

网格式柔性应变传感器的制备及应用

许利强 孙权 詹政 杨润洪 唐智杰 鹿业波

Fabrication and application of mesh flexible strain sensor

XU Liqiang, SUN Quan, ZHAN Zheng, YANG Runhong, TANG Zhijie, LU Yebo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220804.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

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>

纤维素纳米纤维-还原氧化石墨烯/聚苯胺气凝胶柔性电极复合材料的制备与性能

Preparation and properties of cellulose nanofiber-reduced graphene oxide/polyaniline composite aerogels as flexible electrodes

复合材料学报. 2019, 36(7): 1583–1590 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181121.001>

纳米 Fe_2O_3 -还原氧化石墨烯复合材料的制备及对双酚A的检测

Preparation of nano Fe_2O_3 -reduced graphene oxide composite and its determination of bisphenol A

复合材料学报. 2020, 37(1): 182–190 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190505.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220804.002

网格式柔性应变传感器的制备及应用



分享本文

许利强^{1,2}, 孙权³, 詹政¹, 杨润洪³, 唐智杰³, 鹿业波^{*1,3}

(1. 嘉兴学院 浙江省医学电子与数字健康重点实验室, 嘉兴 314001; 2. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 杭州 310018;
3. 嘉兴学院 信息科学与工程学院, 嘉兴 314001)

摘要: 鉴于柔性应变传感器在人体运动监测、健康监测等领域的广泛应用, 设计出兼具高灵敏度和大应变范围的柔性应变传感器具有重要的意义。本文基于 Ecoflex-石墨烯复合材料, 通过模板法制备了四边形和六边形网格式柔性应变传感器。通过对比两种不同网格结构传感器的应变范围与拉伸断裂极限, 发现六边形网格式柔性应变传感器的综合性能更优异, 并在 80% 应变条件下进行拉伸/释放疲劳寿命检测, 此传感器表现出良好的可靠性, 同时该传感器在手肘关节运动和人体不同呼吸状况监测方面表现良好。将六边形网格式柔性应变传感器组合构建多通道检测系统, 实现了多种手势识别, 这在人工智能和运动识别领域具有广阔的市场应用前景。

关键词: 柔性应变传感器; 石墨烯; 网格结构; 健康检测; 手势识别

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)02-0970-08

Fabrication and application of mesh flexible strain sensor

XU Liqiang^{1,2}, SUN Quan³, ZHAN Zheng¹, YANG Runhong³, TANG Zhijie³, LU Yebo^{*1,3}

(1. Key Laboratory of Medical Electronics and Digital Health of Zhejiang Province, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China; 2. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. College of Information Science and Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China)

Abstract: In view of the wide application of strain sensors in human motion monitoring, health monitoring and other fields, it is important to design flexible strain sensors with high sensitivity and large strain range. In this paper, the quadrilateral and hexagonal mesh flexible strain sensors were prepared by template method based on Ecoflex-graphene composites. By comparing the strain range and tensile breaking limit of two different mesh sensors, it is found that the comprehensive performance of hexagonal mesh flexible strain sensor is more excellent, and under the condition of 80% strain, the tensile/releasing fatigue life detection is carried out. The sensor shows good reliability, and the sensor performs well in monitoring the elbow joint movement and different breathing conditions of the human body. A multi-channel detection system was constructed by combining hexagonal mesh flexible strain sensors to realize multiple gesture recognition, which has a broad market application prospect in the field of artificial intelligence and motion recognition.

Keywords: flexible strain sensors; graphene; mesh structure; health monitoring; gesture recognition

近年来, 柔性可拉伸/可穿戴式应变传感器在人类运动识别、医疗健康监测等领域获得了巨大的关注^[1-9]。其中, 用来监测肌肉运动、面部表情、发声振动和呼吸监测^[10-15]的柔性应变传感器得到

了快速的发展。为设计兼具良好导电性和拉伸性能的柔性应变传感器, 研究重点通常在传感器的导电材料和结构两个方面, 并且已有相关报道。目前传感器常用的导电材料主要包括碳纳米管、

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-06-11; 录用日期: 2022-07-28; 网络首发时间: 2022-08-05 09:26:41
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220804.002>
基金项目: 嘉兴市科技计划项目 (2021 AY10061); 浙江省大学生创新活动计划 (2022 R417 A032); 嘉兴学院大学生科研训练计划 (CD8517211438) Science and Technology Bureau Project of Jiaxing (2021 AY10061); Xinmiao Talents Program of Zhejiang (2022 R417 A032); SRT Program of Jiaxing University (CD8517211438)
通信作者: 鹿业波, 博士, 教授, 研究方向为柔性传感器 E-mail: luyebo@zjxu.edu.cn
引用格式: 许利强, 孙权, 詹政, 等. 网格式柔性应变传感器的制备及应用 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(2): 970-977.
XU Liqiang, SUN Quan, ZHAN Zheng, et al. Fabrication and application of mesh flexible strain sensor[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(2): 970-977(in Chinese).

金属纳米线、聚 3,4-二氧乙炔噻吩:聚苯乙 烯磺 (PEDOT : PSS) 和 石 墨 烯^[16-19]。例如, Zhang 等^[20]设计了一种基于碳纳米管 /乙 炔 黑 /Ecoflex 的长条结构的柔性应变传感器, 由于增加了乙 炔 黑导电材料, 因此提高了传感器的检测灵敏度和应变范围。Slobodian 等^[21]提出了一种基于碳纳米管制备的长条结构柔性应变传感器, 通过将传感器固定在衣服上实现了对人体呼吸信号的检测。这类柔性应变传感器是目前应变传感器中使用较多的一种结构, 但是由于无法实现二维或多维方向的检测, 限制了这种结构的应用。另一方面, 常用的传感器形状结构主要可以分为金字塔型、微球型、褶皱和网格形状^[22]等。例如 Zhang 等^[23]提出将碳纳米管沉积到 Ecoflex 上制备出具有微金字塔型的柔性传感器, 可应用于人体运动检测, 但是信号反馈不强, 同时传感器的灵敏度较低。Zhou 等^[24]利用银纳米线制备出蜂窝结构的金属薄膜, 通过将金属薄膜封装在聚二甲基硅氧烷基板上, 完成金属网格柔性应变传感器的制备, 但是由于金属材料的延展性较差, 传感器的拉伸性能只有 35% 的形变量, 由于人体的运动形变较大, 这将极大的限制传感器检测范围与应用场景。基于上述研究可知, 兼具良好拉伸性能、快速响应和高检测灵敏度的应变传感器, 在运动识别、医疗健康监测领域中具有广阔的应用前景。

本文研发了一种基于 Ecoflex-石墨烯复合材料的网格式柔性应变传感器, 制作工艺简单, 成本较低, 响应时间短, 同时具有较好的拉伸性能和灵敏度。通过有限元仿真对比分析了四边形网格结构和六边形网格结构的拉伸性能, 同时对两种传感器灵敏度、拉伸断裂极限和可靠性进行了实验分析, 并将性能较好的六边形网格柔性传感器应用于人体手肘弯曲检测和不同呼吸状态的检测, 实现了不同人体活动状态的预警监测功能, 同时组合多个六边形网格柔性应变传感器, 构建了多通道检测系统, 实现了多种手势识别。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

导电材料是决定传感器性能的关键, 在本文中选择具有高导电性和导热性的单层纳米石墨烯粉末 (纯度 99%, 南京先丰纳米材料科技有限公司)。同时, 为了满足传感器的拉伸、弯曲、压缩等性能, 选择杨氏模量较低且拉伸性能高达 900%

的 Ecoflex 00-30(美国 Smooth-On)。

1.2 网格式传感器制备流程

首先, 使用 Solidworks 进行结构设计, 并结合 3D 打印技术打印出不同网格结构传感器模具。然后, 取 Ecoflex 00-30-A 与 Ecoflex 00-30-B 溶液按照体积比 1 : 1 混合在实验烧杯中, 再加入适量的石墨烯粉末, 将上述混合物充分搅拌后浇注到制作好的模具中, 其中, Ecoflex 混合溶液与石墨烯的质量比为 1 : 0.13。最后, 放置在电热鼓风干燥箱 (上海一恒科学仪器有限公司) 中, 温度控制在 60℃, 持续加热 2 h 后从模具中分离出网格传感器, 其中四边形网格传感器的结构参数为 50 mm×20 mm×1 mm, 正四边形孔的边长为 4.56 mm; 六边形网格传感器的结构参数为 50 mm×20 mm×1 mm, 正六边形孔的边长为 2.63 mm。完整制备流程如图 1 所示。

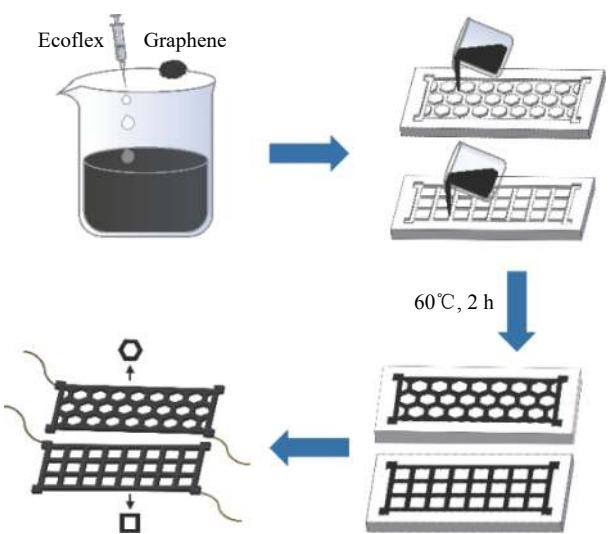


图 1 网格柔性应变传感器制备流程图

Fig. 1 Fabrication flowchart of mesh flexible strain sensor

1.3 测试与表征

由于柔性传感器是由 Ecoflex 和石墨烯两种材料混合制备而成, Ecoflex 与石墨烯的混合均匀性对于传感器综合性能具有非常重要的意义。采用扫描电镜 (日立 SU8020) 对传感器表面进行形貌观察和 EDS 元素分析, 混合后的传感器内部 C、O 和 Si 三种元素分布均匀, 表明 Ecoflex 和石墨烯达到了充分混合。对 Ecoflex 试样和 Ecoflex-石墨烯复合材料试样分别进行 XRD 衍射峰碳元素位置检测, 结果表明碳元素来自于石墨烯, 如图 2(a)~2(e) 所示。事实上, Ecoflex-石墨烯的均匀性是传

传感器电阻响应中的关键因素。同时相关研究表明,当两种材料未能均匀混合时制备传感器的机械变形和力学性能会明显降低^[25]。

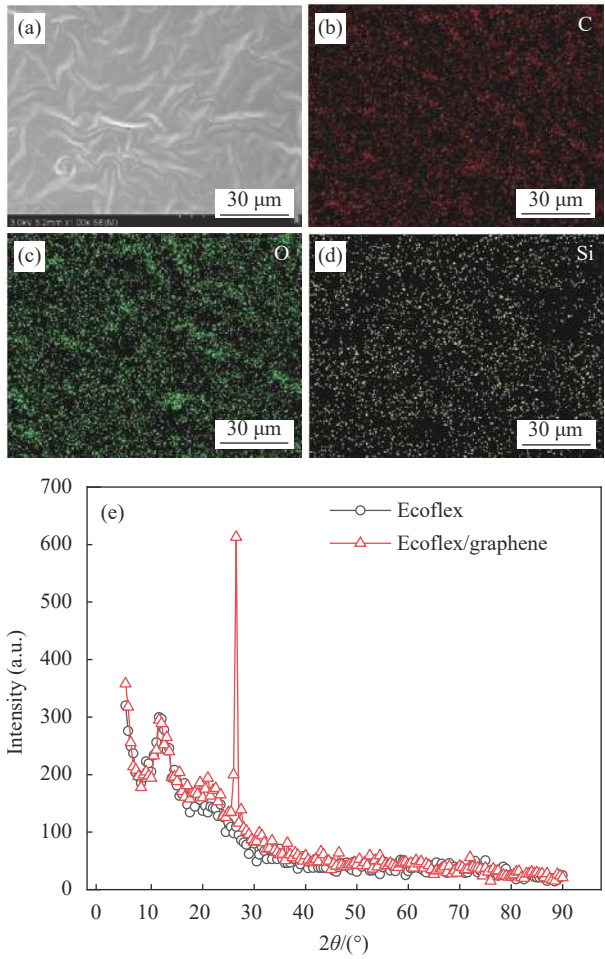


图2 (a) 传感器表面 SEM 图像; ((b)~(d)) 传感器 EDS 元素分布图; (e) Ecoflex 与 Ecoflex-石墨烯的 XRD 图谱

Fig.2 (a) SEM images of sensor surface; ((b)-(d)) Sensor EDS element distribution map; (e) XRD patterns of Ecoflex and Ecoflex-graphene

1.4 材料含量比例与结构有限元分析

在制备传感器的过程中,石墨烯含量会直接影响到传感器的拉伸性能和灵敏度,因此在本实验中按照不同的混合比例制备出不同的柔性应变传感器试样,对比传感器的电阻率与拉伸性能,结果表明当 Ecoflex 与石墨烯在质量比 1 : 0.13 的条件下混合后,传感器同时具有较好的导电性和拉伸应变能力,如表 1 所示。

通过有限元仿真软件 ABAQUS 建立四边形和六边形网格柔性传感器的有限元仿真模型,分析两种结构模型在相同受力条件下的形变情况。当对四边形和六边形网格模型施加相同载荷 1 N 时,

如图 3 所示,四边形网格模型的应变为 30.15%,六边形网格模型的应变为 31.6%。通过对两种传感器结构模型的有限元分析,六边形网格柔性传感器表现出的拉伸性能优于四边形网格柔性传感器。

表 1 Ecoflex-石墨烯不同含量电阻率与拉伸应变参数对比

Table 1 Comparison of resistivity and tensile strain parameters of different Ecoflex-graphene contents

Sample	Mass ratio of Ecoflex : graphene	Electrical resistivity/(Ω·m)	Strain/%
a	1 : 0.10	10 350.00	460
b	1 : 0.11	2 420.00	320
c	1 : 0.12	58.91	245
d	1 : 0.13	1.94	160
e	1 : 0.14	1.05	114
f	1 : 0.15	0.68	95

2 结果与讨论

通过使用 WDW-0.5 C 微机控制万能试验机(上海华龙测试仪器有限公司),对比两种网格传感器在相同实验条件下承受的最大拉伸载荷,如图 4(a)所示。四边形网格柔性应变传感器在应变 90% 的情况下完全断裂,六边形传感器在应变 125% 情况下完全断裂。同时,六边形网格柔性应变传感器在完全断裂时所能承受的最大载荷也要高于四边形传感器。基于 AES-4 SD 柔性电子器件综合测试平台,对四边形和六边形结构传感器进行应力-应变实验测试,计算得到四边形和六边形结构传感器的弹性模量分别为 0.353 MPa 和 0.340 MPa。通过数字源表(Keithley 2450, 泰克公司)为传感器通入 1 mA 直流电,对四边形和六边形网格柔性传感器进行拉伸应变检测,传感器电阻变化率与拉伸应变之间的关系如图 4(b)所示。当四边形网格柔性应变传感器拉伸应变为 65% 时,传感器的电阻变化率达到了 125.7%;当拉伸应变超过 70% 以后,四边形传感器开始发生局部断裂,如图 4(c)所示。而对于六边形网格柔性应变传感器,在拉伸应变为 80% 的情况下,传感器的电阻变化率达到了 163.10%;当拉伸应变超过 85% 以后,同样的出现了局部断裂现象,如图 4(d)所示。根据图 4(b) 关系曲线可以计算出四边形网格结构传感器灵敏度 $G_F=2.413$,六边形网格传感器的灵敏度 $G_F=3.824$,性能优于已报道的金纳米线柔性应变传感器^[26]。由传感器的电阻变化率与拉伸应变曲线可知,在相同的试验条件下,六边形网格柔

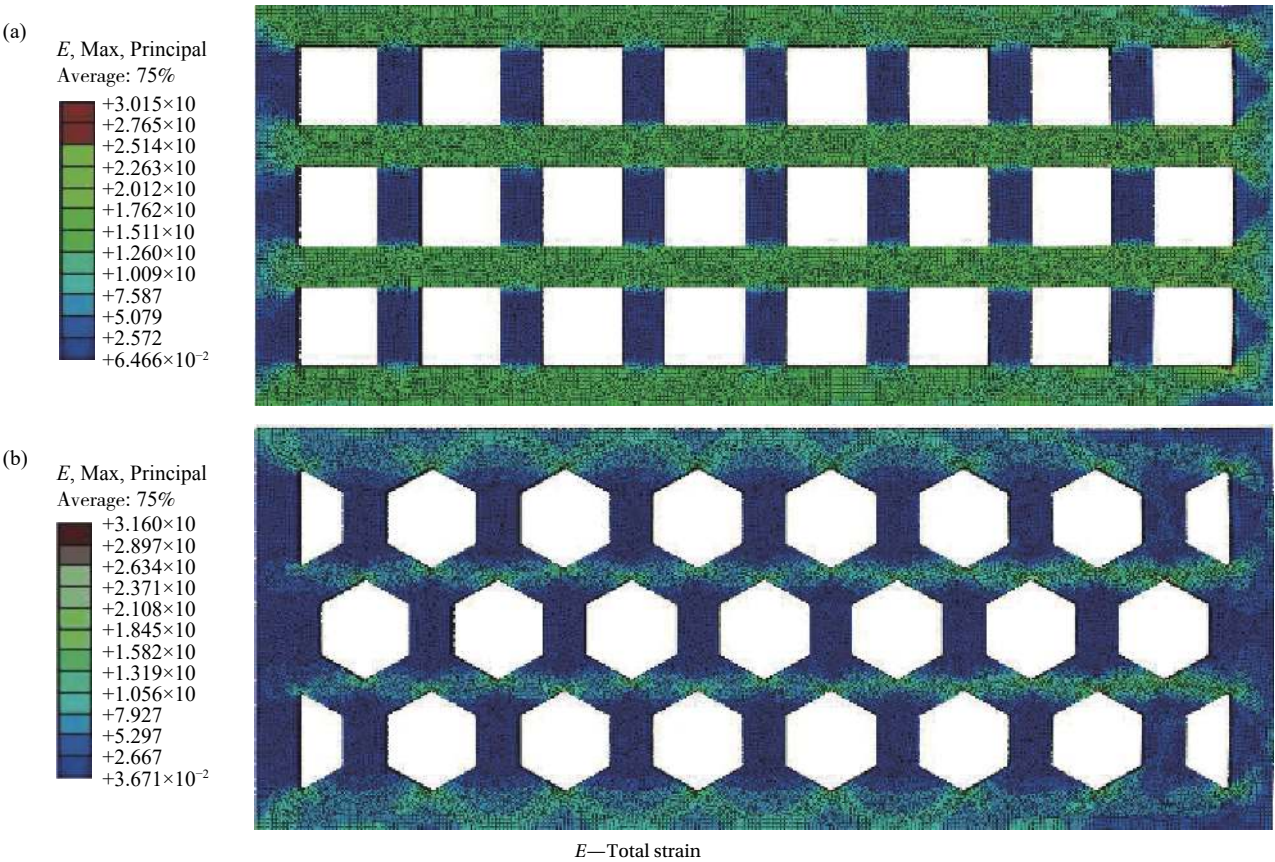


图3 (a) 四边形网格传感器模型有限元分析; (b) 六边形网格传感器模型有限元分析

Fig. 3 (a) Finite element analysis of quadrilateral mesh sensor model; (b) Finite element analysis of hexagonal mesh sensor model

性应变传感器的灵敏度优于四边形传感器，且六边形传感器的拉伸应变极限显著高于四边形传感器。通过对比两种网格柔性应变传感器的最大拉伸载荷、拉伸应变极限和灵敏度，六边形网格柔性应变传感器综合性能更优。为进一步验证传感器的可靠性，对六边形网格柔性应变传感器在拉伸应变为 80% 条件下进行了 20 000 次的拉伸/释放循环检测，其中在 0~15 000 次时六边形网格传感器依旧保持着良好的稳定性和高度可重复性，而超过 15 000 次后传感器存在着较明显的应力松弛现象，导致传感器发生变形，从而影响到测试结果，并与文献 [27-28] 报道结果一致，如图 4(e) 所示。此外，六边形网格传感器在应变为 80% 时的响应时间和恢复时间分别为 136.7 ms 和 166.7 ms，如图 4(f) 所示。

六边形网格柔性应变传感器具有较高的拉伸应变与承受载荷能力，可应用在人体肢体动作的检测。如图 5(a) 所示，将传感器固定在手肘关节处，用于检测手肘的弯曲情况，对于不同的弯曲角度，可以检测到相应的弯曲信号。当手肘分别

弯曲 20°、35°、50°、65°和 90°时，由于传感器拉伸形变不断增大，导致传感器的电阻变化率也随之变化，如图 5(b) 所示。当手肘由伸直状态快速弯曲到 90°状态，传感器可以快速检测到电阻变化率的变化信号，并且在快速重复伸直弯曲这两种状态时，传感器反映出的信号几乎相同，传感器重复稳定性极高，如图 5(c) 所示。因此，这类传感器可用于检测人体肢体动作变形，并对肢体运动做出快速的信号反馈。

呼吸是人体与外界进行气体交换以保证正常机体功能运转的最基本的生理活动。呼吸频率是呼吸生理方面的一个主要参数，同时也是急性功能性呼吸障碍的重要指标，对呼吸系统方面疾病的诊断、治疗具有重要的作用。人体正常的呼吸频率范围为 12~20 次/min，长时间高于 25 次和低于 12 次均属于非正常呼吸频率。持续监测呼吸状况对人体保持正常功能运转具有重大的意义。通过腰带将六边形网格柔性应变传感器固定在人体腹部位置，从而检测人体不同类型的呼吸状况，如图 6(a) 所示。根据人体正常呼吸、浅呼吸与深

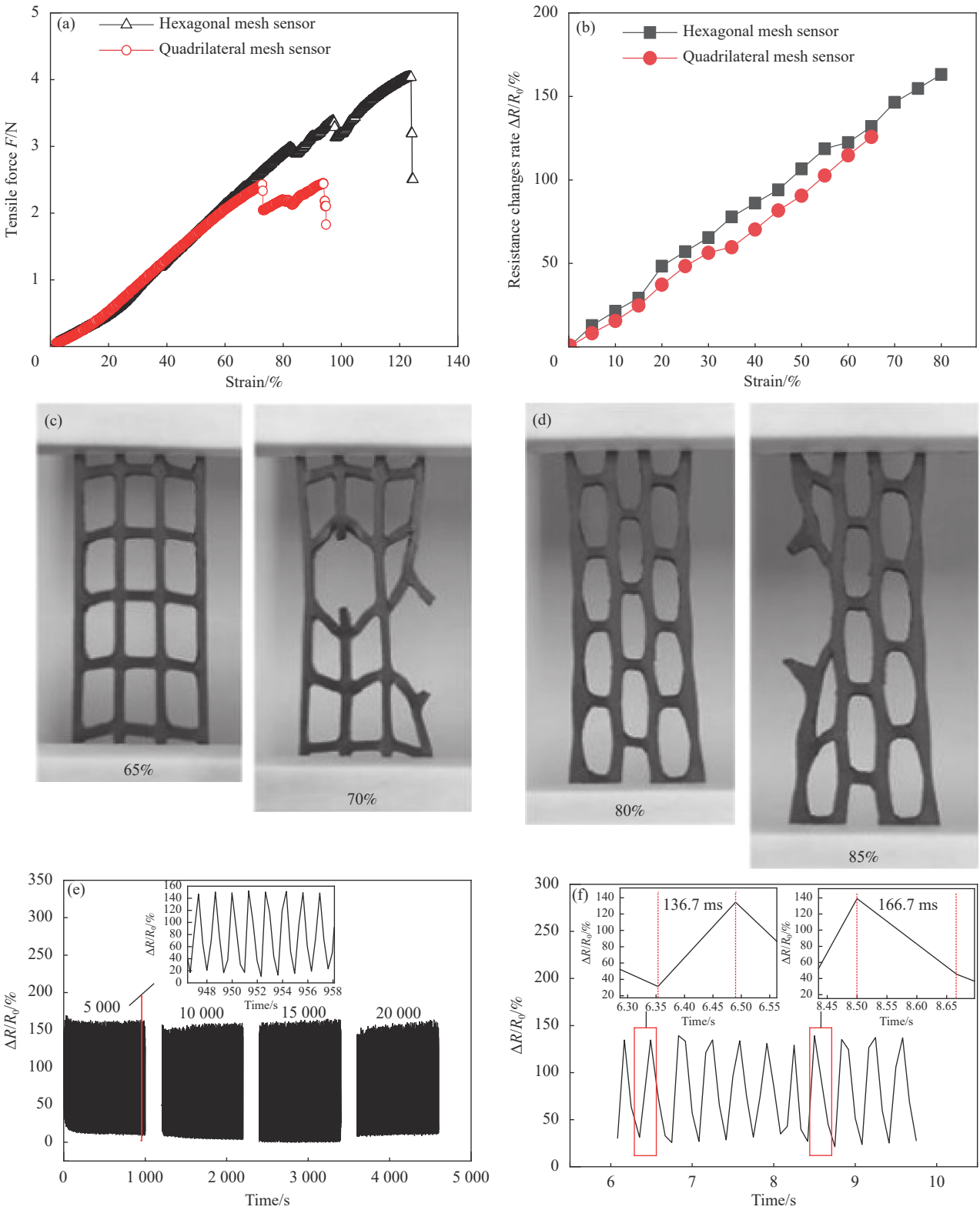


图 4 (a) 传感器断裂极限载荷与拉伸应变关系曲线; (b) 传感器电阻变化率与拉伸应变关系曲线; ((c), (d)) 传感器断裂实物图; (e) 六边形网格柔性应变传感器 20 000 次拉伸/释放曲线; (f) 六边形网格柔性应变传感器在 80% 应变下响应与恢复时间

Fig. 4 (a) Relationship curve between the ultimate breaking load and the tensile strain of the sensor; (b) Relationship curve between sensor resistance changes rate and tensile strain; ((c), (d)) Sensor fracture diagram; (e) Hexagonal mesh flexible strain sensor 20 000 stretch/release curve; (f) Response and recovery time of hexagonal mesh flexible strain sensor under 80% strain

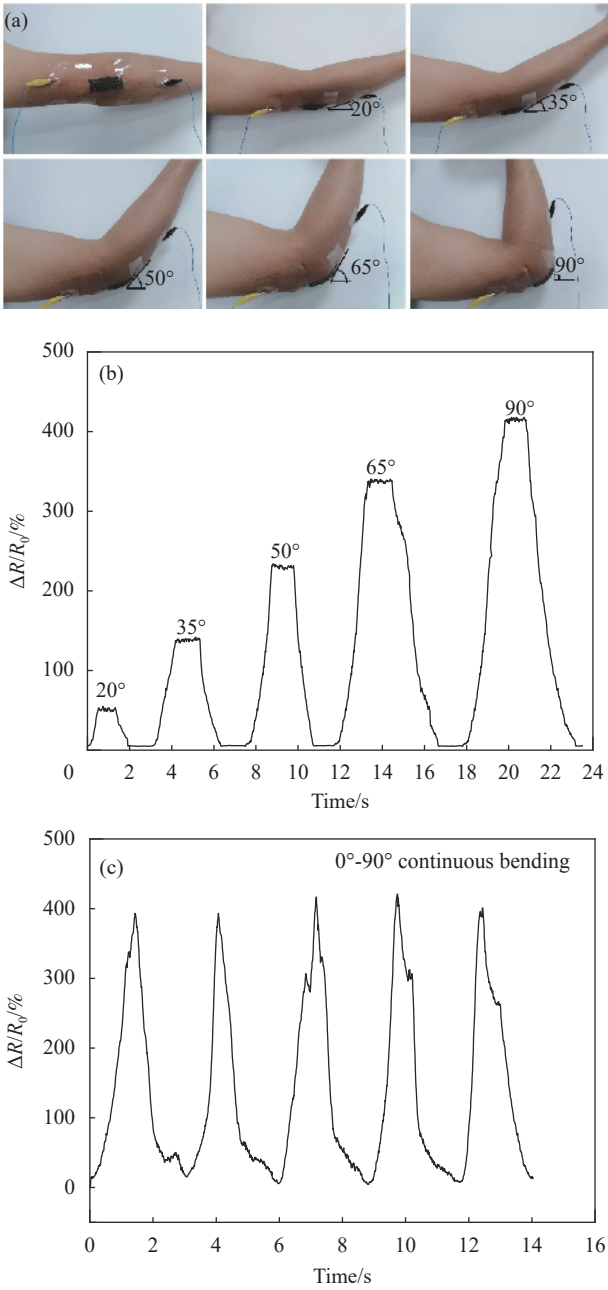


图5 (a) 手肘弯曲图; (b) 手肘弯曲 20°、35°、50°、65°、90°信号反馈曲线; (c) 手肘由 0°到 90°连续弯曲信号反馈曲线

Fig. 5 (a) Elbow bend; (b) Elbow bending 20°, 35°, 50°, 65°, 90° signal feedback curve; (c) Elbow from 0° to 90° continuous bending signal feedback curve

呼吸频率所导致的胸部或腹部的扩张程度不同，可以通过传感器对这 3 种信号进行监测。如图 6(b) 所示为浅呼吸、正常呼吸和深呼吸监测，其中浅呼吸在每次吸气过程中吸入的氧气含量较少，同时由于没有将吸入的氧气进行充分转化，呼气过程中所呼出的气体量也相对偏少，因此，吸气与呼气的周期也比正常呼吸短。并且，由于没有将

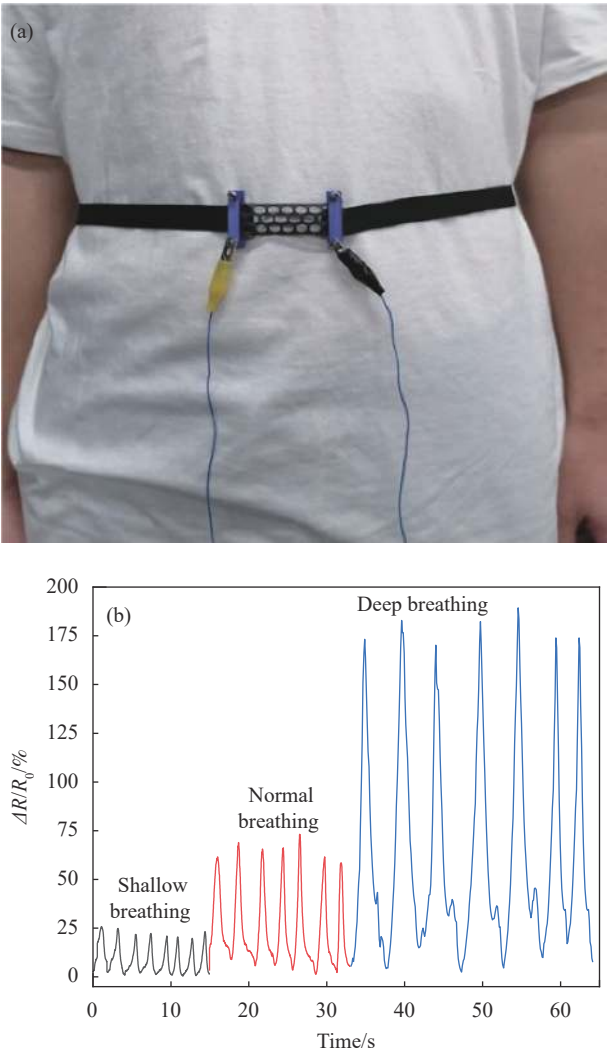


图6 (a) 人体呼吸检测图; (b) 浅呼吸、正常呼吸和深呼吸的信号反馈曲线

Fig. 6 (a) Human breath detection; (b) Signal feedback curve of shallow breathing, normal breathing and deep breathing

胸部和腹部完全打开，电阻变化率仅 20%~25% 左右。而人体正常呼吸频率 1 min 为 12~24 次左右，每次的吸气与呼气的周期大约为 3 s，符合正常呼吸频率范围，同时电阻变化率平均约为 60%。与正常呼吸相比，深呼吸是放松的一种形式，其吸气与呼气要比正常呼吸程度深，每个呼吸周期约为 5 s，电阻变化率可以达到 165% 左右。

在柔性传感器的应用中，手势识别检测在人工智能领域得到了广泛的关注与研究。在本文中设计了一个手势识别系统，该系统主要由六边形网格柔性传感器、多通道数据采集模块和深度神经网络算法及识别结果显示终端组成。结合上文对六边形网格柔性传感器拉伸形变与传感器电阻变化量之间的关系，以单片机中模拟/数字转换

器 (Analog-to-digital converter, ADC) 模块实现模拟量与数字量的转化, 从而实现对传感器拉伸/弯曲信号到电信号的转化, 进而获得传感器形变的响应信号, 实现精准识别人体手势动作。本文将 5 个六边形网格柔性传感器固定在手指关节处, 构建了一套多通路手势识别传感系统, 在该手势识别系统中, 选用石头、剪刀、布作为传感器的识别对象, 如图 7(a) 所示, 实现对静态手势信号的识别, 其中识别步骤包括电路搭建、数据采集和处理、特征提取与分析、识别程序的搭建与识别算法的开发、识别装置准确度的验证和识别结果的传输显示。在该识别系统中将数据传输到上位机分析发现, 在手指弯曲的过程中, 可实时分析电阻值变化引起的电压信号变化, 如图 7(b) 所示, 以石头手势动作作为初始状态量, 进行石头、剪刀和布 3 种手势动作识别, 从波形数据可看出, 电压信号随着指关节弯曲过程中呈现出较明显且有规律的特征, 通过提取并综合分析这些特征, 结合深度神经网络算法, 使识别准确度得到了较大的提高。

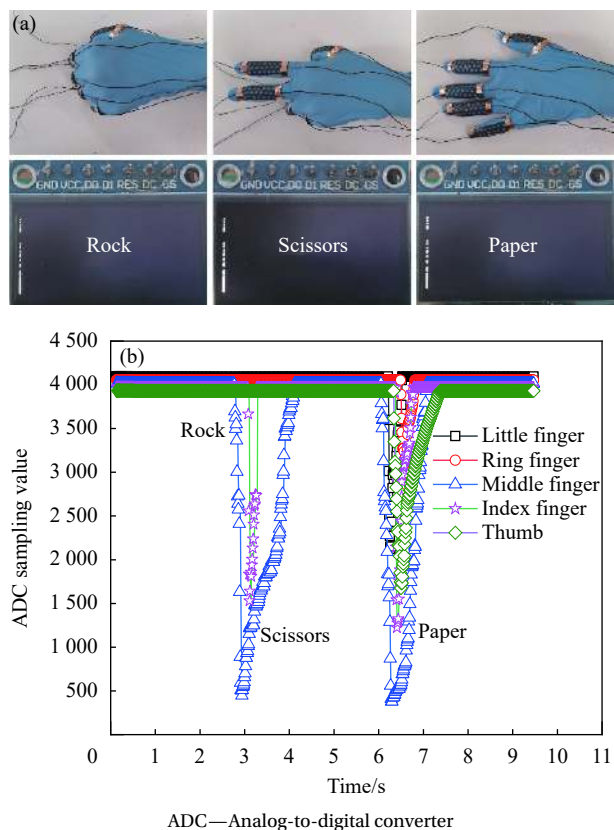


图 7 (a) 石头、剪刀、布手势与发光二极管 (LED) 显示结果; (b) 石头、剪刀、布手势识别信号曲线

Fig. 7 (a) Rock-scissors-paper gesture and light-emitting diode (LED) display results; (b) Rock-scissors-paper gesture recognition signal curves

3 结论

(1) 通过三维软件设计出四边形和六边形网格结构模型, 利用 3D 打印技术打印出网格模具, 并制备出基于 Ecoflex-石墨烯复合材料的网格柔性应变传感器。

(2) 通过有限元仿真和实验分析了两种网格柔性传感器的拉伸应变范围、灵敏度和拉伸断裂最大承受载荷, 结果表明六边形网格柔性传感器的综合性能更加优异。

(3) 在 80% 应变条件下进行拉伸/释放疲劳寿命检测, 六边形网格柔性传感器表现出良好的可靠性。

(4) 六边形网格柔性应变传感器可用于检测不同关节运动和监测人体呼吸状况, 实验得到的数据与人体正常呼吸、浅呼吸和深呼吸的实际情况吻合性较好。

(5) 基于六边形网格柔性传感器的基础上设计开发了一套手势识别系统, 实现了石头、剪刀和布静态手势信号的识别和演示。

参考文献:

- [1] ZHAO S, LI J, CAO D, et al. Recent advancements in flexible and stretchable electrodes for electromechanical sensors: Strategies, materials, and features[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(14): 12147-12164.
- [2] WANG X, LIU Z, ZHANG T. Flexible sensing electronics for wearable/attachable health monitoring[J]. *Small*, 2017, 13(25): 1602790.
- [3] TRICOLI A, NASIRI N, DE S. Wearable and miniaturized sensor technologies for personalized and preventive medicine[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(15): 1605271.
- [4] JASON N N, HO M D, CHENG W. Resistive electronic skin[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(24): 5845-5866.
- [5] TRUNG T Q, LEE N E. Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4338-4372.
- [6] AMJADI M, KYUNG K U, PARK I, et al. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(11): 1678-1698.
- [7] XU F, LI X, SHI Y, et al. Recent developments for flexible pressure sensors: A review[J]. *Micromachines*, 2018,

- 9(11): 1-17.
- [8] KHAN S, ALI S, BERMAK A. Recent developments in printing flexible and wearable sensing electronics for healthcare applications[J]. *Sensors*, 2019, 19(5): 1-34.
- [9] HEO J S, HOSSAIN M F, KIM I. Challenges in design and fabrication of flexible/stretchable carbon- and textile-based wearable sensors for health monitoring: A critical review[J]. *Sensors*, 2020, 20(14): 1-29.
- [10] XU H, ZHANG M K, LU Y F, et al. Dual-mode wearable strain sensor based on graphene/colloidal crystal films for simultaneously detection of subtle and large human motions[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(2): 1901056.
- [11] YIN B, WEN Y, HONG T, et al. Highly stretchable, ultra-sensitive, and wearable strain sensors based on facilely prepared reduced graphene oxide woven fabrics in an ethanol flame[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(37): 32054-32064.
- [12] AN B, MA Y, LI W, et al. Three-dimensional multi-recognition flexible wearable sensor via graphene aerogel printing[J]. *Chemical Communications*, 2016, 52(73): 10948-10951.
- [13] ZHOU K, ZHANG C, XIONG Z, et al. Template-directed growth of hierarchical MOF hybrid arrays for tactile sensor[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(38): 2070257.
- [14] YANG T, WANG W, HUANG Y, et al. Accurate monitoring of small strain for timbre recognition via ductile fragmentation of functionalized graphene multilayers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(51): 57352-57361.
- [15] SUN X, SUN J, LI T, et al. Flexible tactile electronic skin sensor with 3D force detection based on porous CNTs/PDMS nanocomposites[J]. *Nano-Micro Letters*, 2019, 11(1): 57.
- [16] LEE H, KIM M J, KIM J H, et al. Highly flexible graphene nanoplatelet-polydimethylsiloxane strain sensors with proximity-sensing capability[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(4): 054603.
- [17] POPOV V I, KOTIN I A, NEBOGATIKOVA N A, et al. Graphene-PEDOT : PSS humidity sensors for high sensitive, low-cost, highly-reliable, flexible, and printed electronics[J]. *Materials*, 2019, 12(21): 1-9.
- [18] JEONG S, HEO S, KIM H J. Mechanical property variation of AgNW/PDMS nanocomposites for fully elastomeric electrodes[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021, 32(4): 4727-4736.
- [19] ALI S, MADDIPATLA D, NARAKATHU B B, et al. Flexible capacitive pressure sensor based on PDMS substrate and Ga-In liquid metal[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(1): 97-104.
- [20] ZHANG Y, REN E, TANG H, et al. Carbon nanotubes/acetylene black/Ecoflex with corrugated microcracks for enhanced sensitivity for stretchable strain sensors[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31(17): 14145-14156.
- [21] SLOBODIAN P, DANOVA R, OLEJNIK R, et al. Multifunctional flexible and stretchable polyurethane/carbon nanotube strain sensor for human breath monitoring[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, 30(7): 1891-1898.
- [22] 金凡, 吕大伍, 张天成, 等. 基于微结构的柔性压力传感器设计、制备及性能[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(10): 3133-3150.
JIN Fan, LV Dawu, ZHANG Tiancheng, et al. Design, fabrication and performance of flexible pressure sensors based on microstructures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(10): 3133-3150(in Chinese).
- [23] ZHANG S, WEN L, WANG H, et al. Vertical CNT-Ecoflex nanofins for highly linear broad-range-detection wearable strain sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(19): 5132-5139.
- [24] ZHOU W, LI Y, LI P, et al. Metal mesh as a transparent omnidirectional strain sensor[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(4): 1800698.
- [25] XU A, WANG Y, GAO J, et al. Facile fabrication of a homogeneous cellulose/polylactic acid composite film with improved biocompatibility, biodegradability and mechanical properties[J]. *Green Chemistry*, 2019, 21(16): 4449-4456.
- [26] JIBRIL L, RAMIREZ J, ZARETSKI A V, et al. Single-nanowire strain sensors fabricated by nanoskiving[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 263: 702-706.
- [27] MA J, WANG P, CHEN H, et al. Highly sensitive and large-range strain sensor with a self-compensated two-order structure for human motion detection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(8): 8527-8536.
- [28] WANG Y, GONG S, WANG S J, et al. Volume-invariant ionic liquid microbands as highly durable wearable biomedical sensors[J]. *Materials Horizons*, 2016, 3(3): 208-213.