

# 导电海绵-AgNWs 复合柔性应力传感器灵敏度优化\*

李秀平<sup>1)†</sup> 李娜<sup>1)</sup> 刘程<sup>2,4)</sup> 于福来<sup>3)</sup> 谢智荆<sup>1)</sup> 罗才辉<sup>1)</sup>

(1)大连大学环境与化学工程学院, 116622, 辽宁大连; (2)大连理工大学辽宁省高分子科学与工程重点实验室, 116024, 辽宁大连; (3)大连孚美化工科技有限公司, 116000, 辽宁大连; (4)辽宁省高性能树脂工程技术研究中心, 116024, 辽宁大连)

**摘要** 以导电海绵为基底,并将其与银纳米线(AgNWs)复合作为柔性电极,制备了一系列柔性应力传感器,其具有良好的灵敏度和重复性.研究发现 AgNWs 均匀附着在导电海绵的泡沫网络中.受力时随着海绵泡沫结构大形变的同时,AgNWs 结构在微观上也产生次级形变,这种多层次的导电网络结构变化有利于增强应力传感器的灵敏度.考察了不同介电材料、介电层厚度、AgNWs 滴涂层数等条件对灵敏度的影响,并优化了制备条件,实现了传感器的可控制备.本文制备的传感器制备方法简单,有一定实际应用前景.

**关键词** 应力传感器;银纳米线;导电海绵;微观结构;柔性

**中图分类号** TB34

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2021250

## 0 引言

随着柔性电子材料和检测技术的迅猛发展<sup>[1]</sup>,柔性应力传感器被广泛应用于软体机器人<sup>[2-3]</sup>、电子移动终端<sup>[3-4]</sup>、医疗健康监测设备<sup>[5-6]</sup>、电子皮肤<sup>[7]</sup>、人机交互<sup>[8]</sup>等可穿戴领域.柔性应力传感器是智能可穿戴设备的关键器件<sup>[9]</sup>,它可以将应力转化为电信号并输出.柔性应力传感器的性能对可穿戴设备的整体性能有重要影响.

柔性应力传感器的传感机制是传感器在通电回路中将所受到的应力/应变先转化为自身性质的变化,进而再转化为电信号的感应机制,其主要分为压阻效应、电容效应和压电效应.因此,应力传感器通常分为电阻式传感器<sup>[10]</sup>、电容式传感器<sup>[11-12]</sup>和压电式传感器<sup>[13-14]</sup>.其中,电容式柔性传感器因具有较好的抗过载能力、抗干扰特性和动态特性等受到广泛关注和研究.

电容式传感器通常采用传统的3层平板式结构,即上层复合驱动电极、中间层介电层和底层复合感应电极.当应力作用在平行板时,会引起驱动电极与感应电极之间的2板之间距离和电极面积改变,导致电容值改变而进行检测.

柔性应力传感器对高灵敏度和较高柔性的需求,不断驱动着柔性传感器器件在传感理论和结构设计上的研究.以高分子材料为基础的柔性应力传感器

的制备方法主要包括低温沉积法<sup>[15]</sup>、溶液处理法<sup>[16]</sup>、转移印刷法<sup>[17]</sup>和纳米模塑/微米模塑<sup>[18]</sup>.最近仿生方法亦成为热门方法用于制备柔性应力传感器.这些制备方法通过构建活性导体微结构、介电层微结构和电极微结构等途径,来提高传感器的灵敏度.

然而,目前电容式柔性应力传感器仍存在灵敏度低等缺点,采用工艺简单、低成本的方法制备高灵敏度、快速响应时间的柔性应力传感器是研究者们要致力解决的问题<sup>[19-22]</sup>,柔性应力传感器的组装、排列、采集和封装技术仍需进一步提高.因此研究工艺简单、成本低廉且具有高灵敏度、快速响应时间的柔性应力传感器具有重要的科研及实际意义.研究制备过程对应力传感器灵敏度有影响的因素对提升传感器的性能很有意义.

导电海绵是一种价格低廉且简便易得的基底材料,其具备的多孔特性在响应压力和传导电流方面起到重要作用<sup>[23]</sup>.导电海绵具有弹性大、孔隙率高、比表面积大、密度低、制作成本低等优点,是应力传感器优良基底材料<sup>[24]</sup>.

具有高长径比的一维金属纳米材料,因其具有独特的性能在传感器领域得到广泛的应用.其中银纳米线(AgNWs)不仅具有较高的长径比,而且具有优异的导电性和柔韧性,可作为应力传感器的敏感电极材料<sup>[25]</sup>.研究表明,应力传感器的灵敏度受电极表面

\* 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540045);大连市科技之星资助项目(2019RQ087)

† 通信作者:李秀平(1984—),女,讲师.研究方向:聚合物基纳米复合材料. E-mail: lixp0204@sina.cn

收稿日期:2021-10-12

AgNWs 的微观形貌影响,当电极表面 AgNWs 处于无规疏松状态,即电极粗糙度相对较大时,传感器灵敏度较高<sup>[26]</sup>.

本文以导电海绵为基底并将其与 AgNWs 复合作为柔性电极制备柔性应力传感器,借助导电海绵大比表面积和高孔隙率的立体结构特点,增强附着于导电海绵上 AgNWs 微观结构的无规性和疏松性,来提升传感器的灵敏度.重点研究了制备过程中的制备方法和传感器的构造对传感器灵敏度的影响机制,实现应力传感器的可控制备.本文制备的柔性应力传感器制备方法简便、易于大规模生产、灵敏度高,有一定实际应用价值.

## 1 实验部分

**1.1 实验原料** 采用的导电海绵(厚度 3.0 mm)直接从深圳市华悦源电子有限公司购买(以聚氨酯发泡海绵为基体,经过 PVD 导电化处理和电沉积金属镍、铜等加厚处理制备). AgNWs( $5.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  的乙醇溶液,银线长度约  $20 \mu\text{m}$ )从南京纳米先丰科技有限公司购买,用无水乙醇稀释到特定质量浓度后直接使用.无水乙醇等常规药品均从国药集团化学试剂有限公司购买.

### 1.2 实验方案:柔性应力传感器的制备

1) AgNWs 滴涂导电海绵.将导电海绵切成  $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$  大小,分别放入去离子水和无水乙醇溶液中各超声清洗 20 min.将清洗干净的导电海绵置于真空烘箱中  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  下真空干燥去除残留的乙醇.干燥后取出,将  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  AgNWs 加入无水乙醇稀释,即可配制不同质量浓度的无水乙醇 AgNWs 溶液.将配制好的  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  AgNWs 溶液  $600 \mu\text{L}$  用移液枪均匀滴涂在干净的导电海绵上的一面,静置干燥.待导电海绵一面干燥后翻转,再用移液枪移取质量浓度为  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  的 AgNWs 溶液  $600 \mu\text{L}$  均匀滴涂至另一面,再静置干燥.此时导电海绵已滴涂了 2 层质量浓度为  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  的 AgNWs 溶液,每滴涂 1 层所用 AgNWs 溶液的量  $600 \mu\text{L}$ .可以重复此滴涂的步骤获得滴涂层数为 4 和 6 层的导电海绵.

2) 柔性应力传感器的封装.将制备好的导电海绵电极铺展在干净无尘的玻璃板上,先在导电海绵电极的一面四周边缘贴上约 5 mm 宽的双面胶带,再将 10 cm 长的铜导线一端插入导电海绵与双面胶带粘合的间隙内,然后将一定厚度的聚氨酯(PU)与导电海绵电极带双面胶的一面贴合,最后将另一片以相同方法制备的四周粘有双面胶和铜导线的导电海绵电极

与 PU 海绵的另一面贴合,制备成具有如图 1 所示结构的传感器.用保鲜膜对已制备好的柔性应力传感器进行表面封装.重复上述步骤,分别以 PU 海绵、聚乙烯(PE)薄膜和聚四氟乙烯(PTFE)薄膜作为柔性介电层材料制作新型柔性电容式应力传感器.

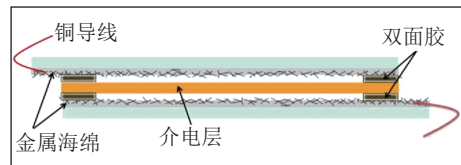


图 1 封装的柔性应力传感器的结构示意图

本文制备的传感器的结构主要分为 5 层:处于最外侧的 2 层为导电海绵电极层,中间介电层为双面胶厚度的薄空气层和柔性介电层材料(PU 海绵、PE 薄膜或 PTFE 薄膜).传感器小巧轻便,总厚度最薄可为 6.4 mm.传感器总厚度依据测试出的用于制备传感器的材料厚度来计算,例如:单个导电海绵电极的厚度约为 3.0 mm,介电层厚度最薄为 0.4 mm,双面胶的厚度为 0.15 mm.其中,聚氨酯介电层的厚度可以调整.不同厚度的聚氨酯介电层的封装方法与上述步骤类似,分别以厚度为 0.5、1.0 和 2.0 cm 的聚氨酯海绵作为柔性介电层材料,采用胶粘封装的方式制作新型柔性电容式应力传感器.

**1.3 测试方法** 应力传感器的灵敏度由应力传感器测试平台来进行表征.测试平台如图 2 所示.

本文的应力传感器测试平台利用胜利牌 VC6013 数字电容表和艾德堡数显推拉力计 HP-50N 搭建电容式柔性压力传感器的测试装置,测试微小压力作用在柔性应力传感器表面时电容值信号的变化.为了便

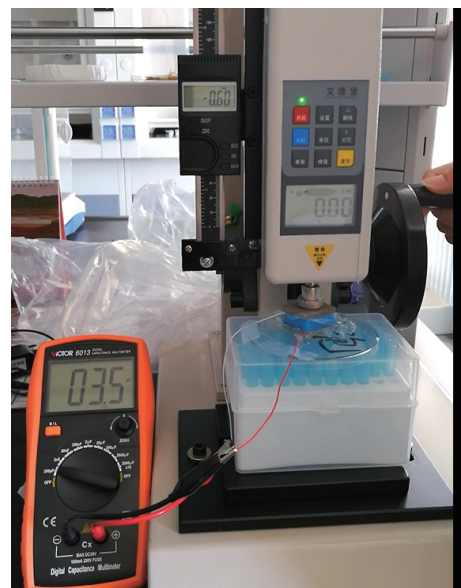


图 2 应力传感器的测试平台

于传感器的测试, 封装传感器时将上下电极引出的导线错开排列, 再将导线与数字电容表连接来测试电容值. 测试过程中, 数显推拉力计在传感器表面施加压力时电容值会有所变化, 通过研究电容值随承载的面积压力变化来研究传感器的灵敏度等性能. 测试所用的数字电容表型号为 UV-2501PC, 购置于深圳朗普电子科技有限公司. 数显推拉力计型号为 HP-50, 购置于乐清艾德堡仪器有限公司.

## 2 结果与讨论

**2.1 材料的制备和结构表征** 目前, 常见纳米复合材料应力传感器的作用机制是通过受力过程中纳米导电网络结构的改变, 导致电阻或电容的改变. 而纳米导电网络的均一性和纳米导电网络微观结构变化是影响传感器灵敏度的重要影响因素. 纳米导电网络的均一性尤其不好控制. 本文采用的导电海绵立体网络结构稳定均一. 导电海绵因为孔洞的紧密排列所以具有优良的柔性. 而 AgNWs 均匀附着在导电海绵的泡沫网络中受力时随着海绵泡沫结构的大形变的同时, AgNWs 结构在微观上也产生次级形变, 这种多层次的导电网络结构变化有利于增强应力传感器

的灵敏度. 图 3 为滴涂 6 层 AgNWs 的导电海绵电极的扫描电镜照片, 可看出导电海绵均匀稳定的立体网络结构(图 3-a)和附着在导电海绵上面 AgNWs 的均一结构(图 3-b).

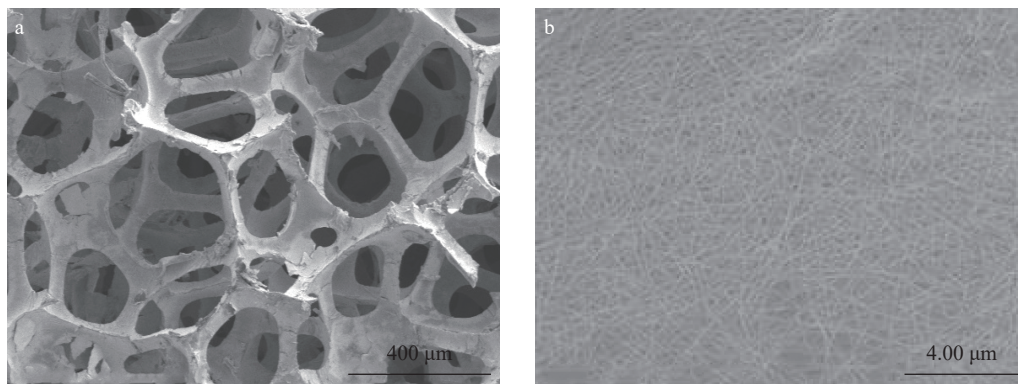
灵敏度是应力传感器的一个重要的性能指标, 灵敏度( $S_n$ )可以通过测试传感器在稳态下输出量变化与输入量变化的比值来计算, 公式为<sup>[27]</sup>

$$S_n = \frac{\delta\left(\frac{\Delta C}{C_0}\right)}{\delta p} = \frac{\delta\left(\frac{C - C_0}{C_0}\right)}{\delta p},$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}.$$

式中  $p$  为压强,  $C_0$  为初始电容,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon_r$  为极板间介质的相对介电常数,  $A$  为两平行板覆盖的面积,  $d$  为两平行板间距.

此外, 本文制备的柔性应力传感器的质量为 6.600 1~7.300 4 g(质量变化是由于介电层材料及厚度的变化), 质量小使其具有良好的便携性. 导电海绵基底柔性好, 易与不同形貌平面贴合, 而且柔软轻便, 具有良好的舒适性. 本文制备的柔性应力传感器在可穿戴领域有一定应用前景.



a. 放大 250 倍, 导电海绵网络结构; b. 放大 2 万倍, 附着在导电海绵上的 AgNWs 的结构.

图 3 AgNWs 复合导电海绵的微观结构

**2.2 介电材料对传感器灵敏度的影响** 本文分别采用 PU 海绵(相对介电常数 3.5~4.3)、PTFE 薄膜(相对介电常数 2.6~2.8)和 PE 薄膜(相对介电常数 2.2~2.3)作为介电层材料制备应力传感器, 并对传感器的灵敏度进行了系统研究. 如图 4 所示, 以 PU 海绵为介电层的应力传感器的灵敏度明显优于以 PTFE 薄膜和 PE 薄膜为介电层的应力传感器. 这是因为介电层材料本身的性质对传感器灵敏度有较大影响. 通常, 聚合物介电层的相对介电常数越大、相对密度越高, 电容式应力传感器的灵敏度就越高<sup>[27]</sup>. 与 PTFE、PE 的相对密度和相对介电常数相比较(相对密度:  $\rho(\text{PTFE}) >$

$\rho(\text{PU}) > \rho(\text{PE})$ ; 相对介电常数由大到小排序: PU、PTFE、PE), PU 海绵相对密度和相对介电常数综合优于 PTFE 和 PE, 因此 PU 作为介电层的应力传感器灵敏度高于 PTFE 和 PE 作为介电层的传感器.

基于此, 下述对于应力传感器灵敏度的影响因素研究均采用灵敏度更优的 PU 海绵作为介电层的传感器.

**2.3 介电层厚度的影响** 介电层的厚度不同对形变时电容的变化有一定影响. 本文研究了不同厚度的 PU 海绵介电层对应力传感器灵敏度的影响, 如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 本文制备的应力传感器有 2 个

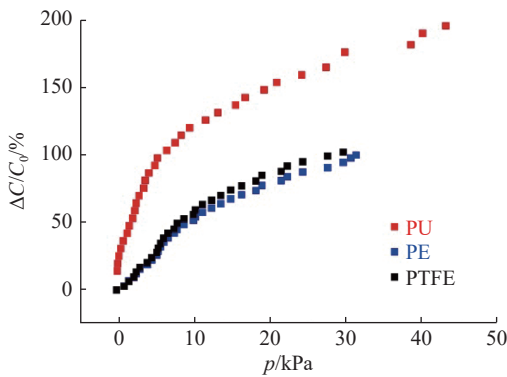
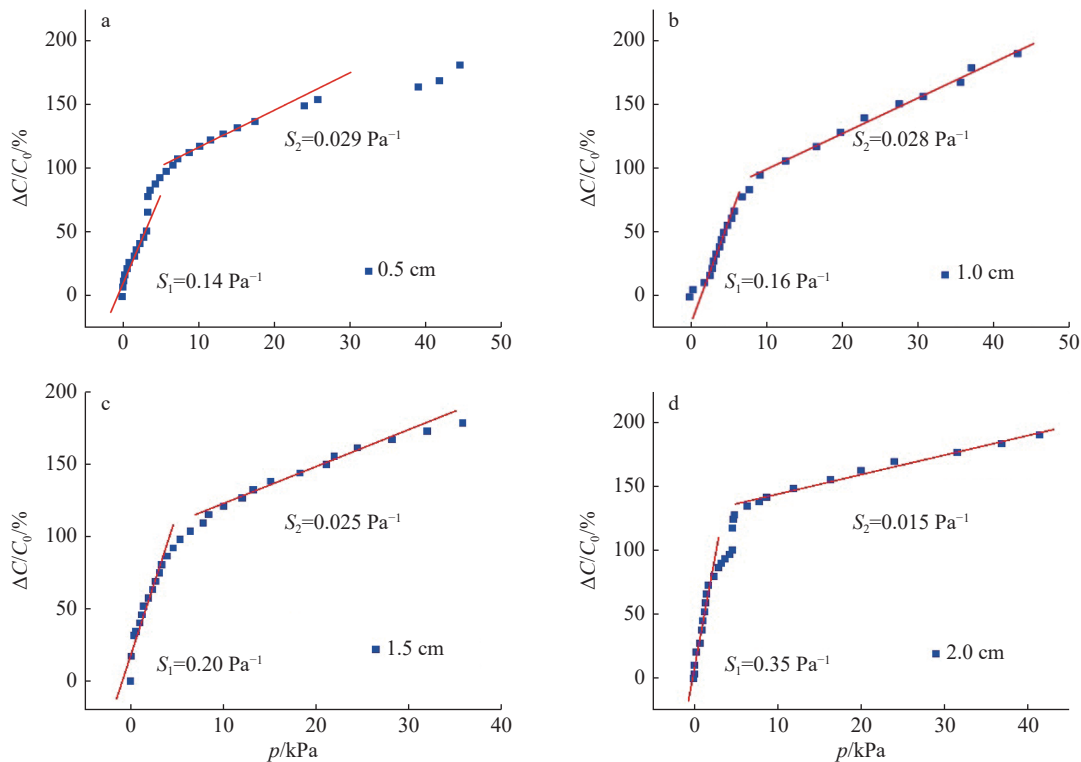


图 4 不同介电材料传感器的灵敏度曲线



a. 介电层厚度 0.5 cm; b. 介电层厚度 1.0 cm; c. 介电层厚度 1.5 cm; d. 介电层厚度 2.0 cm.

图 5 介电层厚度对传感器灵敏度的影响

综上,当 PU 海绵介电层厚度为 1.5 cm 时,传感器在小应力范围和大应力范围均具有良好的灵敏度.因此,介电层厚度为 1.5 cm 为较优的制备参数.

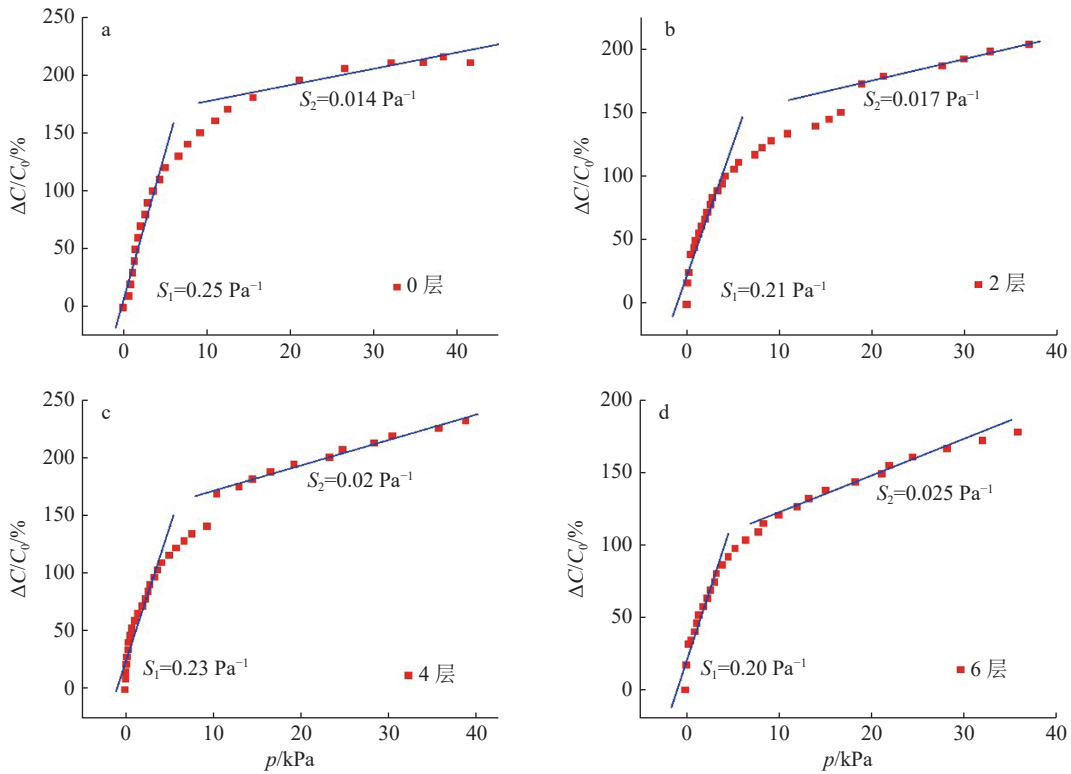
**2.4 不同 AgNWs 滴涂层数与灵敏度的关系** 为了研究 AgNWs 滴涂层数对传感器灵敏度的影响,本研究分别对滴涂了 0、2、4 和 6 层 AgNWs 溶液制作的以 PU 为介电层(厚度为 1.5 cm)的柔性应力传感器进行了灵敏度测试(图 6).

从图 6 能够发现,当应力 < 10 kPa 时,AgNWs 滴涂层数对灵敏度的影响不大.随着 AgNWs 滴涂层数的增加,应力传感器在小应力作用范围内的灵敏度反而呈现略微降低的趋势,表明在较小的应力作用范围内,传感器的电容变化主要依靠导电海绵的形变所

线性区间,1 个是在应力较小的区间(<5000 Pa),对应的灵敏度为  $S_1$ ;另 1 个在应力较大的区间范围(5000~40000 Pa),对应的灵敏度为  $S_2$ .随着 PU 海绵介电层的厚度不断增大, $S_1$  显著增大,表明在小压力情况下,介电层厚度的增大有利于增加传感器的灵敏度.然而,介电层的厚度增大却直接导致  $S_2$  的降低.尤其当介电层厚度达到 2.0 cm 时,灵敏度比 0.5、1.0 和 1.5 cm 介电层厚度的传感器灵敏度下降近 50%,表明在单应力较大的区间范围,介电层厚度的增加降低了传感器的灵敏度.

致,AgNWs 层所起的作用有限.当应力 > 10 kPa 时,可以观察到随着 AgNWs 滴涂层数的增加,传感器的灵敏度呈上升趋势,表明在大应力作用范围内 AgNWs 对传感器的电容变化起到一定作用,可以与导电海绵的空间孔结构相协同实现应力检测.

上述特点与图 3 传感器的微观结构的特征相一致.从图 3 可看出,导电海绵的孔明显比 AgNWs 大很多,因此当微小应力作用于传感器时,导电海绵的孔空间结构变化更能够影响电容的变化,AgNWs 对电容变化影响有限.当施加应力变大到一定程度时,导电海绵孔结构的形变程度可能已经接近极限,施加应力对导电海绵结构影响渐弱,而附着在导电海绵孔表面的 AgNWs 导电层开始发挥作用.因此,在较大应



a. 滴涂 0 层; b. 滴涂 2 层; c. 滴涂 4 层; d. 滴涂 6 层.

图 6 不同 AgNWs 滴涂层数对传感器灵敏度的影响

力范围内作用时, AgNWs 层数的增加使传感器的灵敏度也增大.

**2.5 重复性实验** 为了研究传感器反复使用的性能, 本文测试了以 PU 为介电层(厚度为 1.5 cm, AgNWs 滴涂 6 层)的柔性应力传感器的电容随应力变化的曲线, 重复测试了 50 次, 如图 7 所示.

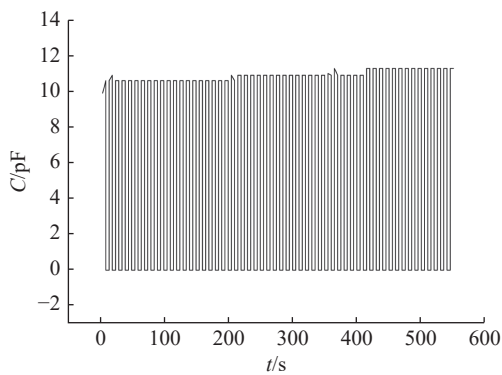


图 7 柔性应力传感器重复性曲线(50 次)

本文制备的传感器重复性较好: 在反复施力的过程中, 电容值变化基本在一个比较稳定的区间. 然而, 随着测试次数的增加, 电容有略微增大的趋势, 这可能是因为反复施力使电极中间的介电层厚度有微小的变化.

**2.6 迟滞性曲线** 迟滞性是指传感器的输入量在相同的量程, 但输入量的施加趋势不相同, 即正行程

(输入量增大)和反向行程(输入量减少)期间, 曲线不一致的程度. 本研究在同一进程中施加逐渐增加应力到最大值后再逐渐减小应力, 记录对应的电容值变化. 传感器的迟滞曲线如图 8 所示.

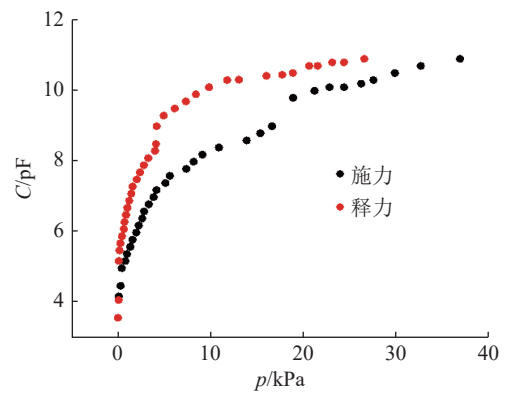


图 8 应力传感器的迟滞性曲线

从图 8 能够发现, 本文所制备的应力传感器具有一定迟滞性, 即施力曲线和释力曲线有一定偏差, 表明在逐渐增加应力过程中和逐渐减小应力过程中传感器的形变引起的微观结构不同. 造成迟滞性的原因可能是导电海绵基底回弹性差, 改善基底结构提升基底回弹性会成为下一步的研究方向之一. 选用弹性更好的基底, 比如橡胶类, 或者在海绵结构中填充回弹性好的材料有望解决这个问题.

### 3 结论

本文制备了一种以导电海绵为基底的柔性应力传感器,并研究了其灵敏度的影响因素.导电海绵所具有的优良柔性和孔洞均一紧密排列的结构特点,有利于受到应力时微观形貌规律变化. AgNWs 均匀附着在导电海绵的泡沫网络中,受力时随着海绵泡沫结构的大形变的同时, AgNWs 结构在微观上也产生次级形变,这种多层次的导电网络结构变化有利于增强应力传感器的灵敏度.进一步地,本文考查了不同介电材料、介电层厚度、AgNWs 滴涂层数等条件对灵敏度的影响,优化了制备条件.对传感器的重复性和迟滞性进行了研究,发现传感器重复性良好.迟滞性结果表明 AgNWs 复合导电海绵的结构在施力和释力过程中略有差别.本文制备的传感器制备方法简单、灵敏度良好,有一定实际应用前景.

### 4 参考文献

- [1] 李秀平, 刘程, 丁仕强, 等. PBI 基底柔性导电材料的制备和性能研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 654
- [2] ABELS C, MASTRONARDI V M, GUIDO F, et al. Nitride-based materials for flexible MEMS tactile and flow sensors in robotics[J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 1080
- [3] YAO L L, VAN DE ZEDDE R, KOWALCHUK G. Recent developments and potential of robotics in plant ecophenotyping[J]. *Emerging Topics in Life Sciences*, 2021, 5(2): 289
- [4] MALIK A, KANDASUBRAMANIAN B. Flexible polymeric substrates for electronic applications[J]. *Polymer Reviews*, 2018, 58(4): 630
- [5] WANG T, YANG H, QI D P, et al. Mechano-based transductive sensing for wearable healthcare[J]. *Small*, 2018, 14(11): 1702933
- [6] WU Y T, YAN T, PAN Z J. Wearable carbon-based resistive sensors for strain detection: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 4030
- [7] YANG J C, MUN J, KWON S Y, et al. Electronic skin: recent progress and future prospects for skin-attachable devices for health monitoring, robotics, and prosthetics[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(48): 1904765
- [8] HE F L, YOU X Y, WANG W G, et al. Recent progress in flexible microstructural pressure sensors toward human-machine interaction and healthcare applications[J]. *Small Methods*, 2021, 5(3): 2001041
- [9] WANG C Y, XIA K L, WANG H M, et al. Advanced carbon for flexible and wearable electronics[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(9): 1801072
- [10] TALLMAN T N, SMYL D J. Structural health and condition monitoring via electrical impedance tomography in self-sensing materials: a review[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(12): 123001
- [11] MISHRA R B, EL-ATAB N, HUSSAIN A M, et al. Recent progress on flexible capacitive pressure sensors: from design and materials to applications[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(4): 2001023
- [12] SUN Y, NELSON B J. MEMS capacitive force sensors for cellular and flight biomechanics[J]. *Biomedical Materials*, 2007, 2(1): S16
- [13] WASEEM A, JOHAR M A, HASSAN M A, et al. Flexible self-powered piezoelectric pressure sensor based on GaN/p-GaN coaxial nanowires[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 872: 159661
- [14] ZASZCZYŃSKA A, GRADYS A, SAJKIEWICZ P. Progress in the applications of smart piezoelectric materials for medical devices[J]. *Polymers*, 2020, 12(11): 2754
- [15] HASAN M, RHO J, KANG S Y, et al. Low temperature aluminum oxide gate dielectric on plastic film for flexible device application[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(5): 05EA01
- [16] GAO Q, MEGURO H, OKAMOTO S, et al. Flexible tactile sensor using the reversible deformation of poly(3-hexylthiophene) nanofiber assemblies[J]. *Langmuir*, 2012, 28(51): 17593
- [17] MADSEN M, TAKEI K, KAPADIA R, et al. Nanoscale semiconductor "X" on substrate "Y" - processes, devices, and applications[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(28): 3115
- [18] FAN F R, LIN L, ZHU G, et al. Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 3109
- [19] VORATHIN E, HAFIZI Z M, ISMAIL N, et al. Review of high sensitivity fibre-optic pressure sensors for low pressure sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 121: 105841
- [20] NAG M, SINGH J, KUMAR A, et al. Sensitivity enhancement and temperature compatibility of graphene piezoresistive MEMS pressure sensor[J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(10): 3977
- [21] LIU S Y, LU J G, SHIEH H P D. Influence of permittivity on the sensitivity of porous elastomer-based capacitive pressure sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(5): 1870
- [22] AHMAD H, CHONG W Y, THAMBIRATNAM K, et al.

- High sensitivity fiber Bragg grating pressure sensor using thin metal diaphragm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(12): 1654
- [23] 秦宁. 导电聚合物/聚氨酯基复合材料力学传感器的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018
- [24] 贺晓晓. 功能化导电微纳米复合材料的制备及其在柔性电子器件上的应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2018
- [25] 全勇. 银纳米线柔性压力传感器的制备及响应特性优化研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017
- [26] 侯玉群, 莫黎昕, 翟庆彬, 等. 银纳米线电极微结构对柔性压力传感器灵敏度的影响[J]. *信息记录材料*, 2014, 15(5): 13
- [27] 侯玉群. 柔性电容式应力传感器及其灵敏度影响因素研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2014

## Modification of conductive sponge-AgNWs flexible stress sensor

LI Xiuping<sup>1)</sup> LI Na<sup>1)</sup> LIU Cheng<sup>2, 4)</sup> YU Fulai<sup>3)</sup> XIE Zhijing<sup>1)</sup> LUO Caihui<sup>1)</sup>

(1) College of Environmental and Chemical Engineering, Dalian University, 116622, Dalian, Liaoning, China;

2) Liaoning Province Key Laboratory of Polymer Materials and Engineers (Dalian University of Technology), 116024, Dalian, Liaoning, China;

3) Dalian Fumei Chemical Technology Co., Ltd, 116000, Dalian, Liaoning, China;

4) Liaoning Province High Performance Resin Engineering Technology Research Center, 116024, Dalian, Liaoning, China)

**Abstract** Flexible stress sensor is a key component in wearable devices. Sensitivity of flexible stress sensor determines detection properties. Thus, investigation of sensitivity influence factors in the preparation process could help to improve sensor properties and controllable preparation. In this study, a novel series of flexible stress sensors were prepared by combining Ag nanowires (AgNWs) with conductive sponge substrates. Structural characterizations show that AgNWs adheres to the network of conductive sponge uniformly. When stress is applied, conductive sponge presents large-scale deformation and AgNWs shows subordinate deformation in microstructure. Multiple deformation including conductive sponge and AgNWs microstructure could enhance the sensitivity of flexible stress sensor. The flexible stress sensors in this work exhibit excellent sensitivity and repeatable durability. The influence of different dielectric materials, the thickness of dielectric layer and layers of dripping AgNWs is investigated carefully. The preparation process is optimized and can be controlled. The preparation process in this study is simple and is fit for large-scale production, with great application prospects in the future.

**Keywords** stress sensor; Ag nanowires (AgNWs); conductive sponge; microstructure; flexible

【责任编辑: 武 佳】