行后续制备工作。

图 8 展示了 CNT 浸渍 15 min 不同循环次数所制备出三维 ES/PET 非织造基压力传感器的相对电阻变化曲线。在受压过程中, 浸渍 15 min 且经过不同浸渍次数处理的样品, 相对电阻变化量均随着压力的增大而增加。在压力加载初期 (<1.3 kPa), 浸渍 15 min 且分别进行 1 次、2 次、3 次、4 次循环处理的样品灵敏度分别为 0.127、0.108、0.375 和 0.087 kPa⁻¹。随着压力继续增加, 相对电阻变

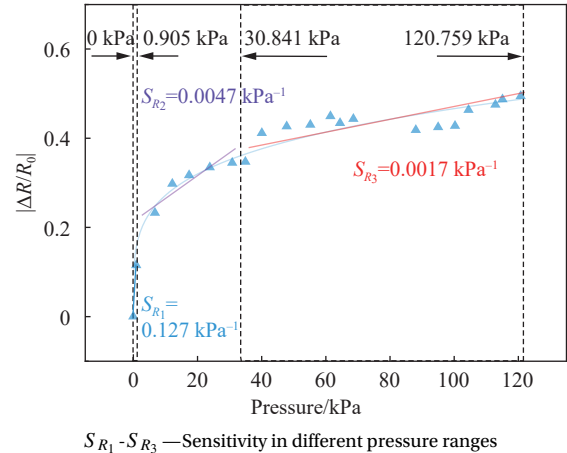


图 7 CNT 浸渍 15 min 所制备三维 ES/PET 非织造基压力传感器的灵敏度曲线

Fig. 7 Sensitivity curve of the 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor prepared by immersing CNT for 15 min

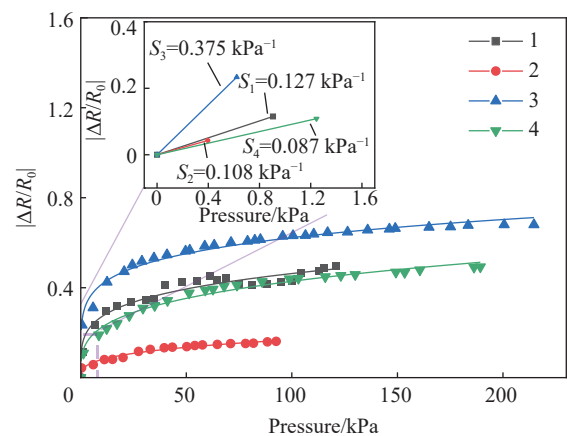


图 8 CNT 浸渍 15 min 不同循环次数所制备出三维 ES/PET 非织造基压力传感器的相对电阻变化曲线

Fig. 8 Relative resistance change curves of 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor prepared with CNT immersion for 15 min at different cycle numbers

化逐渐减缓。根据图 5 中 SEM 图像分析, 浸渍 2 次的样品中 CNT 膜的完整度不如只浸渍 1 次的样品。因此, 在受压过程中, CNT 的部分团聚影响了纤维间的导电通路, 导致浸渍 2 次的样品灵敏度低于仅浸渍 1 次的样品。经过浸渍 3 次的样品, 由于其表面结构的完整性和 CNT 的均匀分布, 纤维在受压时能够形成更多的接触点, 从而实现了优异的传感性能。相比之下, 浸渍 4 次的样品, 尽管 CNT 含量更高, 但过度的 CNT 团聚现象减少了纤维间的空隙, 限制了纤维的压缩空间, 导致接触点数量的减少, 进而降低了传感器的灵敏度。

图 9 为经过 3 次循环 CNT 浸渍 15 min 处理的

三维 ES/PET 非织造基压力传感器灵敏度曲线图。可知，经过 CNT 浸渍 15 min 且循环 3 次处理的传感器在压力较小范围内 (0~0.622 kPa) 的灵敏度平均为 0.375 kPa⁻¹。在 0.622~63.209 kPa 范围内，平均灵敏度为 0.0034 kPa⁻¹，在较大压力范围内 (63.209~214.526 kPa)，平均灵敏度为 0.0006 kPa⁻¹。这是由于压力的增加导致传感器电阻变化趋于平缓，灵敏度随之下降。

经过综合评估，浸渍 15 min 并循环浸渍 3 次的样品在灵敏度和响应范围方面表现最为优异。基于这些特性，该样品被选定用于后续的性能测试和应用实验。

图 10 反映了三维 ES/PET 非织造基压力传感器在手点击施加约 0.31 kPa 压力加载和卸载状态下的响应与恢复时间曲线。从图中可以看出，传感器的响应速度非常快，响应时间仅需 48 ms。而在压力卸载后的恢复时间稍长，为 122 ms。这种恢复时间相对较长的现象，分析认为是由传感

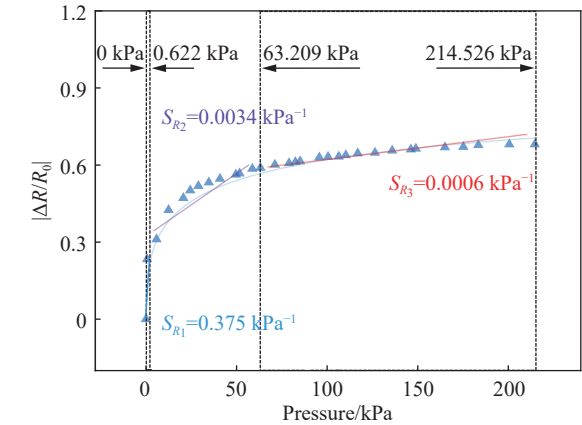


图 9 经过 3 次循环 CNT 浸渍 15 min 处理的三维 ES/PET 非织造基压力传感器灵敏度曲线图

Fig. 9 Sensitivity curve of the 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor prepared with CNT immersion for 15 min at 3 cycle numbers

器材料的迟滞效应^[23]所导致。尽管恢复时间稍长，但该传感器仍然展现出优异的响应速度和传感性能，足以应对大多数人体运动信号的检测需求。

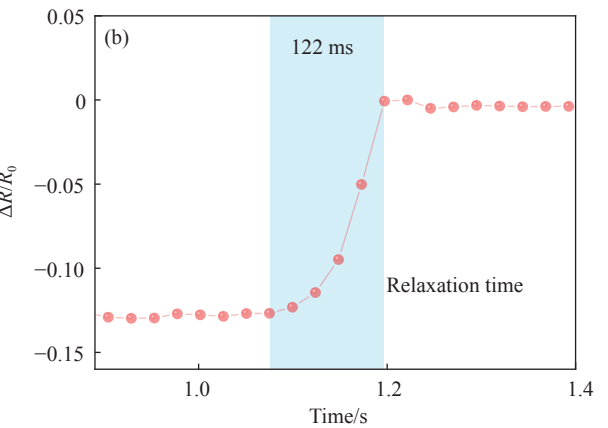
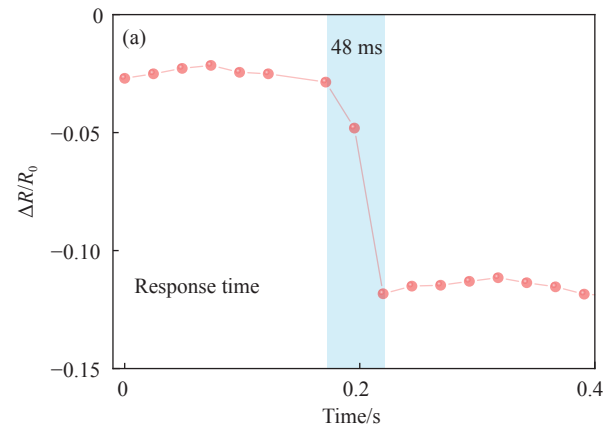


图 10 CNT 浸渍三维 ES/PET 非织造基压力传感器的响应和恢复时间曲线图：(a) 响应时间；(b) 恢复时间

Fig. 10 Response and recovery time curves of the CNT impregnating 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor: (a) Response time; (b) Relaxation time

耐久性作为衡量传感器关键性能的指标，对于保证传感器长期的性能稳定性和延长其使用寿命至关重要。为了探究本传感器的耐久性能，对其进行了 2 100 次的重复压力试验。

图 11 为经过 2 100 次压力循环耐久性实验传感器的耐久测试结果。可知，对传感器循环施加约 0.6 kPa 的压力，耐久性曲线呈现周期性的波形，波形相似，波段差异小。为了进一步评估传感器的耐久性能，提取了在耐久性能试验中 400~410 s 以及 1 700~1 710 s 期间的压力循环数据，结果如图 11 插图中的曲线图所示。通过对比试验初期和

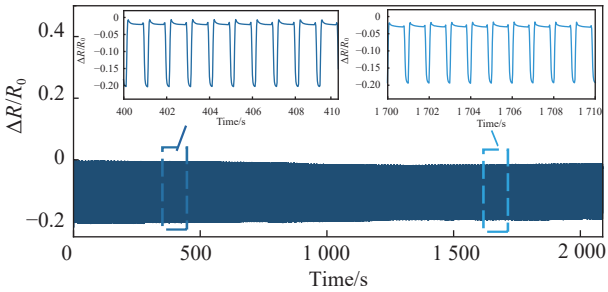


图 11 CNT 浸渍三维 ES/PET 非织造基压力传感器经过 2 100 次压力循环耐久性实验

Fig. 11 Durability test of the CNT impregnating 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor after 2 100 pressure cycles

末期的响应数据,可以明显观察到,传感器在试验的开始和结束阶段展现了一致的响应特性。此结果表明传感器在经历了 2 100 次的压力循环耐久测试之后,传感器的性能仍保持稳定,没有出现明显的信号偏移的现象。分析其原因为三维 ES/PET 非织造材料具有稳定的网络状结构,使传感

器具备良好的稳定性和恢复性,且其纤维表面的 CNT 导电层牢固附着在纤维表面,在长时间使用过程中保持优异的电阻信号响应。图 12 展示了三维 ES/PET 非织造基压力传感器的机制图^[24-26],传感器在受压的时候,纤维网之间的导电通路增加,进而降低了传感器的电阻。

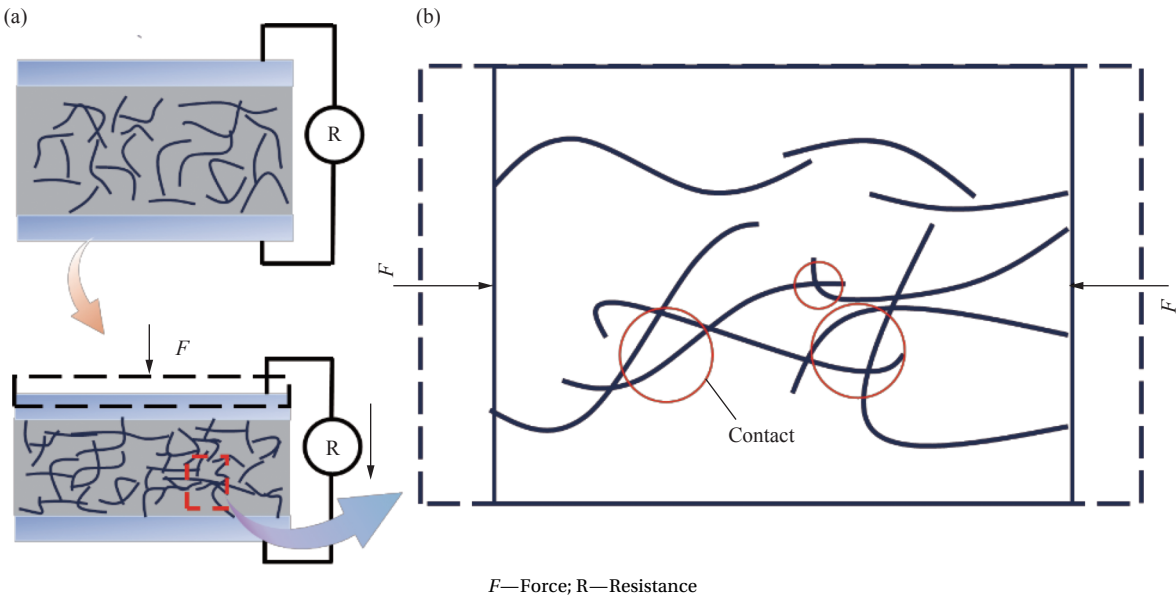


图 12 CNT 浸渍三维 ES/PET 非织造基压力传感器的机制图

Fig. 12 Mechanism diagram of the CNT impregnating 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor

表 2 为柔性压阻传感器性能对比表^[27-32],通过对文献报道中的类似压力传感器性能(传感器最大灵敏度和最大响应范围)进行比较,本研究中制备的三维 ES/PET 网络结构柔性压阻传感器在最大灵敏度和响应范围方面优势明显。

2.3 CNT 包覆三维 ES/PET 传感器的应用研究

由于传感器在灵敏度、线性度、响应范围、响应速度及耐久性等方面具有出色的性能,对其应用性能进行了研究,以探索其在日常生活应用中的潜在价值。

表 2 柔性压阻传感器性能对比表
Table 2 Performance comparison table of flexible piezoresistive sensors

Electrode	Type	Structure	Sensitivity/kPa ⁻¹	Detect range/kPa	Response time/ms	Ref.
Silver nanowires	Piezoresistive	3D porous microstructured	0.014	0-100	64	[27]
Expandable graphite	Piezoresistive	Planar structure	0.15	0.1-110	—	[28]
Reduced graphene oxide	Piezoresistive	Polyurethane foam	0.17	0-25	300	[29]
Reduced graphene oxide	Piezoresistive	3D porous microstructured	0.009	0-180	13	[30]
Reduced graphene oxide	Piezoresistive	Polyurethane sponge	0.13	0-30	—	[31]
CNT	Piezoresistive	3D nonwoven	5.57%	0-131.32	105	[32]
CNT	Piezoresistive	3D ES/PET network structure	0.375	0-214.526	48	This work

图 13 为传感器在关节弯曲状态下的应用性测试。人体关节弯曲时,传感器的电阻响应曲线展示了高度的一致性和周期性。在对同一关节进行

反复的弯曲和伸展测试时,传感器显示出一致的波形和相似的峰值,这表明测试结果具有很高的一致性和较低的差异。同时,不同部位的关节活

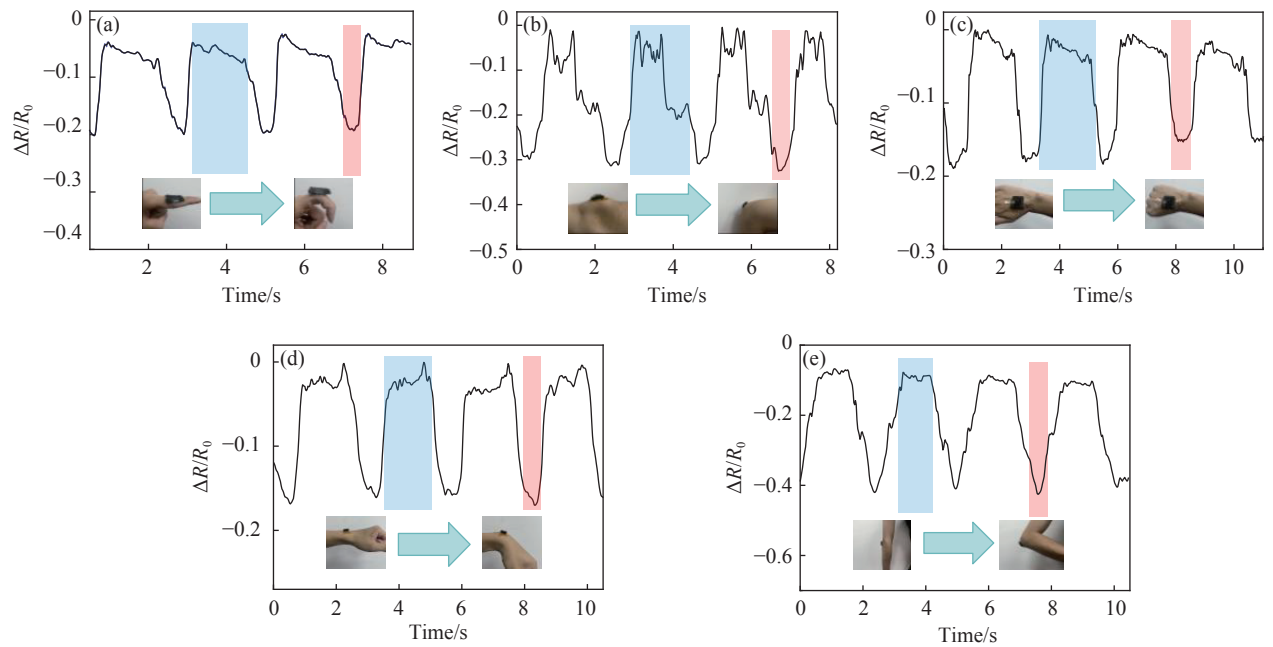


图 13 CNT 浸渍三维 ES/PET 非织造基压力传感器在关节弯曲状态下的应用性测试: (a) 手指弯曲; (b) 膝盖弯曲; (c) 握拳; (d) 手腕弯曲; (e) 手肘弯曲

Fig. 13 Application test of the CNT impregnating 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor in joint curvature: (a) Curved fingers; (b) Knee bending; (c) Clench fist; (d) Wrist bending; (e) Elbow bending

动在传感器的响应上则表现出明显的差异性, 如图 13(a)~13(d) 所示。以手肘弯曲为例, 如图 13(e) 所示, 当手肘弯曲时, 传感器的电阻迅速降低; 而在手肘伸直时, 电阻则快速回升至初始状态, 相对电阻的变化约为 45%。这种响应不仅迅速而

且稳定, 充分展示了其在监测人体关节运动方面的稳定性和准确性。

图 14 展示的是传感器在生活常见活动监测中的应用。根据图 14(a) 可知, 当手指点击固定在平面上的传感器时, 该传感器能够清晰地反映出

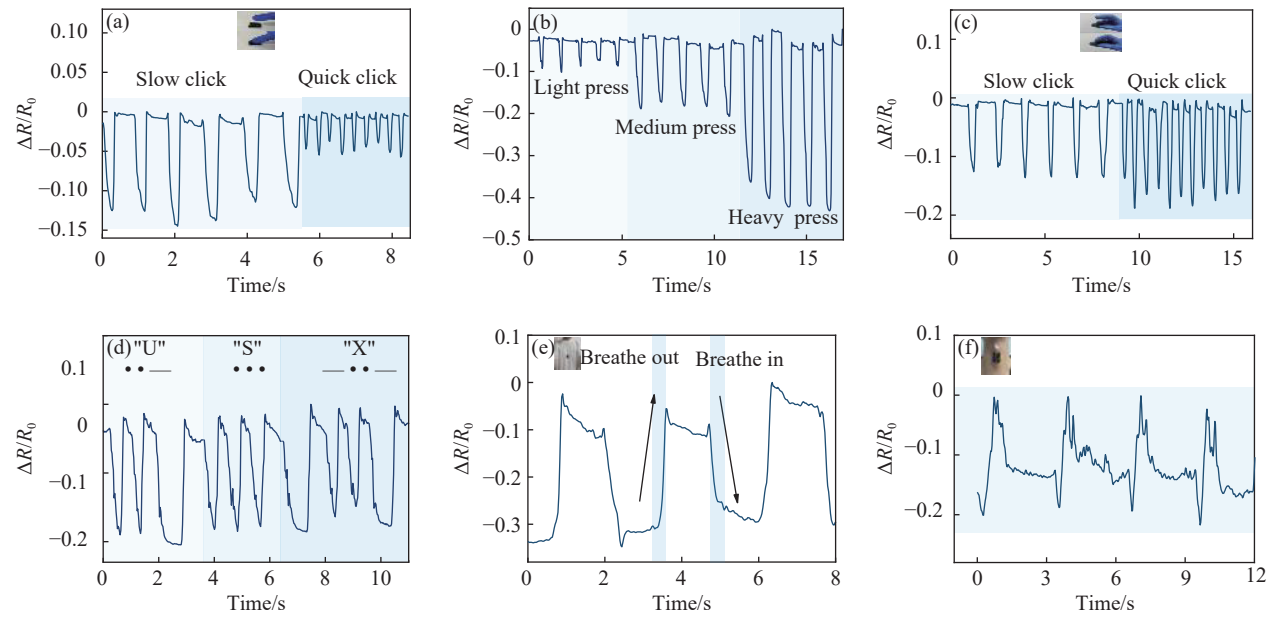


图 14 CNT 浸渍三维 ES/PET 非织造基压力传感器在生活常见活动监测中的应用: (a) 不同频率手指点击; (b) 不同力度手指点击; (c) 不同频率鼠标点击; (d) 摩斯密码; (e) 呼吸监测; (f) 吞咽

Fig. 14 Application of CNT impregnating 3D ES/PET nonwoven-based pressure sensor in the monitoring of common activities of life: (a) Finger clicks of different frequencies; (b) Finger clicks of varying intensity; (c) Different frequency of mouse clicks; (d) Morse code; (e) Respiratory monitoring; (f) Swallowing

点击频率。如图 14(b) 所示, 传感器在不同的压力状态下能够精确捕捉到压力的变化。当传感器贴附于鼠标上时, 它同样能够稳定地响应快速和慢速的点击操作, 如图 14(c) 所示。此外, 基于传感器对触压状态的精准识别和稳定响应, 进一步将其应用于摩斯密码的信号传递。

如图 14(d) 所示, 传感器通过识别点击和长按这两种状态来传递信号。在实验中, 输入“U”、“S”、“X” 等不同的摩斯密码信号时, 传感器能够将这些输入信号准确地转换成电阻变化的输出形式。这一实验结果表明, 传感器能够有效地识别和响应输入的摩斯密码信号, 实现了精准的信号传递。同时, 将传感器分别放置于测试人员的胸口部位和喉部, 以便监测呼吸和吞咽过程中的微弱运动(图 14(e)、图 14(f))。结果显示, 在呼吸和吞咽时, 胸部和喉部的往复运动导致传感器的相对电阻变化曲线出现周期性波动。在曲线峰值之间存在微小差异, 这可能是由于测试人员在呼吸和吞咽过程中施加的力度不同所引起的。

3 结论

本文通过针刺-热熔技术制备了三维聚乙烯-聚丙烯 (Ethylene-propylene side by side, ES)/聚酯 (PET) 非织造材料, 并对其进行碳纳米管 (CNT) 表面修饰, 制备出三维纤维网结构的柔性压力传感器。比较分析了不同 CNT 浸渍条件下的传感器性能, 得出以下结论:

- (1) 通过对 CNT 包覆三维 ES/PET 非织造材料进行 SEM 表征, 结果表明 CNT 能够均匀附着在纤维表面, 显著降低了纤维的电阻, 从而赋予传感器较好的传感性能;
- (2) 通过控制 CNT 浸渍时间和浸渍次数可以改善传感器的灵敏度。最佳浸渍条件为: CNT 浸渍 15 min、浸渍次数为 3 次。该浸渍条件下所制备的传感器兼具高灵敏度和宽检测范围, 在 0~0.622 kPa、0.622~63.209 kPa 与 63.209~214.526 kPa 的灵敏度分别为 0.375、0.0034、0.0006 kPa⁻¹。同时, 传感器展示出了较快的响应与恢复时间 (48 ms 和 122 ms), 并具有良好的分辨率和稳定的耐久性 (>2 100 次);
- (3) 传感器在检测人体不同部位的生理活动时, 能够清晰识别和反馈关节弯曲、手指按压和呼吸等生理活动信号, 在人机交互、电子皮肤、运动监测等领域展现出巨大潜力。此外, 传感器在设

计和材料选择上具有显著优势, 使其在低成本和易于规模化生产方面表现突出, 为未来柔性压力传感器的商业化制备提供了新的可能。

参考文献:

[1] 李港华, 王航, 史宝会, 等. 柔性电子织物的构筑及其压力传感性能 [J]. 纺织学报, 2023, 44(2): 96-102.
LI Ganghua, WANG Hang, SHI Baohui, et al. Construction of flexible electronic fabric and its pressure sensing performance [J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(2): 96-102(in Chinese).

[2] 雷鹏, 鲍艳. 基于 MXene 柔性压阻传感器研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(14): 82-92.
LEI Peng, BAO Yan. Research progress of flexible piezoresistive sensor based on MXene [J]. Materials Review, 2022, 36(14): 82-92(in Chinese).

[3] LIU Z, ALEXIS P M. Advancing smart biomedical textiles with humanoid robots [J]. Advanced Fiber Materials, 2024, 6: 1-2.

[4] 汤桂君, 殷柯柯, 原会雨. 纳米材料在柔性压阻式压力传感器中的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3722-3737.
TANG Guijun, YIN Keke, YUAN Huiyu. Research progress of nanomaterials in flexible piezoresistive pressure sensors [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3722-3737(in Chinese).

[5] ZHANG S, SUN X, GUO X, et al. A wide-range-response piezoresistive-capacitive dual-sensing breathable sensor with spherical-shell network of MWCNT for motion detection and language assistance [J]. Nanomaterials, 2023, 13(5): 843.

[6] 王菲菲, 彭海益, 姚晓刚. 基于多向冷冻法制备的高灵敏度柔性电容式压力传感器 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(5): 2680-2687.
WANG Feifei, PENG Haiyi, YAO Xiaogang. High-sensitive flexible capacitive pressure sensor based on multi-directional freezing method [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2680-2687(in Chinese).

[7] LI L, ZHOU X, JIN B, et al. Highly compressible, breathable, and waterproof piezoresistive sensors based on commercial three-dimensional air-laid nonwovens [J]. Colloid and Polymer Science, 2023, 302(3): 449-461.

[8] TIAN G, DENG J, YU W, et al. Low-cost, scalable fabrication of all-fabric piezoresistive sensors via binder-free, in-situ welding of carbon nanotubes on bicomponent nonwovens [J]. Advanced Fiber Materials, 2024, 61: 120-132.

[9] JIANG H, ZHANG J, QIN M, et al. A flexible piezoresistive strain sensor based on black phosphorus/gold nanocomposites interspersed sponge for motion sensing [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 356: 114359.

[10] CHEN K Y, XU Y T, ZHAO Y, et al. Recent progress in

- graphene-based wearable piezoresistive sensors: From 1D to 3D device geometries[J]. *Nano Materials Science*, 2023, 5(3): 247-264.
- [11] DUCLOUÉ L, HAQUE M A, GORAL M, et al. Color-switching hydrogels as integrated microfluidic pressure sensors[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 6333.
- [12] ZHANG D, WANG Y, SUN S, et al. Ceramic hybrid nanofiber-based elastic scaffold pressure sensor with good sensitivity, breathability, and washability[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(2): 3453-3460.
- [13] 郭鑫雷, 刘鑫, 胡汉春, 等. 多孔聚二甲基硅氧烷/碳纳米管复合压阻式柔性压力传感器的制备 [J]. *轻工机械*, 2023, 41(2): 34-41.
- GUO Xinlei, LIU Xin, HU Hanchun, et al. Fabrication of piezoresistive flexible pressure sensor with porous polydimethylsiloxane/carbon nanotubes[J]. *Light Industry Machinery*, 2023, 41(2): 34-41(in Chinese).
- [14] DING X H, CAO H L, ZHANG X H, et al. Large scale triboelectric nanogenerator and self-powered flexible sensor for human sleep monitoring[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1713.
- [15] JIAO H, YANG K, SANG S, et al. Graphene-based flexible temperature/pressure dual-mode sensor as a finger sleeve for robotic arms[J]. *Diamond Related Materials*, 2024, 142: 110799.
- [16] LEAL-JUNIOR A, CAMPOS V, FRIZERA A, et al. Low-cost and high-resolution pressure sensors using highly stretchable polymer optical fibers[J]. *Materials Letters*, 2020, 271: 127810.
- [17] WANG P, MA X, LIN Z, et al. Well-defined in-textile photolithography towards permeable textile electronics.[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 887.
- [18] KAMONWAN C, ALBERT S. Dip-coated carbon nanotube surface deposits as stable, effective response enhancers in pencil lead electrode voltammetry[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(46): 2672-2680.
- [19] FUJIKI H, TOBASE K, MUGURUMA H. Electrochemical determination of the procyanidins in peanut skin using a carbon nanotube electrode[J]. *Analytical Sciences: The International Journal of the Japan Society for Analytical Chemistry*, 2024, 40(3): 549-553.
- [20] JU B, TIAN F, SHI K, et al. Influence of ambient temperature and structural parameters on thermal conductivity of carbon nanotube arrays after secondary segmentation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 21: 124154.
- [21] ZHAO Y, SHEN T, ZHANG M, et al. Advancing the pressure sensing performance of conductive CNT/PDMS composite film by constructing a hierarchical-structured surface[J]. *Nano Materials Science*, 2023, 5(4): 343-350.
- [22] WU J Y, YIN Q, JING H W, et al. Strength prediction based on ultrasonic property of fractal gangue cemented rockfill reinforced by carbon nanotubes[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 303: 124444.
- [23] BASU R, IANNACCHIONE G S. Dielectric hysteresis, relaxation dynamics, and nonvolatile memory effect in carbon nanotube dispersed liquid crystal[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(12): 124312.
- [24] RASHID I A, IRFAN M S, GILL Y O, et al. Stretchable strain sensors based on polyaniline/thermoplastic polyurethane blends[J]. *Polymer Bulletin*, 2020, 77: 1081-1093.
- [25] PROSUNG R, CHUAYBAMRUNG A, GEORGOPOULOU A, et al. Rapid formation of carbon nanotubes-natural rubber films cured with glutaraldehyde for reducing percolation threshold concentration.[J]. *Discover Nano*, 2024, 19: 30.
- [26] PATSAKORN L, SURANGSEE D. Effect of CNT on the physical and electrical properties of CNT/UHMWPE nanocomposite sensor[J]. *Materials Science Forum*, 2023, 1103: 75-85.
- [27] JING M Y, ZHOU J, ZHANG P C, et al. Porous AgNWs/poly(vinylidene fluoride) composite-based flexible piezoresistive sensor with high sensitivity and wide pressure ranges[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(49): 55119-55129.
- [28] 秦文峰, 王新远, 李亚云, 等. 基于膨胀石墨/聚二甲基硅氧烷复合材料的柔性压力传感器及加热除冰的应用 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(2): 461-469.
- QIN Wenfeng, WANG Xinyuan, LI Yayun, et al. Flexible piezoresistive sensor and heating de-icing performance based on expanded graphite/polydimethylsiloxane composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(2): 461-469(in Chinese).
- [29] ZHONG W, DING X, LI W, et al. Facile fabrication of conductive graphene/polyurethane foam composite and its application on flexible piezo-resistive sensors[J]. *Polymers*, 2019, 11(8): 1289.
- [30] JIA J M, YANG Y, CAI B, et al. A 3D honeycomb graphene structure for wearable piezoresistive pressure sensor with high sensitivity[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, 33: 2003-2011.
- [31] GILANIZADEHDIZAJ G, AW K C, STRINGER J, et al. Facile fabrication of flexible piezo-resistive pressure sensor array using reduced graphene oxide foam and silicone elastomer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 340: 113549.
- [32] TIAN G, ZHAN L, DENG J, et al. Coating of multi-wall carbon nanotubes (MWCNT) on three-dimensional, bicomponent nonwovens as wear-able and high-performance piezoresistive sensors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425: 130682.