

具有温辨功能的柔性电容压力传感器设计与测试

安艺菲^{1,2}, 张墨宇^{1,2}, 李佳荷^{1,2}, 李楠^{1,2,3*}

(1. 西北工业大学自动化学院西安 710129; 2. 西北工业大学深圳研究院深圳 518057;

3. 西安电子科技大学高性能装备机电集成制造全国重点实验室西安 710071)

*Email: nan.li@hotmail.co.uk

摘要: 本文展示了一种具有可穿戴应用的柔性电容性压力传感器的设计。使用具有微孔结构的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 作为传感器的介质层, 当对其一端或两端的电极施加压力时, 该微孔结构受压后内部孔隙闭合, 从而对外部压力能进行有效的感知, 并对该传感器的灵敏度、可重复稳定性以及加入温变材料后的一些特性进行了分析。本文所设计的传感器结构简单且易于制作, 在电子皮肤、健康检测和运动监测方面有着广泛的重要应用。

关键词: 柔性电容压力传感器; 压力传感器; 电容; 微孔介质层

1、研究背景

在柔性传感器领域, 通过对介电层进行微结构化来生成孔隙, 形成与海绵结构类似的具有微孔的结构已成为一种越来越流行的方法, 不仅可以改善滞后性, 还可以提高灵敏度等其他重要参数 [1]。同时电容式压力传感器与其他类型的压力传感器相比, 具有结构简单、稳定性和可靠性高、功耗低等优点 [2]。

本文主要展示了一种利用具有微孔结构的聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 作为介质层的新型柔性电容压力传感器, 并在此基础上加入温变材料实现对压力和温度的有效感知。

2、研究内容

本文整体思想是在对电极两端施加压力时制造一个可变的电容器。电容的介质层是由具有微孔结构的 PDMS 构成, 上下两个电极为粘合上的铜箔。在没有压力时, 介质层中是具有微小孔隙的, 两个电极之间的电容近似等于零。当压力施加在一个或两个电极上时, 介电层中的孔隙被压缩闭合时, 原先存在于孔隙中的空气部分被挤压排出, 导致介质层中的空气占比减小, PDMS 的占比增大, 从而使得两极板间距减小和介质层整体的介电常数出现增大的情况, 整体结构如图 1 所示。这两者变化的同时发生, 使得该电容压力传感器对压力的感知能力增强, 灵敏度会有明显提升。因此本文是通过改变介电层的微观结构, 生成微孔结构来提高电容式压力传感器的灵敏度。

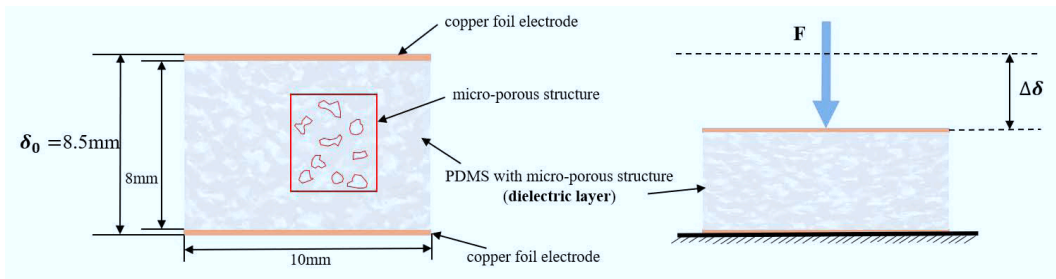


图 1. 柔性传感器结构原理示意图

在制备具有微孔结构 PDMS 时，本文使用的是较为常见的模板法，用易溶于水、易检测残留的 KCL 颗粒作为牺牲颗粒混合在 PDMS 中来完成传感器设计。我们使用不同孔径的 KCL 颗粒来控制产生的 PDMS 中孔隙的孔径，用不同目数的纱网来筛选 KCL 颗粒的粒径。目数表示每英寸纱网中的孔数，目数越高，筛选出的粒径会越小。在此我们使用的是 60、80 和 120 这三种目数的纱网，分别筛选出了 60-80、80-100、100-120 和过 120 四种规格的 KCL 颗粒，即后文中用 S1、S2、S3、S4 分别来表示这四种传感器的规格。

柔性介电层的完整制造过程和传感器设计，分为两个主要步骤：（1）通过掺入 KCL 颗粒制造介电层的柔性体，（2）将电极片粘合到微结构介电层上。图 2 展示了结构化柔性介电层的完整制造过程。首先，将 PDMS 与固化剂按 10:1 的质量比混合搅拌 20 min，并使用真空泵脱气除去气泡。然后按照体积比 4:1 将筛选后的 KCL 颗粒加入到混合溶液中，人工搅拌 10-15 分钟使其成为均一混合物。再将其倒在 3D 打印的模具上，80°C 的恒温箱上加热固化 2h。将其放入超声波清洗槽中将结构中的牺牲颗粒溶解浸出，在 PDMS 柔性体中留下微孔结构，随后放入恒温箱中烘干 1h。最后需在介质层成品上下两端贴上铜箔电极。

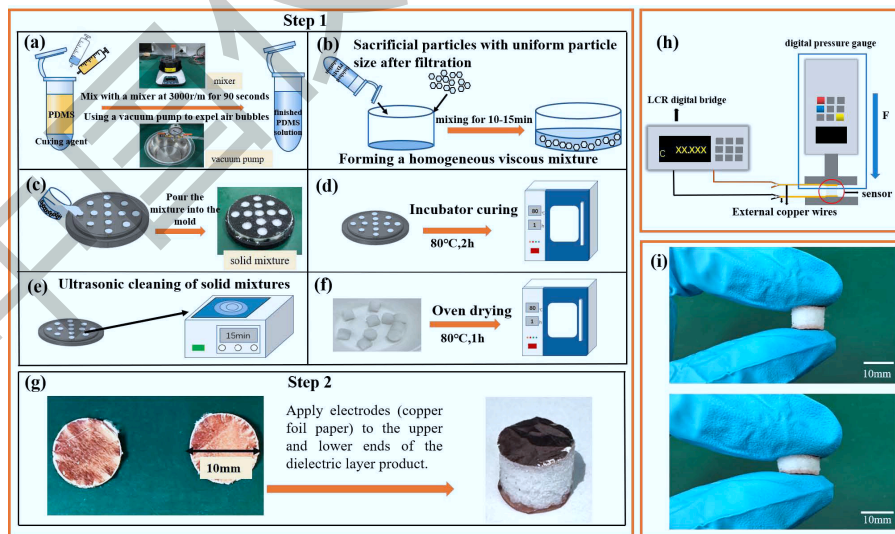


图 2. 传感器制备及测试流程

制备柔性介电层所需的材料主要包括牺牲 KCL 颗粒、PDMS(Sylgard 184, Dow Corning, Midland, MI, USA) 和固化剂 (Sylgard 184, Dow Corning)。如图 2(h) 所示, 为了表征传感器对所施加压力的响应, 使用数显压力计 (艾德堡仪器, HPA, China) 和 LCR 数字电桥 (VICTOR, 4090A, China)。LCR 数字电桥用于记录传感器压力测试时的电容值, 实现压力与电容值之间的关系探究。

本文利用电容的变化 $\Delta C/C_0$ 反映所制备传感器的灵敏度。图 3(a) 为所制备的不同规格传感器测量值均值所计算出的灵敏度。通过对比可知在一定压力范围内在介电层内部形成孔隙可以提高电容的相对变化率, 从而传感器的灵敏度也得到了提高, 且当力较小时, 相应传感器的灵敏度随着孔隙率的减小而逐渐降低。同时描述了对应于不同孔隙率的传感器进行重复性测试的误差带范围。可以看到可重复稳定性受孔径 (即纱网的目数) 的影响, 但曲线的总体趋势保持一致, 仅在幅度上可以观察到变化, 后面能够通过考虑准备材料和初始标准的一致性来解决。图 3(b) 展示了四个规格传感器进行循环加载的整体工作范围与电容数据走向, 在一定误差范围内传感器的起始与最终的电容值是相近的, 同时也都显示出其所具有的较高的稳定性。但 S1 与 S4 曲线的整体重合性更好, 故我们可根据实际不同的压力范围需求去选用不同规格的传感器。

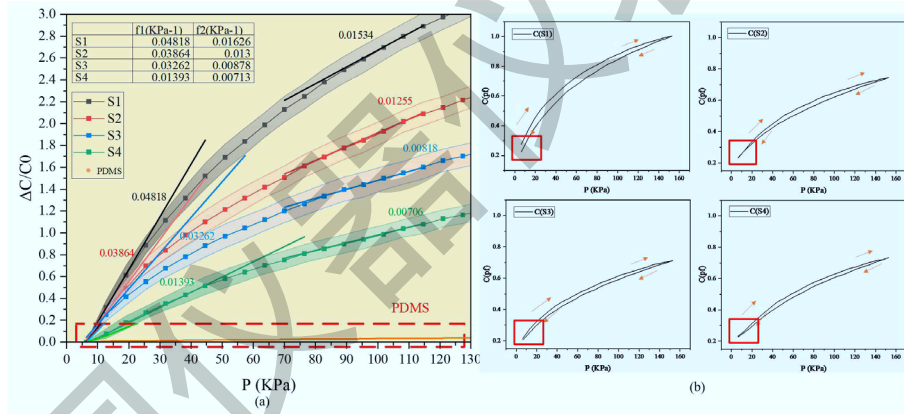


图 3. 灵敏度、可重复稳定性及循环加载

多种功能的集成可以赋予传感器更高的实用性和更广阔的应用领域。故在本文介绍的设计中, 我们进行了压力和温度同时感知的测试。制备过程如下: 在制备介电层的第一步中, 加入温变粉末以赋予传感器温度感知的能力。在测试过程中, 传感器通过水浴加热以确保均匀加热。我们粗略确定颜色变化相对应的温度范围为 10°C 至 70°C , 灰度值范围约为 0 至 240。可以制作具有图 4(c) 所示的灰色值的色块图。热致变色粉末与 PDMS 混合后的宏观和微观条件如图 4(e) 所示, 以进行比较。图 4(f) 可看出传感器颜色随温度变化的整体趋势, 图 4(g) 为手指对介电层基底施加压力后, 通过颜色的变化来对手指温度进行感知。

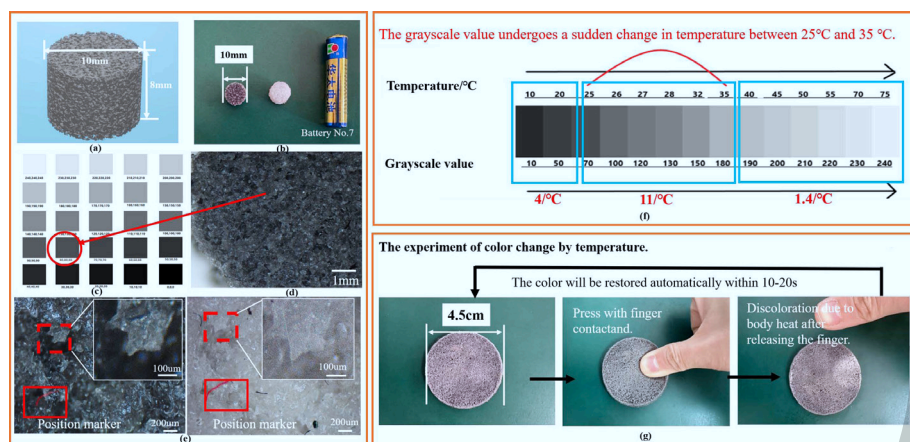


图 4. 加入温变材料后对温度的感知

3、结论

本文提出了一种以微孔 PDMS 为介电层的柔性电容式压力传感器。当对电极施加压力时，结构中由牺牲颗粒产生的孔隙的闭合使板距减小的同时并改变了介电常数，与传统的电容式传感器相比会更容易感知压力，灵敏度更高。并在介电层中融入温变材料，以实现同步温度感知能力，可用于中医脉诊、体温监测等健康监测领域。在未来的工作中，我们的目标是进一步探索更可靠的制造方法以及差分结构等结构设计，以提高传感器灵敏度、非线性及其他参数指标，使其在结构更具可控性，从而实现更薄、更轻、更耐用的传感器。这些进展期望在未来的生理信号监测、医疗脉搏诊断、健康监测、电子皮肤等可穿戴制造领域发挥作用。

基金资助：

国家自然科学基金面上项目 52275545；陕西省科技厅 重点产业创新链（群）-工业领域（2023-ZDLGY-41）；广东省基础与应用基础研究基金（2023B1515120080）。

参考文献

- [1] RuthSRA,BaoZ. Designingtunablecapacitivepressure sensors based on material properties and microstructure geometry[J].ACS Applied Materials & Interfaces, vol. 12, no. 52, pp. 58301-58316,2020.
- [2] Yang CR, Wang LJ, Tseng SF. Arrayed porous polydimethylsiloxane/barium titanate microstructures for high-sensitivity flexible capacitive pressure sensors, Ceramics International, Vol. 48, no. 9, pp. 13144—13153, 2022.