

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.002

基于 PSS 改性石墨烯的高灵敏柔性应变传感器

胡若海¹, 马渊明¹, 刘志¹, 陈贝宁¹, 刘思思¹, 杨晓明²

(1. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601; 2. 浙江欧仁新材料有限公司, 浙江 嘉善 314103)

摘要:针对裂纹结构传感器应变范围小、稳定性差的问题,文章以改性聚苯乙烯磺酸钠(PSS)、石墨烯(GNPs)和硅橡胶(silicon rubber, SR)为材料,使用丝网印刷工艺制备一种具有双层裂纹结构的高灵敏电阻式柔性应变传感器。首先阐述该传感器制备流程,并对改性聚苯乙烯磺酸钠进行化学表征;然后分析传感器不同结构的导电机理并仿真得到双层裂纹结构的工作原理;最后对传感器的静动态特性进行测试。结果表明:所制备的双层裂纹结构柔性应变传感器在宽工作范围(0~85%应变)下具有超高的灵敏度(应变灵敏度系数GF值可达16 364)、快速响应时间(65 ms)以及优异的工作稳定性(>1 000次循环)。该传感器应用于人体脉搏信号检测,通过提取所得的脉搏波特征信号能够判断受试者心血管状况,表明其在可穿戴实时医疗监测领域具有良好的应用前景。

关键词:应变传感器;电阻式;裂纹;微结构;高灵敏

中图分类号:TP212.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)07-0872-07

Highly sensitive flexible strain sensor based on PSS modified graphene

HU Ruohai¹, MA Yuanming¹, LIU Zhi¹, CHEN Beining¹, LIU Sisi¹, YANG Xiaoming²

(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Zhejiang Ouren New Materials Co., Ltd., Jiahsan 314103, China)

Abstract: To address the issue of small strain range and poor stability of crack-based sensors, this paper prepared a highly sensitive resistive flexible strain sensor with a double-layer crack structure by screen printing technology using modified sodium polystyrene sulfonate(PSS), graphene nanoplatelets(GNPs), and silicone rubber(SR) as materials. Firstly, the preparation process of the sensor was described, and the modified PSS was chemically characterized. Then, the conductive mechanism of the different structures of the sensor was analyzed, and the working principle of the double-layer crack structure was simulated. Finally, the static and dynamic characteristics of the sensor were tested. The results show that the prepared flexible strain sensor with double-layer crack structure has ultra-high sensitivity(gauge factor up to 16 364), fast response(65 ms) and excellent working stability(>1 000 cycles) under a wide working range(0-85% strain). The aforementioned sensor was applied to the detection of human pulse signals. By extracting the pulse wave characteristic signals obtained, it can be used to judge the cardiovascular condition of the subjects, showing a good application prospect in the field of wearable real-time medical monitoring.

Key words: strain sensor; resistive; crack; microstructure; high sensitivity

收稿日期:2023-05-31;修回日期:2023-06-19

基金项目:浙江省“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C03052);安徽省教育厅协同创新资助项目(GXXT-2021-30)

作者简介:胡若海(2000—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

马渊明(1981—),男,江苏丹阳人,合肥工业大学讲师,通信作者,E-mail:mayuanming1981@hfut.edu.cn.

柔性传感器凭借其拉伸性好、弯曲性强、与人体皮肤契合等优势,在柔性电子皮肤^[1-2]、智能机器人^[3-4]等领域中备受关注。常见的柔性压力传感器按工作原理主要可分为电阻式^[5-6]、电容式^[7-8]、摩擦电式^[9-10]等多种类型。其中,电阻式柔性压力传感器因其简单的制备工艺、出色的响应时间等特点,在可穿戴电子、机器人触觉抓取等领域被广泛应用。

柔性电阻式传感器通常以导电复合材料制成的薄膜作为敏感层,但此类传感器的灵敏度很低^[11]。为了提高传感器使用过程中的灵敏度,有关学者常在传感器中引入微结构。文献^[12]基于发面原理将碳酸氢铵加入聚二甲基硅氧烷(PDMS),通过加热挥发得到高密度孔状 PDMS 海绵,证明了具有多孔结构的传感器灵敏度比无微结构的传感器灵敏度高 3 倍以上;文献^[13]基于光刻工艺以聚乙烯醇和磷酸(H_3PO_4)为原料制作了基于毛发状微结构的高灵敏柔性应变传感器,在 0~4 kPa 范围内实现了 $2\ 296\ kPa^{-1}$ 的超高灵敏度;文献^[14]设计了一款 Ag-碳纳米管(CNT)复合 PDMS 的电阻式裂纹传感器,通过优化 CNT 的组成和 Ag 层的厚度达到了较高的灵敏度,应变灵敏度系数(gauge factor, GF)可达 108 241.7,成功测量了心肌细胞的收缩性;文献^[15]制造了一款具有分层裂纹结构的金/石墨烯复合薄膜可拉伸应变传感器,具有 GF 为 153 的超高灵敏度及 $R^2 \approx 0.9975$ 的良好线性度,可用于人体运动监测。合适的微结构可以提升传感器的灵敏度,当传感器采用裂纹结构时表现出比其他微结构更高的灵敏度。裂纹结构虽然提高了器件灵敏度,但传统单应变层裂纹结构的应变范围过小,限制了传感器的应用场景,此外由裂纹形成的碎片状敏感层容易脱落,导致器件信号发生改变甚至无法工作。因此,保持裂纹结构高灵敏度并提高传感器应变范围和稳定性是一个关键问题。

本文使用 3-氨丙基三甲氧基硅烷(APTMS)在聚(4-苯乙烯)磺酸钠(PSS)的末端接枝三甲氧基硅烷制成改性 PSS(MOPSS),并与石墨烯(GNPs)、硅橡胶(silicon rubber, SR)混合得到能够均匀分散的 GNPs/MOPSS 和 GNPs/MOPSS/SR 导电浆料,同时使用丝网印刷工艺制作了有裂纹结构的双层柔性应变传感器,该传感器具有超高的灵敏度(GF 可达 16 364)、宽应变范围(0~85%应变)、快速响应时间(65 ms)和优异的

重复性($>1\ 000$ 次循环)。将该传感器用于脉搏信号检测,通过提取正常人群和高血压人群的脉搏波信号并分析特征信号,能够判断受试者的心血管情况。

1 电阻式传感单元研制

1.1 传感器制备流程

电阻式柔性应变传感器的制备流程如图 1 所示。将 1.25 mL 2-溴-2-甲基丙酰溴(BMPB)和 0.5 g APTMS 混合,并通过引入催化剂使两者产生酯化反应^[16],生成溴化的 APTMS(APTMS-Br);将 100 mg APTMS-Br 和 700 mg 苯乙烯磺酸钠(SSS)混合后加入甲醇溶液,在 N_2 和催化剂的作用下发生原子转移自由基聚合^[17]生成 MOPSS。将 GNPs、MOPSS 和去离子水按 3 : 3 : 250 的质量比混合,超声分散 30 min,获得 GNPs/MOPSS 溶液。

向 10 mL GNPs/MOPSS 溶液中加入 1.82 g SR,搅拌 30 min 制成 GNPs/MOPSS/SR 浆料,通过丝网印刷工艺将其印刷在 SR 薄膜上,干燥 4 h 后形成 GNPs/MOPSS/SR 层。将 20 mL GNPs/MOPSS 溶液放在磁力搅拌台上 $8\ ^\circ C$ 加热搅拌 1.5 h,制成 GNPs/MOPSS 浆料。将 GNPs/MOPSS 浆料丝网印刷在 GNPs/MOPSS/SR 层上,室温干燥 15 min,制成 GNPs/MOPSS 层。使用导电银浆和导电铜片制作传感器的电极,再使用 SR 对传感器进行封装。最后使用拉力机对传感器进行循环预拉伸,完成传感器的制备。

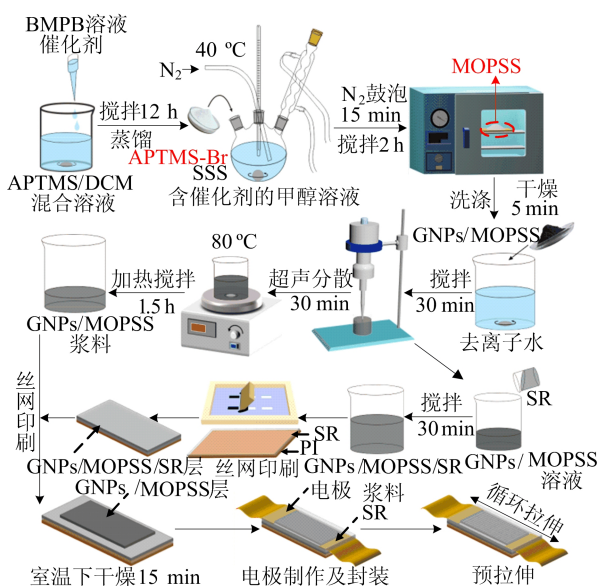


图 1 电阻式柔性应变传感器制备流程

1.2 材料化学特性表征

本文以 SR 为弹性材料,GNPs 为导电填料,使用 MOPSS 对 GNP 进行修饰并与 SR 互连。MOPSS 上 PSS 链的苯环通过 $\pi\pi$ 相互作用与 GNP 相连,并依靠链长产生的空间位阻减小 GNP 之间的团聚^[18]。MOPSS 末端的三甲氧基硅烷能够与 SR 之间发生脱水缩合反应,从而增强 GNP 在 SR 基体中的分散性以及 GNP 薄膜与 SR 基底的界面结合力。

为验证 APTMS 对 PSS 的改性效果,本文对 PSS 和 MOPSS 进行傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared, FTIR)测试。PSS 和 MOPSS 在波数为 $500\sim 1\,500\text{ cm}^{-1}$ 范围内的 FTIR 谱图如图 2 所示。

由图 2 可知,相较于 PSS,改性后的 MOPSS 的吸收谱内还存在 $1\,320\text{ cm}^{-1}$ 的 C—N 伸缩振动吸收峰、 $1\,263\text{ cm}^{-1}$ 的 C—O 拉伸振动吸收峰、 568 cm^{-1} 的 C—Br 拉伸振动吸收峰、 $1\,114\text{ cm}^{-1}$ 的 Si—O—C 拉伸振动吸收峰、 991 cm^{-1} 的 Si—O 拉伸振动吸收峰、 $1\,235\text{ cm}^{-1}$ 的 Si—C 变角振动吸收峰以及 806 cm^{-1} 和 792 cm^{-1} 的 Si—C 拉伸振动吸收峰、 744 cm^{-1} 的 N—H 摇摆吸收峰,以上新峰的产生表明 APTMS 的三甲氧基硅烷已经成功接枝到 PSS 上。

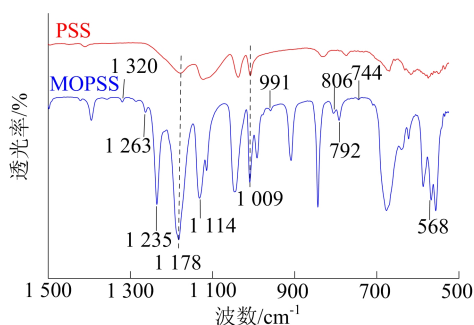


图 2 PSS 和改性材料 MOPSS 的 FTIR 谱图

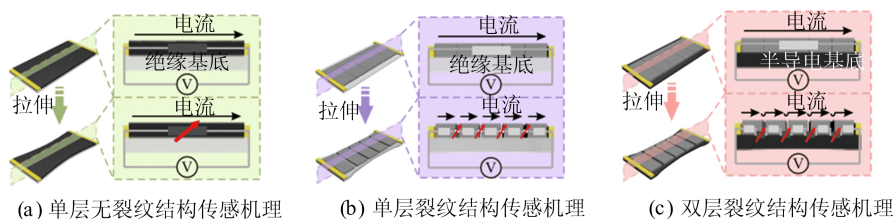


图 3 不同结构传感器的传感机理分析

双层裂纹结构传感器在未拉伸时,电流直接从上层低电阻层流过,此时传感器的初始电阻值

2 传感器结构设计及特性分析

2.1 传感器结构设计及分析

微纳结构设计能够提高传感器灵敏度,例如多孔结构、金字塔结构^[19]、拓扑设计^[20]和裂纹结构等。基于裂纹结构的传感器具有比其他微纳结构传感器更高的灵敏度,且制备工艺较为简单。但单一的裂纹结构会导致器件应变范围过低,且在使用过程中容易发生层间滑移导致器件损坏。为了提高裂纹结构传感器的工作范围以及工作稳定性,本文设计了一种具有双层裂纹结构的应变传感器,通过对材料的改性大幅提高传感器层间界面结合力,使传感器不仅具有高灵敏度、较宽的工作范围,还具有很强的稳定性和重复性。

GF 一般被用于衡量应变传感器的灵敏度,其计算公式为:

$$F_G = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta L/L_0} \quad (1)$$

其中: ΔR 为传感器电阻的变化值; R_0 为初始传感器电阻值; ΔL 为传感器长度的变化值; L_0 为初始传感器长度。

单层无裂纹结构应变传感器拉伸前、后导电回路变化及其等效电路如图 3a 所示。在拉伸时器件的电阻仅受敏感层内导电网络分布变化和器件拉伸应变长度的影响,传感器电阻的变化值 ΔR 很小,因此此类器件 GF 值很低。

具有单层裂纹结构的应变传感器拉伸前、后导电回路变化及其等效电路如图 3b 所示。单层裂纹传感器的电阻随应变的增加而迅速增加,但在较大应变的作用下裂纹贯穿敏感层,电流无法形成有效通路,导致器件断路,因此单层裂纹结构传感器虽具有极高的 GF 值,但其应变范围很小。

具有双层裂纹结构的应变传感器拉伸前、后导电回路变化及其等效电路如图 3c 所示。

R_0 很低;经过拉伸后,上层低电阻层被裂纹分割,电流在上层无法穿过裂纹,因而在裂纹处电流进

入下层,从下层高电阻层绕过裂纹后重新返回上层,形成“S”型导电路径。由于电流在每个裂纹处均需从下层高电阻层流过,传感器电阻的变化值 ΔR 很大,使得传感器具有很高的 GF 值。由于裂纹产生后电流可以从高电阻层继续流过,在较大应变范围下传感器依旧保持完整的电流通路。因此,双层裂纹结构传感器同时具备较高的灵敏度与较宽的工作范围。

本文使用 COMSOL Multiphysics 软件构建具有双层裂纹结构的柔性应变传感器仿真模型,并对其力学特性和电学特性进行模拟仿真。设置该传感器仿真模型的上层厚度为 $100\ \mu\text{m}$,下层厚度为 $100\ \mu\text{m}$;上、下层电导率根据材料的实际测试结果分别设置为 391.38 、 $0.35\ \text{S/m}$ 。仿真结果如图 4 所示。

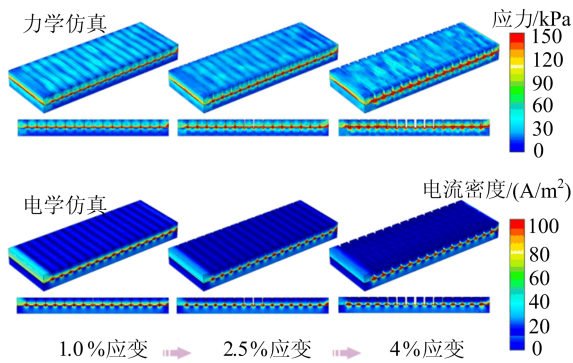


图 4 双层裂纹结构传感器模型的力学及电学仿真

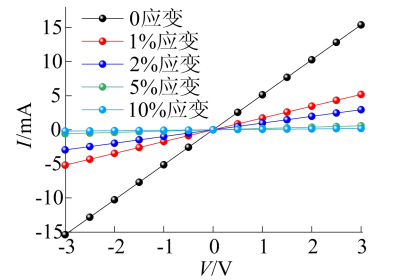
力学仿真结果表明,应力主要集中在器件的裂纹结构处,裂纹随应变增大而逐渐扩展。裂纹处的应力集中有助于提高传感器的灵敏度,并确保上层不会因拉伸而在非裂纹处断裂,提升传感器的稳定性。

电学仿真结果表明,随着应变的增大,裂纹扩展导致裂纹处的电阻迅速增大。在电流运动至裂纹处之前,上层低电阻层的电流密度远大于下层,在裂纹处,电流从器件上层转入器件下层,电流在下层高电阻层中紧贴上、下层界面经过裂纹,在绕过裂纹后重新返回上层,因此传感器在较大拉伸范围内仍能正常工作。该电学模拟结果与图 3c 中的裂纹结构双层应变传感器导电机理相一致,表明此类传感器不仅具有高灵敏度,同时还具有较宽的工作范围。

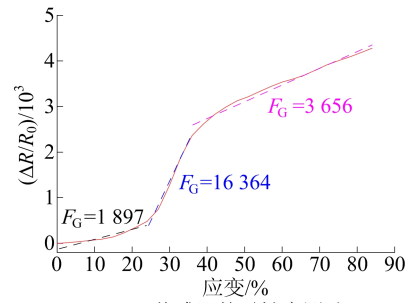
2.2 传感器静态特性测试

本文通过 TH515 电阻仪和 ZQ-990B 拉压力机搭建柔性应变传感器的静、动态特性测试平台。

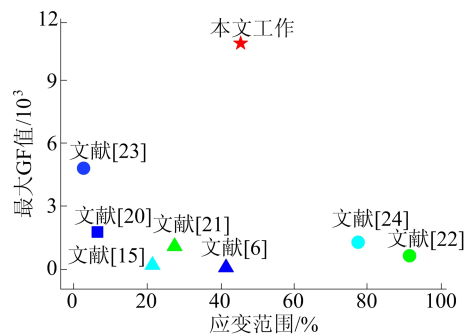
传感器的静态特性测试结果如图 5 所示。



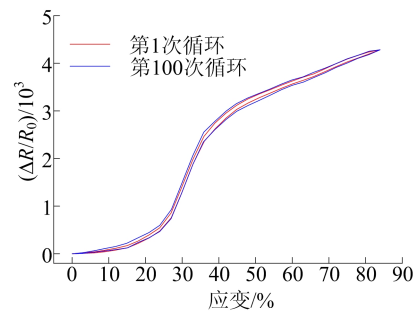
(a) 柔性传感器的曲线 $I-V$



(b) 传感器的灵敏度测试



(c) 相似工作传感器性能对比



(d) 传感器的迟滞回差

图 5 传感器的静态特性测试

本文传感器在不同应变下的 $I-V$ 特性曲线如图 5a 所示,当电压从 $-3\ \text{V}$ 增至 $3\ \text{V}$ 时,不同应变下传感器 $I-V$ 曲线的线性度良好,表现出优异的欧姆特性。

本文传感器的应变-相对电阻变化曲线如图 5b 所示,该曲线显示器件应变范围可达 $0\sim 85\%$,灵敏度先增大后减小,最大 GF 值可达 $16\ 364$ ($25\%\sim 40\%$ 应变),这与双层裂纹结构传感器的机理分析

相一致。本文与相似工作传感器的 GF 值和应变范围的对比如图 5c 所示,可以看出本文传感器兼具良好的灵敏度和应变范围,优于目前已报道的大部分传感器^[6,15,20-24]。

图 5d 展示了本文传感器的迟滞回差,在初始拉伸和重复 100 次循环拉伸后,传感器均具有很低的迟滞回差,拉伸前、后迟滞相近,说明 MOPSS 的加入增强了传感器的界面结合,具有优异的力学稳定性。

本文传感器的动态特性测试如图 6 所示。

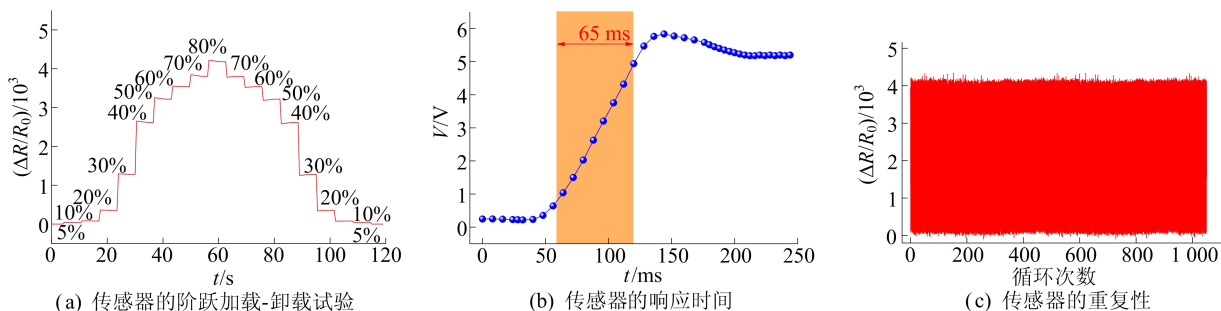


图 6 传感器的动态特性测试

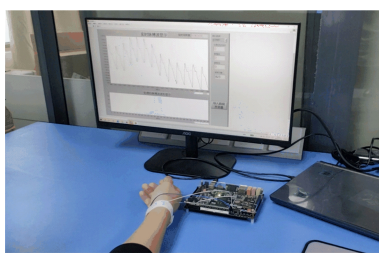
3 传感器应用

基于本文传感器所具备的高灵敏度、高力学重复性和高信号稳定性,将其应用于人体脉搏信号检测,如图 7 所示。

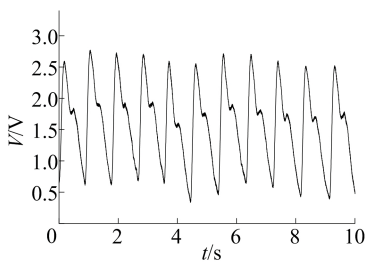
图 7a 所示为脉搏信号采集示意图,通过硬件电路对传感器检测的脉搏信号进行采集并上传,

对传感器进行阶跃加载-卸载试验,由图 6a 可知输出信号对每一阶段的应变都具有良好的跟随能力。数字采集卡获取的传感器被快速拉伸至 80%应变时的响应曲线如图 6b 所示,可以看出响应时间为 65 ms,说明该传感器能够完全获取频率小于 7.7 Hz 的输入信号,适用于对低频信号的采集。传感器在 0~80%应变下加卸载循环 1 000 次的相对电阻变化如图 6c 所示,在此过程中,传感器相对电阻变化峰值变化不明显,证明该应变传感器具有高耐用性和高稳定性。

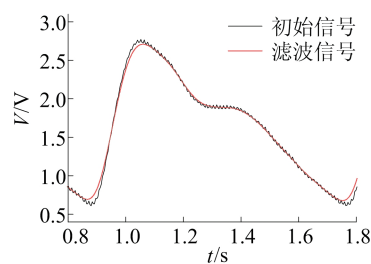
上位机接收数据后通过 LabVIEW 可视化窗口显示脉搏波波形。图 7b 所示为采集的脉搏波形,脉搏信号中存在来自硬件电路、环境的噪声干扰,因此需对信号进行滤波处理。图 7c 所示为滤波前、后单个脉搏信号的变化,可见原始信号中存在许多毛刺,而滤波后的信号更加平滑,这有助于后续对脉搏信号进行进一步分析处理。



(a) 脉搏信号采集示意图



(b) 传感器采集的脉搏信号



(c) 滤波前、后的脉搏信号

图 7 脉搏信号检测系统

脉搏波与人体心血管状况密切相关,本文研究了脉搏周期(t)与人体高血压疾病的关系。

正常人群的心跳间隔在 600~1 000 ms 之间,而高血压人群的心跳间隔更短。受试者连续 100 个脉搏信号的 t 间期变化如图 8a 所示,可以看出健康受试者的数据点均位于该区间内,而高血压患者的数据点均偏离了该区间。

构建 t 间期的庞加莱散点图如图 8b 所示,可以看出健康受试者的散点分布呈标准的椭圆形,而患者的散点更加杂乱。

受试者 t 间期的差分庞加莱图如图 8c 所示,其显示了相邻 t 间期之间的差异,可以帮助分析受试者心脏神经系统的情况。由图 8c 可知,健康受试者散点均匀分布在 4 个象限内,而高血压患

者散点主要分布在第二象限和第四象限。这说明健康受试者的心自主神经系统具有良好的心率调节能力,能够更好地应对不同内外环境条件对心率的要求;而高血压患者的散点则集中在第二象限和第四象限,说明高血压患者调节心率的能

力已经减弱,神经系统主要抑制心率的变化。

由上可知,本文制作的柔性应变传感器能够准确检测受试者的脉搏信号,并结合信号处理能够分析判断受试者的心血管情况,在可穿戴实时医疗监测领域具有良好的应用前景。

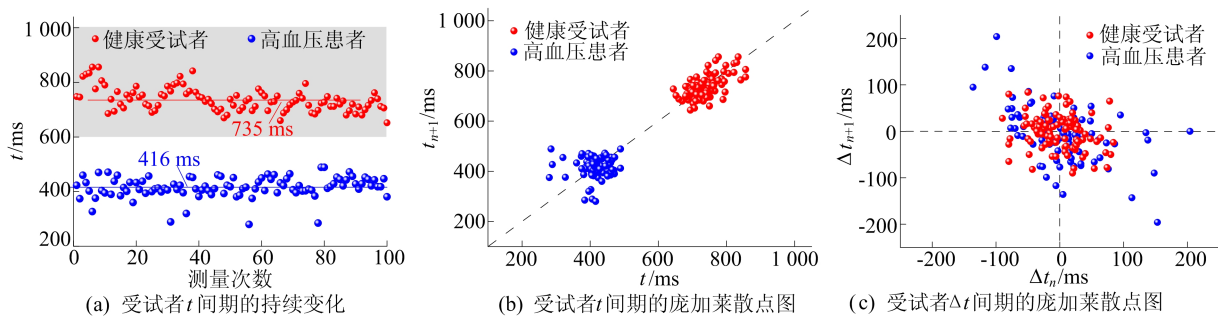


图 8 基于脉搏周期的高血压疾病诊断

4 结 论

本文通过丝网印刷工艺将 MOPSS、GNPs 和 SR 组成的导电复合材料制成一种具有双层裂纹结构的高灵敏柔性应变传感器,其具有很强的层间界面结合力。首先对改性材料进行了化学分析与表征,并对双层裂纹结构传感器进行了力学、电学仿真以分析其工作机理;测试了传感器的静、动态特性,结果表明该传感器具有高灵敏度(GF 值可达 16 364)、宽应变范围(0~85%应变)、高工作稳定性(重复性大于 1 000 次)以及 65 ms 的快速响应且迟滞小于±5%。将该传感器应用于脉搏波检测,可以准确检测受试者的脉搏信号,分析判断受试者心血管情况,有助于为受试者提供实时医疗诊断。

[参 考 文 献]

- [1] ZHOU Y, WANG Q, ZHANG X, et al. Piezoionic transfer effect in topological borophene-bismuthene derivative micro-leaves for robust supercapacitive electronic skins[J]. *Nano Energy*, 2022, 104: 107970-107984.
- [2] PEI H, JING J, CHEN Y, et al. 3D printing of PVDF-based piezoelectric nanogenerator from programmable metamaterial design: promising strategy for flexible electronic skin[J]. *Nano Energy*, 2023, 109: 108303-108314.
- [3] LIU W, DUO Y, LIU J, et al. Touchless interactive teaching of soft robots through flexible bimodal sensory interfaces[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 5030-5043.
- [4] BAI N, WANG L, XUE Y, et al. Graded interlocks for ionic pressure sensors with high sensitivity and high linearity over a broad range[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(3): 4338-4347.
- [5] DENG C, GAO P, LAN L, et al. Ultrasensitive and highly stretchable multifunctional strain sensors with timbre-recognition ability based on vertical graphene[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(51): 1907151-1907161.
- [6] LI X, WANG R, WANG L, et al. Scalable fabrication of carbon materials based silicon rubber for highly stretchable e-textile sensor[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2020, 9(1): 1183-1191.
- [7] CHOI J, KWON D, KIM K, et al. Synergetic effect of porous elastomer and percolation of carbon nanotube filler toward high performance capacitive pressure sensors[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(1): 1698-1706.
- [8] ZHOU Q, JI B, WEI Y, et al. A bio-inspired cilia array as the dielectric layer for flexible capacitive pressure sensors with high sensitivity and a broad detection range[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(48): 27334-27346.
- [9] WANG H L, KUANG S Y, LI H Y, et al. Large-area integrated triboelectric sensor array for wireless static and dynamic pressure detection and mapping[J]. *Small*, 2020, 16(2): 1906352-1906358.
- [10] WANG Z, ZHANG F, LI N, et al. Self-powered multifunctional triboelectric sensor based on PTFE/PU for linear, rotary, and vibration motion sensing[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(7): 2000159-2000166.
- [11] 廖波, 周国庆, 王英杰. 炭黑/硅橡胶导电复合薄膜传感特性研究[J]. *传感技术学报*, 2013, 26(8): 1101-1104.
- [12] 陈瞳, 王瑞荣, 李晓红. 基于 PDMS 海绵介质层的电容式柔性压力传感器[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(4): 528-531.
- [13] PAN L, HAN L, LIU H, et al. Flexible sensor based on hair-like microstructured ionic hydrogel with high sensitivity for pulse wave detection[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 137929-137938.
- [14] WANG L, XU X, CHEN J, et al. Crack sensing of cardiomyocyte contractility with high sensitivity and stability[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(8): 12645-12655.

(下转第 974 页)

[参 考 文 献]

- [1] 吴道祥,曹亚娟,钟轩民,等. 安徽淮北平原钙质结核土分布及成因年代研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 434-439.
- [2] 龚晓南. 21 世纪岩土工程发展展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 238-242.
- [3] 蓝天鹏,吴道祥,杨远杰,等. 钙质结核土及其大型直剪试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(2): 257-261.
- [4] 季斌,吴道祥,王国强,等. 钙质结核土微观结构定量分析研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(5): 181-182, 211.
- [5] 华仁兵. 钙质结核土的电阻率试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [6] 胡雪婷. 钙质结核土微观结构要素与抗剪强度关系的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [7] 沈启鹏. 钙质结核土三轴试验的颗粒流模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [8] 巴墨浓. 钙质结核对土体抗剪强度影响的试验研究及离散元模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [9] 王小龙,任亚群,葛海明,等. 钙质结核土分形特性及表现特征研究[J]. 电力勘测设计, 2018(增刊 1): 104-108.
- [10] 廖君,任亚群,王小龙. 基于颗粒流法的钙质结核土三轴试验细观模拟研究[J]. 中国水运, 2019, 19(3): 246-248.
- [11] 梁传扬,吴跃东,吴回国,等. 钙质结核土缩尺试验压缩系数修正方法研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 207-213.
- [12] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soil: measurement and parameter effects[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1972, 98(6): 603-624.
- [13] DARENDELI M B. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2001.
- [14] 李又云,谢永利,刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1037-1046.
- [15] 徐毅青,唐益群,任兴伟,等. 地铁振动荷载作用下隧道周围加固软黏土动弹性模量试验[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 250-255, 269.
- [16] 邱成春,张孟喜. 水平-竖向加筋饱和砂土动弹性模量试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1667-1672, 1702.
- [17] 庄心善,赵汉文,王俊翔,等. 合肥膨胀土动弹性模量与阻尼比试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 759-766.
- [18] 吴豪,邓全胜,张国栋,等. 振动频率对重塑粉质黏土动力响应特性的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 41-44.
- [19] 戴张俊,余飞,陈善雄. 淮北平原典型地基土动态变形模量特征及与承载力相关关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 59(增刊 1): 2723-2729.
- [20] 王少强,余飞,陈善雄,等. 淮北平原新近沉积层静探值域特征与承载力相关关系研究[J]. 路基工程, 2015(4): 49-54.
- [21] 赵权威. 盾构下穿京广线郑州站的地表沉降预计及控制技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [22] 宋豪. 徐州市主城区含砂姜结核粘土特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 877 页)

- [15] CHENG X, CAI J, XU J, et al. High-performance strain sensors based on Au/graphene composite films with hierarchical cracks for wide linear-range motion monitoring [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2022, 14(34): 39230-39239.
- [16] ALGHAMDI A A, MRAIR Y M, ALHARTHI F A, et al. Catalytic performance of SBA-15-supported poly (Styrenesulfonic Acid) in the esterification of acetic acid with n-Heptanol[J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 5835-5848.
- [17] TAO Y, XU Q, LI N, et al. Synthesis and photoluminescent property of star polymers with carbzole pendent and a zinc porphyrin core by ATRP [J]. Polymer, 2011, 52(19): 4261-4267.
- [18] 韩晓东,赵志伟,李雪华,等. 一种氧化还原石墨烯的稳定水溶液分散体的合成方法[J]. 化工学报, 2016, 67(增刊 1): 396-401.
- [19] ZHANG P, CHEN Y, LI Y, et al. Flexible piezoresistive sensor with the microarray structure based on Self-Assembly of multi-walled carbon nanotubes [J]. Sensors, 2019, 19(22): 4985-5002.
- [20] YU H, LIAN Y, SUN T, et al. Two-sided topological architecture on a monolithic flexible substrate for ultrasensitive strain sensors [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(46): 43543-43552.
- [21] YANG Y, TAO L, PANG Y, et al. An ultrasensitive strain sensor with a wide strain range based on graphene armour scales [J]. Nanoscale, 2018, 10: 11524-11530.
- [22] SHEN Y, YANG W, HU F, et al. Ultrasensitive wearable strain sensor for promising application in cardiac rehabilitation [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6(1): 21-32.
- [23] 张之昊,李浩然,张思琦,等. 基于硅模具制作的纳米裂纹及应变传感器[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(4): 337-341.
- [24] 刘彩霞,卢柏声,李帅,等. 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[J]. 复合材料学报, 2022, 39(12): 5835-5845.

(责任编辑 胡亚敏)