复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

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

李瑞青 李思明 陈天骄 肖学良

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

LI Ruiqing, LI Siming, CHEN Tianjiao, XIAO Xueliang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201110.005

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

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

基于空间限域强制组装法制备短切碳纤维-碳纳米管/聚二甲基硅氧烷导电复合材料性能

Properties of short carbon fiber-carbon nanotubes/polydimethylsiloxane conductive composites prepared by spatial confining forced network assembly method

复合材料学报. 2019, 36(11): 2552-2560 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190320.002

电极与介电层褶皱接触对压电式柔性电子皮肤性能的影响

Effect of folded contact between electrode and dielectric layer on the performance of piezoelectric flexible electronic skin

复合材料学报. 2020, 37(12): 3194-3200 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200416.002

多壁碳纳米管界面传感器及其在纤维缠绕压力容器原位监测中的应用

Multi-walled carbon nanotube interfacial sensor and its application in in-situ monitoring of the filament wound pressure vessel

复合材料学报. 2020, 37(2): 336-344 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190417.004

柔性可拉伸硅橡胶@多壁碳纳米管/硅橡胶可穿戴应变传感纤维

Flexible stretchable and highly sensitive silicone rubber@multiwalled carbon nanotubes/silicone rubber wearable strain sensing fibers

复合材料学报. 2020, 37(8): 2045-2054 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200103.002

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 38 卷 第 7 期 7 月 2021 年
Vol. 38 No. 7 Jul 2021

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20201110.005

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

分享本文

李瑞青，李思明，陈天骄，肖学良*
（江南大学 纺织科学与工程学院，无锡 214122）

摘 要：为解决含有微结构的柔性电容式压力传感器工作范围较窄的问题，设计了一种基于可膨胀微球/聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 介电层的柔性“三明治”结构电容式压力传感器，并对介电层的结构和形貌进行表征。通过自行搭建的压力设备和电容采集设备研究了基于可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的力学性能和电学性能。结果表明：通过向 PDMS 介电层中加入可膨胀微球显著降低了介电层的杨氏模量，同时提高了压力下介电层的介电常数，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的工作范围可达 400 kPa，最大灵敏度达到 0.06 kPa^{-1}，在 100 kPa 的负载循环下具有较好的重复性和稳定性，且具有较低的迟滞性 (4.7%)，可以准确迅速地检测到指尖压力，在生命健康等领域具有潜在的应用前景。

关键词：电容式压力传感器；聚二甲基硅氧烷；多孔材料；织物；灵敏度

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)07-2152-10

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

LI Ruiqing , LI Siming , CHEN Tianjiao , XIAO Xueliang*
(School of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to solve the problem of narrow working pressure range of microstructured flexible capacitive pressure sensors, a flexible “sandwich” structure capacitive pressure sensor based on expandable microsphere/ polydimethylsiloxane (PDMS) dielectric layer was designed in this paper. Then the structure and morphology of the expandable microsphere/PDMS dielectric layer were characterized. The mechanical and electrical properties of the expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensor based on expandable microsphere/PDMS dielectric layer were tested by self-built pressure and capacitance acquisition equipment. The results show that the Young’s modulus of the expandable microsphere/PDMS dielectric layer is significantly reduced due to the addition of expandable microsphere into PDMS, and the dielectric constant of the expandable microsphere/PDMS dielectric layer is increased under pressure. The working pressure range of the expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensor is up to 400 kPa, and the maximum sensitivity reaches 0.06 kPa^{-1}. The expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensor has good repeatability and stability under the load cycle of 100 kPa, and low hysteresis (4.7%). It can detect fingertip pressure accurately and rapidly, which has potential applications in areas of life and health.

Keywords: capacitive pressure sensors; polydimethylsiloxane; porous materials; fabrics; sensitivity

近年来，随着可穿戴设备及智能化产品的蓬勃发展，轻便易携带且适应性强的柔性压力传感器受到广泛关注。柔性压力传感器弥补了传统传感器重量重、体积大的缺点，拓宽了压力传感器

收稿日期：2020-08-03; **录用日期**：2020-10-28 ; **网络首发时间**：2020-11-10 16:03:19
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201110.005
基金项目：盛虹-应急保障与公共安全用纤维材料及制品科研攻关项目 (2020-fx020026); 江苏省研究生科研实践创新计划 (KYCY20_1944)
通信作者：肖学良，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为智能可穿戴电子服装材料 E-mail: xiao_xueliang@jiangnan.edu.cn

引用格式：李瑞青，李思明，陈天骄，等. 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 [J]. 复合材料学报，2021, 38(7): 2152-2161.
LI Ruiqing, LI Siming, CHEN Tianjiao, et al. Flexible capacitive pressure sensor based on expandable microsphere/ polydimethylsiloxane composite dielectric layer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(7): 2152-2161(in Chinese).

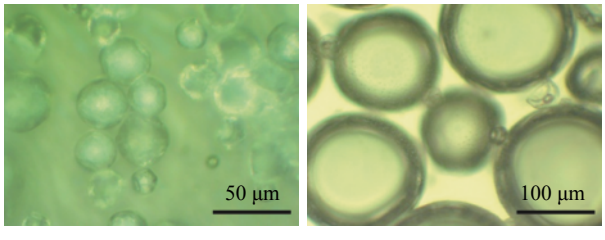
的应用领域[1-3]。根据信号转换原理的不同，柔性压力传感器主要分为压电式[4]、压阻式[5-6]和电容式[7-9]三大类，与压阻式及压电式柔性压力传感器相比，电容式压力传感器具有稳定性好、结构简单、功耗低等特点[10-12]，被广泛应用于健康监测、人机界面、可穿戴设备等领域[3,13-14]。但由于弹性介电层杨氏模量的限制，电容式压力传感器难以达到高灵敏度要求[15]，因此提高电容式压力传感器的灵敏度是亟待解决的问题之一。

在压力传感器的使用过程中，灵敏度是反映传感器性能的重要参数之一，决定了检测结果的有效性和精度[15-16]。在对脉搏、心跳、呼吸等微弱压力进行测量时，传感器的高灵敏度显得尤为重要。众多研究者针对提高电容式柔性压力传感器的灵敏度展开了一系列研究。引入微结构和构建复合介电层是目前研究较多的两种方法，其中比较常用的方法是引入微结构[17]。如 Luo 等[18]通过光刻制备了以倾斜微结构为介电层，Au/聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 为电极层的电容式柔性压力传感器。当受到压力时，微结构呈弯曲状态，比受压缩更容易发生变形，因此传感器在 0~1 kPa 的压力范围内灵敏度达到 0.41 kPa^{-1}。Kwon 等[19]将 Ecoflex 放入方糖模具中固化成型，再用水溶解掉方糖即得到多孔 Ecoflex 介电层。将多孔弹性体与碳纳米管-弹性体电极层组合所得的传感器在 <5 kPa 压力范围内的灵敏度达到 0.601 kPa^{-1}。Wan 等[20]以荷叶为电极模板，得到了具有荷叶微结构的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 柔性电极层。与无色聚酰亚胺 (CPI)介电层组装后得到的传感器灵敏度在 0~2 kPa 内达到 1.194 kPa^{-1}。上述研究均通过构建不同微结构的方法提高了传感器的灵敏度，但随着压力增大，微结构变形趋于饱和，灵敏度在高压下迅速下降，导致传感器的工作范围较低[21-22]。

针对上述问题，本文设计了一种具有高灵敏度及宽工作压力范围的传感器。通过可膨胀微球与 PDMS 的混合制得了具有中空微球结构的可膨胀微球/PDMS 介电层，当受压时，介电层产生较大且快速的变形，且介电常数得到提高，从而提高了传感器的灵敏度，同时微球壁在压缩时起到适当的支撑作用，使可膨胀微球/PDMS 介电层传感器在高压下仍具有工作能力。对可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的力学性能和电学性能进行了详细测试和分析，以期为柔性电容式压力传感器的进一步发展提供参考。

1 传感器的制备

可膨胀微球是由热塑性壳体 (丙烯腈聚合物) 包裹低沸点碳氢化合物形成的一种球体，当达到膨胀温度后，核内的低沸点液体碳氢化合物受热气化，在气压的作用下已经软化的热塑性壳体膨胀变大，从而变成一个中空球体。本文所用 EHM303 可膨胀微球开始膨胀温度为 120℃，最大膨胀温度为 160℃，膨胀前球径为 24~34 μm，膨胀后球径为 80~120 μm，微球膨胀前后的光学显微镜图像如图 1 所示。



(a) Before expansion (b) After expansion

图 1 微球膨胀前后示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microsphere before and after expansion

1.1 可膨胀微球/聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 介电层的制备

可膨胀微球/PDMS 介电层的制备流程如图 2 所示。分别向 PDMS 中加入 2.0wt%、1.5wt%、1.0wt% 的 EHM303 可膨胀微球，超声搅拌 2 h 使微球均匀分散在 PDMS 溶液中，将得到的混合溶液分别标记为可膨胀微球/PDMS-1、可膨胀微球/PDMS-2、可膨胀微球/PDMS-3。将不同含量的混合溶液分为 5 份放入 160℃ 的真空烘箱 (DZF-6020，上海一恒科学仪器有限公司)，分别保持 1 min、3 min、5 min、10 min、15 min，微球在此条件下发生膨胀。按照 10∶1 的质量比，向膨胀后的混合溶液中加入固化剂，通过搅拌均匀混合后，将溶液倒入玻璃皿并放在 70℃ 的真空烘箱中，固化 3 h 后，得到可膨胀微球/PDMS 介电层薄膜。

1.2 传感器组装

将制备的可膨胀微球/PDMS 介电层 (2.0 mm 厚) 裁剪成 1 cm×1 cm 的正方形，并在其上下两侧粘贴紧密机织物导电布胶带作为传感器的电极材料，最后在上下电极两侧均匀喷涂绝缘聚氨酯涂层作为传感器的屏蔽层，共同组成电容式柔性压力传感器，如图 3 所示。

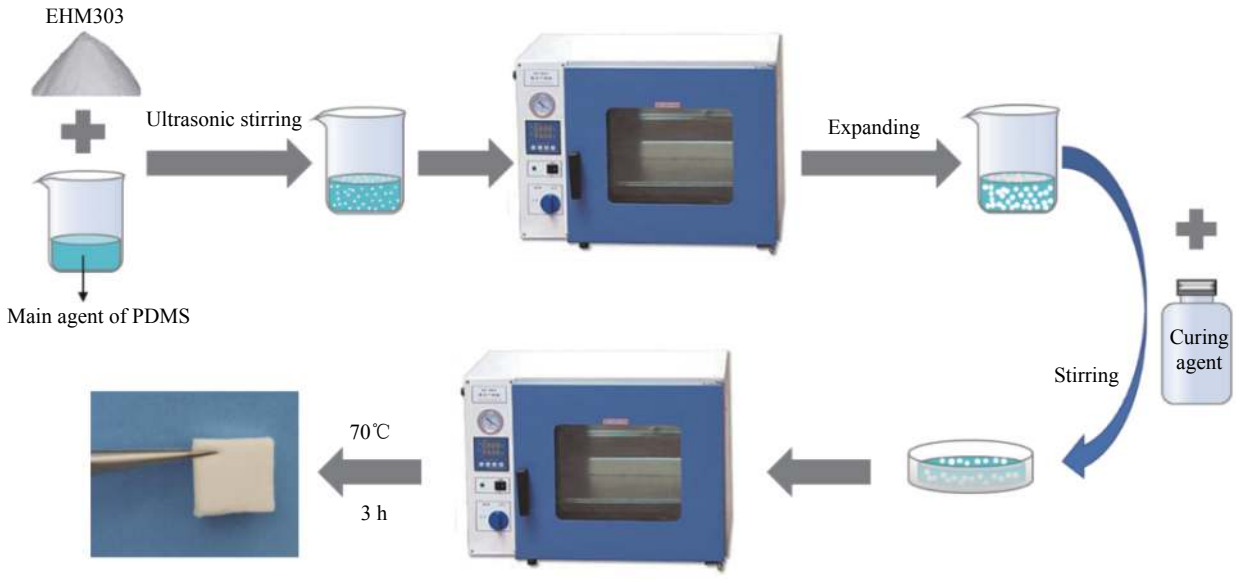


图 2　可膨胀微球/聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 介电层制备流程示意图

Fig. 2　Preparation diagram of expandable microsphere/polydimethylsiloxane (PDMS) dielectric layer

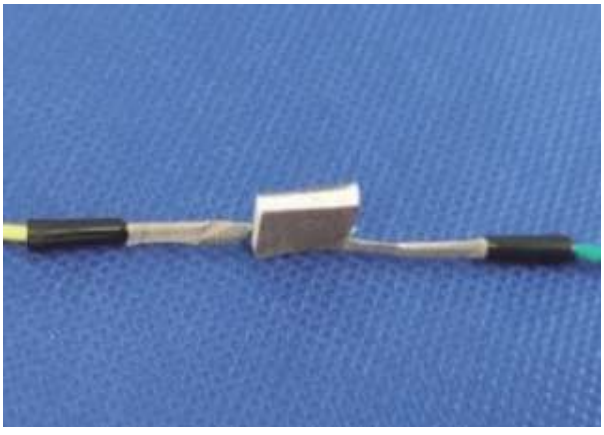


图 3　柔性电容式压力传感器实物照片

Fig. 3　Photographic of flexible capacitive pressure sensor

2　实验与表征

2.1　原材料

PDMS，主剂 A-184 硅橡胶，密度为 1.04 g/mL；固化剂 B，混合比例为 10∶1，混合后黏度为 3 500 mPa·s；EHM303 可膨胀微球，白色粉末，平均粒径为 24~34 μm，开始膨胀温度为 120℃，最大膨胀温度为 160℃，日本 SEKISUI；绝缘聚氨酯涂层，CRC18410，天津市创亚科技有限公司；机织物导电布胶带，厚度为 0.1 mm，深圳华顺有限公司。

2.2　测试与表征

2.2.1　介电层的表征

采用扫描电子显微镜 (TM3030，日立高新技术公司) 对含有可膨胀微球的介电层截面及纯 PDMS 介电层的截面进行观察，重点观察微球的分布及形貌。

采用 X 射线衍射仪 (D2 PHASER，德国布鲁克 AXS 有限公司) 进行样品的扫描，扫描速度为 0.1°/s，扫描范围为 5°~80°。

采用傅里叶变换红外光谱仪 (Nicolet is10，美国赛默飞世尔科技 (中国) 有限公司) 对试样进行红外测试，扫描范围为 4 000~500 cm^{-1}。

2.2.2　力学性能测试

当受到外力时，电容式压力传感器介电层的可压缩性对传感器性能有较大的影响。本文通过介电层厚度与压力的关系来反映介电层的可压缩性，采用万能试验机 (WH-5000，宁波伟恒检测仪器有限公司) 对传感器进行测试。

2.2.3　电学性能测试

在对压力传感器的性能进行评价时，主要涉及灵敏度、线性度、稳定性、重复性、迟滞性等参数，柔性压力传感器的性能评价指标也是诸如此类。针对本文中基于可膨胀微球/PDMS 介电层传感器，重点研究了其灵敏度、重复性、迟滞性及稳定性。将柔性压力传感器放置在万能试验机的试样台上，采用铜导线将传感器与 LCR 数字电桥 (TH2832，常州同惠电子股份有限公司) 连接起来进行电学性能测试。

灵敏度是决定传感器性能的重要参数之一，

通常代表传感器输出量与输入量的比值，反应了传感器的精度及有效性[5]。电容式压力传感器的灵敏度公式为

$$S = \frac{(C - C_0)/C_0}{\Delta P} = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta P} \tag{1}$$

电容值的计算公式为

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \tag{2}$$

式中：C_0和C分别为施加压力前后的传感器电容值 (pF)，当无负载时，该传感器的初始电容 C_0= 1.04 pF；ΔP 为所施加的压力 (kPa)；S为传感器的灵敏度，通常用传感器特征曲线的斜率来表示 (kPa^{-1})。测试时，利用万能试验机对传感器施加不同的力，并记录下 LCR 数字电桥上所显示的电容值，根据实验数据计算并画出传感器的特征曲线，根据公式可以得出，曲线的斜率即为该传感器的灵敏度。

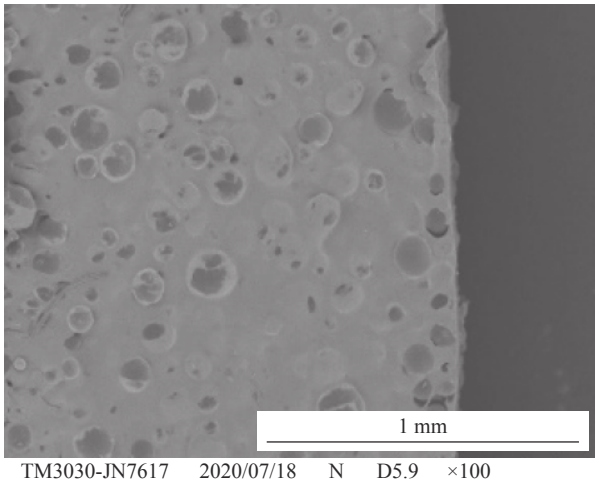
稳定性反映了传感器在较长一段时间内保持其性能参数的能力，而重复性指传感器的输入按同一方向变化时在全量程内连续进行重复测试所得到的各特征曲线的重复程度[23]，良好的重复性及稳定性是传感器保持长时间工作的必要条件。采用万能试验机对传感器施加法向力，当压力为 100 kPa 时，重复 500 次对传感器的重复性进行测试，并在不同力下对传感器的稳定性进行研究。

迟滞性指传感器在正 (输入量增大) 反 (输入量减小) 行程中输出-输入特征曲线不重合的程度。对于压力传感器，迟滞性代表传感器在加载及卸载时输出-输入特征曲线的不重合程度。当对迟滞性进行测试时，分别记录相同压力下传感器第一次、第十次及第一百次加载-卸载循环的对应电容值，根据实验数据即可绘出传感器的迟滞性曲线。

3 结果与分析

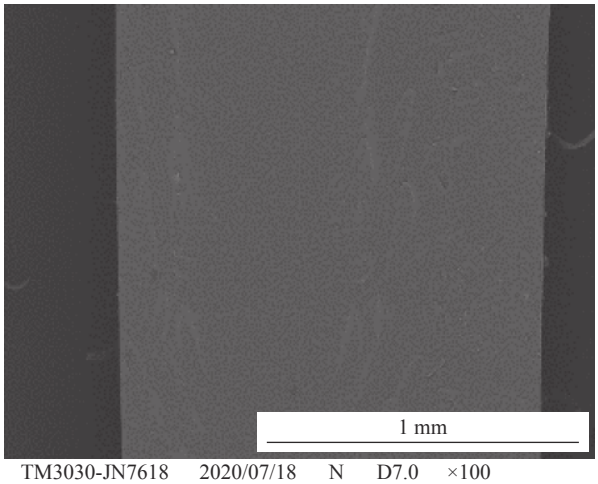
3.1 膨胀微球/PDMS 介电层的微观形貌、结构及性能

图 4 为可膨胀微球/PDMS 介电层和纯 PDMS 介电层的 SEM 图像。可以看出，微球大小及形状规则，且均匀分布在 PDMS 中。图 5 为含有 2.0wt% 可膨胀微球的可膨胀微球/PDMS 介电层和纯 PDMS 介电层的 FTIR 图谱。可以看出，加入可膨胀微球后，可膨胀微球/PDMS 介电层的图谱中出现了微弱的 C≡N (2 260 cm^{-1})、C=C (1 680 cm^{-1}) 红外吸收峰，与可膨胀微球的丙烯腈聚合物相对应，且其他峰值未发生变化，说明微球的加入没有影响 PDMS 的化学结构。图 6 为含有 2.0wt% 可膨胀微球的可膨胀微球/PDMS 介电层和纯 PDMS 介电层的 XRD 图谱。可知，微球的加入使可膨胀微球/PDMS-1 介电层的图谱不同于纯 PDMS 介电层的图谱，可能是由于微球改变了 PDMS 体系的晶粒分布，降低了 PDMS 体系单位体积内晶粒的含量，导致结晶度下降。在这种情况下，结晶度降低，导致可膨胀微球/PDMS-1 介电层的杨氏模量降低，从而使可膨胀微球/PDMS-1 介电层更容易被压缩。



TM3030-JN7617 2020/07/18 N D5.9 ×100

(a) Expandable microsphere/PDMS dielectric layer



TM3030-JN7618 2020/07/18 N D7.0 ×100

(b) Pure PDMS dielectric layer

图 4 可膨胀微球/PDMS 介电层和纯 PDMS 介电层的 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of expandable microsphere/PDMS dielectric layer and PDMS dielectric layer

不同微球含量及不同膨胀时间对传感器的性能影响也不相同。含有微球的介电层可被视为多孔材料，则介电常数公式如下[24-26]：

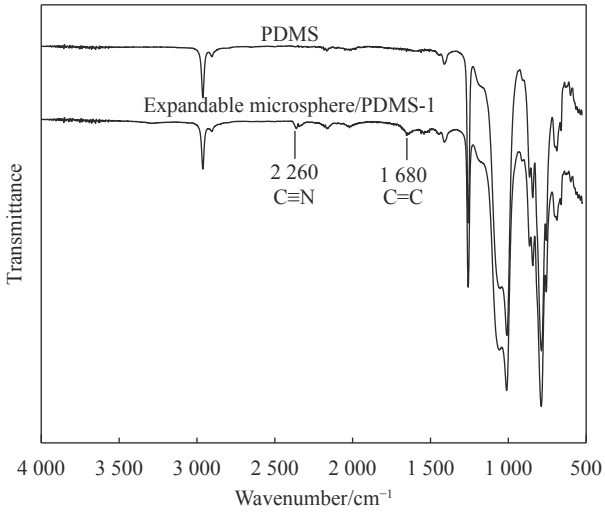


图 5　可膨胀微球/PDMS-1 介电层和纯 PDMS 介电层的 FTIR 图谱

Fig. 5　FTIR spectra of expandable microsphere/PDMS-1 dielectric layer and PDMS dielectric layer

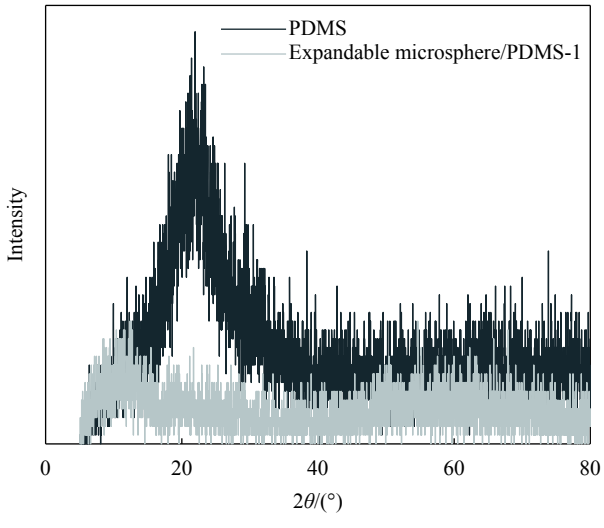


图 6　可膨胀微球/PDMS-1 介电层和纯 PDMS 介电层的 XRD 图谱

Fig. 6　XRD patterns of expandable microsphere/PDMS-1 dielectric layer and PDMS dielectric layer

$$\varepsilon_r = \varepsilon_a V_a + \varepsilon_p V_p \tag{3}$$

式中：ε_r为介电层的介电常数；ε_a、V_a分别为气体的介电常数及体积分数；ε_p、V_p分别为固体的介电常数及体积分数。$\varepsilon_p V_p = \varepsilon_b V_b + \varepsilon_d V_d$，其中$\varepsilon_b$、$V_b$分别为微球壁的介电常数及体积分数，$\varepsilon_d$、$V_d$分别为 PDMS 的介电常数及体积分数。由于$\varepsilon_a < \varepsilon_d < \varepsilon_b$，因此微球膨胀体积越大，则$\varepsilon_{r0}$越小，压力作用下的$\varepsilon_r$越大。结合灵敏度公式可知，微球膨胀体积越大，对提高传感器的灵敏度越有利。

图 7 为不同微球含量时可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的灵敏度随加热时间的变化。可以看出，随着加热时间及微球含量的增加，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的灵敏度得到显著提高，与理论分析相符。除三种不同含量的可膨胀微球/PDMS 介电层传感器外，还制备了含有 2.5wt% 微球的可膨胀微球/PDMS 介电层传感器，但由于填料浓度过高，最终膨胀后的混合溶液不能固化。因此，2.0wt% 的微球含量及 15 min 的加热时间是提高可膨胀微球/PDMS 介电层传感器灵敏度的最佳条件。

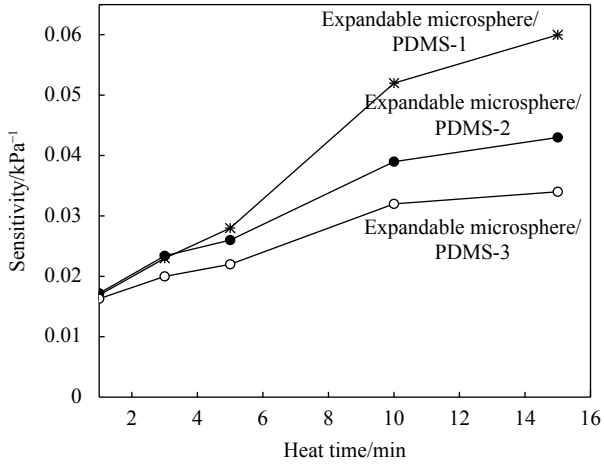


图 7　不同微球含量时可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的灵敏度随加热时间的变化

Fig. 7　Sensitivity of expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensors as a function of heating time with different contents of microspheres

3.2　膨胀微球/PDMS 介电层传感器的力学性能

电极板间的距离 d 与压力 P 的理论公式[27] 如下：

$$d' = d^0 - \sqrt[3]{\frac{\epsilon}{P}} \tag{4}$$

式中：d^0为介电层的初始厚度；d'为压力 P 作用下的介电层厚度；P 为施加在介电层上的压力；ϵ 为拟合参数，其数值取决于介电层的材料。图 8 为不同微球含量的可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的力学性能。可知，曲线走向与理论公式对应的曲线走向相符，说明测试结果的可靠性。还可以看出，随着压力的增大，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器电极间距离变化较大，而 PDMS 介电层传感器的电极间距离变化很小，证明微球的加入降低了介电层的杨氏模量，使可膨胀微球/PDMS 介电层传感器在压力下的距离变化增大，介电层的可压缩性提高，与 XRD 图谱分析结果相符。同时，在相同压力下，微球含量为 2.0wt% 时，

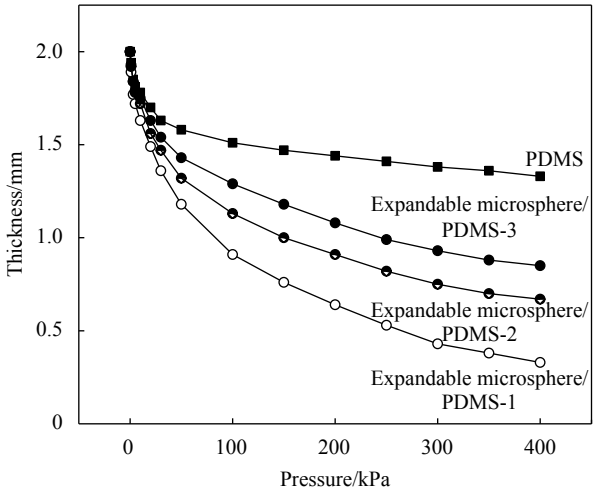
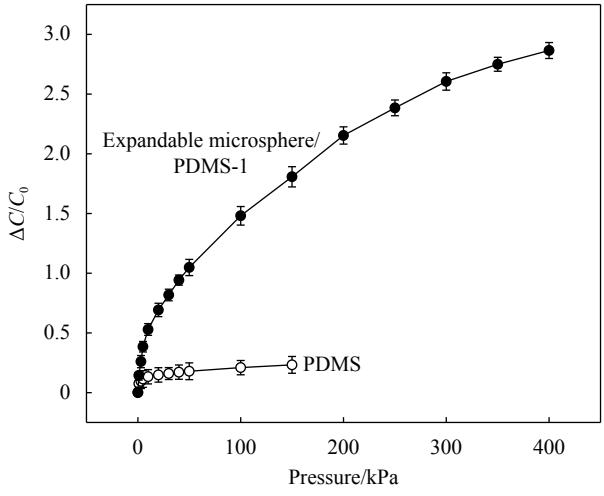


图 8　不同微球含量的可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的力学性能

Fig. 8　Mechanical properties of expandable microsphere/PDMS dielectric layer with different contents of microspheres



ΔC—Difference capacitance of sensor; C_0—Initial capacitance of sensor

图 9　可膨胀微球/PDMS-1 和 PDMS 介电层传感器的灵敏度

Fig. 9　Sensitivity of expandable microsphere/PDMS-1 and PDMS dielectric layer sensors

可膨胀微球/PDMS 介电层传感器产生的形变最大。因此，与可膨胀微球/PDMS-2 和可膨胀微球/PDMS-3 介电层传感器相比，可膨胀微球/PDMS-1 介电层传感器可以产生更大的电容变化。

3.3　膨胀微球/PDMS 介电层传感器的电学性能

3.3.1　膨胀微球/PDMS 介电层传感器的灵敏度

图 9 为膨胀微球/PDMS-1 和 PDMS 介电层传感器的灵敏度。可以看出，膨胀微球/PDMS-1 介电层传感器的最大灵敏度为 0.06 kPa^{-1} (0~25 kPa)，是 PDMS 介电层传感器 (0.01 kPa^{-1}) 的 6 倍，且在 25~400 kPa 的高压下，膨胀微球/PDMS-1 介电层传感器仍可保持相对较高的灵敏度 (0.0044 kPa^{-1})。表 1 为不同电容式压力传感器的灵敏度对比[7,28-33]。可以看出，与其他研究相比，膨胀微球/PDMS 介电层传感器的灵敏度处于较高水平。这是由于可膨胀微球降低了介电层的杨氏模量，使传感器在相同压力下产生更大范围的变形，且随着压力的增大，提高了传感器的 ε_r，在两方面的共同作用下，传感器的电容变化值增大。因此，微球的加入显著提高了膨胀微球/PDMS 介电层传感器的灵敏度。

3.3.2　膨胀微球/PDMS 介电层传感器的重复性及稳定性

图 10 为可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的重复性。图 11 为可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的稳定性。从图 10 可以看出，在 100 kPa 压力、重复 500 次的作用下，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的电容变化比值波动较小，说明可膨胀微球/PDMS 介电层传感器具有稳定的重复性。由图 11 可知，在 10 kPa、100 kPa、250 kPa 的载荷下，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的稳定性良好，满足了压力传感器长久使用的要求。

3.3.3　膨胀微球/PDMS 介电层传感器的迟滞性

当动态压力作用在传感器上时，传感器的迟

表 1　不同电容式压力传感器的灵敏度对比

Table 1　Sensitivity comparison of different capacitive pressure sensors

Electrode	Dielectric layer	Sensitivity/kPa^{-1}	Ref.
Carbon nanotube (CNTs)	Ecoflex	0.00059	[28]
Silver nanowire (AgNW)	PDMS	0.00040	[29]
Conductive knitted fabrics	Microporous silicone elastomer	0.01210	[7]
Multiwall carbon nanotubes (MWNTs) and poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) composite electrodes	Porous PDMS	0.00112	[30]
CNTs yarn	Ecoflex	0.05000	[31]
Indium tin oxide (ITO)/polyester (PET)	Microstructured PDMS	0.05500	[32]
AgNW	Ecoflex	0.00162	[33]
Conductive woven fabrics	Expandable microsphere/PDMS	0.06000	This work

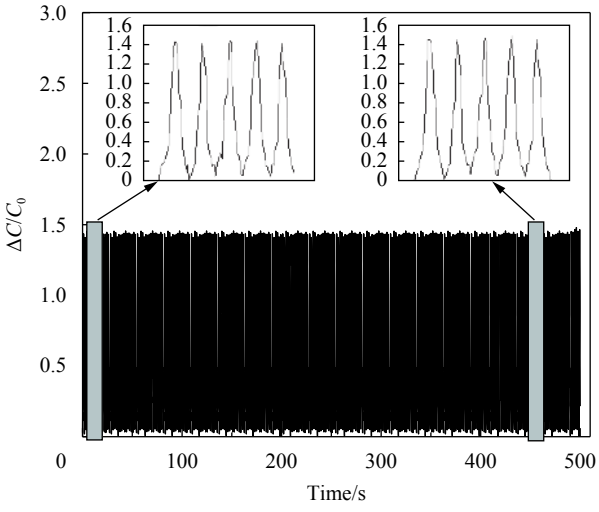


图 10　可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的重复性

Fig. 10　Repeatability of expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensor

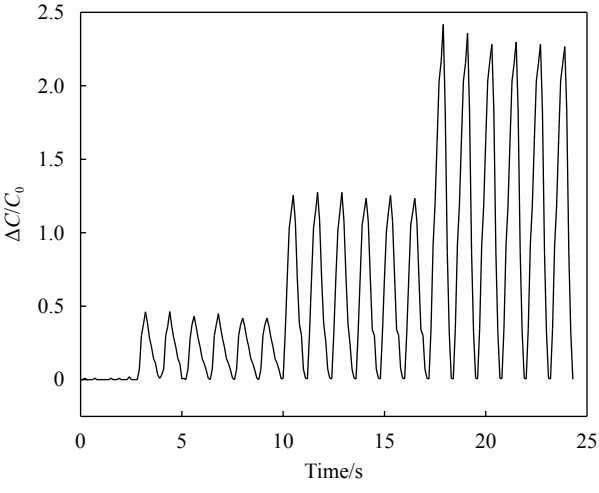


图 11　可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的稳定性

Fig. 11　Stability of expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensor

滞性较为重要，反应了传感器的误差情况。对于在弹性介电层中添加填料的传感器，填料之间的摩擦及弹性体的黏弹性是影响传感器迟滞性的重要因素[34-35]。图 12 为可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的迟滞性。可知，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器迟滞误差较小 (4.7%)，低于文献 [36] (5.6%)、文献 [37] (6%)、文献 [38] (11%) 及文献 [39] (11.5%) 中传感器的迟滞性误差，表明可膨胀微球/PDMS 介电层传感器在信号的输入与输出方面可靠性高，准确性好。在后续工作中可以通过使用低介电常数的弹性体、改变介电层的厚度、调整填料的直径或均匀度等方法[38] 来进一步降低传感器的迟滞

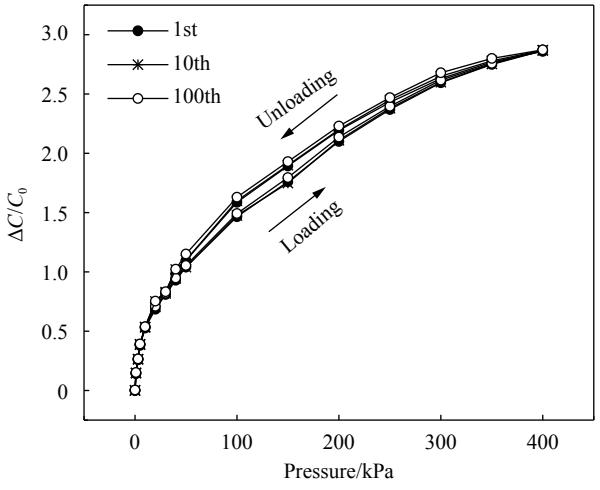


图 12　可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的迟滞性

Fig. 12　Hysteresis of expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensor

性，提高传感器的精度。

4　应 用

柔性压力传感器具有柔韧性好，轻便易携带等优点，应用领域非常广泛。可膨胀微球/PDMS 介电层的柔性传感器具有较高的实用性，不同温湿度条件下制备的可膨胀微球/PDMS 介电层传感器性能如图 13 所示。可以看出，不同条件下制备的可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的性能差异很小，可忽略不计。图 14 为手指按压可膨胀微球/PDMS 介电层传感器表面时的电容信号变化。可知，当按压频率为 1 Hz 时，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的电容变化与手指按压动作一致，进

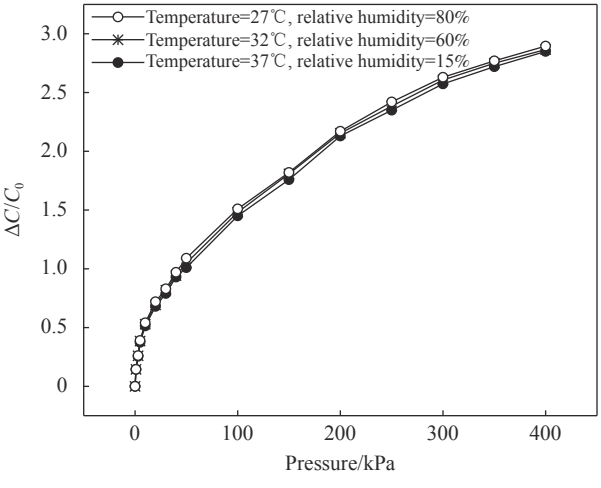


图 13　不同条件制备的可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的电容变化率曲线

Fig. 13　Capacitance change rate curves of expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensors prepared under different conditions

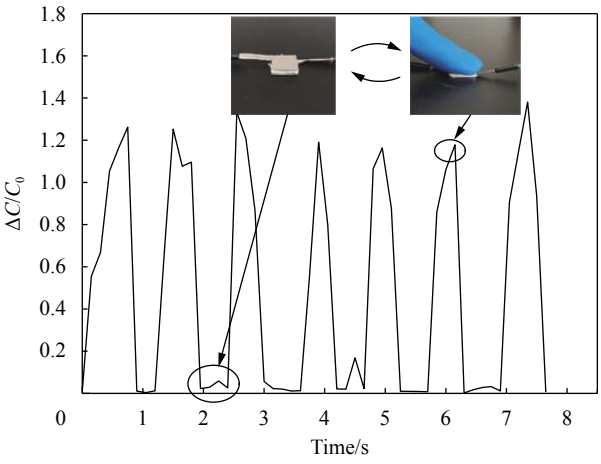


图 14　手指按压时可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的电容变化率曲线

Fig. 14　Capacitance change rate curve of expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensor by finger pressing

一步说明上述可膨胀微球/PDMS 介电层性能检测结果的准确性。可膨胀微球/PDMS 介电层传感器具有较高的灵敏度，可以可靠地检测到较小压力的加载和卸载过程，如手指点击鼠标时的压力，如图 15 所示，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的响应曲线准确反映了连续点击及长按鼠标的动作。实验证明，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器具有响应快、稳定性好等优点，且能够实现对指尖压力的检测。

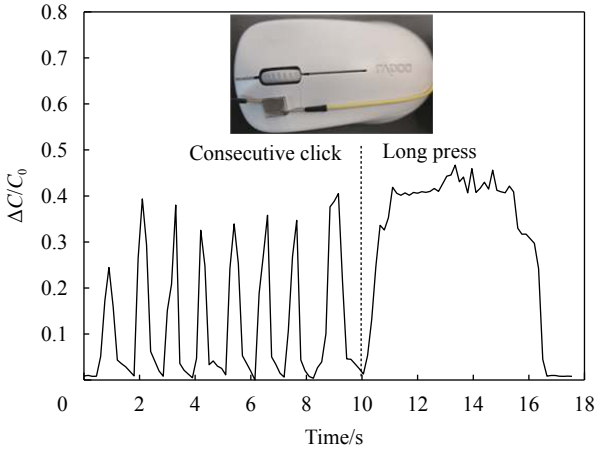


图 15　鼠标点击时可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的电容变化率曲线

Fig. 15　Capacitance change rate curve of expandable microsphere/PDMS dielectric layer sensor by mouse clicking

5　结 论

(1) 可膨胀微球与聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 溶液一起在适当温度下膨胀并固化，得到可膨胀微球/PDMS 介电层，将其与机织导电胶带粘合在一起成功制备了可膨胀微球/PDMS 介电层柔性电容式压力传感器。

(2) 采用万能试验机和 LCR 数字电桥对传感器的性能进行测试，结果表明，PDMS 介电层中加入可膨胀微球显著降低了介电层的杨氏模量，可膨胀微球/PDMS 介电层传感器的工作范围可达 400 kPa，最大灵敏度达到 0.06 kPa^{-1}，是纯 PDMS 传感器灵敏度的 6 倍，在 100 kPa 的负载循环下具有良好的重复性和稳定性，且具有较低的迟滞性 (4.7%)。

(3) 可膨胀微球/PDMS 介电层传感器可以实现指尖压力的精准检测，在医疗设备等领域具有潜在应用前景。

参考文献：

[1] 于红涛, 孙雷, 肖瑶, 等. 压阻式柔性压力传感器的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(6)：1-11.
YU H T, SUN L, XIAO Y, et al. Progress in the research of piezo-resistive flexible pressure sensor[J]. Electronic Composites and Materials，2019，38(6)：1-11(in Chinese).

[2] CHEN W F, YAN X. Progress in achieving high-performance piezoresistive and capacitive flexible pressure sensors: A review[J]. Journal of Materials Science & Technology，2020，43：175-188.

[3] 张明艳, 杨振华, 吴子剑, 等. 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[J]. 复合材料学报, 2020, 37(5)：175-188.
ZHANG M Y, YANG Z H, WU Z J, et al. Preparation and properties of a novel sandwich structure polydimethylsiloxane/polyvinylidene fluoride-Ag nanowires/polydimethylsiloxane flexible strain sensor[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2020，37(5)：175-188(in Chinese).

[4] TRUNG T Q, TIEN N T, SEOL Y G, et al. Transparent and flexible organic field-effect transistor for multi-modal sensing[J]. Organic Electronics，2012，13(4)：533-540.

[5] LI X P, LI Y, LI X F, et al. Highly sensitive, reliable and flexible piezoresistive pressure sensors featuring polyurethane sponge coated with MXene sheets[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2019，542：54-62.

[6] LI H F, DING G F, YANG Z Q. A high sensitive flexible pressure sensor designed by silver nanowires embedded in polyimide (AgNW-PI)[J]. Micromachines，2019，10(3)：206.

[7] ATALAY O, ATALAY A, GAFFORD J, et al. A highly sensitive capacitive-based soft pressure sensor based on a conductive fabric and a microporous dielectric layer[J]. Advance Materials Technologies，2018，3(1)：1700237.

[8] HE Z F, CHEN W J, LIANG B H, et al. Capacitive pressure sensor with high sensitivity and fast response to dynamic

interaction based on graphene and porous nylon networks[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(15): 12816-12823.

[9] YANG J, LUO S, ZHOU X, et al. Flexible, tunable, and ultrasensitive capacitive pressure sensor with microconformal graphene electrodes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(16): 14997-15006.

[10] LEE J, KWON H, SEO J, et al. Conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics[J]. Advanced Materials, 2015, 27(15): 2433-2439.

[11] LIU S, LU J, SHIEH H D. Influence of permittivity on the sensitivity of porous elastomer-based capacitive pressure sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(5): 1870-1876.

[12] 杜青, 李刚, 胡杰, 等. 基于C-PDMS介质层的柔性电容式传感器研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019(2): 1-3, 8.
DU Q, LI G, HU J, et al. Flexible capacitive sensor based on C-PDMS composites as dielectric layer[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(2): 1-3, 8(in Chinese).

[13] 高会, 黄龙男, 刘彦菊, 等. 形状记忆聚合物在柔性光/电子器件领域的发展与挑战[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3255-3246.
GAO H, HUANG L N, LIU Y J, et al. Developments and challenges of shape memory polymers in flexible optoelectronics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3255-3246(in Chinese).

[14] PANG C, KOO J H, NGUYEN A, et al. Sensors: Highly skin-conformal microhairy sensor for pulse signal amplification[J]. Advanced Materials, 2015, 27(4): 589.

[15] XU F L, LI X Y, SHI Y, et al. Recent developments for flexible pressure sensors: A review[J]. Micromachines, 2018, 9(11): 580.

[16] WEHNER M, TRUBY R L, FITZGERALD D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots[J]. Nature, 2016, 536(7617): 451-455.

[17] MA L Q, SHUAI X T, HU Y G, et al. A highly sensitive and flexible capacitive pressure sensor based on a micro-arrayed polydimethylsiloxane dielectric layer[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(48): 13232-13240.

[18] LUO Y S, SHAO J Y, CHEN S R, et al. Flexible capacitive pressure sensor enhanced by tilted micropillar arrays[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(19): 17796-17803.

[19] KWON D, LEE T I, KIM M S, et al. Porous dielectric elastomer based ultra-sensitive capacitive pressure sensor and its application to wearable sensing device[C]//2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). Anchorage: IEEE, 2015.

[20] WAN Y B, QIU Z G, HONG Y, et al. A highly sensitive flexible capacitive tactile sensor with sparse and high-aspect-ratio microstructures[J]. Advanced Electronic Materials, 2018, 4(4): 1700586.

[21] GUO Z X, MO L X, DING Y, et al. Printed and flexible capacitive pressure sensor with carbon nanotubes based composite dielectric layer[J]. Micromachines, 2019, 10(11): 715.

[22] LEE B Y, KIM J, KIM H, et al. Low-cost flexible pressure sensor based on dielectric elastomer film with micropores[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 240: 103-109.

[23] 李思明, 吴官正, 胡雨洁, 等. 压力分布监测袜的制备及其传感器性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(7): 138-144.
LI S M, WU G Z, HU Y J, et al. Preparation of pressure distribution monitoring socks and related sensing properties[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(7): 138-144(in Chinese).

[24] KANG S B, LEE J, LEE S, et al. Highly sensitive pressure sensor based on bioinspired porous structure for real-time tactile sensing[J]. Advanced Electronic Materials, 2016, 2(12): 1600356.

[25] NIU H S, GAO S, YUE W J, et al. Highly morphology-controllable and highly sensitive capacitive tactile sensor based on epidermis-dermis-inspired interlocked asymmetric-nanocone arrays for detection of tiny pressure[J]. Small, 2020, 16(4): 1904774.

[26] GUO Y J, GAO S, YUE W J, et al. Anodized aluminum oxide-assisted low-cost flexible capacitive pressure sensors based on double-sided nanopillars by a facile fabrication method[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(51): 48594-48602.

[27] LI S M, GU Y J, WU G Z, et al. A flexible piezoresistive sensor with highly elastic weave pattern for motion detection[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(3): 035020.

[28] WANG X, LI T, ADAM J, et al. Transparent, stretchable, carbon-nanotube-inlaid conductors enabled by standard replication technology for capacitive pressure, strain and touch sensors[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 11(1): 3580-3586.

[29] ZHANG B, XIANG Z M, ZHU S W, et al. Dual functional transparent film for proximity and pressure sensing[J]. Nano Research, 2014, 10(7): 1488-1496.

[30] PARK S W, DAS P S, PARK J Y. Development of wearable and flexible insole type capacitive pressure sensor for continuous gait signal analysis[J]. Organic Electronics, 2018, 53: 213-220.

[31] KIM S Y, PARK S, PARK H W, et al. Highly sensitive and multimodal all-carbon skin sensors capable of simultaneously detecting tactile and biological stimuli[J]. Advanced Materials, 2015, 27(28): 4178-4185.

[32] MAHATA C, ALGADI H, LEE J, et al. Biomimetic-inspired micro-nano hierarchical structures for capacitive pressure sensor applications[J]. Measurement, 2020, 151: 107095.

[33] YAO S S, ZHU Y. Wearable multifunctional sensors using printed stretchable conductors made of silver nanowires[J]. Nanoscale, 2014, 6(4): 2345-2352.

[34] CHENG W, WANG J, MA Z, et al. Flexible pressure sensor with high sensitivity and low hysteresis based on a hierarchically microstructured electrode[J]. IEEE Electronic Device Letters, 2018, 39(2): 288-291.

[35] QIU J, GUO X H, CHU R, et al. Rapid-response, low detection limit, and high-sensitivity capacitive flexible tactile sensor based on three-dimensional porous dielectric layer for wearable electronic skin[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(43): 40716-40725.

[36] GUO X H, HUANG Y, CAI X, et al. Capacitive wearable tactile sensor based on smart textile substrate with carbon black/silicone rubber composite dielectric[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(4): 04105.

[37] RANA A, ROBERGE J P, DUCHAINE V. An improved soft dielectric for a highly sensitive capacitive tactile sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(22): 7852-7863.

[38] LI M M, LIANG J M, WANG X D, et al. Ultra-sensitive flexible pressure sensor based on microstructured electrode[J]. Sensors, 2020, 20(2): 371.

[39] MANNSFELD S C B, TEE B C K, STOLTENBERG R M, et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers[J]. Nature Materials, 2010, 9(10): 859-864.