



石墨烯气凝胶全柔性触觉传感器的设计、 组装及性能

王保民^{1*}, 李义云^{1,2}, 陈天弟², 汪秉吉², 刘雨富^{1,2}, 马立民², 杨生荣^{2,3}, 高欣⁴,
王金清^{2,3*}

1. 兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000;

3. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

4. 兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000

* E-mail: wbm2007@163.com; jqwang@licp.cas.cn

收稿日期: 2022-05-16; 接受日期: 2022-10-17; 网络版发表日期: 2023-04-04

国防科工局基础研究计划项目(编号: JCKY2019130C105)和国家自然科学基金面上项目(批准号: 51975562)资助

摘要 针对柔性触觉传感器存在的设计难度大、抗干扰性差、不易封装以及线路布置困难等问题, 基于Storakers材料模型的应变能密度函数发展了一种基于石墨烯气凝胶(graphene aerogel, GA)的具有“气泡膜”结构的全柔性触觉传感器的设计方法. 通过模拟分析发现, 相对于“三明治”结构, “气泡膜”结构的GA柔性触觉传感器具有更好的抗干扰性. 在此基础上, 设计并组装了“气泡膜”结构的GA全柔性触觉传感器, 通过实验证实该GA全柔性触觉传感器具有优异的传感特性、力学特性和抗干扰特性. 同时, 设计开发了压阻式传感阵列的信号采集系统, 并成功实现了其对力的大小、物体位置和形状等信息的实时采集和传感监测.

关键词 石墨烯气凝胶, 全柔性触觉传感器, 气泡膜结构, 数值模拟, 传感应用

1 引言

对外部环境的精确、快速感知是智能化的基础, 柔性触觉传感器是实现这一功能的重要手段^[1], 其应用领域涉及运动状态监测^[2]、人机交互^[3]、医疗检查^[4]和科学研究^[5,6]等诸多领域. 基于传感器传感机制的不同, 柔性触觉传感器分为压阻式、电容式、压电式和摩擦电式传感器^[7]. 其中压阻式传感器以其结构简单、易于组装、功耗低、抗疲劳性好、应用范围宽

和信号漂移低等显著优点得到广泛关注^[8]. 柔性压阻传感器由柔性基底、电极和传感材料三部分组成^[9]. 石墨烯气凝胶(GA)具有密度低、结构易加工、形貌易调控、性质稳定、导电性和强度高等诸多优点^[10~12], 是制作柔性触觉传感器的理想传感材料, 可实现柔性触觉传感器的高性能. 因此, 以GA为传感材料的柔性触觉传感器已成为该研究领域的热点. 然而, 多孔结构在赋予GA丰富性能的同时, 也给材料性能的量化带来了较大难度. 为此, Pan等人^[13]和Yang等人^[14]

引用格式: 王保民, 李义云, 陈天弟, 等. 石墨烯气凝胶全柔性触觉传感器的设计、组装及性能. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 499–508
Wang B M, Li Y Y, Chen T D, et al. Design, assembly, and property of a graphene aerogel-based fully flexible tactile sensor (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 499–508, doi: 10.1360/SST-2022-0169

利用粗粒度分子动力学模拟建立了介观模型, 对GA材料的性能进行分析, 而Gao等人^[15,16]则通过几何建模对GA多孔结构进行分析, 并通过有限元方法对材料性能进行数值模拟。但上述方法建模难度大, 无法满足GA材料结构与性能的多变性要求。另外, 与施力物体直接接触的柔性基底对传感材料起到保护作用, 要求其兼具耐腐蚀性、耐磨性、良好的稳定性、弹柔性和生物相容性以及低成本等特性^[17]。常见的柔性基底材料主要有: 硅基橡胶(如聚二甲基硅氧烷, PDMS)、水凝胶、纤维素以及其他高分子聚合物等^[18]。电极材料是柔性传感器信号传输的载体, 对柔性传感器的稳定性、灵敏度和响应时间等性能均有显著影响^[19,20]。

柔性触觉传感器大多采用由敏感单元、极板和基底组成的“三明治”封装结构^[21]。比如, 文献^[22]设计了一款由导电薄膜、上下电极层、压阻橡胶和多孔PDMS薄膜组成且具有三明治结构的高柔弹性压力触觉传感器, 该传感器具有稳定的信号响应, 可实现大面积的触觉感知。“三明治”结构虽然简单且方便制作, 但将“三明治”结构用于GA柔性触觉传感器时, 由于其上、下对称多层结构的存在, 当将其附着于机器人关节和人体皮肤等可变形表面时, 上下基层的变形将会压迫传感材料引入传感误差; 为了减小变形对传感器性能的影响, 研究人员在加热的PDMS基体上粘接硅薄膜, 待其冷却后, 硅薄膜由于加热的PDMS基体带来的预应变而形成二维波状结构, 使得该传感器具有可拉伸性能^[23], 但预应变的效果十分有限, 故而研究人员利用拱桥架构^[24]、分层电接触结构^[25]和马蹄形结构^[21]等设计方式将传感器变形隔绝于传感材料之外, 使得传感材料不会直接发生变形, 因而传感器具有较好的柔韧性。

综上所述, 柔性传感器在设计和封装方面仍然面临诸多技术难题的困扰, 如柔性传感器的“全柔性”设计方法, 封装材料、电极材料和柔性基底材料的选取, 以及传感器的阵列化与结构布局等。基于此, 本文利用Storakers超弹材料模型通过参数拟合的方法建立了GA材料的力学模型, 基于获取的模型参数对比分析了“三明治”与“气泡膜”封装结构的GA柔性传感器在相同变形状态下的应变分布情况及抗干扰特性; 在此基础上, 设计并制作了具有“气泡膜”结构的GA全柔性触觉传感器, 并研究了该传感器的传感特性、力学特性、抗干扰特性与传感应用效果等性能。

2 GA力学建模与柔性传感器结构分析

2.1 GA力学建模

研究发现^[9], 在压缩试验的加载过程中GA材料的应力-应变(σ - ε)曲线呈现三个阶段, 分别是线性弹性阶段、弹性形变阶段和致密化阶段。超弹材料在小应变时呈线性关系, 而在中等至较大应变时则表现为明显的非线性关系。文献^[26~28]将GA及其相关的材料均描述为超弹材料, 可见GA的力学行为可通过超弹材料模型来进行描述; 同时, 由于GA具有较小的泊松比, 即可将其视为可压缩超弹材料。因此, Storakers材料模型可被用于模拟GA。Storakers材料模型的应变能密度函数为

$$W_S = \sum_{k=1}^N \frac{2\mu_k}{\alpha_k^2} \left(\lambda_1^{\alpha_k} + \lambda_2^{alph \alpha_k} + \lambda_3^{\alpha_k} - 3 + \frac{1}{\beta_k} \left(J_{el}^{-\alpha_k \beta_k - 1} \right) \right), \quad (1)$$

式中, λ_1 , λ_2 和 λ_3 是主伸长率, J_{el} 是弹性体积比, α_k , β_k 和 μ_k 是Storakers材料特性参数。

在实际应用中, 主要考量GA的正压力以及正压力下的应变, 故假设GA材料在高度方向上承受单轴载荷且仅允许弹性变形, 则可将单轴力表示为

$$F_{uniaxial} = l_{10} l_{30} \sum_{k=1}^N \frac{2\mu_k}{\alpha_k} \left(1 - \lambda^{-\alpha_k \frac{(1+3\beta_k)}{(1+2\beta_k)}} \right) \lambda^{alph \alpha_k - 1}, \quad (2)$$

式中, l_{10} 和 l_{30} 是沿主方向的原始尺寸。

为获取GA试样在0~90%应变下的 σ - ε 曲线数据, 将试样置于AGS-X电子万能试验机对其力学特性进行测试, 试验过程如图1(a)所示。利用COMSOL Multiphysics[®]软件的优化接口对实验测得的 σ - ε 曲线与Storakers材料模型进行参数拟合, 拟合结果如图1(b)所示, 拟合获得的材料参数分别为 $\alpha_1=13.145$, $\beta_1=-0.41452$, $\mu_1=805.83$ kPa, $\alpha_2=1.9658$, $\beta_2=-0.44645$ 和 $\mu_2=1.4721$ kPa, 拟合结果显示拟合曲线与实验曲线高度重合, 因此, 所得拟合参数可用于GA力学特性的有限元分析计算与GA柔性触觉传感器的设计。

2.2 “气泡膜”结构抗干扰性能分析

针对柔性触觉传感器“三明治”结构抗干扰性差的问题, 将拉弯变形引入传感单元连接部位以达到抗干扰的目的, 从而设计了一款具有“气泡膜”结构的GA全

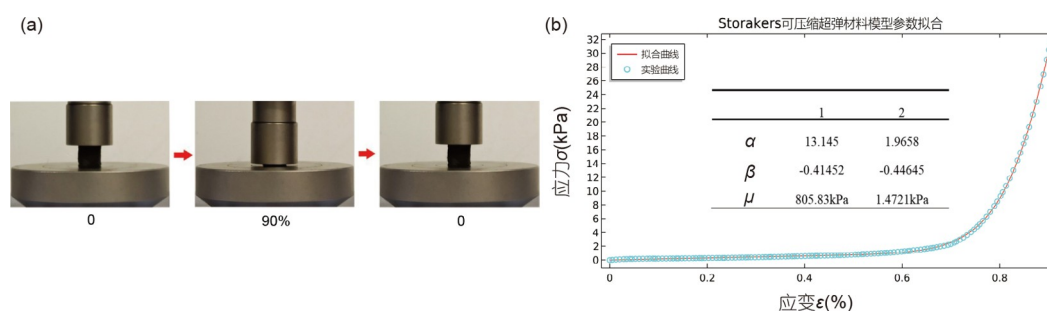


图 1 GA材料在90%应变时的单轴压缩试验图(a)与GA传感材料Storakers参数模型拟合曲线及参数(b)

Figure 1 Uniaxial compression test diagram of GA at 90% strain (a) and fitting curve and parameters of Storakers parameter model of GA sensing material (b).

柔性触觉传感器, 并利用Storakers材料模型参数与有限元计算方法对设计可行性进行了分析和验证.

根据柔性触觉传感器的结构特点, 在对“气泡膜”和“三明治”两类结构的GA柔性触觉传感器进行几何建模时, 均采用相同尺寸的传感材料和水性聚氨酯基底, 并忽略电极与导线对传感器力学特性的影响; 同时, 根据文献[29], 用近似不可压缩的Mooney-Rivlin模型来描述聚氨酯材料的力学行为, 应变能方程为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3), \quad (3)$$

式中, W 为应变能, C_{10} 和 C_{01} 为Mooney-Rivlin常数, C_{10} 和 C_{01} 分别为1.87和0.47 MPa.

根据上述方程, 利用COMSOL软件对两类传感器在不同应变状态下的应变分布情况进行有限元分析, 即采用固体力学物理场进行有限元分析. 由于传感器模型具有细小的薄壁结构, 故而利用具有广泛适用性的三角形网格对模型进行网格划分, 为了提高计算精度, 并对薄壁结构进行网格细化处理, 采用稳态研究与MUMPS求解器进行计算.

在“三明治”结构与“气泡膜”结构的GA柔性传感器基底左侧施加固定约束, 并在右侧分别施加伸长量为2, 6和10 mm的拉伸变形, 传感器拉伸应变分布云图如图2所示. 从中可看出, “三明治”结构传感器的上下基底在应力作用下产生相向收缩, 对各传感材料造成程度相同且变形较大的压缩; “气泡膜”结构传感器的变形分为下基底的拉伸变形、侧壁拉伸变形和随之产生的上基底下移三个方面, 则变形主要聚集于直接受力的各传感单元连接处, 不会对传感材料造成显著影响; 与“三明治”结构相比, 在相同尺度的拉伸状态下,

“气泡膜”结构中传感材料的应变范围与尺度均较小, 具有更好的抗拉伸干扰特性.

在“三明治”结构与“气泡膜”结构的GA柔性传感器基底左侧施加固定约束, 并在右侧分别施加弦变量为2, 6和10 mm的弯曲变形, 将弧长为160 mm的“气泡膜”结构与“三明治”结构的GA柔性触觉传感器分别弯曲成弦长为158, 154和150 mm的圆弧, 传感器弯曲应变分布云图如图3所示. 从中可看出, “三明治”结构传感器的传感材料下部因弯曲受到径向压应力, 传感器上部因弯曲受到来自上表面的轴向压应力, 传感材料在双重压缩应力下发生较大形变; “气泡膜”结构传感器的变形分为传感单元连接部位弯曲变形与传感材料附着位置的弯曲变形两个方面, 则形变主要聚集于对传感材料不产生影响的传感单元连接部位, 不会对传感材料造成过大影响; 在相同尺度的弯曲状态下, 与“三明治”结构相比, “气泡膜”结构中传感材料的应变范围与尺度均较小, 使得“气泡膜”结构的GA柔性触觉传感器具有良好的抗弯曲干扰特性.

3 GA全柔性触觉传感器设计与制作

3.1 传感器结构设计及其阵列化

通过以上分析发现, “气泡膜”结构的GA柔性触觉传感器在抗干扰方面优势显著, 因此, 本文设计了“气泡膜”结构的GA全柔性触觉传感器, 如图4(a)所示. 通常传感器采用上下电极结构, 需在传感单元侧壁与上基底设置导线和电极, 这样就增大了侧壁与上基底的厚度与强度, 对传感器的灵敏度与测量下限等会产生较大影响, 同时, 也增加了传感器的封装难度. 故该传

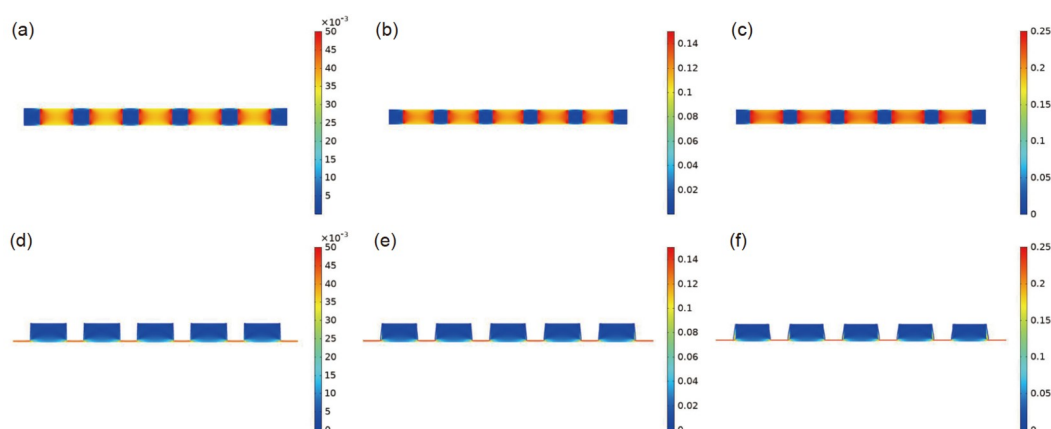


图2 “三明治”结构的GA柔性触觉传感器在不同拉伸尺度的应变分布云图: (a) 2 mm, (b) 6 mm, (c) 10 mm; “气泡膜”结构GA柔性触觉传感器在不同拉伸尺度的应变分布云图: (d) 2 mm, (e) 6 mm, (f) 10 mm

Figure 2 Distributing nephograms of strain for GA flexible tactile sensor with “sandwich” structure at different tensile states: (a) 2 mm, (b) 6 mm, (c) 10 mm; distributing nephograms of strain for GA flexible tactile sensor with “bubble film” structure at different tensile states: (d) 2 mm, (e) 6 mm, (f) 10 mm.

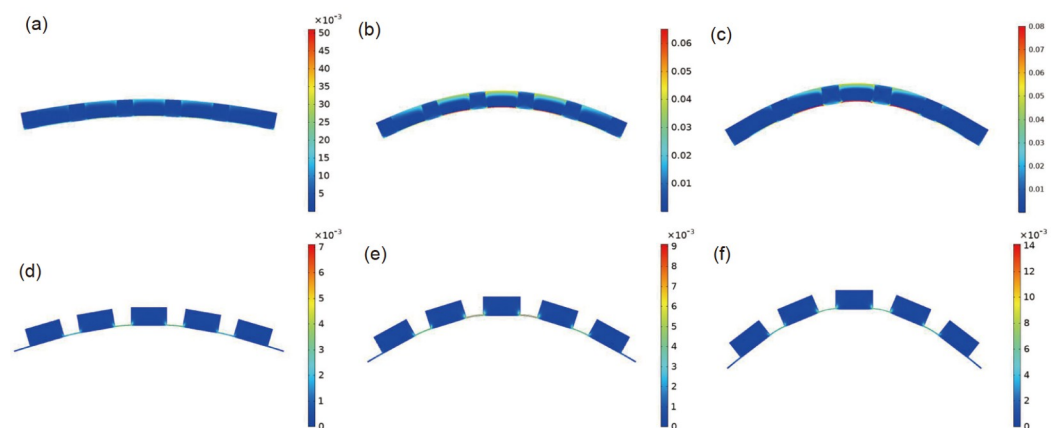


图3 “三明治”结构的GA柔性触觉传感器在不同弯曲尺度的应变分布云图: (a) 2 mm, (b) 6 mm, (c) 10 mm; “气泡膜”结构GA柔性触觉传感器在不同弯曲尺度的应变分布云图: (d) 2 mm, (e) 6 mm, (f) 10 mm

Figure 3 Distributing nephograms of strain for the flexible tactile sensor with “sandwich” structure at different bending states: (a) 2 mm, (b) 6 mm, (c) 10 mm; distributing nephograms of strain for the flexible tactile sensor with “bubble film” structure at different bending states: (d) 2 mm, (e) 6 mm, (f) 10 mm.

传感器采用左右电极形式, 并将电极统一放置于下基底。此外, 该传感器以GA为传感材料, 其半径和厚度均为5 mm; 通过涂敷工艺制备的水性聚氨酯柔性封装基底具有薄膜厚度小(0.2 mm)、工艺简单、机械性能好等优点, 而以导电铜带为电极、蛇形铜线为导线则具有高的导电性、稳定性和变形特性。

为了实现柔性传感器大面积触觉感知、可拼接性和可移植性等功能, 将该GA全柔性触觉传感器设计为5×5的阵列结构。采用左右电极将会产生行列导线交

叉造成的短路, 而多层布线则会加大基底厚度, 影响灵敏度与传感器体积。因此, 将电极网络设计为图4(b)所示结构, 漆包铜线作导线, 漆皮起到良好的绝缘作用, 将导线绕制为蛇形结构可以改善电极网络的可拉伸性能, 细小的漆包铜线在交叉使用时不会影响上下基底的粘接效果。

3.2 GA全柔性触觉传感器制作

GA全柔性传感器制作工艺如图5(a)所示。首

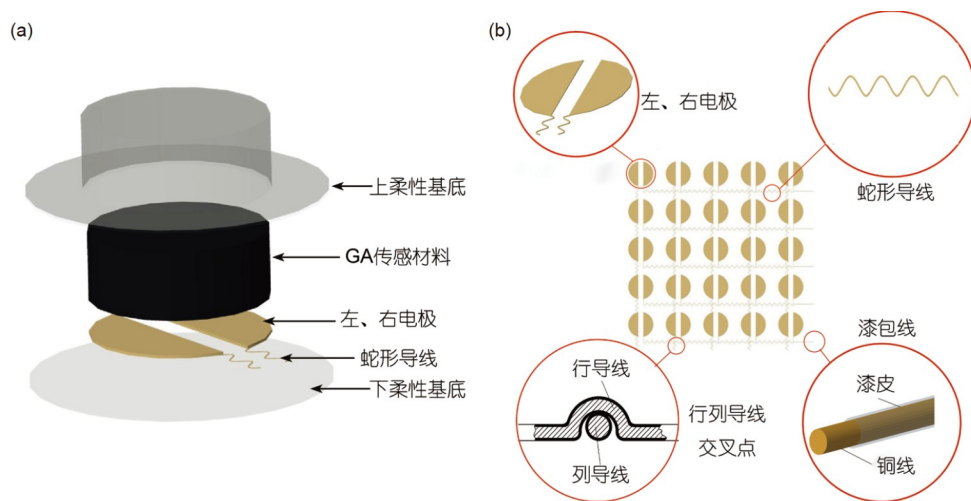


图 4 GA全柔性触觉传感器结构模型(a)与GA全柔性触觉传感器阵列电极网络(b)

Figure 4 Structural model of GA-based fully flexible tactile sensor (a) and array electrode network assembled by GA-based fully flexible sensors (b).

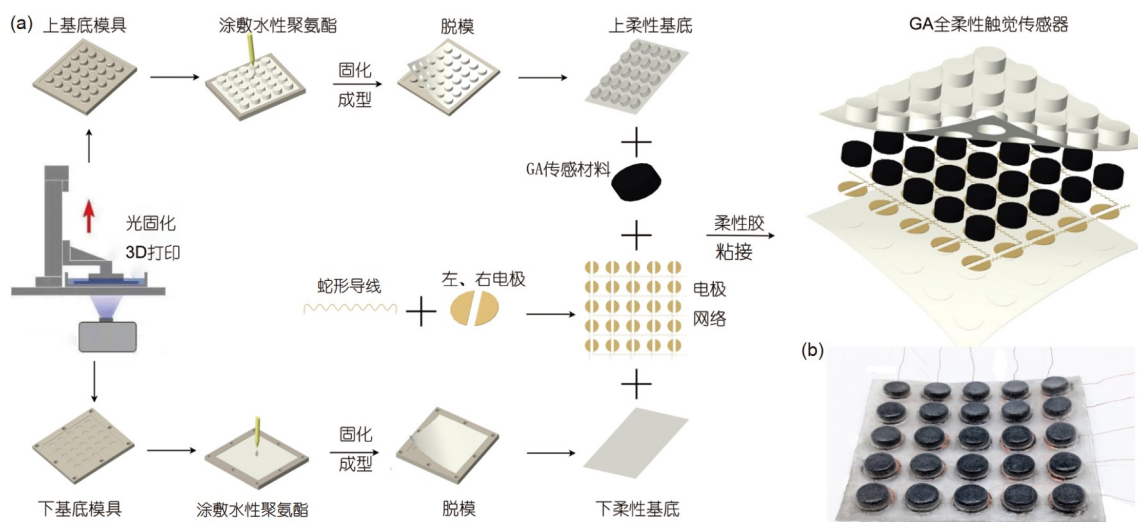


图 5 GA全柔性触觉传感器阵列制作流程图(a)与实物照片(b)

Figure 5 Fabrication flow chart of GA-based fully flexible tactile sensor array (a) and picture of the real product (b).

先, 利用3D打印机(FormlabsForm 3)制作出模具, 接着采用涂敷工艺制备柔性水性聚氨酯基底; 其次, 为了降低封装和布线难度, 将自带背胶的铜带剪裁为两个半圆, 制成左右电极, 将漆包线绕制为蛇形结构, 将连接处除去漆皮后与电极相连制成电极网络, 后将其依次粘接到下基底; 最后, 将GA置于制备好的上基底内, 采用柔性黏合剂将上基底与附有电极与导线的下基底粘接, 保证传感材料与电极上表面紧密贴合, 传感器封装完成。图5(b)为传感器阵列实物照片, 可以看出该全柔性传感器兼具拉伸与弯曲变形功能, 具有质地柔

软、封装轻薄等特点。

4 结果与讨论

4.1 传感器力学和传感性能分析

使用AGS-X万能试验机对传感器的力学与传感性能进行测试, 如图6所示。传感器在60%应变下重复压缩10次的 σ - ε 曲线如图6(a)所示, 显示多次压缩下传感单元的 σ - ε 曲线基本一致, 说明传感器具有良好的力学稳定性与压缩恢复性。传感器在压缩应变为0~80%的

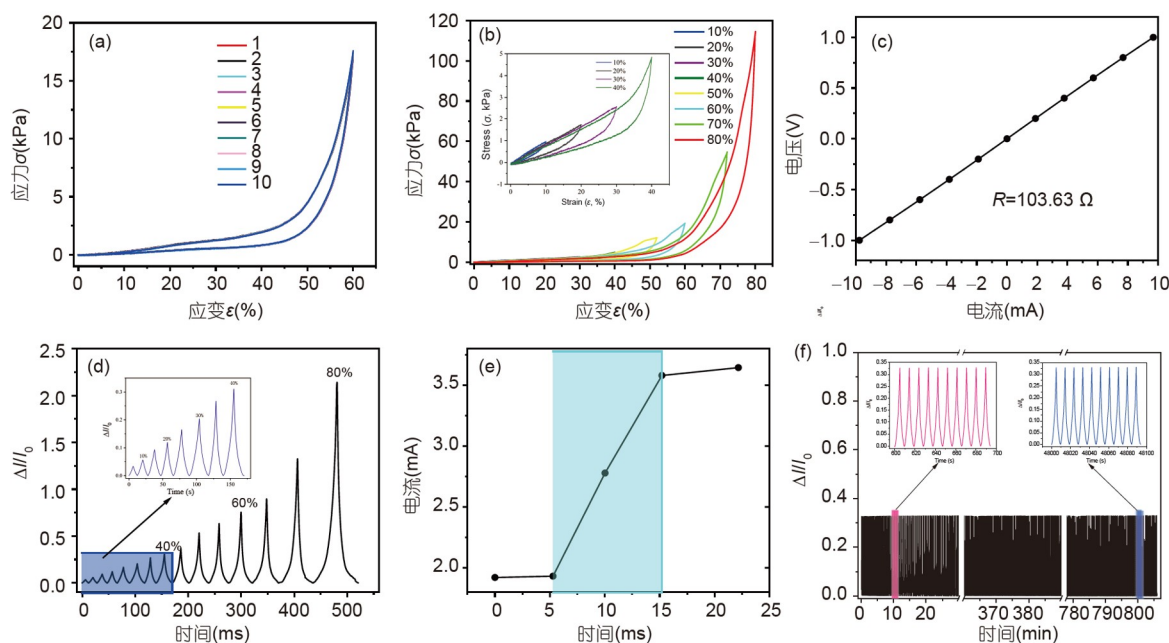


图 6 GA全柔性触觉传感器的力学与传感性能. (a) 传感器在60%应变下重复压缩10次的 σ - ε 曲线; (b) 传感器在0~80%应变下的 σ - ε 曲线; (c) 传感器的 I - V 曲线; (d) 传感器在0~80%下的电流变化率曲线; (e) 传感器的响应时间; (f) 传感器在40%应变下连续压缩10000次的电流变化率曲线

Figure 6 Mechanical property and sensing performance of the GA-based fully flexible tactile sensor. (a) σ - ε curves of the sensor under 60% strain within 10 times of cycling compression; (b) σ - ε curves of the sensor under 0~80% strains; (c) I - V curves of the sensor; (d) the current change rate of the sensor at 0~80% strains; (e) the response time of the sensor; (f) the current change rate of the sensor under 40% strain for 10000 times of cycling compression.

σ - ε 曲线如图6(b)所示, 在卸载阶段, 曲线回归零点, 表明传感器未发生不可逆变形且具有良好的重复性和检测效果, 以及宽的应变检测范围. 传感器的 I - V 曲线如图6(c)所示, 传感单元电阻为103.63 Ω , I - V 曲线斜率稳定不变, 表明该传感器具有稳定的电阻值. 传感器在0~80%应变下的电流变化率如图6(d)所示, 传感器在不同应变下的电阻变化率的差别清晰可见, 证明了对不同应力或应变的检测能力. 传感器的响应时间如图6(e)所示, 显示传感器的响应时间为9.91 ms, 说明其可快速准确识别作用时间或变化频率快的信号. 传感器在40%应变下连续压缩10000次的电流变化率如图6(f)所示, 显示该传感器经多次压缩后, 在相同的应变下仍具有稳定一致的响应信号, 证明该传感器具有良好的稳定性与可靠性, 可以进行连续多次的传感信号检测.

如表1所示, 通过对比发现, GA全柔性触觉传感器虽使用了强度相对较高的封装材料, 但传感器的检测极限相较于其传感材料和其他石墨烯气凝胶材料并无明显提升; 在传感器受到正压力作用时, 传感器可以迅速产生形变, 实现其对传感信号的快速响应; 另外, 受

封装材料自身压缩性能的影响, 将传感材料完成封装后, 在80%的压缩状态下, 传感信号稳定, 但达到90%时, 传感信号将会出现波动; 传感器完成封装后, 传感材料与电极和上下基底采用接触式连接, 故而封装并未对传感器材料的结构造成影响, 也不会对其耐久性产生影响.

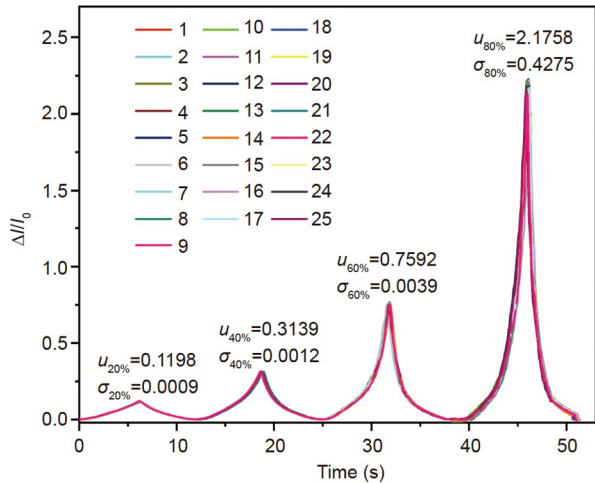
如图7所示, 将GA全柔性触觉传感器的25个传感单元分别进行20%, 40%, 60%和80%的压缩, 并且实时记录其传感信号的变化情况, 可见各传感单元在相同的应变下具有基本相同的响应信号, 说明GA全柔性触觉传感器具有较好的均一性; 在各应变下传感器信号的电流变化率的均值依次为0.1198, 0.3139, 0.7592和2.1758, 各传感单元在不同压缩状态下电流变化率的标准差依次为0.0009, 0.0012, 0.0039和0.4275, 可见随着压缩率的增加, 各传感单元的传感信号的标准差变大, 说明压缩率越大, 均一性越差.

4.2 传感器阵列抗干扰性试验分析

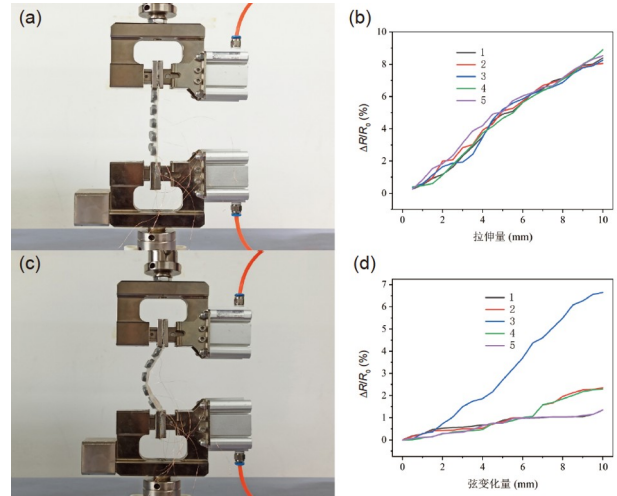
利用AGS-X万能试验机对传感器的抗干扰性能进

表 1 GA全柔性触觉传感器与其他报道的传感材料进行压阻性能的比较**Table 1** Comparison of piezoresistive performances of GA-based fully flexible tactile sensor with other reported sensing materials

传感材料	密度(mg cm^{-3})	灵敏度(kPa^{-1})	极限检测	响应时间(ms)	可压缩性(%)	耐久性(Cycles)	参考文献
MX/rGO Aerogel	—	22.56	<10 Pa	245	—	10000	[30]
GO-KGM foam	1.17	0.25	15 Pa	—	85	3000	[31,32]
GO film	—	1.6	1%	—	—	1000	[33]
MX/PI	4.0	—	2.5%	—	80	1000	[34]
MX/GO	10.41	609	6 Pa	232	62.7	6000	[35]
PANF/GA	—	28.62	3 Pa	37	80	2600	[36]
石墨烯/碳纳米纤维 复合气凝胶(GA)	4.3	0.28	—	13	90	10000	本文所用传感材料
	—	—	2%	9.91	80	10000	本文传感器

**图 7** GA全柔性触觉传感器的均一性分析**Figure 7** Uniformity analysis of the GA-based fully flexible tactile sensor.

行测试, 结果如图8(a)所示. 将传感器沿着图示竖直方向即列方向进行0~10 mm依次递增的拉伸试验, 拉伸过程中每一行传感单元电阻变化率的均值如图8(b)所示. 由图可看出, 随着拉伸尺度增大, 电阻变化率也随之增大, 所有传感单元在相同拉伸量下电阻变化率基本一致, 在拉伸量为10 mm时, 电阻变化率为8.90%, 且变化规律与有限元计算结果基本一致. 将该传感器沿着如图8(c)所示竖直方向即列方向进行弦值变化且弧长不变的弯曲, 弯曲过程中每一行传感单元电阻变化率均值如图8(d)所示. 由图可看出, 随着弯曲程度增大, 电阻变化率也随之增大, 电阻变化率以水平轴呈对称分布, 越靠近中轴弯曲变形越大, 传感单元的电阻变化率也越大; 其中, 弦变化量为10 mm时电阻变化率为

**图 8** GA全柔性触觉传感器阵列抗干扰性实验. (a) 传感器阵列拉伸变形示意图; (b) 传感器阵列拉伸状态信号响应曲线; (c) 传感器阵列弯曲变形示意图; (d) 传感器阵列弯曲状态信号响应曲线**Figure 8** Evaluation of interference resistance of GA-based fully flexible tactile sensor array. (a) Schematic diagram on tensile deformation of the sensor array; (b) signal response of the sensor array in tensile state; (c) schematic diagram on bending deformation of sensor array; (d) signal response of the sensor array in bending state.

6.65%, 且变化规律与有限元计算结果基本一致.

4.3 传感器阵列感知性能试验分析

为了验证GA全柔性触觉传感器阵列对位置、大小和形状等物理参数的检测能力, 利用自主研发的信号采集系统对传感阵列的信号进行采集. 单阵列多次采集施力试验过程如图9(a)所示, 在GA全柔性触觉传感器阵列的一个传感单元上施加一个应力, 经过一定

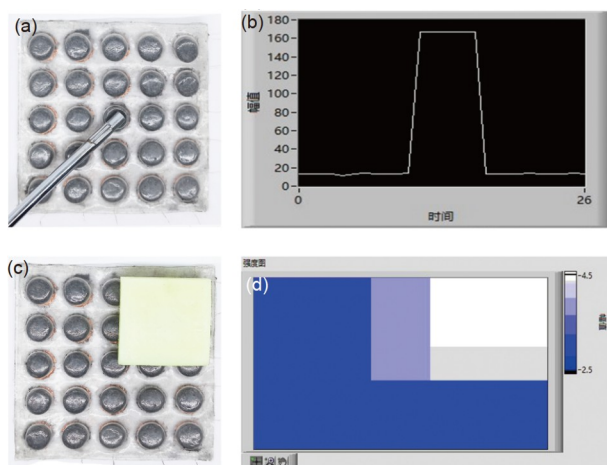


图9 GA全柔性触觉传感器信号采集系统性能实验。(a) 单阵列多次采集施力示意图; (b) 单阵列多次采集响应信号波形图; (c) 多阵列多次采集施力示意图; (d) 多阵列多次采集响应信号强度图

Figure 9 Performance measurement of signal acquisition system of GA-based fully flexible tactile sensor. Single-array multi-acquisition: (a) force diagram and (b) response signal waveform diagram; multi-array multi-acquisition: (c) force diagram and (d) response signal intensity diagram.

时间后撤去, 并将信号采集平台设置为单阵列多次采集模式, 得到一系列传感信号的变化波形, 如图9(b)所示, 波形图清晰且实时显示了整个加载与卸载过程中作用力随时间的变化情况, 说明GA全柔性触觉传感阵列与其信号采集系统可实时监测单个且不断变化的外部刺激。多阵列多次采集施力试验过程如图9(c)所示, 将一块环氧树脂制成的方块放置于柔性传感器之上, 并将信号采集平台设置为多阵列多次采集模式, 得到

如图9(d)所示的信号强度图, 该图清楚且实时显示了环氧树脂块的位置、形状和对传感器阵列的施力情况, 说明GA全柔性传感器阵列可对位置、大小和形状等物理参数进行检测, 具有大面积信号感知能力。

通过以上试验可以得出, 柔性传感器阵列可以对力的大小、作用位置和作用范围进行感知, 同样, 该信号采集系统也可对传感阵列获得的传感信号根据需求进行多种模式的实时显示和采集, 满足了对传感信号应用于多方面评估的目的, 为实现柔性传感器的大面积信号采集提供了实验保障。

5 结论

本文通过对GA材料力学行为的分析, 发现该材料为可压缩超弹材料, 可利用Storakers材料模型对GA材料的力学特性进行模拟分析, 并以此提出了基于GA材料的全柔性触觉传感器的“气泡膜”结构设计和详细的制作方法。通过有限元分析, 证实了相比于“三明治”结构, 具有“气泡膜”结构的GA全柔性触觉传感器具有更好的抗干扰性能, 并成功组装出GA全柔性触觉传感器, 该传感器具有良好的力学、传感特性和抗干扰性, 传感器阵列可实时监测力的大小、位置和形状等信息。同时, 也证实了所搭建的信号采集系统可对传感阵列获得的传感信号根据需求进行多种模式的实时显示和采集, 满足了将传感信号应用于多方面评估的目的, 从而为实现柔性传感器的大面积信号采集提供了实验保障。

参考文献

- Li F C, Kong Z, Wu J H, et al. Research progress of flexible piezoresistive pressure sensor (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2021, 70: 7–24 [李凤超, 孔振, 吴锦华, 等. 柔性压阻式压力传感器的研究进展. *物理学报*, 2021, 70: 7–24]
- Guo Y, Wei X, Gao S, et al. Recent advances in carbon material-based multifunctional sensors and their applications in electronic skin systems. *Adv Funct Mater*, 2021, 31: 2104288
- Xie L P, Xiang D L, Wang R Q, et al. Progress of flexible wearable stress sensor (in Chinese). *Sci Technol Eng*, 2021, 21: 8301–8309 [谢丽萍, 向大龙, 王仁乔, 等. 柔性可穿戴应力传感器的研究进展. *科学技术与工程*, 2021, 21: 8301–8309]
- Im T H, Lee J H, Wang H S, et al. Flashlight-material interaction for wearable and flexible electronics. *Mater Today*, 2021, 51: 525–551
- Keum K, Kim J W, Hong S Y, et al. Flexible/stretchable supercapacitors with novel functionality for wearable electronics. *Adv Mater*, 2020, 32: 2002180
- Chen S, Wei Y, Yuan X, et al. A highly stretchable strain sensor based on a graphene/silver nanoparticle synergic conductive network and a sandwich structure. *J Mater Chem C*, 2016, 4: 4304–4311
- Wan Y, Wang Y, Guo C F. Recent progresses on flexible tactile sensors. *Mater Today Phys*, 2017, 1: 61–73

- 8 Tang X, Yang W, Yin S, et al. Controllable graphene wrinkle for a high-performance flexible pressure sensor. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 20448–20458
- 9 Huang W, Dong X C, Cai Y C. Wearable and flexible electronic strain sensor. *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 635–649
- 10 Chen T, Yang G, Wang J, et al. Surfactant stabilized GO liquid crystal for constructing double-walled honeycomb-like GO aerogel with super-sensitivity for fingertip pulse monitoring. *Carbon*, 2021, 184: 53–63
- 11 Chen T, Wang J, Wu X, et al. Ethanediamine induced self-assembly of long-range ordered GO/MXene composite aerogel and its piezoresistive sensing performances. *Appl Surf Sci*, 2021, 566: 150719
- 12 Huang J X. Design, fabrication and sensing performance of three dimensional graphene-based flexible piezoresistive materials (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019 [黄敬霞. 三维石墨烯基柔性压阻材料的设计、制备及传感性能研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2019]
- 13 Pan D, Wang C, Wang X. Graphene foam: Hole-flake network for uniaxial supercompression and recovery behavior. *ACS Nano*, 2018, 12: 11491–11502
- 14 Yang T, Wang C, Wu Z. Strain hardening in graphene foams under shear. *ACS Omega*, 2021, 6: 22780–22790
- 15 Gao H L, Zhu Y B, Mao L B, et al. Super-elastic and fatigue resistant carbon material with lamellar multi-arch microstructure. *Nat Commun*, 2016, 7: 12920
- 16 Gao H L, Wang Z Y, Cui C, et al. A highly compressible and stretchable carbon spring for smart vibration and magnetism sensors. *Adv Mater*, 2021, 33: 2102724
- 17 Li B M. Preparation of silver nanowire electrode and its application in capacitive pressure sensor (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2021 [李炳蔓. 银纳米线电极的制备及其在电容式压力传感器中的应用研究. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2021]
- 18 Wang Y R, Wang G Q, Li X, et al. Research progress of flexible piezoresistive sensor prepared by solution method (in Chinese). *Acta Chim Sin*, 2022, 80: 214–228 [王雨柔, 王国琪, 李想, 等. 溶液法制备柔性压阻式传感器的研究进展. 化学学报, 2022, 80: 214–228]
- 19 Gao Y, Yu L, Yeo J C, et al. Flexible hybrid sensors for health monitoring: Materials and mechanisms to render wearability. *Adv Mater*, 2020, 32: 1902133
- 20 Zhuang J C. Study on the wearable electrochemical biosensor based on low dimensional nanomaterials (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Shenzhen: Shenzhen University, 2017 [庄俊城. 基于低维纳米材料的可穿戴电化学生物传感器电极研究. 硕士学位论文. 深圳: 深圳大学, 2017]
- 21 Cao J G, Zhou J H, Liao C X, et al. Research progress and development trend of electronic skin tactile sensor (in Chinese). *J Harbin Inst Technol*, 2017, 49: 1–13 [曹建国, 周建辉, 廖存孝, 等. 电子皮肤触觉传感器研究进展与发展趋势. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49: 1–13]
- 22 Guo X H, Huang Y, Teng K, et al. Design and experiment of fully flexible capacitive tactile sensor array (in Chinese). *J Elec Measure Instrum*, 2015, 29: 1278–1285 [郭小辉, 黄英, 腾珂, 等. 全柔性电容式触觉传感阵列设计与实验. 电子测量与仪器学报, 2015, 29: 1278–1285]
- 23 Choi W M, Song J, Khang D Y, et al. Biaxially stretchable “wavy” silicon nanomembranes. *Nano Lett*, 2007, 7: 1655–1663
- 24 Shao R, Wang C, Zhao J, et al. Crosstalk-free, stretching-insensitive sensor based on arch-bridge architecture for tactile mapping with parallel addressing strategy toward million-scale-pixels processing. *Adv Sci*, 2021, 8: 2101876
- 25 Liao X, Wang W, Wang L, et al. A highly stretchable and deformation-insensitive bionic electronic exteroceptive neural sensor for human-machine interfaces. *Nano Energy*, 2021, 80: 105548
- 26 Wang L N, Zhang C D, Wang X L, et al. Preparation and properties of super elastic graphene aerogels (in Chinese). *J Funct Poly*, 2018, 31: 462–467 [汪利娜, 张弛道, 王新灵, 等. 超弹性石墨烯气凝胶的制备及其性能. 功能高分子学报, 2018, 31: 462–467]
- 27 Xiao Z J. Preparation and pressure sensing properties of hyperelastic graphene aerogels (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015 [肖卓建. 超弹性石墨烯气凝胶的制备及其压力传感特性的研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2015]
- 28 Zhang P P, Lv L X, Cheng Z H, et al. Hyperelastic, macroporous, polystyrene controlled graphene gel is used as a sensitive sensor. In: Abstract Collection of the 30th Annual Academic Conference of Chinese Chemical Society—Chapter 39: Nano Carbon Materials (in Chinese). Chinese Chemical Society, 2016. 28 [张盼盼, 吕凌霄, 程志华, 等. 超弹、大孔、聚苯乙烯调控的石墨烯凝胶用作灵敏的传感器. 见: 中国化学会第30届学术年会摘要集——第三十九分会: 纳米碳材料. 中国化学会, 2016. 28]
- 29 Li H N, Li D, Xin X. Finite element analysis of polyurethane bud seal ring based on ANSYS (in Chinese). *Lubricat Seal*, 2015, 40: 82–85 [李海

- 宁, 李丹, 辛新. 基于ANSYS的聚氨酯蕾形密封圈有限元分析. *润滑与密封*, 2015, 40: 82–85]
- 30 Ma Y, Yue Y, Zhang H, et al. 3D synergistical MXene/reduced graphene oxide aerogel for a piezoresistive sensor. *ACS Nano*, 2018, 12: 3209–3216
- 31 Tian W, Zhang H, Duan X, et al. Porous carbons: Structure-oriented design and versatile applications. *Adv Funct Mater*, 2020, 30: 1909265
- 32 Wu X, Hou K, Huang J, et al. Graphene-based cellular materials with extremely low density and high pressure sensitivity based on self-assembled graphene oxide liquid crystals. *J Mater Chem C*, 2018, 6: 8717–8725
- 33 Zhang R, Hu R, Li X, et al. A bubble-derived strategy to prepare multiple graphene-based porous materials. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1705879
- 34 Liu J, Zhang H B, Xie X, et al. Multifunctional, superelastic, and lightweight MXene/polyimide aerogels. *Small*, 2018, 14: 1802479
- 35 Zhu M, Yue Y, Cheng Y, et al. Hollow MXene sphere/reduced graphene aerogel composites for piezoresistive sensor with ultra-high sensitivity. *Adv Electron Mater*, 2020, 6: 1901064
- 36 Xu D, Li Z, Li L, et al. Insights into the photothermal conversion of 2D MXene nanomaterials: Synthesis, mechanism, and applications. *Adv Funct Mater*, 2020, 30: 2000712

Design, assembly, and property of a graphene aerogel-based fully flexible tactile sensor

WANG BaoMin¹, LI YiYun^{1,2}, CHEN TianDi², WANG BingJi², LIU YuFu^{1,2}, MA LiMing², YANG ShengRong^{2,3}, GAO Xin⁴ & WANG JingQing^{2,3}

¹ School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

² State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

³ Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, CAST, Lanzhou 730000, China

To address the concern of flexible tactile sensors, including hard design, packaging, circuit layout, and poor anti-interference, a feasible design method of graphene aerogel (GA)-based fully flexible tactile sensor is proposed based on the strain energy density function of Storakers material model. This method demonstrates that the GA-based flexible tactile sensor with a “bubble film” structure exhibits superior anti-interference performance compared to the “sandwich” structure. Thus, the GA sensor with a “bubble film” structure is fabricated, and its excellent sensing characteristics and mechanical and anti-interference properties are subsequently demonstrated using various measurements. Thus, the signal acquisition system of the piezoresistive sensor array is further designed and developed, along with the successful real-time monitoring of force, object position, and shape.

graphene aerogel, fully flexible tactile sensor, “bubble film” structure, numerical simulation, sensing application

doi: [10.1360/SST-2022-0169](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0169)