

MXene–PEDOT:PSS修饰PDMS多孔弹性体高灵敏度柔性压阻传感器

史菲菲 熊娟 但智钢

High sensitivity flexible piezoresistive sensor of PDMS porous elastomer decorated by MXene–PEDOT:PSS

SHI Feifei, XIONG Juan, DAN Zhigang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240009.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Flexible piezoresistive sensor and heating de-icing performance based on expanded graphite/polydimethylsiloxane composite

复合材料学报. 2021, 38(2): 461–469 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200603.002>

聚3, 4-乙炔二氧噻吩/纳米多孔金复合电极的制备及其在超级电容器中的应用

Preparation of poly 3,4-ethylenedioxythiophene/nanoporous gold composite electrode and its application in supercapacitors

复合材料学报. 2020, 37(12): 3160–3167 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200403.001>

新型三明治结构聚二甲基硅氧烷/聚偏氟乙烯-纳米Ag线/聚二甲基硅氧烷柔性应变传感器的制备与性能

Preparation and properties of a novel sandwich structure polydimethylsiloxane/polyvinylidene fluoride–Ag nanowires/polydimethylsiloxane flexible strain sensor

复合材料学报. 2020, 37(5): 1024–1032 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190923.001>

磁致链化对磁流变弹性体压阻效应的影响

Effects of particle pre-orientation via application of magnetic field on the piezoresistivity of magnetorheological elastomer

复合材料学报. 2017, 34(9): 2085–2092 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161207.003>

基于可膨胀微球/聚二甲基硅氧烷复合介电层的柔性电容式压力传感器

Flexible capacitive pressure sensor based on expandable microsphere/ polydimethylsiloxane composite dielectric layer

复合材料学报. 2021, 38(7): 2152–2161 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201110.005>

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>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240009.001

MXene-PEDOT:PSS 修饰 PDMS 多孔弹性体 高灵敏度柔性压阻传感器



分享本文

史菲菲¹, 熊娟², 但智钢^{*1}

(1. 中国环境科学研究院 环境保护生态工业重点实验室, 北京 100012; 2. 湖北大学 微电子学院, 武汉 430062)

摘要: 柔性压阻传感器在可穿戴式设备、电子皮肤、人机交互等领域有着极大的应用需求。常见的柔性压阻传感器导电敏感介质存在成本高、制备工艺复杂的问题, 限制了其实用化进程和批量化生产。本文以明胶为牺牲剂制备了具有多孔结构的聚二甲硅氧烷 (PDMS) 弹性体, 再采用浸渍法获得了聚 (3,4-亚乙基二氧噻吩): 聚 (苯乙烯磺酸盐) (PEDOT:PSS) 和 MXene 复合修饰的 PDMS 柔性压阻传感器。实验表明, 当 PEDOT:PSS 和 MXene 复合浓度分别为 15 mg/mL 和 10 mg/mL 时, 传感器灵敏度获得最大值, 在 12~40 kPa 压力范围内, 灵敏度达 29.1 kPa⁻¹。经测试, 所制备的传感器响应时间为 0.36 s, 回复时间为 0.6 s。该传感器可以检测人体关节 (手指、肘部、膝盖) 运动, 表明开发的压力传感器在智能衣物、柔性可穿戴电子设备及人机交互领域具有良好的应用前景。

关键词: MXene; PEDOT:PSS; PDMS 多孔弹性体; 高灵敏度; 压阻传感器

中图分类号: TP212; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)10-5443-07

High sensitivity flexible piezoresistive sensor of PDMS porous elastomer decorated by MXene-PEDOT:PSS

SHI Feifei¹, XIONG Juan², DAN Zhigang^{*1}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Microelectronics, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: Flexible piezoresistive sensors have great application demands in wearable devices, electronic skins, man-computer interaction, and other fields. The common conductive sensitive media of flexible piezoresistive sensors suffer from high cost and complex preparation processes, which limit their practical application and mass production. A porous polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer was prepared using gelatin as a sacrificial agent, and a MXene-poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS)/PDMS composite piezoresistive sensor was obtained by impregnation method. Experimental results demonstrated that when the composite concentrations of PEDOT:PSS and MXene are 15 mg/mL and 10 mg/mL, respectively, the sensor has the highest sensitivity, reaching up to 29.1 kPa⁻¹ under the force range of 12-40 kPa. The response and recovery time of the piezoresistive sensor are 0.36 s and 0.6 s, respectively. After verification, the sensor can detect the movement of human joints (finger, elbow and knee), indicating that the developed piezoresistive sensor exhibits good application prospects in the fields of smart clothing, flexible wearable electronic devices, and human-computer interaction.

Keywords: MXene; PEDOT:PSS; PDMS porous elastomer; high sensitivity; piezoresistive sensor

收稿日期: 2023-11-10; 修回日期: 2023-12-08; 录用日期: 2024-01-03; 网络首发时间: 2024-01-09 19:16:00

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240009.001>

基金项目: 中国环境科学研究院国家环境保护生态工业重点实验室开放基金 (2022KFF-08); 湖北省自然科学基金项目 (2022CFB518)

Open Research Fund of State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences (2022KFF-08); Hubei Provincial Natural Science Foundation Project (2022CFB518)

通信作者: 但智钢, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为工业固废处理与资源化 E-mail: dash_2001@163.com

引用格式: 史菲菲, 熊娟, 但智钢. MXene-PEDOT:PSS 修饰 PDMS 多孔弹性体高灵敏度柔性压阻传感器 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(10): 5443-5449.

SHI Feifei, XIONG Juan, DAN Zhigang. High sensitivity flexible piezoresistive sensor of PDMS porous elastomer decorated by MXene-PEDOT:PSS[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(10): 5443-5449(in Chinese).

随着人们生活信息化、智能化的发展趋势,可穿戴设备、电子皮肤、人机交互等领域对柔性传感器的需求不断增加。柔性压阻式压力传感器基于压阻效应,在外力作用下使其中的敏感材料发生变形,并间接改变内部导电材料的分布和接触状态,使敏感材料的电阻值发生有规律的变化,具有结构简单、制备成本低、易操作等优点^[1-2]。在柔性压阻式压力传感器中,需要具有导电性的敏感材料与具有高柔韧性的基体材料。基体材料的选择直接影响传感器的可拉伸性、柔韧性和耐久性。常用作柔性压阻传感器的基体材料有聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚氨酯弹性体橡胶(TPU)、聚酰亚胺(PI)、对苯二甲酸与乙二醇缩聚物(PET)等^[3-4]。其中PDMS具有良好的柔韧性、可拉伸性、防水性、可固化性及生物相容性被广泛应用于柔性压阻传感器领域。为提高传感器的灵敏度、缩短响应时间,研究人员通过光刻、湿法刻蚀等工艺构建金字塔、圆柱状、波浪状、锯齿状等微结构^[5-7],然而这些结构需要光刻机等精密的仪器,具有一定的制造难度和制造成本。

柔性压阻传感器中导电敏感材料是柔性压阻传感器的核心,比较典型的导电敏感材料主要包括:碳基材料(碳纳米管、石墨烯及其复合材料)和金属纳米材料(金属纳米颗粒、金属纳米线及其复合材料)^[8-10]。然而基于金属纳米材料的压阻传感器通常需要贵金属作为原料,存在成本高、制备工艺复杂的问题,且传感器的拉伸性有限。而基于碳基的敏感材料通常选用碳纳米管和石墨烯,其制备较复杂且成本较高,限制了其在工业机器人、医疗器械等领域中的实用化进程和批量化生产。聚(3,4-亚乙基二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)由带正电的导电共轭基团PEDOT连接带负电的绝缘分子链PSS,电导率高、生物相容性好,并具有较好的稳定性和耐湿性,因此常被选作柔性电极材料应用于各种传感器的研发^[11-12]。作为一种新型层状结构的二维过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物(MXene),其导电性可与金属相媲美,在外界压力作用下,MXene内部层间距的变化使其导电性也相应发生改变,因此基于MXene的压力传感器可望获得较高的灵敏度,近年来受到人们广泛关注^[13-14]。

本文以明胶为牺牲剂制备了具有多孔结构的PDMS弹性体,以MXene和PEDOT:PSS为导电敏感材料,采用浸渍法获得了MXene-PEDOT:PSS/

PDMS复合压阻传感器。该传感器在12~40 kPa范围作用力下,灵敏度达 29.1 kPa^{-1} ,响应时间为0.36 s,回复时间为0.6 s。将其用于检测人体关节(手指、肘部、膝盖)运动时,表现出良好的压力敏感特性,以上表明MXene-PEDOT:PSS/PDMS压阻传感器在柔性电子、人机交互领域具有良好的应用前景。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

聚二甲基硅氧烷(PDMS, SYLGARD184, 道康宁);明胶(化学纯,国药试剂);聚(3,4-亚乙基二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS, 西安宝莱特光电科技有限公司);MXene, 苏州北科纳米科技有限公司。

1.2 PDMS弹性体的制备

本文采用牺牲模板法制备多孔PDMS弹性体。实验分别称取2.25 g明胶和1.5 g PDMS溶液,将其搅拌至均匀混合。再称取0.15 g PDMS专用固化剂加入上述溶液中,充分搅拌后放入真空干燥箱以去除气泡。将上述溶液倒至模具中并放入电热恒温鼓风干燥箱60℃恒温加热4 h后取出,再放入90℃热水中持续加热并搅拌,直至明胶/PDMS弹性复合体中的明胶完全溶解,得到白色的多孔PDMS弹性体。将其裁切为2 cm×2 cm×1 cm的立方块,用去离子水冲洗干净,烘干待用。

1.3 PEDOT:PSS/PDMS多孔柔性压阻传感器的制备

对PDMS多孔弹性体进行等离子体处理(功率150 W,时间2 min),将处理后的PDMS多孔弹性体浸泡在不同浓度的PEDOT:PSS水溶液中搅拌5 min后取出,用镊子挤出多余的溶液,再放入管式炉中进行150℃、1 h退火处理、待冷却至室温后,在弹性体上下表面用铜电极封装得到PEDOT:PSS/PDMS多孔柔性压阻传感器。

1.4 MXene-PEDOT:PSS/PDMS多孔柔性压阻传感器的制备

将PEDOT:PSS/PDMS多孔弹性体浸泡在不同浓度MXene溶液中,搅拌15 min后取出,用镊子挤出多余溶液后放入干燥箱中,40℃下保温2 h烘干,然后上下表面用铜电极封装得到MXene-PEDOT:PSS/PDMS多孔柔性压阻传感器。

1.5 测试与表征

对样品喷金处理后用JSM-7100F场发射扫描电子显微镜(捷欧路)观察形貌,采用D8 Advance

X 射线衍射仪(布鲁克)进行结构分析。采用吉时利数字源表和旋转推拉测试仪(爱德堡)测试柔性压阻传感器的压力敏感特性。实验将 Keithley 2611 源表、直流电源与传感器用导线串联形成回路,在固定直流电压(5 V)输出下,用 Keithley 2611 源表记录样品在不同压强作用下传感器的电流变化率。

2 结果与讨论

2.1 PEDOT:PSS/PDMS 及MXene-PEDOT:PSS/PDMS 多孔弹性体的形貌结构

图 1 为负载不同浓度 PEDOT:PSS 后多孔 PDMS 弹性体内部的 SEM 图像。从图 1(a)中可以看出没有负载 PEDOT:PSS 的 PDMS 基体为多孔结构,孔壁上较光滑。负载 1 mg/mL PEDOT:PSS 后 PDMS 内壁出现片层状结构(图 1(b)),但由于浓度较低,PEDOT:PSS 在 PDMS 内壁分布不均匀。随着浓度的增加,片层状区域逐渐增大,当浓度增加至 5 mg/mL 时(图 1(d)),PDMS 内壁被 PEDOT:PSS 薄膜覆盖;继续增加浓度后,PEDOT:PSS 薄膜在 PDMS 内壁呈褶皱状结构。

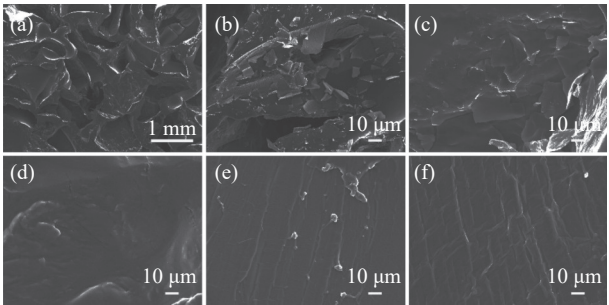


图 1 负载不同浓度聚(3,4-亚乙基二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)的 PEDOT:PSS/聚二甲基硅氧烷(PDMS)弹性体 SEM 图像: (a) 0 mg/mL; (b) 1 mg/mL; (c) 3 mg/mL; (d) 5 mg/mL; (e) 10 mg/mL; (f) 15 mg/mL

Fig. 1 SEM images of PEDOT:PSS/polydimethylsiloxane (PDMS) porous elastomer after loading different concentrations of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS): (a) 0 mg/mL; (b) 1 mg/mL; (c) 3 mg/mL; (d) 5 mg/mL; (e) 10 mg/mL; (f) 15 mg/mL

图 2 为负载不同浓度 MXene 后 PDMS 多孔弹性体内部 SEM 图像。从图 2(a)可以看到未负载 MXene 前, PEDOT:PSS/PDMS 复合压阻传感器内部保持良好的褶皱状结构。图 2(b)~2(f) 分别为负载 1~15 mg/mL MXene 溶液的 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 弹性体内部 SEM 图像。如图 2(b) 及图中标记区域所示,当 MXene 浓度较低时,PDMS 内壁

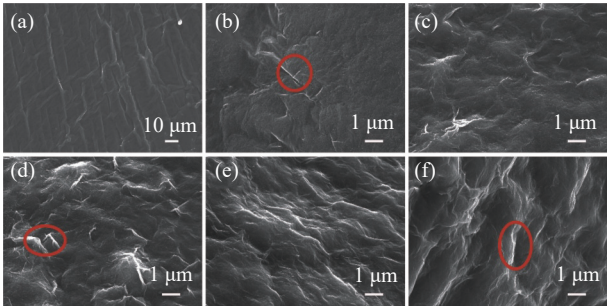


图 2 负载不同浓度 MXene 的 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 弹性体 SEM 图像: (a) 0 mg/mL; (b) 1 mg/mL; (c) 3 mg/mL; (d) 5 mg/mL; (e) 10 mg/mL; (f) 15 mg/mL

Fig. 2 SEM images of MXene-PEDOT:PSS/PDMS porous elastomer after loading different concentrations of MXene: (a) 0 mg/mL; (b) 1 mg/mL; (c) 3 mg/mL; (d) 5 mg/mL; (e) 10 mg/mL; (f) 15 mg/mL

有少量片层状 MXene 附着。随着 MXene 浓度的增加,PDMS 多孔结构内部 MXene 的附着量逐渐增多,孔内壁 MXene 附着厚度也相应增加。

图 3 为 3 种结构 PDMS 多孔弹性体的 XRD 图谱。从图中可以看出,多孔 PDMS 弹性体在 $2\theta=21.7^\circ$ 处出现一个宽特征峰,该特征峰对应于硅橡胶的无定形态^[15]。PEDOT:PSS/PDMS 复合样品在 $2\theta=13.1^\circ$ 时出现的衍射峰,对应于 PEDOT:PSS 的 (200) 晶面^[16],表明 PEDOT:PSS 已经成功附着在多孔 PDMS 弹性体内壁上。而 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 复合样品中出现了 3 个衍射峰,除 13.1° 处对应于 PEDOT:PSS 导电聚合物 (200) 晶面的衍射峰外,还出现了 6.3° 处的衍射峰,其对应于 MXene 材料的 (002) 晶面,表明实验成功在 PEDOT:PSS/PDMS 多孔结构中引入了 MXene^[17]。

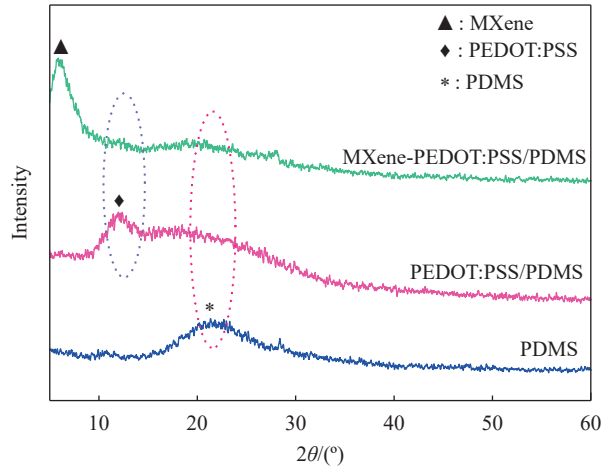


图 3 多孔 PDMS 弹性体、PEDOT:PSS/PDMS 及 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 复合样品的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of PDMS porous elastomer, PEDOT:PSS/PDMS and MXene-PEDOT:PSS/PDMS composited samples

2.2 PEDOT:PSS/PDMS 及MXene-PEDOT:PSS/PDMS 传感器性能表征

灵敏度是评估压阻传感器性能的一个重要指标，它决定了传感器对外力作用的响应程度，也在很大程度上直接影响传感器的实际应用价值。压阻传感器的灵敏度 (*S*) 由下式计算得到：

$$S = \frac{\Delta I/I_0}{\Delta P} = \frac{(I - I_0)/I_0}{\Delta P}$$
 (1)

式中：*I*₀ 和 *I* 表示传感器的初始电流和实时电流；Δ*P* 表示施加在传感器上的外界压力。

图 4 为负载不同浓度 PEDOT:PSS 的 PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器的电流变化率-压强曲线。从图中可以看出压阻传感器对 0~56 kPa 范围内的响应特性可以分为 3 个线性区间。实验发现随着 PEDOT:PSS 浓度的增加，传感器的灵敏度不断增大。PEDOT:PSS 浓度为 15 mg/mL 时，传感器的压阻敏感性能最好，传感器在 3 个线性区间的灵敏度都达到了最大值。在 0~12 kPa 区间内，传感器的灵敏度为 10.20 kPa⁻¹，在 12~40 kPa 和 40~56 kPa 区间范围内，压阻传感器的灵敏度分别为 6.96 kPa⁻¹ 和 3.73 kPa⁻¹。在这 3 个线性区间内，随着作用力的增大，传感器灵敏度呈现减小的趋势。这可能是 PEDOT:PSS 在 PDMS 多孔结构中分布不均匀，随着外部压强的不断增大，部分 PEDOT:PSS 薄膜从 PDMS 孔壁脱落，因此内部导电通路变少，从而导致传感器灵敏度减小。

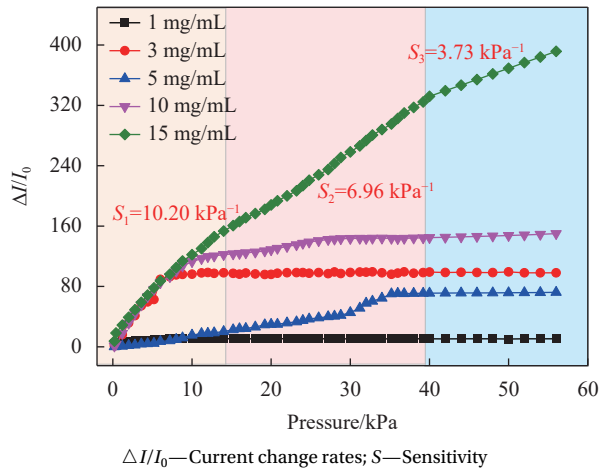


图 4 PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器电流变化率-压强曲线
Fig. 4 Current change rates vs pressure of PEDOT:PSS/PDMS piezoresistive sensor

图 5 为负载不同 MXene 浓度 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器的电流变化率-压强曲线。从图中可以看到，相比于 PEDOT:PSS/PDMS 传感

器，MXene-PEDOT:PSS/PDMS 传感器在 3 个线性区间其灵敏度都得到显著提升。当 MXene 的负载浓度为 10 mg/mL 时，传感器在 3 个区间的灵敏度均最大。在 0~12 kPa 区间内传感器的灵敏度为 14.4 kPa⁻¹，在 12~40 kPa 作用力范围内，灵敏度最大，达到 29.1 kPa⁻¹。这是由于 MXene-PEDOT:PSS 复合导电层为随机分布的层状结构，整体呈现高度不平的粗糙表面。在此阶段，随着压强的逐渐增大，其三维多孔骨架结构中导电层的接触最充分，从而灵敏度达到最大值。而传感器在 40~56 kPa 区间内的灵敏度有所下降，为 20.3 kPa⁻¹，这是由于随着压强的进一步增大，PDMS 中的孔隙变形范围不断缩小，样品中导电通路变化不大，电流变化量基本达到饱和，因此传感器的灵敏度变小。

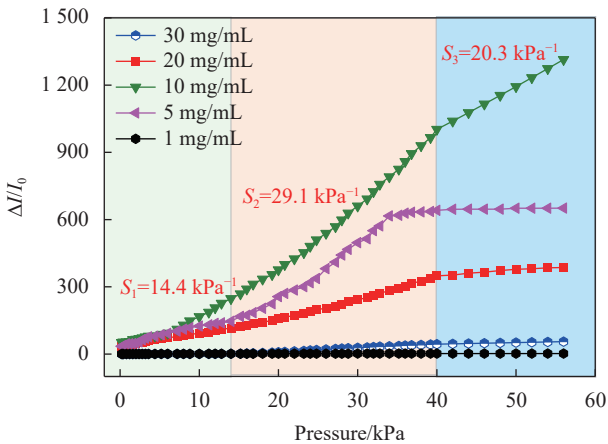


图 5 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器电流变化率-压强曲线
Fig. 5 Current change rates vs pressure of MXene-PEDOT:PSS/PDMS piezoresistive sensor

图 6(a) 是 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器在 0.2~52 kPa 作用力下的电流-电压特性曲线，从图中可以看出，随着外加电压的增大，流过传感器的电流也不断增大，表明传感器具有良好的线性电阻特性。传感器在 12~48 kPa 压强下的电流变化率随时间变化如图 6(b) 所示，对传感器施加 3 次 12~48 kPa 压强时，传感器的电流变化率基本保持稳定，分别在 100、200、300 和 400 左右，反映了传感器的电流响应特性呈线性增加，表明传感器具有较好的线性度。图 6(c) 测试了传感器在 0~44 kPa 压强作用下电流变化率随时间变化曲线，结果表明传感器在不同压强下能迅速响应并产生较稳定的电流变化率，说明传感器具有较宽的压力检测范围和实时快速响应能力。图 6(d) 为

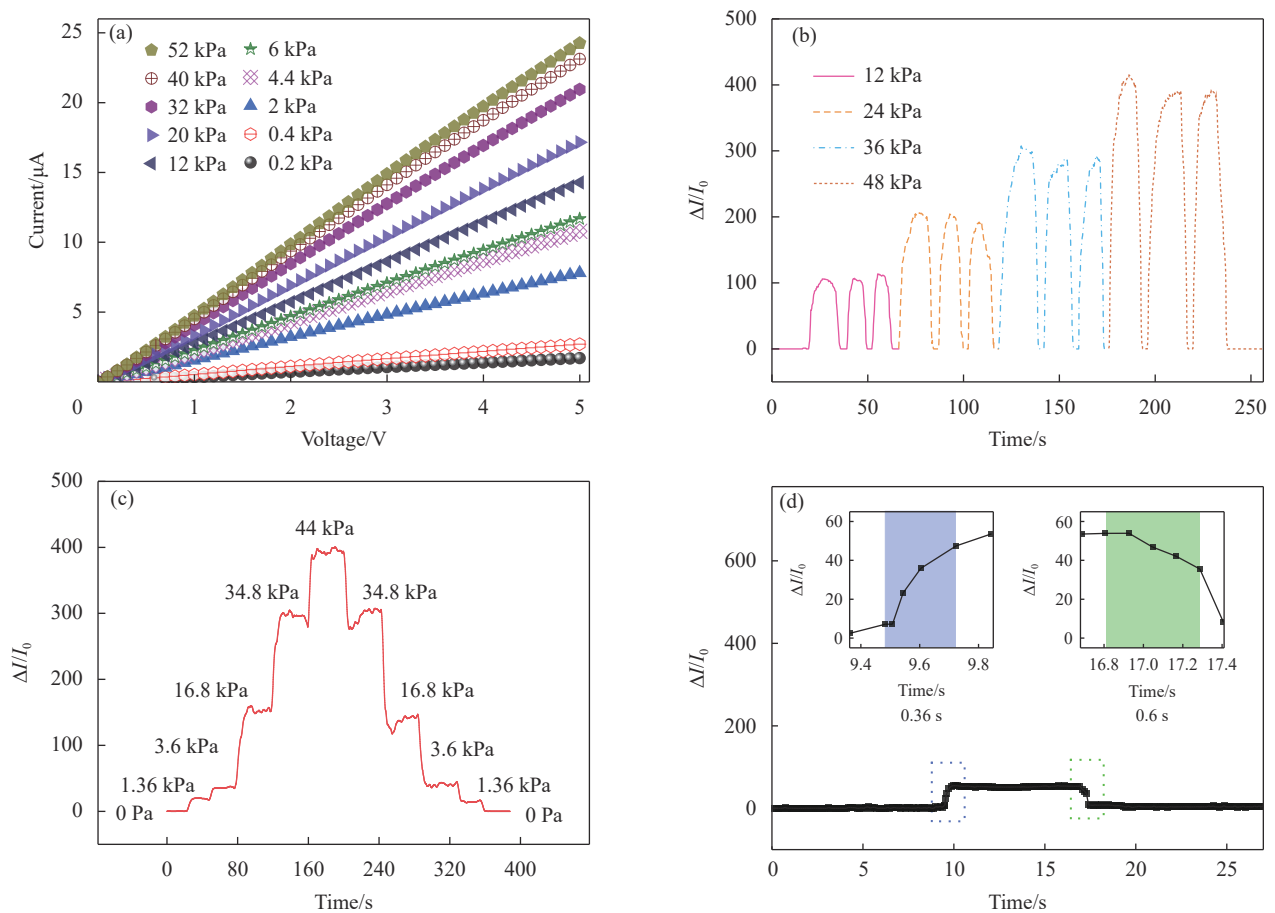


图 6 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器: (a) 电流-电压曲线; 12~48 kPa (b) 及 0~44 kPa (c) 范围内电流变化率随时间变化曲线; (d) 响应与回复曲线

Fig. 6 MXene-PEDOT:PSS/PDMS piezoresistive sensor: (a) Current-voltage curves; Current change rates vs time of 12-48 kPa (b) and 0-44 kPa (c); (d) Response and recovery curves

传感器在 400 Pa 压力作用下的响应与回复时间,从图中可以看出,传感器的响应/回复时间分别为 0.36 s 和 0.6 s,表明该传感器能较快的响应和回复速度。

与文献 [18-22] 报道的柔性压阻式压力传感器

相比 (表 1), 实验所制备的 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 柔性多孔压阻传感器具有更高的灵敏度,表明该柔性压阻传感器在高灵敏度人机交互、人工智能等柔性电子技术领域具有零号的应用前景。

表 1 柔性压阻式压力传感器性能比较

Table 1 Performance comparison of flexible piezoresistive sensor

Material	Detection range/kPa	Sensitivity/kPa ⁻¹	Response/recovery time/ms	Ref.
PDMS@MWCNTs/PP	2-7	16.6	74/64	[18]
MXene@PDMS	0-40	1.96	40/40	[19]
CNT/PDMS	0-9.2	5.1	54/65	[20]
MXene/NWF	15-150	6.31	300/260	[21]
PANI/BC/CH	0-0.3	1.41	>1 000	[22]
MXene-PEDOT:PSS/PDMS	0-12	14.4	360/600	This work

Notes: PP—Polypropylene; MWCNT—Multiwall carbon nanotube; CNT—Carbon nanotube; NWF—Nonwoven fabric; PANI/BC/CH—Polyaniline/bacterial cellulose/chitosan.

2.3 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器应用测试

实验将所制备的 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压

阻传感器固定在人体关节处,通过检测传感器的电流变化率来监测关节的弯曲运动,结果如图 7

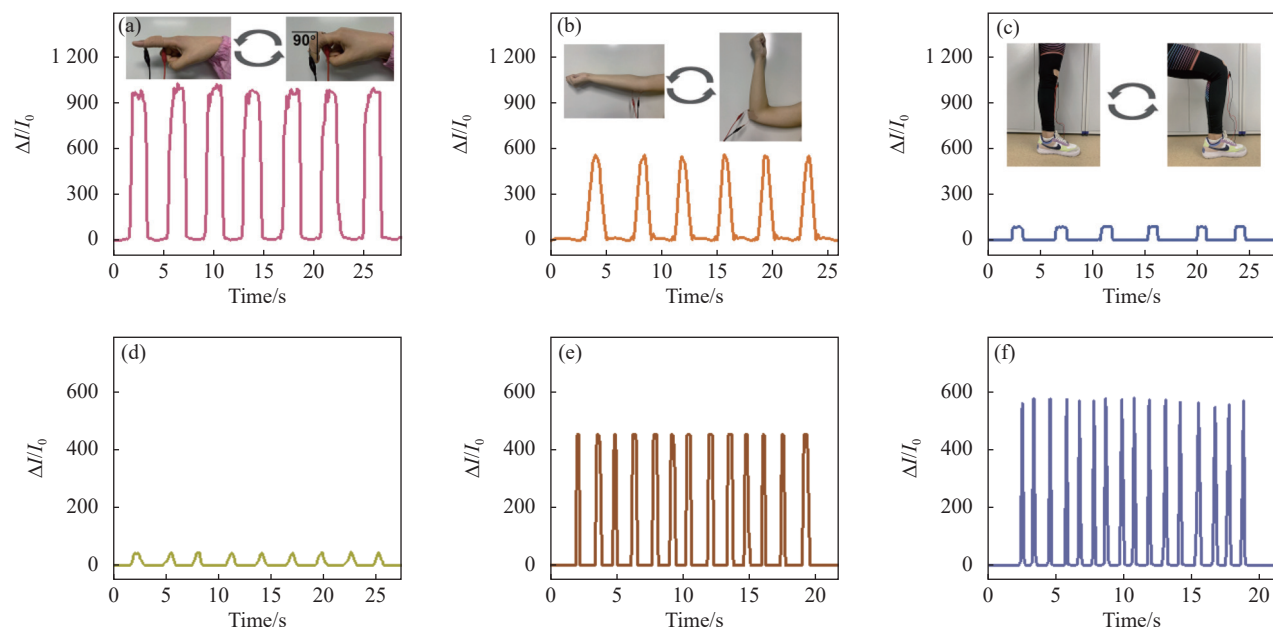


图7 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器的应用: 手指弯曲(a)、肘部弯曲(b)、膝盖弯曲(c)、走(d)、跑(e)、跳(f)运动状态的响应曲线

Fig. 7 Application of MXene-PEDOT:PSS/PDM piezoresistive sensor: Response curves of finger bending (a), elbow bending (b), knee bending (c), walking (d), running (e) and jumping (f)

所示。当将传感器放置在手指关节处, 被测者手指关节弯曲约 90° 时, 传感器的电流变化率如图 7(a) 所示, 传感器的电流变化率可达 900。图 7(b) 为传感器监测肘部弯曲时的电流变化率曲线, 当手肘弯曲 90° 时, 传感器的电流变化率约为 580, 当手肘伸直时, PDMS 弹性体回复初试状态, 传感器电流值基本不变。如图 7(c) 所示, 当传感器固定在膝盖处, 膝盖从 0° 弯曲到 90° 时, 传感器的电流变化率值约为 80, 在经过 6 次弯曲-伸直的循环测试后, 传感器对该动作的响应特性曲线基本保持不变。在图 7(d)~7(f) 中, MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器被用来实时监测人体行走、跑步、跳跃动作, 测试结果发现在行走时, 传感器的电流变化率约为 50, 且经过多次循环测试后电流变化率表现出良好的稳定性。跑步时传感器的电流变化率数值由 50 增加到 450, 而在跳跃时, 由于运动幅度的进一步增强, 传感器的电流变化率不断增大, 传感器的电流变化率达到 570。上述结果表明, MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器能够监测和识别人体的关节和肢体活动, 显示其在运动监测和医疗健康等领域具有良好的应用潜力。

3 结论

(1) 以明胶为牺牲剂获得了具有多孔结构的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 弹性体, 再采用浸渍法制

备了 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 柔性压阻传感器。分析了聚 (3,4-亚乙基二氧噻吩): 聚 (苯乙烯磺酸盐) (PEDOT:PSS) 及 MXene 复合浓度对压阻传感器灵敏度的影响。

(2) 结果表明, 当 PEDOT:PSS 复合浓度为 15 mg/mL 时, PEDOT:PSS/PDMS 传感器的灵敏度最大。实验进一步在多孔 PEDOT:PSS/PDMS 中加入导电性能更好的二维材料 MXene, 测试结果表明, 加入不同浓度 MXene 后, 传感器的灵敏度得到显著提升。当 MXene 复合浓度为 10 mg/mL 时, 传感器的灵敏度达到了最大值。在 $0\sim 12 \text{ kPa}$ 、 $12\sim 40 \text{ kPa}$ 和 $40\sim 56 \text{ kPa}$ 这 3 个区间内, 该传感器的灵敏度分别为 14.4 kPa^{-1} 、 29.1 kPa^{-1} 和 20.3 kPa^{-1} 。同时 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 传感器具有稳定的电流-电压曲线及电流响应特性, 传感器对外力作用的响应速度较快, 响应/回复时间分别为 0.36 s 和 0.6 s 。

(3) 将制备 MXene-PEDOT:PSS/PDMS 压阻传感器固定在手指、肘部和膝盖关节处, 测试人体关节弯曲不同角度时传感器的电流变化率, 结果发现传感器对关节运动呈现良好的电流响应特性, 表明该传感器在柔性可穿戴设备、人机交互等领域具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] SHI L, LI Z, CHEN M, et al. Ultrasensitive and ultraprecise

- pressure sensors for soft systems[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(10): 2210091.
- [2] QU X Y, LI J, HAN Z L, et al. Highly sensitive fiber pressure sensors over a wide pressure range enabled by resistive-capacitive hybrid response[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(15): 14904-14915.
 - [3] LIU H, LI Y L, DAI K, et al. Electrically conductive thermoplastic elastomer nanocomposites at ultralow graphene loading levels for strain sensor applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(1): 157-166.
 - [4] HUANG J R, YANG X X, LIU J T, et al. Vibration monitoring based on flexible multi-walled carbon nanotube/polydimethylsiloxane film sensor and the application on motion signal acquisition[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(33): 335504.
 - [5] ARAROMI O A, GRAULE M A, DORSEY K L, et al. Ultra-sensitive and resilient compliant strain gauges for soft machines[J]. *Nature*, 2020, 587: 219-224.
 - [6] ZHANG X Y, HU Y G, GU H, et al. A highly sensitive and cost-effective flexible pressure sensor with micropillar arrays fabricated by novel metal-assisted chemical etching for wearable electronics[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(9): 1900367.
 - [7] CHEN S, SONG Y J, XU F. Flexible and highly sensitive resistive pressure sensor based on carbonized crepe paper with corrugated structure[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(40): 34646-34654.
 - [8] ZHAO S F, RAN W H, WANG D P, et al. 3D dielectric layer enabled highly sensitive capacitive pressure sensors for wearable electronics[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(28): 32023-32030.
 - [9] CHEN M R, LUO W F, XU Z Q, et al. An ultrahigh resolution pressure sensor based on percolative metal nanoparticle arrays[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4024.
 - [10] YANG N, YIN X Y, LIU H L, et al. Dual-layer all-textile flexible pressure sensor coupled by silver nanowires with Ti_3C_2 -MXene for monitoring athletic motion during sports and transmitting information[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(36): 42992-43002.
 - [11] HAMEDI M M, CAMPBELL V E, ROTHEMUND P, et al. Electrically activated paper actuators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(15): 2446-2453.
 - [12] JIA P T, ARGUN A A, XU J W, et al. High-contrast electrochromic thin films via layer-by-layer assembly of starlike and sulfonated polyaniline[J]. *Chemistry of Materials*, 2010, 22(22): 6085-6091.
 - [13] ZHENG X H, ZHANG S L, ZHOU M J, et al. MXene functionalized, highly breathable and sensitive pressure sensors with multi-layered porous structure[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(19): 2214880.
 - [14] LIU Z R, ZHANG Y L, SONG Y X, et al. A wearable 3D pressure sensor based on electrostatic self-assembly MXene/chitosan sponge and insulating PVP spacer[J]. *Nanotechnology*, 2023, 34(45): 455502.
 - [15] CHEN Y, LIU H S, YU L, et al. Superhydrophobic modification on starch film using PDMS and ball-milled MMT coating[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 8(28): 10423-10430.
 - [16] ZHENG D Y, JIN H H, LIAO Y C, et al. Bi_2Te_3 nanowires tuning PEDOT:PSS structure for significant enhancing electrical transport property[J]. *Materials Letters*, 2023, 338: 134019.
 - [17] LU Z, WEI Y Y, DENG J J, et al. Correction to "self-cross-linked MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) membranes with good antistwelling property for monovalent metal ion exclusion"[J]. *ACS Nano*, 2023, 13(9): 10535-10544.
 - [18] LI H B, LUO R B, HU J B, et al. Self-assembled gel-assisted preparation of high-performance hydrophobic PDMS@MWCNTs/PEDOT:PSS composite aerogels for wearable piezoresistive sensors[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 182: 22-32.
 - [19] CHEN B D, ZHANG L, LI H Q, et al. Skin-inspired flexible and high-performance MXene@polydimethylsiloxane piezoresistive pressure sensor for human motion detection[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 617: 478-488.
 - [20] HE Y X, LU X S, WU D Y, et al. CNT/PDMS conductive foam-based piezoresistive sensors with low detection limits, excellent durability, and multifunctional sensing capability[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 358: 114408.
 - [21] YU Q H, SU C L, BI S Y, et al. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ @nonwoven fabric composite: Promising MXene-coated fabric for wearable piezoresistive pressure sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(7): 9632-9643.
 - [22] HUANG J Y, LI D E, ZHAO M, et al. Flexible electrically conductive biomass-based aerogels for piezoresistive pressure/strain sensors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 373: 1357-1366.