

文章编号: 1671-7449(2026)02-0213-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(2): 213-220.

基于MXene/PEDOT: PSS复合材料多孔结构的 柔性压阻式压力传感器制备

张悦¹, 要政江^{2,3}, 张昊^{2,3}, 张磊^{2,3*}

(1. 山西省机械产品质量监督检验站有限公司, 山西 太原 030009;

2. 中北大学 微纳器件与系统教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 在物联网、医疗健康检测与人工智能迅猛发展的背景下, 柔性传感器受到了研究人员的广泛关注。其中, 柔性压力传感器是一种可以将实时外界压力信号转换为电信号的检测装置, 可广泛应用于航空航天、健康监测、电子皮肤和人机界面等领域。近年来, MXene二维材料因其独特的层状结构、高导电性、丰富的表面官能团和亲水性而受到广泛关注, 为柔性传感器带来了新的突破。通过离子插层和化学反应相结合的方法制备了性能优异的MXene/PEDOT: PSS多孔结构压敏层, 增加MXene薄膜的层间间距和机械强度。实验结果证明: 所制备的柔性压力传感器具有优异的灵敏度($S_1=12.808\text{ kPa}^{-1}$, $S_2=0.397\text{ kPa}^{-1}$), 较宽的检测范围(0.01~93.593 kPa), 良好的响应时间(64 ms)/恢复时间(83 ms), 以及重复性(4 000次)。此外, 这一多孔结构柔性压力传感器能够实现实时监测声带运动和肢体运动, 在语音监测、语音识别、灵活的人机交互和智能机器人领域展现出巨大潜力。

关键词: MXene; PEDOT: PSS; 多孔结构; 柔性压力传感器; 压力监测

中图分类号: TP212

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026011

引用格式: 张悦, 要政江, 张昊, 等. 基于MXene/PEDOT: PSS复合材料多孔结构的柔性压阻式压力传感器制备[J]. 测试技术学报, 2026, 40(2): 213-220.

ZHANG Yue, YAO Zhengjiang, ZHANG Hao, et al. Fabrication of flexible piezoresistive pressure sensor based on MXene/PEDOT: PSS composite porous structure[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(2): 213-220.

Fabrication of Flexible Piezoresistive Pressure Sensor Based on MXene/PEDOT: PSS Composite Porous Structure

ZHANG Yue¹, YAO Zhengjiang^{2,3}, ZHANG Hao^{2,3}, ZHANG Lei^{2,3*}

(1. Shanxi Machinery Products Supervision and Inspection Station Co., Ltd., Taiyuan 030009, China;

2. Key Laboratory of Micro and Nano Devices and Systems, Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the context of the rapid development of the Internet of Things, medical health detection and artificial intelligence, flexible sensors have attracted widespread attention from researchers. Among them,

【收稿日期】2024-04-03

【基金项目】国家科技重大专项资助项目(J2022-V-0005-0031); 国家自然科学基金资助项目(52105594); 山西省重点研发计划资助项目(20210302124274)

【作者简介】张悦(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事微纳传感器研究。E-mail: 13623456568@163.com。

*【通信作者】张磊(1991—), 男, 副教授, 博士, 主要从事柔性智能传感器研究。E-mail: 20210022@nuc.edu.cn。

the flexible pressure sensor is a detection device that can convert real-time external pressure into a number, and can be widely used in health monitoring, electronic skin and human-machine interface and other fields. In recent years, MXene 2D materials have attracted widespread attention due to their unique layered structure, high electrical conductivity, abundant surface functional groups, and hydrophilicity, bringing breakthroughs to flexible sensors. In this study, the porous MXene/PEDOT:PSS varistor layer with excellent properties was prepared by the combination of ion intercalation and chemical reaction, which greatly improved the interlayer spacing and mechanical strength of the MXene film. The experimental results show that the flexible pressure sensor has excellent sensitivity ($S_1=12.808\text{ kPa}^{-1}$, $S_2=0.397\text{ kPa}^{-1}$), a wide detection range (0.01—93.593 kPa), good response time (64 ms)/recovery time (83 ms) and repeatability (4 000 times). In addition, the real-time monitoring of vocal cord movement and movement is realized in this flexible pressure sensor with a porous structure, showing great potential in the fields of monitoring, identification, flexible human-computer interaction and intelligent robotics.

Key words: MXene; PEDOT:PSS; porous structure; flexible pressure sensors; pressure monitoring

0 引言

随着物联网、人工智能技术以及仿生机器人等前沿科技领域的快速发展,可穿戴柔性传感器展现出广阔的应用前景^[1]。其中,柔性压力传感器因其独特的感知机制备受关注,可将外部实时压力、物体形变等机械刺激转化为电信号进行稳定输出^[2]。柔性压力传感器通过不同的响应机制可分为压阻式、电容式、摩擦电式以及压电式等^[3-6]。其中,柔性压阻式压力传感器因其独特的工作原理和优异的传感性能,在众多领域均展现出显著的优势^[7]。

近年来,二维材料的新发现为柔性传感器领域注入了新的活力^[8]。其中,MXene凭借其独特的金属导电性和可调的层间结构,使其成为优异的敏感层材料之一^[9]。在外力作用下,MXene的层间电子通道可通过结构形变实现动态响应。然而,MXene纳米片的自堆叠效应和氢键导致层间间距受限,使得电子通道变化幅度不足,很大程度上影响了MXene基压敏层传感性能的进一步提升^[10]。PEDOT:PSS(聚3,4-乙烯二氧噻吩:聚苯乙烯磺酸盐)作为一种高性能导电高分子材料,具有高导电性、优异的柔韧性和机械稳定性^[11]。MXene与PEDOT:PSS的复合是一种高效的性能优化策略,通过界面机械连锁效应,可显著提高复合材料的整体电导率与机械强度。

压阻式压力传感器的压敏层影响着传感器的性能指标,研发兼具高灵敏度和宽检测范围的压敏层至关重要。目前,研究人员已开发出众多压敏层微观结构,如圆锥结构、球结构、褶皱结构。然而,多孔结构的制备却比较单一。汪海船等^[12]

使用冷冻干燥和模板辅助的方法制备了性能优异的多孔结构压敏层。多孔结构压敏层因其独特的孔隙拓扑和丰富的导电通路,赋予了传感器优异的传感特性,解决了传统薄膜材料检测范围低和灵敏度不足的问题^[13]。然而,多孔结构压敏层的制备普遍繁琐且耗时,难以满足日常所需^[14];其次,MXene二维纳米片的自堆叠结构和较弱的机械强度导致纯MXene薄膜难以形成大范围电阻变化,严重影响压力传感器的传感性能。

本文提出了一种通过离子插层和化学反应相结合的方法来构建层间可调谐MXene/PEDOT:PSS多孔复合网络结构压敏层。通过PEDOT:PSS与MXene的结合,增加了压敏层复合材料的机械强度与电导率。此外,通过 K^+ 插层在MXene纳米片上,可以进一步扩大层间间距,从而减少MXene纳米片之间的氢键和范德华力,从根本上维护了孔隙结构的完整性。

1 敏感材料制备与表征

1.1 敏感材料制备

高纯度 Ti_3AlC_2 粉末(400 mesh),购自莱州凯烯陶瓷材料有限公司。水性聚氨酯分散体,化学试剂LiF和HCl均购自Sigma-Aldrich。PEDOT:PSS水分散液,Clevios PH1000,固含量1.3%,购自Heraeus GmbH。氢氧化钾(KOH),分析纯,购自Sigma-Aldrich。所有实验用水均为去离子水。

1.1.1 MXene制备

首先,准确称取1 g LiF,将20 mL HCl(6 mol/L)

缓慢倒入装有 LiF 的容器内,混合并充分搅拌 20 min 以制得 HF 和 LiCl 溶液;其次,将 1 g Ti_3AlC_2 粉末缓慢且均匀地加入 HF 溶液中;然后,在 40 °C 的恒温环境下持续磁力搅拌 48 h,待反应结束后,进一步使用去离子水反复洗涤最终反应后的混合物,直至上清液 pH 值达到 6;随后,将洗净沉淀物分散在去离子水中,在 Ar 气流下的冰浴中超声处理 2 h;最后,将上述溶液转移至离心管中,在 3 500 r/min 转速下离心 30 min,收集上清液,得到最终的 MXene 纳米片分散液^[15]。如图 1 所示,该 MXene 纳米片分散液具有良好的丁达尔效应。

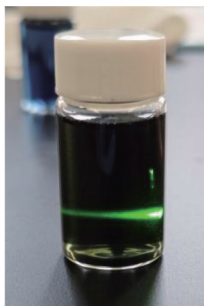


图 1 MXene 纳米片分散液

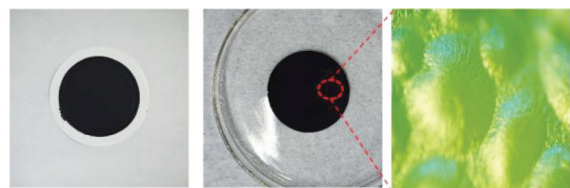
Fig. 1 MXene nanosheet dispersion

1.1.2 复合压敏材料的制备

1) 将制备好的 MXene 纳米片分散液和 PEDOT:PSS 溶液均加入适量去离子水,使其稀释至 1 mg/mL,然后取 5 mL MXene 分散液和 1 mL PEDOT:PSS 溶液混合,超声分散 30 min。最后,加入 0.5 g KOH 粉末使其充分溶解,超声处理 20 min,最终得到 KOH-MXene/PEDOT:PSS 混合水溶液。

2) 将制备好的 KOH-MXene/PEDOT:PSS 混合水溶液缓慢倒入真空抽滤装置中,抽滤 KOH-MXene/PEDOT:PSS 混合溶液并在真空环境下干燥(40 °C)。待缓慢干燥后,将其迅速转移至 HCl 溶液中,使 MXene 纳米片层之间残留的 KOH 与 HCl 进行充分化学反应。在反应过程中,所产生的能量将致密的层状结构变为表面突起的多孔结构。复合压敏材料实物图如图 2(a) 所示。如图 2(b) 所示,将多孔结构压敏层放置于生物显微镜下放大,可见反应后形成表面突起的多孔结构。此外,生成的 KCl 会进一步附着在 MXene 纳米片中,削弱 MXene 纳米片之间的范德华力和氢键并撑开层间间距。将制备的 MXene/PEDOT:PSS 复合压敏材料从 HCl 溶液中缓慢取出,并在室温环境下充分干燥。待干燥完成后,具有 K^+ 插层的多孔结构 MXene/PEDOT:PSS

就被成功制备。



(a) 复合压敏材料实物图

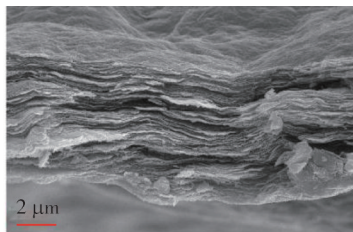
(b) 压敏材料表面放大图

图 2 复合压敏材料实物图及表面放大图

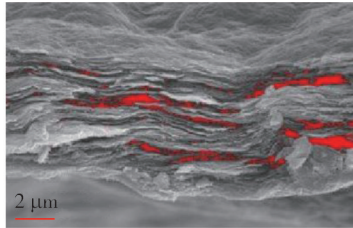
Fig. 2 Physical diagram and magnified view of composite pressure-sensitive material

1.2 敏感材料表征

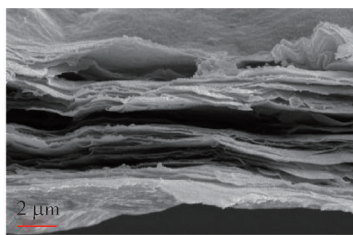
为深入探究 MXene/PEDOT:PSS 复合压敏材料中多孔结构的形成机制,采用扫描电子显微镜对 MXene/PEDOT:PSS 复合压敏材料的横截面进行观测,如图 3 所示。



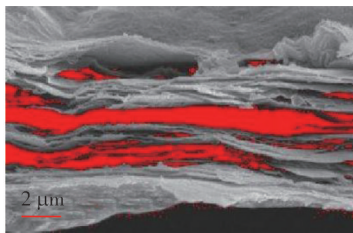
(a) MXene/PEDOT:PSS 致密薄膜横截面



(b) MXene/PEDOT:PSS 致密薄膜的孔隙率分析



(c) MXene/PEDOT:PSS 多孔薄膜横截面



(d) MXene/PEDOT:PSS 多孔薄膜的孔隙率分析

图 3 传感器复合压敏材料的扫描电镜图及孔隙率分析

Fig. 3 Scanning electron microscopy and porosity of composite varistor materials for sensors

从图 3(a) 中可以清晰看出 MXene/PEDOT:PSS 致密薄膜的层状堆叠结构, 从而证明 MXene 纳米片的微观形态。随后, MXene/PEDOT:PSS 致密薄膜经过强烈的化学反应后, 其有序的层状堆叠结构形成大规模的多孔复合结构。如图 3(c) 所示, 与反应前的致密薄膜相比, 反应后的 MXene/PEDOT:PSS 薄膜展现出明显且尺寸各异的孔隙结构。

进一步对相应截面的孔隙率进行精确测定, 结果如图 3(b) 和 (d) 所示, 致密薄膜的孔隙率仅为 2.82%, 而多孔薄膜的孔隙率大幅提升至 13.79%, 可以看出反应前后孔隙率的显著变化。

2 传感器制备与测试

2.1 压力传感器制备

首先, 采用磁控溅射技术在经过表面预处理的柔性 PI 薄膜基底上溅射一层 50 nm 镍; 然后, 溅射 1 μm 的铜功能层, 从而制备出柔性叉指电极。随后, 将预先制备的多孔网络结构压敏层薄膜(图 4(a))切割成尺寸为 0.75 cm $\times$ 1 cm, 厚度为 6 μm 的矩形试样, 确保其能完整覆盖叉指电极; 最后, 采用热压封装工艺, 利用聚酰亚胺薄膜对传感器进行全封闭封装, 确保器件的机械稳定性和环境适应性, 如图 4(b) 所示。

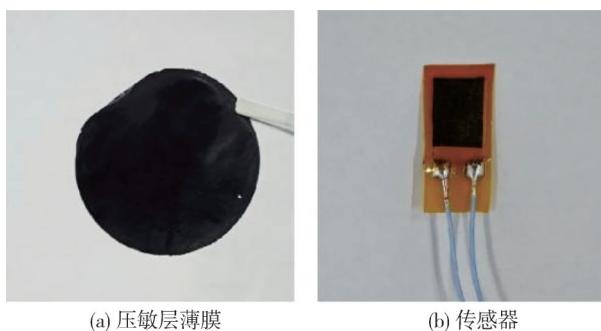


图 4 压敏层薄膜和传感器示意图
Fig. 4 Schematic of varistor layer film and sensor

2.2 压力传感器工作原理

压力传感器的工作原理如图 5 所示: 在初始状态下, 三维多孔网络结构的压敏层呈现高度发达的孔隙结构, 相邻 MXene 纳米层间保持较大层间距。当外界压力作用时, 多孔网络结构发生弹性形变, 孔隙率显著降低且层间距进一步压缩, 促使 MXene 纳米层间形成更多导电通路, 从而使载流子在 MXene 纳米层间高效迁移, 最终导致传

感器电阻值呈现数量级的显著下降。

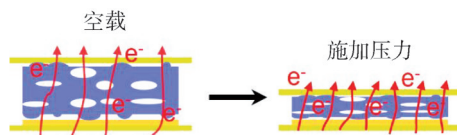


图 5 传感器工作原理示意图
Fig. 5 Schematic diagram of sensor working mechanism

2.3 传感器的性能测试

传感器标定与测试平台可以明确传感器的性能指标^[16], 本文测试平台主要包括压力试验机、高精度数字万用表、电源以及上位机^[17]。性能测试具体步骤如下: 首先, 使用医用胶带对柔性压力传感器进行固定, 电源提供 1 V 的电压对测试平台进行供电, 产生的电信号变化通过上位机软件进行实时监测并记录^[18]。

灵敏度与检测范围作为柔性传感器的核心性能指标, 在压阻式传感体系中, 压敏层微观结构对灵敏度的调控起着决定性作用^[19]。相较于传统的层状致密结构($S_3=1.213 \text{ kPa}^{-1}$ (0.01~26.880 kPa), $S_4=0.236 \text{ kPa}^{-1}$ (26.880~93.593 kPa)), 多孔压敏层凭借其独特的三维网络孔隙结构, 在相同压力作用下可产生更为显著的电阻响应变化。为系统揭示柔性压力传感器的灵敏度响应规律, 搭建了高精度压力测试平台。将传感器置于压力试验机正下方, 采用阶梯式加载方式开展全量程灵敏度测试。实验结果表明: 当施加的压力缓慢增加到 12.240 kPa 时灵敏度抵达了阈值, 然后, 在 12.240~93.593 kPa 之间略有增加。如图 6 所示, 灵敏度曲线表现出两段较为平整的线性曲线, 相应的灵敏度值分别为 12.808 kPa^{-1} 和 0.397 kPa^{-1} , 压力检测范围为 93.593 kPa。该研究结果为多孔结构传感器的量程扩展与灵敏度优化提供了重要的实验依据。

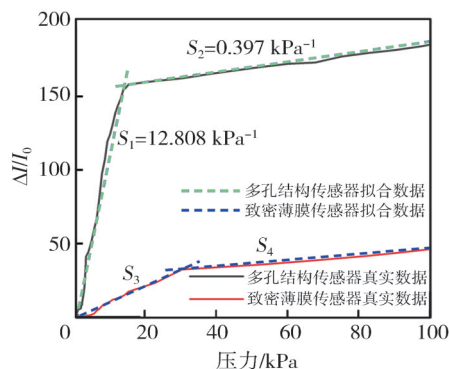


图 6 传感器灵敏度测试
Fig. 6 Sensor sensitivity test

为验证该柔性压力传感器在实时监测领域的适用性,本文采用动态压力加载系统对多孔结构柔性压力传感器的响应特性开展系统性测试^[19]。测试结果如图 7 所示,响应时间为 64 ms,恢复时间为 83 ms。这种快速响应特性归因于多孔压敏层的弹性机制:当压力卸载时,三维孔隙结构能够迅速恢复形变,有效减少迟滞效应。其良好的响应时间特性赋予了传感器实时感知的强大功能。

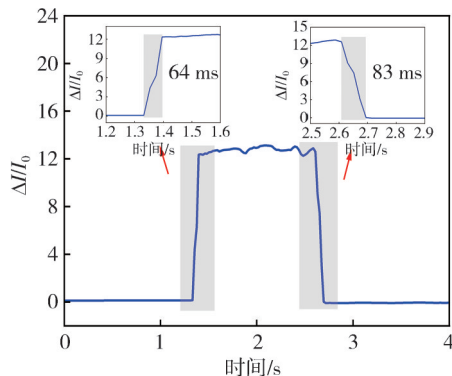
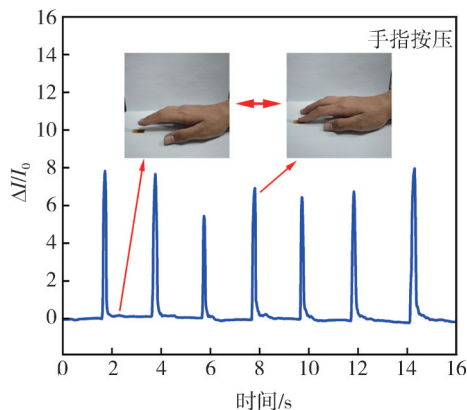


图 7 传感器响应及恢复时间测试

Fig. 7 Sensor response and recovery time testing

为系统验证多孔结构柔性压力传感器的长期可靠性与循环稳定性,本文采用单轴伺服电动缸作为动力装置,搭建了高精度循环加载实验平台^[20]。结果表明:传感器展现出良好的可重复性,可经受 4 000 次循环加载和卸载实验。在单轴电机的冲击作用下,各时间段的电流信号变化无明显差异,如图 8 所示。这表明该传感器的性能稳定,未出现因循环次数增加而导致的性能波动。这些实验结果充分证明,该柔性压力传感器能够在人体长期可靠地运行,为后续实际应用提供了坚实的数据支撑与性能保障。



(a) 手指按压触动信号变化

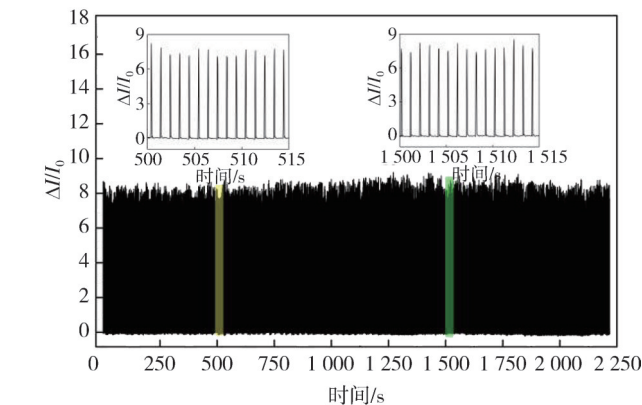


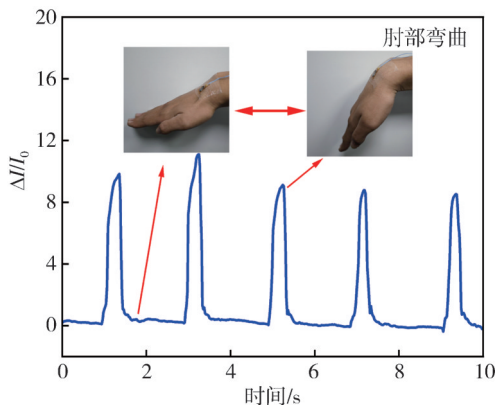
图 8 传感器稳定性测试

Fig. 8 Sensor stability test

2.4 传感器应用测试

为深入探究该压力传感器在可穿戴电子设备中的广阔应用前景,本文实施了一系列肢体运动检测实验^[21]。如图 9(a) 所示,当手指轻轻触动压力传感器时,其内部独特的多孔结构孔隙会相应减小。这一微观结构的改变会进一步引发压力传感器电阻值的变化,从而实现对外部微弱压力的有效感知与信号转换。此外,将压力传感器贴附在人体关节处,相应部位的动态变化均能被精准捕捉与记录,如图 9(b)~(d) 所示。这些详实的数据与直观的图示充分显示了该压力传感器在可穿戴设备应用场景中所具备的卓越性能与潜力。

为进一步全面且精准地评估该传感器在检测微弱压力时的性能表现,本文开展了一项针对性实验。在语音康复工程领域,针对语音障碍群体的精准语音识别始终是极具挑战性的研究课题。本文创新性地提出一种基于喉部微应变监测的语音识别方法,利用压阻式传感器对声带振动的高灵敏度响应特性,实现对不同语音信号的非侵入式检测。



(b) 肘部弯曲信号变化

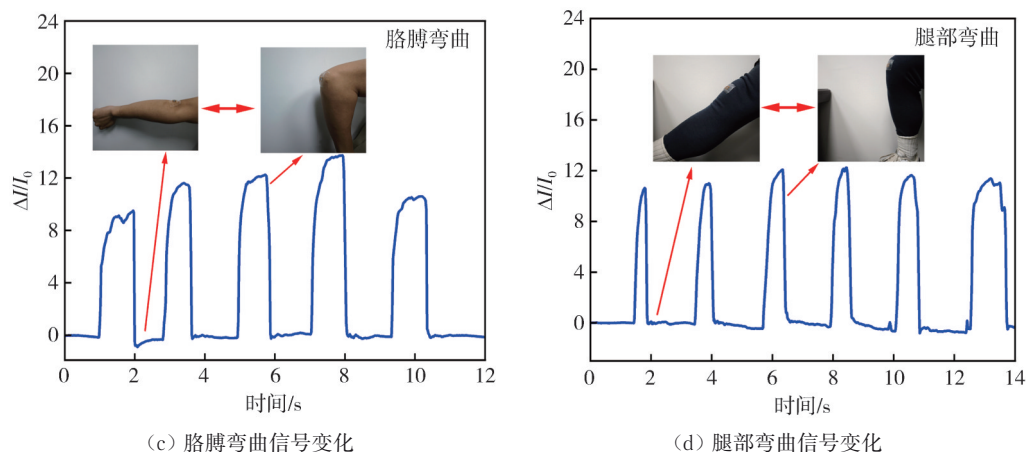


图9 肢体运动压力检测实验结果

Fig. 9 Experimental results of exercise pressure measurement

当声带振动时,这一细微的颤动会使压力传感器的电阻发生微小变化。

如图10所示,该传感器能够迅速且准确地检测到不同单词(Application、Hello、Pressure、Sensor)的高低音变化,并且表现出显著的重复性。这一实验成果表明,该压力传感器具备语音检测

和识别能力,凸显了其在可穿戴设备应用场景中,针对语音监测方面的巨大优势与潜力。本研究为语音障碍的早期诊断与个性化康复训练提供了全新的技术路径。未来可通过优化传感器阵列布局、融合深度学习算法,进一步提升复杂语音场景下的识别精度。

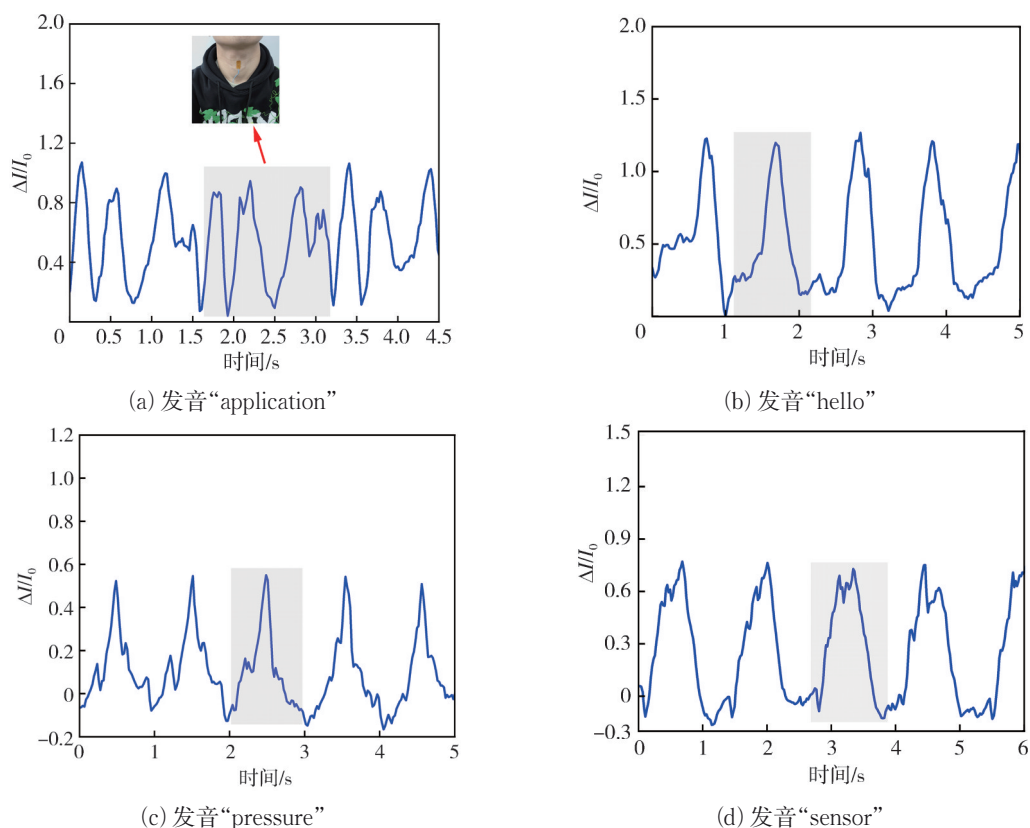


图10 声带运动检测实验结果

Fig. 10 Experimental results of vocal cord motion detection

3 结论

本文通过离子插层和薄膜内强烈化学反应的

方法,扩大了MXene纳米片的层间间距,使得致密的MXene/PEDOT:PSS薄膜有序展开为多孔网络结构薄膜,从而制备了一种新型多孔结构压

敏层。实验结果表明,该多孔结构柔性压力传感器展现出极其优异的灵敏度性能, $S_1=12.808 \text{ kPa}^{-1}$ ($0.01\sim12.240 \text{ kPa}$), $S_2=0.397 \text{ kPa}^{-1}$ ($12.240\sim93.593 \text{ kPa}$), 良好的响应时间(64 ms)/恢复时间(83 ms)以及重复性($4\ 000$ 次)。此外,该柔性压力传感器可以准确检测并识别不同单词引起的声部运动以及肢体运动。因此,具有多孔结构的 MXene/PEDOT:PSS 柔性压力传感器在语音识别、运动监测等健康管理领域的实际应用提供了重要技术支撑。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 宿荣芳, 文心仪, 王俊, 等. 智能可穿戴柔性压力传感器的研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(8): 98-108.
SU Rongfang, WEN Xinyi, WANG Jun, et al. Research progress of intelligent wearable flexible pressure sensor [J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(8): 98-108. (in Chinese)
- [2] 舒霞云, 周智, 张墙. MXene 柔性压力传感器的制备与性能[J]. 微纳电子技术, 2023, 60(7): 1070-1076.
SHU Xiayun, ZHOU Zhi, ZHANG Qiang. Preparation and performance of MXene flexible pressure sensor [J]. Micronanoelectronic Technology, 2023, 60(7): 1070-1076. (in Chinese)
- [3] 刘庆华, 李丽. 压阻式柔性压力传感器的研究进展[J]. 安徽化工, 2025, 51(1): 1-6.
LIU Qinghua, LI Li. Research progress of piezoresistive flexible pressure sensor [J]. Anhui Chemical Industry, 2025, 51(1): 1-6. (in Chinese)
- [4] 田玉玉, 何韧, 吴菊英, 等. 电容式柔性压力传感器的性能优化原理及研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(16): 13-26.
TIAN Yuyu, HE Ren, WU Juying, et al. Capacitive flexible pressure sensor: optimization principle and research progress [J]. Materials Reports, 2023, 37(16): 13-26. (in Chinese)
- [5] 房翔敏, 曲丽君, 田明伟. 绒面织物基摩擦电式压力传感器的制备及其应用[J]. 现代纺织技术, 2023, 31(4): 183-191.
FANG Xiangmin, QU Lijun, TIAN Mingwei. Fabrication and wearable application of fleece fabric-based triboelectric pressure sensors [J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31(4): 183-191. (in Chinese)
- [6] 王桂从, 孟令源, 李映君, 等. 高频动态压电式压力传感器结构设计与实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(6): 203-214.
WANG Guicong, MENG Lingyuan, LI Yingjun, et al. Structural design and experimental study of high frequency dynamic piezoelectric pressure sensor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(6): 203-214. (in Chinese)
- [7] LI T T, LI Z W, HAO Y F, et al. Ultrasensitive stretchable patches for joint motion monitoring [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2024, 15(3): 285-291.
- [8] 尹建宇, 刘逆霜, 高义华. MXene 在压力传感中的研究进展[J]. 无机材料学报, 2024, 39(2): 179-185.
YIN Jianyu, LIU Nishuang, GAO Yihua. Recent progress of MXene in pressure sensing [J]. Journal of Inorganic Materials, 2024, 39(2): 179-185. (in Chinese)
- [9] LIU M, LIU X, YANG F. Flexible and washable MXene@PEDOT:PSS@CS@PU pressure sensors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 378: 115810.
- [10] WEI C, XU Y, HU Y, et al. Ti3C2Tx MXene paper-based flexible wearable pressure sensor with wide pressure detection range for human motion detection [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1017: 179126.
- [11] 钟山, 贾磊, 李晓春, 等. 基于 MXene/PEDOT:PSS 柔性压力传感器的制备及其在唇语识别中的应用[J]. 复合材料学报, 2025, 42(1): 374-385.
ZHONG Shan, JIA Lei, LI Xiaochun, et al. Preparation of flexible pressure sensor based on MXene/PEDOT:PSS and its application in lip language recognition [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(1): 374-385. (in Chinese)
- [12] 汪海船, 毛沛楠, 吕宏伟, 等. 基于多孔 PDMS/MWCNTs 的柔性压力传感器[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(4): 70-72.
WANG Haichuan, MAO Peinan, LÜ Hongwei, et al. Flexible pressure sensor based on porous PDMS/MWCNTs [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(4): 70-72. (in Chinese)
- [13] 李玲, 岳凤英, 乔霖, 等. 基于多孔 PDMS 薄膜介电层的柔性压力传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2019(4): 15-19.

- LI Ling, YUE Fengying, QIAO Lin, et al. Flexible pressure sensor based on dielectric layer of porous PDMS thin film [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(4): 15-19. (in Chinese)
- [14] 孙翰轩, 陈盛华, 徐策, 等. 具有多孔双微结构层的柔性电容式压力传感器[J]. *微纳电子技术*, 2024, 61(4): 111-119.
- SUN Hanxuan, CHEN Shenghua, XU Ce, et al. Flexible capacitive pressure sensors with porous double-microstructure layers [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2024, 61(4): 111-119. (in Chinese)
- [15] 宋锐, 罗海军, 王雪. 用于人体运动监测的微球结构柔性压力传感器[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(8): 83-86.
- SONG Rui, LUO Haijun, WANG Xue. Microsphere-structure flexible pressure sensor for human motion monitoring [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(8): 83-86. (in Chinese)
- [16] 孙士斌, 钱磊, 王培力, 等. 基于磁控溅射技术的微结构柔性压力传感器[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(9): 104-107.
- SUN Shibin, QIAN Lei, WANG Peili, et al. Micro-structure flexible pressure sensor based on magnetron sputtering technology [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(9): 104-107. (in Chinese)
- [17] 吴其皓, 廖鹏飞, 茅寅, 等. 高灵敏度电容式柔性压力传感器的设计与优化[J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(4): 107-110.
- WU Qihao, LIAO Pengfei, MAO Yin, et al. Design and optimization of high sensitive capacitive flexible pressure sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(4): 107-110. (in Chinese)
- [18] 程丽霞, 郝晓剑, 王任鑫, 等. 基于PDMS-石墨烯泡沫的柔性压力传感器[J]. *微纳电子技术*, 2021, 58(5): 397-402.
- CHENG Lixia, HAO Xiaojian, WANG Renxin, et al. Flexible pressure sensor based on PDMS-graphene foam [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2021, 58(5): 397-402. (in Chinese)
- [19] WU J, QIN C, SUN Q, et al. Accordion-inspired flexible pressure sensor based on folded interdigital electrode [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(3): 4290-4297.
- [20] WANG X, LU Y, JIANG J, et al. A flexible piezoelectric PVDF/MXene pressure sensor for roughness discrimination [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(5): 7176-7184.
- [21] WEI W, WANG J, ZHANG X, et al. 3D printing for capacitive flexible pressure sensors of small pressure high sensitivity with microdome-labyrinth structure [J]. *Smart Materials and Structures*, 2025, 34(1): 015012.