

聚偏氟乙烯柔性压电式传感器的研制与应用研究

刘源¹, 李映君^{1,2}, 王桂从^{1,2}, 孟令源¹

(1. 济南大学机械工程学院, 250022, 济南;

2. 山东省传感技术与高精度称重仪器重点实验室, 250004, 济南)

摘要: 针对柔性传感器灵敏度低、制备工艺复杂、难以精准检测动态生理信号的问题,采用纳米纤维素(CNF)与氧化锌(ZnO)协同改性策略,通过超声波辅助分散-磁力搅拌耦合工艺优化纳米填料分布,结合溶剂蒸发法制备了厚度为 0.1 mm 的聚偏氟乙烯(PVDF)基复合压电薄膜,并开发聚酰亚胺(PI)胶带柔性封装工艺,构建可穿戴传感器件。实验表明,该传感器在 0~700 Pa 压力范围内呈线性响应,拟合优度 R^2 达到 0.983。电压灵敏度达 1.167 6 V/kPa,相较于 PVDF 柔性传感器提高了 30.6%。响应、恢复时间分别为 13、204 ms,且成功实现了人体手腕与手肘运动、颈动脉搏动及鼻息振动等多频生理信号的高保真捕获。研究证实 CNF/ZnO 协同增强机制可显著提升 PVDF 压电性能,为可穿戴生理信号监测提供了新材料解决方案。

关键词: 聚偏氟乙烯;纳米纤维素;氧化锌;柔性压力传感器;生理信号监测

中图分类号: TM22;TB33 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202605016 **文章编号:** 0253-987X(2026)05-0164-10

Study on the Development and Application of Polyvinylidene Fluoride Flexible Piezoelectric Sensor

LIU Yuan¹, LI Yingjun^{1,2}, WANG Guicong^{1,2}, MENG Lingyuan¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Shandong Key Laboratory of Sensing Technology and High Precision Weighing Instruments, Jinan 250004, China)

Abstract: To address the issues of low sensitivity, complex fabrication processes, and difficulties in accurately detecting dynamic physiological signals in flexible sensors, a synergistic modification strategy using cellulose nanofibers (CNF) and zinc oxide (ZnO) is adopted. By employing an ultrasonic-assisted dispersion combined with magnetic stirring process, the distribution of nanofillers was optimized. A polyvinylidene fluoride (PVDF)-based composite piezoelectric film with a thickness of 0.1 mm was fabricated via the solvent evaporation method, and a polyimide (PI) tape-based flexible encapsulation process was developed to construct a wearable sensor device. Experiments show that the sensor exhibits a linear response within the pressure range of 0—700 Pa, with a goodness-of-fit R^2 of 0.983. The voltage sensitivity reaches 1.167 6 V/kPa, representing a 30.6% improvement compared to PVDF flexible sensors. The response/recovery time is 13, 204 ms, and the sensor successfully achieves high-fidelity capture of multi-frequency physiological signals such as human wrist and elbow movements, carotid artery pulsations, and

nasal airflow vibrations. The study confirms that the synergistic enhancement mechanism of CNF/ZnO significantly improves the piezoelectric performance of PVDF, providing a new material solution for wearable physiological signal monitoring.

Keywords: Polyvinylidene fluoride; cellulose nanofiber; zinc oxide; flexible pressure sensor; physiological signal monitoring

与传统金属基传感器相比,柔性传感器具有轻量化、柔韧性好与可拉伸性强的特点,因此柔性传感器得以成功应用于气体传感^[1]、人体医疗^[2]、人体生理指标检测^[3]、人体运动监测^[4]及个性化健康监测^[5]等领域。近年来,柔性传感器发展迅猛,在各行各业已经出现了多种类型的柔性传感器以满足不同的使用需求,主要有压电式^[6-7]、电容式^[8-9]、电阻式^[10-11]、摩擦电式^[12-13]。其中,柔性压电式压力传感器凭借低功耗特性与自供电能力,在动态力检测领域展现出显著的应用潜力。现在常见的压电材料有压电石英、压电陶瓷、聚偏氟乙烯(PVDF)等。相比于压电石英与压电陶瓷,PVDF 具有较好的柔韧性,在医疗健康检测等领域拥有更广泛的应用。然而,PVDF 压电灵敏度较低^[14],限制了传感器灵敏度的提升,导致其输出信号的线性度难以满足高精度动态测量需求。因此,提高 PVDF 的灵敏度和动态响应时间等压电性能对柔性压电式压力传感器的发展至关重要。

为了提高压电材料的性能,许多学者通过对压电薄膜进行拉伸^[15]、极化^[16]、掺杂其他纳米填料^[17]等方式进行研究。其中 Chen 等^[18]研究了氧化石墨烯(GO)对 PVDF 纳米纤维晶体结构、形貌和压电性能的影响。结果显示,GO 的存在使 PVDF 纳米纤维之间形成新的导电网络,有利于电子传输,并增加 PVDF 材料中的峰值电流。除此之外,氧化锌(ZnO)是一种具备良好压电效应和半导体特性的材料,广泛应用于传感器、能量收集等领域。ZnO 较大的压电系数、稳定的压电性能以及低廉的生产成本,使 ZnO 在压电器件中得到了广泛的使用^[19-20]。此外,含羟基的纳米填料可以增强 PVDF 的压电性能。Pan 等^[21]证明,纤维素纳米晶体(CNCs)能够与 PVDF 中的氟原子形成氢键,在不额外处理的条件下即可限制 PVDF 分子链的运动,促进其有序排列,从而显著提升 PVDF 的压电性能。基于该原理所制备的压电织物传感器具备自供电特性,能够实现对人体运动及人机交互信号的有效监测,表现出良好的多功能性。

现有增强 PVDF 压电性能的方法较为复杂,为

了提高 PVDF 基柔性压电式压力传感器的性能,本文采用溶剂蒸发法,以 PVDF 材料为基材,采用超声波辅助混合纳米纤维素(CNF),并通过磁力搅拌器搅拌混合氧化锌(ZnO)共同作用于 PVDF,制备具有高灵敏度、低响应时间的 PVDF/CNF/ZnO 柔性压电式压力传感器。通过搭建的信号检测平台完成 PVDF/CNF/ZnO 传感器的灵敏度、响应-恢复时间、多频响应能力等力学传感性能参数测试,并在典型人体生理信号测量领域开展了应用。

1 材料和方法

1.1 实验材料与设备

制备 PVDF/CNF/ZnO 压电薄膜的材料包括:纳米纤维素(CNF,直径为 50 nm,长度为 1~3 μm ,上海麦克林生化科技有限公司)、聚偏氟乙烯(PVDF,相对分子质量为 500 000,阿科玛集团)、纳米氧化锌(ZnO,粒径为 50 nm,清河县灿恩金属材料有限公司)、以及 N,N-二甲基甲酰胺(DMF,广东大兴科技股份有限公司)。所有化学品均直接使用,未经进一步纯化。制备与封装过程所用设备包括电子天平、磁力搅拌器、烘箱和超声仪。所用耗材包括玻璃基片、铜电极、屏蔽线及聚酰亚胺(PI)胶带。信号检测系统主要由电荷放大器(KD5007,扬州科动电子有限公司)、动态信号分析仪(KD8-LP02Y,扬州科动电子有限公司)以及手摇压力试验机(ZQ-21A-1,东莞智取精密仪器有限公司)组成。

1.2 PVDF/CNF/ZnO 柔性压电式压力传感器的制备流程

基于前期对关键工艺参数与材料组成配比进行了多次实验验证,最终采用溶剂蒸发法完成压电薄膜的制备,其制备工艺流程如图 1 所示。

将 0.2 g 纳米纤维素与 20 mL DMF 溶剂混合,超声处理 30 min。然后,向其中加入 3 g PVDF 粉末,在 1 000 r/min 转速下磁力搅拌 100 min,使其充分溶解,得到澄清黏稠溶液。之后,加入 0.1 g ZnO 粉末,继续以 1 000 r/min 搅拌 5.5 h,得到 PVDF、CNF 与 ZnO 的均匀混合溶液。最终,将该溶液滴涂于 30 mm $\times$ 30 mm 的洁净玻璃片上,置于 110 $^{\circ}\text{C}$

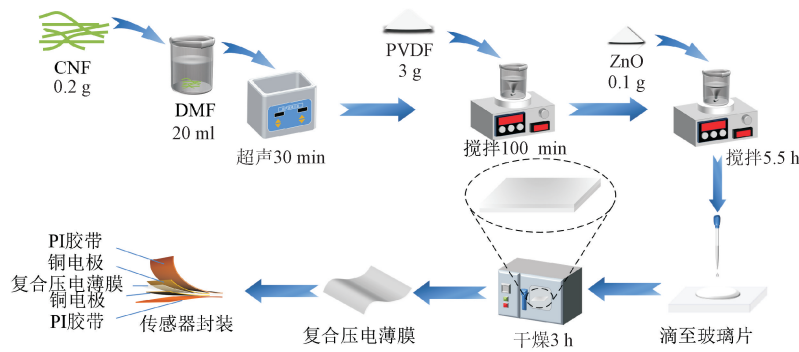
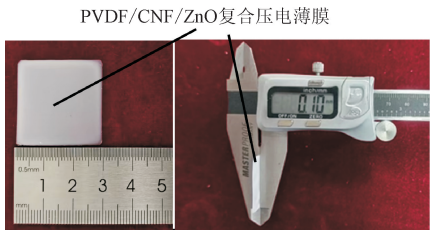


图 1 传感器的制备工艺流程示意图

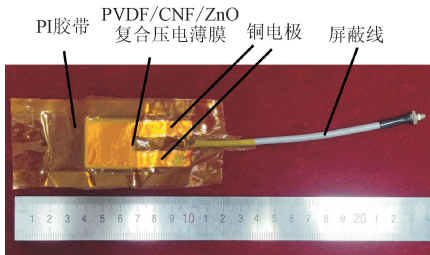
Fig. 1 Schematic diagram of sensor's preparation process

烘箱中干燥 3 h,待溶剂完全挥发,制得长×宽为 30 mm×30 mm、厚度为 0.1 mm 的 PVDF/CNF/ZnO 复合压电薄膜,如图 2(a)所示。

在复合压电薄膜两侧分别放置两片略小于薄膜的铜电极对传感器进行封装,电极厚度为 0.01 mm,接触区域长×宽为 25 mm×25 mm,延伸部分用于焊接屏蔽线。然后,在电极两侧贴覆 PI 胶带,形成“PI 胶带-铜电极-压电薄膜-铜电极-PI 胶带”的整体结构。封装后的柔性传感器实物如图 2(b)所示。



(a)PVDF/CNF/ZnO 复合压电薄膜尺寸及厚度



(b)传感器的整体封装

图 2 传感器的整体尺寸与封装

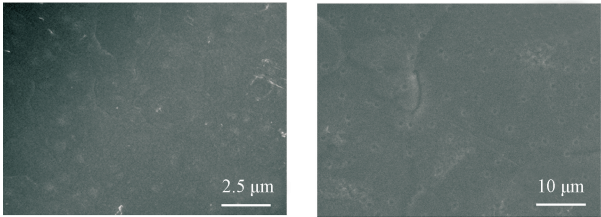
Fig. 2 Overall size and packaging of the sensor

2 PVDF/CNF/ZnO 复合材料表征与压电性能指标检测

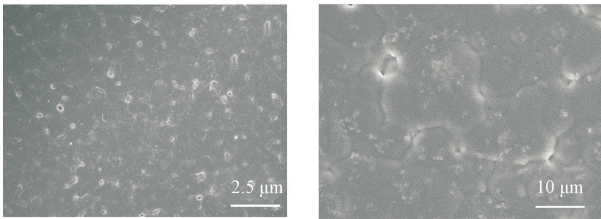
2.1 微观形貌表征

通过扫描电镜(SEM,JSM-7800F,日本电子株

式会社)对 PVDF 薄膜与 PVDF/CNF/ZnO 复合薄膜进行表面形貌表征,结果如图 3 所示。由图 3(a)可以看出,PVDF 薄膜表面存在少量微小凹坑与裂纹。相比之下,由于 ZnO 纳米颗粒对 PVDF 基体的填充与修饰作用,有效减少了薄膜在成膜与固化过程中产生的结构缺陷。因此,PVDF/CNF/ZnO 复合薄膜的表面更为平整、致密,有效减少了 PVDF 薄膜制作中的缺陷,如图 3(b)所示。



(a)PVDF 薄膜微观形貌



(b)PVDF/CNF/ZnO 复合薄膜微观形貌

图 3 扫描电镜实验图片

Fig. 3 Images from scanning electron microscopy experiments

从图 3(b)可以看出,ZnO 纳米颗粒在 PVDF 基体中分布均匀,PVDF/CNF/ZnO 复合薄膜表面上分布着不规则凹凸结构及团聚的 ZnO 颗粒(平均粒径约为 2.89 μm),共同构筑了具有更高比表面积的复合结构。由于 ZnO 纳米颗粒的成核作用抑制了大孔缺陷的形成,同时浇注液传质阻力的增大促进了更致密网络的生成,因此薄膜整体呈现交织的纤

维网络结构,纤维直径约 0.31 μm 。该交织网络结构可有效增大压力作用下的有效接触面积,减少应力集中,从而有利于压电电荷的收集。通过薄膜表面上不同尺寸的 ZnO 包裹颗粒所产生的表面电荷和极性相互作用,诱导 PVDF 分子链由 α 相(非极性)向 β 相(高极性)转变,从而增强薄膜的压电性能。

通过能量色散光谱(EDS)分析对 PVDF 薄膜与 PVDF/CNF/ZnO 复合薄膜的元素组成进行表征,结果如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,由于机械搅拌的均质化作用,从而使 Zn 与 O 元素在 PVDF 基复合薄膜表面均匀分布,证实 ZnO 纳米颗

粒成功负载且分散性良好。所制备 PVDF/CNF/ZnO 复合材料的元素定量分析结果显示,其中 C、O、F、Zn 的实测质量分数分别为 41.28%、1.14%、54.65%和 2.94%,与理论计算各元素质量分数(C 为 45.99%,O 为 2.83%,F 为 48.04%,Zn 为 3.26%)的偏差均在允许误差范围内。图 4(b)所示的 PVDF 薄膜中,F 质量分数为 57.72%、C 质量分数为 42.28%,与理论组成(F 质量分数为 57.46%,C 质量分数为 36.37%)相比具有良好的一致性。该结果证实磁力搅拌-溶剂蒸发法能够有效控制合成过程中的组分比例。

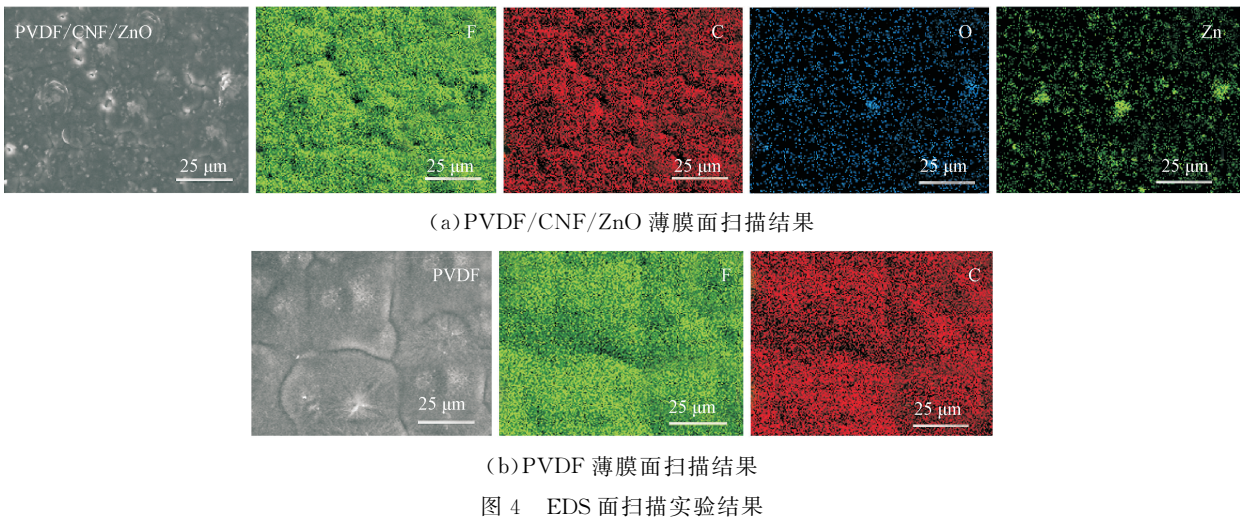


Fig. 4 Experimental results of EDS surface scanning

2.2 XRD 图谱分析

采用 X 射线衍射仪(XRD,Ultima IV,日本理学公司)对 PVDF/CNF/ZnO 复合薄膜及 PVDF 薄膜进行表征,得到 XRD 图谱如图 5 所示。

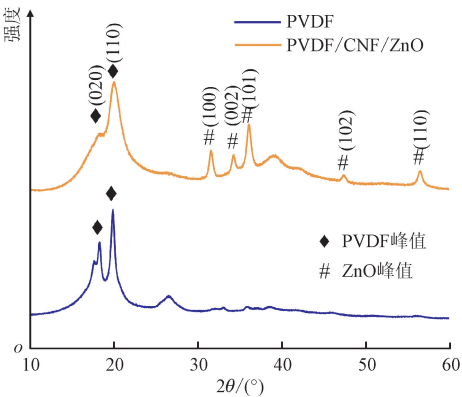


图 5 PVDF 与 PVDF/CNF/ZnO 的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of PVDF and PVDF/CNF/ZnO

在 PVDF 的 XRD 图谱中,2 θ 位于 18.4°(020)和 20.2°(110)的衍射峰分别对应于非极性 α 相和极

性 β 相。晶胞膨胀会引起 α 相和 β 相衍射峰位置发生偏移,引入 CNF/ZnO 能抑制晶胞膨胀,从而防止峰位偏移。PVDF/CNF/ZnO 复合材料的 XRD 分析表明,ZnO 片晶沿(101)晶向生长,其所有衍射峰均与六方结构 ZnO 的标准谱一致,具体出现在 2 θ 为 31.8°(100)、34.5°(002)、36.3°(101)、47.7°(102)和 56.73°(110)处。由于 PVDF/CNF/ZnO 压电复合薄膜形成过程中 ZnO 起主导作用,而 CNF 仅起辅助作用,所以对应于 CNF 的衍射峰强度较弱。此外,ZnO 对 CNF 的覆盖削弱了其 XRD 信号,导致难以获得 CNF 的有效衍射数据。

2.3 灵敏度测试

灵敏度是表征传感器性能的关键指标,反映了其在外力作用下的电压响应能力。由于柔性传感器产生的原始电压信号难以直接准确测量,因此需要使用电荷放大器进行信号放大。实验过程中,将柔性传感器连接至电荷放大器,再接入动态信号分析仪,最终通过信号分析检测系统获取电压响应波形,其信号采集系统搭建方案如图 6 所示。

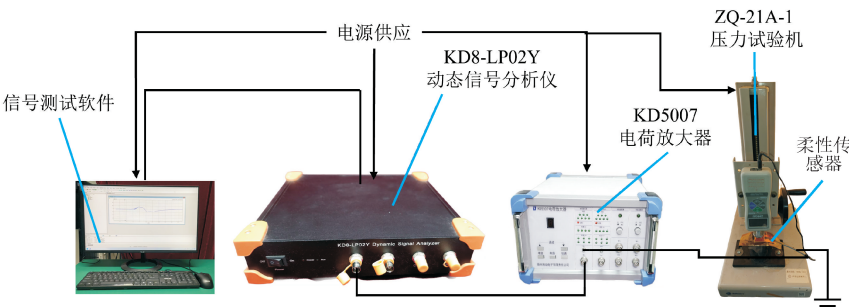


图 6 信号采集系统搭建

Fig. 6 Construction of signal acquisition system

为评估所制备柔性传感器的灵敏度,采用手摇式压力试验机对其施加等步长递增的压力,同时监测传感器在不同压力下将机械能转换为电信号的响应输出。通过记录电压-压力变化关系,并计算其灵敏度,从而实现对传感器压电性能的定量评估。灵敏度计算式为

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta p}$$

(1)

式中: ΔU 为柔性压电传感器的开路电压差; Δp 为其所受的外加压力差。

通过压力试验机每隔 70 Pa 分别对 PVDF/CNF/ZnO 传感器与 PVDF 传感器样机施加压力并记录产生的 3 组电压数据,最后对 3 组峰值电压数据取平均值,得到施加载荷与输出电压的实验数据分别如表 1 与表 2 所示。

表 1 PVDF/CNF/ZnO 传感器灵敏度实验数据

Table 1 Sensitivity experimental data for PVDF/CNF/ZnO sensor

压力/Pa	峰值电压/mV			平均电压/mV	重复性误差/%
	第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量		
70	155.71	160.90	156.63	157.75	0.57
140	185.62	170.35	193.65	183.21	2.57
210	247.02	216.46	227.25	230.24	3.37
280	357.82	357.08	365.11	360.00	0.88
350	387.48	406.06	391.69	395.08	2.05
420	510.76	534.89	512.66	519.44	2.66
490	571.23	560.09	568.18	566.50	1.23
560	680.50	690.69	700.79	690.66	2.23
630	725.55	744.90	739.31	736.59	2.13
700	898.71	855.59	907.68	887.33	5.74

表 2 PVDF 传感器压电灵敏度实验数据

Table 2 Experimental data of piezoelectric sensitivity of PVDF sensor

压力/Pa	峰值电压/mV			平均电压/mV	重复性误差/%
	第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量		
70	57.39	62.19	25.09	48.22	8.71
140	41.26	38.68	39.88	39.94	0.61
210	66.48	88.90	93.67	83.03	6.38
280	117.16	128.66	114.45	120.09	3.33
350	107.02	295.27	270.46	224.25	44.19
420	283.31	259.40	309.45	284.05	11.75
490	397.98	400.45	412.78	403.74	3.47
560	428.19	474.80	457.34	453.44	10.94
630	455.18	450.53	431.05	445.59	5.66
700	480.10	450.77	467.27	466.05	6.88

通过表 1 与表 2 的实验数据进行曲线拟合,得到 PVDF/CNF/ZnO 传感器与 PVDF 传感器的灵敏度,结果如图 7(a)所示。

对 PVDF/CNF/ZnO 传感器在 0~700 Pa 压力范围内的实验数据进行一元线性拟合,得到方程 $U = 1.1676p + 23.15$,拟合优度 $R^2 = 0.983$,灵敏度为 $1.1676 \text{ V} \cdot \text{kPa}^{-1}$,表明传感器在该范围内具有良好的线性响应特性。PVDF 传感器的灵敏度为 $0.8106 \text{ V} \cdot \text{kPa}^{-1}$,所制备的 PVDF/CNF/ZnO 传感器比 PVDF 传感器的灵敏度提升了 30.6%。本研究的 PVDF/CNF/ZnO 传感器灵敏度优于文献[22-25]中报道的 PVDF 基传感器,如图 7(b)所示。

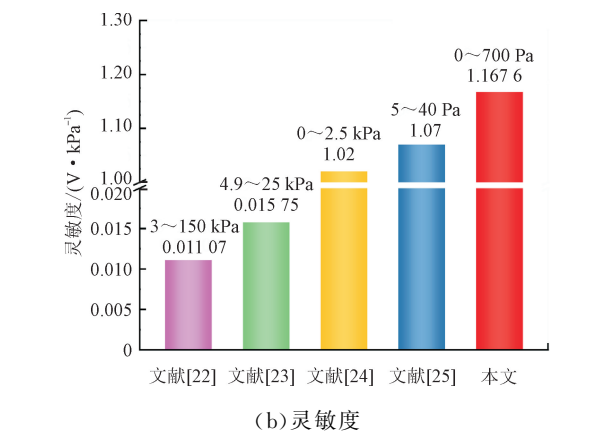
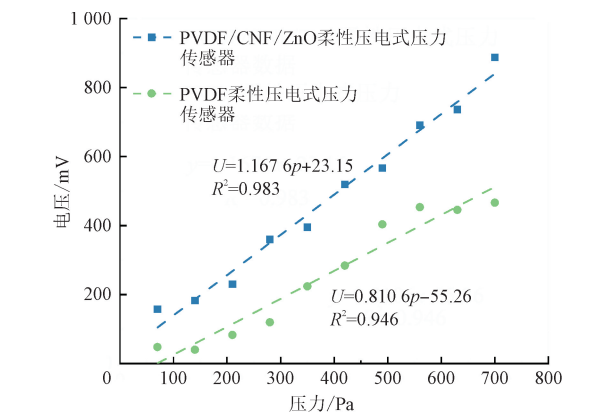


图 7 压力与响应电压拟合曲线和灵敏度对比示意图
Fig. 7 Comparison chart of pressure and response voltage fitting curve and sensitivity

2.4 响应时间及恢复时间测试

柔性传感器的响应时间与恢复时间分别反映传感器对压力信号的快速响应能力及动态测量精度,分别对 PVDF/CNF/ZnO 传感器与 PVDF 传感器进行响应测试。

如图 8(a)所示,PVDF 柔性传感器的响应与恢复时间分别为 114 ms 和 228 ms。图 8(b)为 PVDF/CNF/ZnO 传感器在压力激励下的动态响应曲线,其响应时间仅为 13 ms,恢复时间为 204 ms,表明该传感器具备优异的压电响应速度,能够快速输出电信号,适用于监测复杂、瞬变的人体运动信号。此外,所设计的 PVDF/CNF/ZnO 传感器与文献[26-28]报道的 PVDF 基传感器相比在响应速度上具有显著优势,如图 8(c)所示。

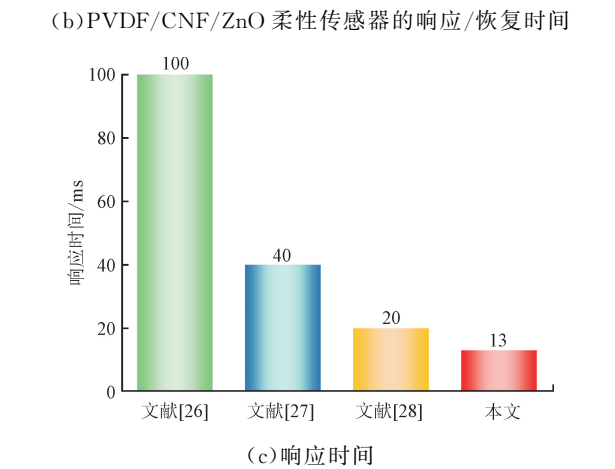
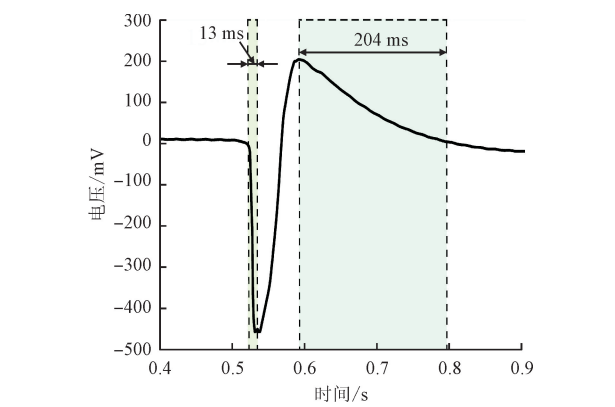
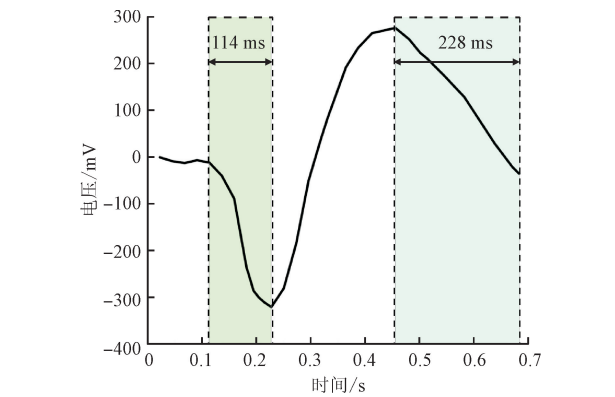


图 8 传感器响应/恢复曲线与响应时间对比
Fig. 8 Schematic diagram of comparison between sensor response/recovery curve and response time

2.5 多频率响应检测

柔性传感器的多频响应能力能够体现其对于不同频率压力信号的动态响应特性。对 PVDF/CNF/ZnO 柔性传感器施加 6.5 Hz 与 1.15 Hz 的压力信号来分析其多频响应性能,测试结果如图 9 所示。

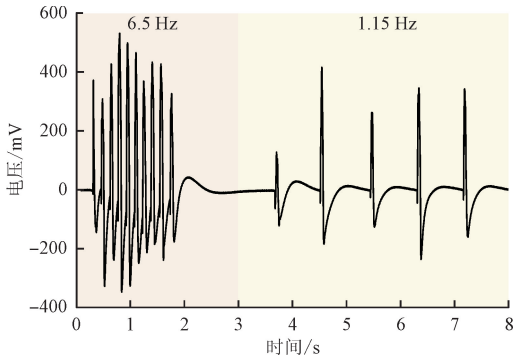


图 9 传感器多频响应能力检测结果

Fig.9 Schematic diagram of multi frequency response capability detection of sensors

从图 9 可以看出,PVDF/CNF/ZnO 传感器在 6.5 Hz 和 1.15 Hz 的动态压力刺激下,均能输出稳定的电压信号,展现出良好的多频响应性能,不仅能准确捕捉人体 1~2 Hz 的脉搏信号,还可捕捉到频率更高的手肘与手腕屈伸等人体活动所产生的动态压力信号。

3 PVDF/CNF/ZnO 柔性压电式压力传感器的应用

为评估 PVDF/CNF/ZnO 柔性压电式压力传感器在生理信号检测中的实际性能,将其分别粘贴于口罩、颈动脉、手腕及手肘处,依次检测鼻息、颈动脉脉搏与关节弯曲情况,具体粘贴位置如图 10 所示。

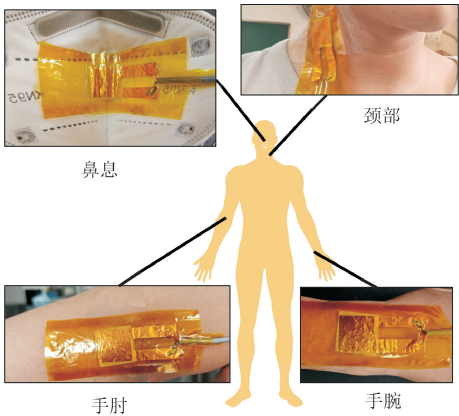
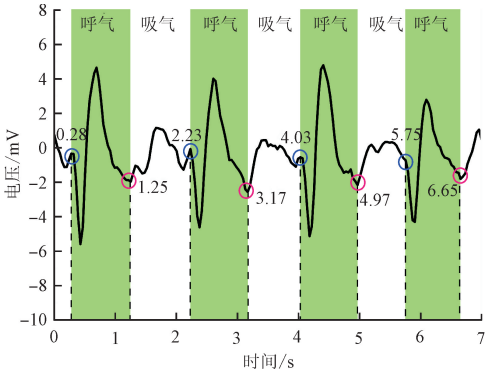


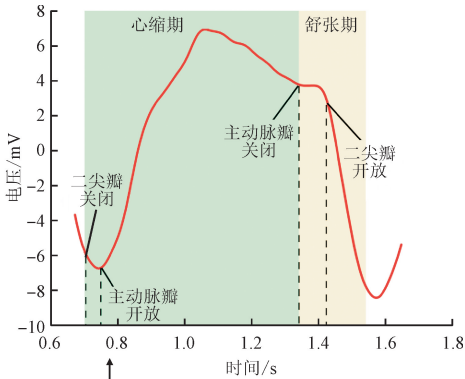
图 10 传感器粘贴位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of sensor pasting position

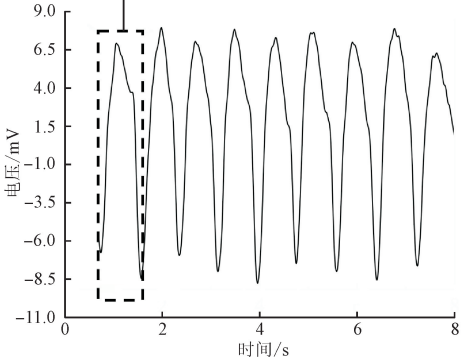
采用图 10 中的粘贴方式,对被试者分别检测鼻息、颈动脉脉搏与关节弯曲情况,结果如图 11 所示。



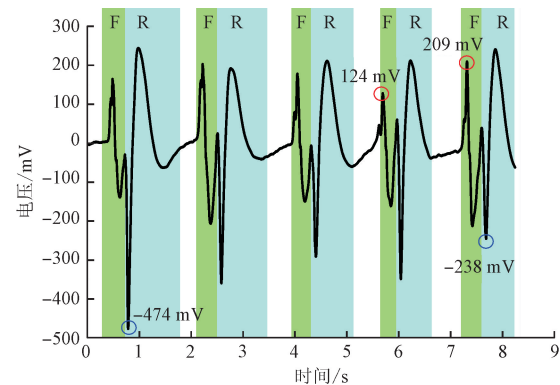
(a)鼻息检测测试结果



(b)颈动脉信号检测结果



(c)手肘弯曲信号检测结果



(d)手腕弯曲信号检测结果
图 11 生理信号检测结果

Fig. 11 Results of physiological signal detection

从图 11(a)可以看出,传感器成功采集到被测者的鼻息信号。在被测者的 4 个呼吸周期中,呼气开始的时间点分别为 0.28、2.23、4.03、5.75 s,呼气结束的时间点分别为 1.25 s、3.17 s、4.97 s、6.65 s。每次呼气的平均时长约为 0.94 s,平均呼吸每次约为 1.82 s。实验结果表明,所制备的柔性传感器具有检测鼻息信号的能力,可为医护人员监测被测者的呼吸健康状态提供可靠的依据。

心动周期是指心脏完成一次收缩和舒张的全过程所需时间。从图 11(b)可以看出,传感器成功测量出被测者的连续 9 个心动周期的颈动脉脉搏信号。以第 1 个心动周期为例,收缩期发生于 0.7~1.34 s(持续 0.64 s),舒张期发生于 1.34~1.54 s(持续 0.20 s),总时长为 0.84 s。收缩期起始时二尖瓣于 0.7 s 关闭,0.74 s 主动脉瓣随即开放。舒张期初始阶段(1.34 s)主动脉瓣关闭,至 1.42 s 二尖瓣重新开放完成心室充盈,计算所得被测者的心率为 71/min。通过对颈动脉信号的检测,验证了传感器具有优异的动态响应特性。

手肘屈曲信号如图 11(c)所示,传感器成功记录连续 3 次 60°屈肘运动,电压信号规律性波动,屈曲(B)与伸直(R)阶段交替出现。信号时域特征显示,负向相位时长(约 1.1 s)大于正向(约 0.7 s),即屈肘时需克服更大阻力。该测试表明传感器可用于关节运动速度与肌肉收缩特性的分析。

手腕弯曲信号检测结果如图 11(d)所示,传感器可灵敏响应手腕周期性屈伸运动,弯曲(F)与恢复(R)阶段分别产生 124~209 mV 的正向电压和 -474~-238 mV 的负向电压,表明其能够区分不同弯曲角度并实现运动量化评估。

4 结 论

为有效提升 PVDF 柔性压电式压力传感器的灵敏度,降低响应时间,增强其对人体生理信号的检测能力,本文基于溶剂蒸发法,将超声波辅助混合纤维素纳米纤维(CNF)和磁力搅拌氧化锌(ZnO)纳米颗粒与 PVDF 结合,制备出一种 PVDF/CNF/ZnO 柔性压电式压力传感器,得到主要结论如下。

(1)基于信号采集系统对 PVDF/CNF/ZnO 柔性压电式压力传感器进行灵敏度测试,得出其在 0~700 Pa 的压力范围内灵敏度为 1.167 6 V/kPa,相较于 PVDF 传感器灵敏度提高了 30.6%。

(2)分析测量了所制备 PVDF/CNF/ZnO 柔性压电式压力传感器的响应/恢复时间为 13 ms/204 ms,满足用于人体生理信号检测所需的快速反应性能的需求。

(3)PVDF/CNF/ZnO 柔性压电式压力传感器可获得鼻息、颈动脉、手腕与手肘弯曲测量部位的压力信号,该传感器在多项生理信号监测中均表现出良好的响应特性与稳定性,具备优异的实际应用潜力。

本文制备的性能优良的柔性压电式压力传感器,可应用于医疗保健监测领域。未来可开发透气性良好的柔性传感器,在增强穿戴舒适性等方面开展进一步研究。

参考文献:

[1] ZHU Shuwen, FAN Huiqing, DONG Peizhi, et al. PEDOT: PSS@WO₃ p-n heterojunction sensor for enhanced triethylamine detection at room temperature [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(5): 118099.

[2] CHE Xiuzi, FAN Huiqing, CAO Jiahao, et al. Novel stable and biocompatible poly L-lactide/ β -glycine films for in vivo bone repairing by using nanogenerator with high piezoelectricity [J]. Nano Energy, 2025, 143: 111275.

[3] ZHOU Zixuan, GUO Kaiqi, YIN Feifei, et al. The dual-mode sensing of pressure and temperature based on multilayer structured flexible sensors for intelligent monitoring of human physiological information [J]. Composites Science and Technology, 2023, 238: 110012.

[4] 陈国策, 沈华, 谢承博, 等. 用于人体运动监测的柔性摩擦发电传感纱的研发及其性能 [J]. 现代纺织技术, 2025, 33(8): 106-116.

- CHEN Guoce, SHEN Hua, XIE Chengbo, et al. Development and performance of flexible triboelectric sensor yarns for human motion monitoring [J]. *Advanced Textile Technology*, 2025, 33(8): 106-116.
- [5] CUI Meijie, WU Songkai, LI Jiannan, et al. An ultra-sensitive flexible strain sensor based on CNC/CNTs/MXene/TPU fibrous mat for human motion, sound and visually personalized rehabilitation training monitoring [J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 244: 110309.
- [6] 张锦桐, 周刚, 陈桂婷, 等. 电极与介电层褶皱接触对压电式柔性电子皮肤性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(12): 3194-3200.
- ZHAN GJintong, ZHOU Gang, CHEN Guiting, et al. Effect of folded contact between electrode and dielectric layer on the performance of piezoelectric flexible electronic skin [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(12): 3194-3200.
- [7] SOLTANABADI H, RAFIEE E, GHADERI R. Cobalt-polyoxometalate-PVDF nanofibers a flexible, self-powered and high-sensitive piezoelectric sensor [J]. *Colloids and Surfaces; A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 712: 136442.
- [8] 朱清松, 孙权, 鲁玉军, 等. 基于温敏材料的量程可调电容式柔性压力传感器 [J]. *传感技术学报*, 2025, 38(4): 598-602.
- ZHU Qingsong, SUN Quan, LU Yujun, et al. A range adjustable capacitive flexible pressure sensor based on thermosensitive materials [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2025, 38(4): 598-602.
- [9] 岳欣琰, 邵剑波, 王小虎, 等. 基于镀银锦纶/锦纶/水性聚氨酯复合纱的一维结构柔性电容传感器 [J]. *纺织学报*, 2025, 46(3): 82-89.
- YUE Xinyan, SHAO Jianbo, WANG Xiaohu, et al. One-dimensional structured flexible capacitive sensors based on silver coated polyamide fiber/polyamide fiber/waterborne polyurethane composite yarns [J]. *Journal of Textile Research*, 2025, 46(3): 82-89.
- [10] 谭佳朋, 张鹏, 黄梁松, 等. 基于涤纶基叉指电极的柔性电阻式压力传感器 [J]. *传感技术学报*, 2025, 38(8): 1365-1372.
- TAN Jiapeng, ZHANG Peng, HUANG Liangsong, et al. Flexible resistive pressure sensor based on interdigital electrode on polyester substrate [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2025, 38(8): 1365-1372.
- [11] XIAO Yuan, HU Chengan, YANG Leipeng, et al. Preparation of graphene/polydimethylsiloxane flexible resistive pressure sensors based on direct ink writing 3D printing [J]. *Sensors and Actuators; A Physical*, 2025, 382: 116148.
- [12] 张文博, 李雯, 梁慧媛, 等. 生物质材料在摩擦电柔性传感器中的研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(3): 1272-1287.
- ZHANG Wenbo, LI Wen, LIANG Huiyuan, et al. Progress of biomass materials in triboelectric flexible sensors [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(3): 1272-1287.
- [13] 杨云, 薛淑萍, 王子恒, 等. 用于运动状态监测的纸基柔性摩擦电传感器 [J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(4): 165-168.
- YANG Yun, XUE Shuping, WANG ZI Heng, et al. Paper-based flexible triboelectric sensors for motion state monitoring [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(4): 165-168.
- [14] ZHENG Zhifang, WANG Xiuchen, HANG Gege, et al. Recent progress on flexible poly(vinylidene fluoride)-based piezoelectric nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronic applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 193: 114285.
- [15] 张奔, 徐磊, 张淑洁, 等. PVDF 柔性脉搏传感器的设计 [J]. *天津纺织科技*, 2022(1): 44-47.
- ZHANG Ben, XU Lei, ZHANG Shujie, et al. Design of PVDF flexible pulse sensor [J]. *Tianjin Textile Science & Technology*, 2022(1): 44-47.
- [16] 覃双, 张旭, 赵锋, 等. PVDF 薄膜单轴拉伸及交流极化特性研究 [J]. *中国测试*, 2018, 44(10): 151-156.
- QIN Shuang, ZHANG Xu, ZHAO Feng, et al. Study on the uniaxial orientation behaviors and polarization properties of PVDF films [J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2018, 44(10): 151-156.
- [17] 苏宇, 翁凌, 王小明, 等. 核壳结构 SiCNWs@SiO₂/PVDF 复合材料的制备与介电储能特性 [J]. *材料导报*, 2023, 37(11): 190-200.
- SU Yu, WENG Ling, WANG Xiaoming, et al. Preparation and dielectric energy storage properties of core shell structure SiCNWs@SiO₂/PVDF composites [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(11): 190-200.
- [18] CHEN Guangzhou, CHEN Gang, PAN Li, et al. Electrospun flexible PVDF/GO piezoelectric pressure sensor for human joint monitoring [J]. *Diamond and Related Materials*, 2022, 129: 109358.
- [19] 孙娇娇, 李银辉, 李朋伟, 等. 基于 ZnO@rGO/PVDF 柔性复合薄膜的压电纳米发电机 [J]. *压电与声光*, 2023, 45(2): 306-312.

SUN Jiaojiao, LI Yinhui, LI Pengwei, et al. Piezoelectric nanogenerator based on ZnO@rGO/PVDF flexible composite film [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2023, 45(2): 306-312.

[20] 谈建强, 李银辉, UWAYEZU E, 等. 毛刷状 ZnO@PVDF 复合纳米纤维柔性压电纳米发电机 [J]. *电子元件与材料*, 2023, 42(2): 173-180.

TAN Jianqiang, LI Yinhui, UWAYEZU E, et al. Piezoelectric nanogenerator based on brush-like ZnO@PVDF composite fiber [J]. *Electronic Components and Materials*, 2023, 42(2): 173-180.

[21] PAN Liang, WANG Ying, JIN Qiuyi, et al. Self-poled PVDF/recycled cellulose composite fibers utilizing cellulose nanocrystals to induce PVDF β -phase formation through wet-spinning as a flexible fabric piezoelectric sensor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479: 147742.

[22] FENG Wanqi, CHEN Yixiang, WANG Wei, et al. A waterproof and breathable textile pressure sensor with high sensitivity based on PVDF/ZnO hierarchical structure [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 633 (Part 2): 127890.

[23] WANG Yabing, ZHU Miaomiao, WEI Xuedian, et al. A dual-mode electronic skin textile for pressure and temperature sensing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425: 130599.

[24] 申国栋, 刘喜冉, 姚一军, 等. 棉织物基 ZnO/BaTiO₃/PVDF 压电传感器及其性能 [J]. *纺织高校基础科学学报*, 2025, 38(2): 33-40.

SHEN Guodong, LIU Xiran, YAO Yijun, et al. Cotton fabric-based ZnO/BaTiO₃/PVDF piezoelectric sensor and its performances [J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2025, 38(2): 33-40.

[25] 余兆勇, 王诗雯, 王莉莉, 等. 聚吡咯改性钛酸钡纳米颗粒/聚偏氟乙烯复合压电薄膜的制备及性能分析 [J]. *浙江理工大学学报(自然科学)*, 2024, 51(4): 466-473.

YU Zhaoyong, WANG Shiwen, WANG Lili, et al. Preparation of polypyrrole-modified barium titanate nanoparticles/polyvinylidene fluoride composite piezoelectric films and their performance analysis [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University(Natural Sciences)*, 2024, 51(4): 466-473.

[26] GUO Hang, WAN Ji, WU Hanxiang, et al. Self-powered multifunctional electronic skin for a smart anti-counterfeiting signature system [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(19): 22357-22364.

[27] XIN Feifei, DENG Jinjun, WANG Wenlong, et al. Boosting piezoelectric response of PVDF via synergistic effect of dopamine-treated BaTiO₃ and graphene for self-powered pressure sensor [J]. *Sensors and Actuators; A Physical*, 2025, 387: 116470.

[28] M A H, KARUMUTHIL S C, RAJAN L. Optimization of PVDF nanocomposite based flexible piezoelectric tactile sensors: a comparative investigation [J]. *Sensors and Actuators; A Physical*, 2023, 353: 114215.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 130 页)

[27] VAN DE NOORT M, IRELAND P T, TELISINGHE J C. Effects of manufacturing tolerances on double-wall effusion cooling [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2024, 146(1): 011009.

[28] FRIEDRICHS S, HODSON H P, DAWES W N. Heat transfer committee best paper of 1995 award: distribution of film-cooling effectiveness on a turbine endwall measured using the ammonia and diazo technique [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1996, 118(4): 613-621.

[29] FRIEDRICHS S, HODSON H P, DAWES W N. Aerodynamic aspects of endwall film-cooling [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(4): 786-793.

(编辑 武红江)