

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.006

表面微凸 TPU 微孔片材的制备及压力传感性能

杨柳^{1,2}, 肖书平^{1,2}, 列皓琰^{1,2}, 孙志刚^{1,2}, 黄嘉荣^{1,2}, 徐百平^{1,2}

(1. 五邑大学机械与自动化工程学院, 广东江门 520920; 2. 江门市高分子材料智能制造重点实验室, 广东江门 520920)

摘要: 通过将超临界二氧化碳(Sc-CO_2)发泡技术和多孔板受限发泡模具相结合, 成功实现了热塑性聚氨酯弹性体(TPU)介电层表面微凸结构和内部微孔结构的同步构筑, 并对所得表面微凸 TPU 微孔介电层的表面形貌、内部孔结构及压缩力学性能进行了测试表征分析, 探究了表面微凸结构的间距比及高度等对相应电容式压力传感器的压强电容响应特性的影响规律。扫描电子显微镜和三维超景深显微镜观察结果表明, 微米级泡孔均匀分布于介电层的主体区域及微凸结构内部。压缩力学性能测试结果表明, 表面微凸 TPU 微孔介电层的微凸结构有效增强了介电层的压缩变形能力, 减小了外力作用下介电层厚度, 增加了与电极的接触面积, 从而显著提升了相应电容式压力传感器的压强响应性能。与无表面微凸结构的 TPU 微孔介电层相比, 表面微凸 TPU 微孔介电层相应传感器在微凸线性弹性区、基体线性弹性区和屈曲区的灵敏度分别提高了 48.60、0.87 和 2.10 倍。此外, 阶梯压力响应测试和循环测试结果表明, 该传感器呈现出较高的分辨率和稳定性。应用测试结果表明, 该传感器可应用于指尖点击等人体运动的检测。

关键词: 电容式压力传感器; 超临界流体发泡; 表面微凸结构; 微孔结构; 热塑性聚氨酯弹性体

中图分类号: TQ320.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0037-08

Preparation and pressure sensing performance of surface micro-convex TPU microporous sheets

YANG Liu^{1,2}, XIAO Shuping^{1,2}, LIE Haoting^{1,2}, SUN Zhigang^{1,2}, HUANG Jiarong^{1,2}, XU Baiping^{1,2}

(1. School of Mechanical and Automation Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

2. Jiangmen Key Laboratory of Polymer Intelligent Manufacturing, Jiangmen 529020, China)

Abstract : By combining the supercritical carbon dioxide (Sc-CO_2) foaming technology with a porous plate restricted foaming mould, the surface micro-convex structure and internal microporous structures were successfully constructed on the thermoplastic polyurethane elastomer (TPU) dielectric layer. The surface morphology and internal porous structure of the obtained TPU microporous dielectric layer, as well as its compressive mechanical properties, were tested and characterized. Based on this, the influence of the duty ratio and height of the surface micro-convex structure on the pressure-sensing performance for the corresponding capacitive pressure sensor were investigated. The scanning electron microscopy and three-dimensional ultra-depth-of-field microscopy analysis results indicate that the micrometer-sized pores are uniformly distributed in the main area of the dielectric layer and within the micro-convex structures. The testing results of the compressive mechanical properties show that the micro-convex structure effectively enhances the compressive deformation ability of the dielectric layer, and thus promotes the reduction of the dielectric layer thickness and the increase of the contact area between the electrode and the dielectric layer under external force, and thereby significantly improving the pressure response performance of the corresponding capacitive pressure sensor. Compared with the TPU micropore dielectric layer without surface micro-convex structures, the sensitivity of the sensor with the surface micro-convex TPU dielectric layer are increased by 48.60, 0.87, and 2.10 times in the micro-convex linear elastic zone, the matrix linear elastic zone and the buckling zone, respectively. In addition, the step pressure response test and cycle test results indicate that the sensor exhibits high resolution and stability. The application testing results demonstrate that the sensor can be applied to the detection of human movements such as fingertip click.

Keywords : capacitive pressure sensor ; supercritical fluid foaming ; surface micro-convex structure ; microporous structure ; thermoplastic polyurethane elastomer

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目(2024A1515011787, 2023A1515110321), 五邑大学创新创业基金项目(2022CX06)

通信作者: 肖书平, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为轻质高分子材料高效制备与高值化应用

收稿日期: 2025-02-14

引用格式: 杨柳, 肖书平, 列皓琰, 等. 表面微凸 TPU 微孔片材的制备及压力传感性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(4): 37-44.

YANG Liu, XIAO Shuping, LIE Haoting, et al. Preparation and pressure sensing performance of surface micro-convex TPU microporous sheets[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 37-44.

电容式压力传感器相较于电阻式和压电式等压力传感器,不仅具有结构简单、能耗低的优势,而且可应用于动态和静态压力检测,在可穿戴设备和电子皮肤等领域得到了广泛应用^[1-5]。然而,随着实际应用需求的不断提高,在宽压力范围内如何拥有高灵敏度已成为该类传感器研究的热点和难点之一^[6-8]。

电容式压力传感器为典型的“电极层-介电层-电极层”的三明治结构,在介电层内部构筑多孔结构可有效改善该类传感器的压力传感性能,提升其灵敏度。目前,该类传感器介电层内多孔结构的构筑方法多为颗粒沥滤法^[9-11]、静电纺丝法^[12-14]和化学发泡法^[15-16]等,但这些方法往往存在操作繁琐、残余有刺激性气体或者大量使用有机溶剂等缺点。

近年来,超临界二氧化碳(Sc-CO_2)发泡技术因绿色环保、操作简单等突出优势,成为制备聚合物多孔材料的常用方法之一。目前国内外在 Sc-CO_2 发泡技术方面的研究主要集中在改善所得多孔材料的孔结构,进而提高样品抗收缩性^[17]、形变恢复能力^[18]和样品的尺寸稳定性^[19]等。然而,有关 Sc-CO_2 发泡技术在电容式压力传感材料研制领域中的研究较少。本课题组采用 Sc-CO_2 发泡技术制备了聚合物多孔材料片材,并研究了其在电容式压力传感器中的应用,如在120℃的发泡温度和16 MPa的饱和压力下所制备得到的膨胀比为4.86的多孔热塑性聚氨酯弹性体(TPU)介电层^[20],其相应传感器在95~610 kPa的压力范围内展现出较高的灵敏度(5.6 MPa^{-1})。因此, Sc-CO_2 发泡技术在传感器介电层材料的制备方面展现出其巨大的应用潜力。然而,目前所研制出的多孔介电层材料难以在低压下展现出良好的响应特性,低压下灵敏度较低。大量研究表明,在介电层表面构筑微结构可提升传感器在低压下的灵敏度。然而,目前表面结构的制备方法多为模板浇筑法^[21-22]和颗粒沥滤法^[23]等,存在工艺复杂或需额外使用有机溶剂等缺点。

基于以上现状,笔者以具备良好的可变形性、生物相容性和可降解性的TPU为基体,采用 Sc-CO_2 发泡、多孔板和受限发泡模具,进行介电层表面微结构和内部微孔结构的同步绿色构筑,并探究表面微结构的存在及形状对电容式压力传感器传感性能的影响,并探索了其在指尖点击等人体运动检测方面的应用潜力。

1 实验部分

1.1 主要原材料

TPU粒料:WHT1185EC,密度1.19 g/cm^3 ,烟台万华化学集团股份有限公司;

氧化铟锡/聚对苯二甲酸乙二酯(ITO/PET)导电膜:ITO-M0507,珠海凯为光电科技有限公司;

聚酰亚胺(PI)胶带:广州盈讯科技有限公司;

二氧化碳气体(CO_2):纯度99.9%,江门市金凤化学气体有限公司。

1.2 主要仪器及设备

真空干燥箱:DZF-6090B,常州恩培仪器制造有限公司;

平板硫化机:BL-6170-B,东莞市宝轮精密检测仪器有限公司;

多孔板:自制,材质铝;

高压反应釜:LB250N,上海莱北科学仪器有限公司;

高精度柱塞泵:500D,美国TELETYPE ISCO公司;

电子天平密度计:LLDM-A31,北京莱伯泰科仪器股份有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Phenom Prox,荷兰Phenom公司;

三维超景深视频显微镜:RH-2000,浩视(中国)有限公司;

万能材料试验机:Instron 5966,美国英斯特朗公司;

数字电桥(LCR)测试仪:Keysight E4980A,美国安捷伦科技有限公司。

1.3 TPU微孔片材制备

(1) TPU片材的制备。

首先,将TPU粒料置于80℃真空干燥箱中烘干8 h。然后,称取一定量烘干后的TPU粒料,用平板硫化机在200℃的热压温度和5 MPa的热压压力下热压成厚度约2 mm的TPU片材。最后,裁切成直径约10 mm的圆形小片材备用。

(2)表面微凸TPU微孔片材的制备。

如图1所示,首先将TPU圆形小片材放置于安装有不同间距比多孔板的受限发泡模具内,将该模具放入提前预热好(110℃)的反应釜釜腔内;然后采用高精度柱塞泵,将 CO_2 加压至16 MPa,并将其注入反应釜的釜腔内,使TPU圆形小片材在110℃和

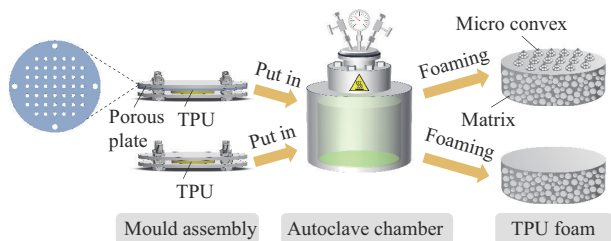


图1 TPU微孔片材放热制备过程

Fig. 1 Preparing process of TPU microporous sheets

16 MPa的Sc-CO₂环境中饱和3 h;随后打开反应釜泄压阀以快速泄压;最后快速打开反应釜,取出样品,并放入冰水浴中冷却。由此制得表面微凸TPU微孔片材,标记为FTPU-1:*x*,其中,1:*x*代表多孔板孔直径与孔间距比值(1:1, 1:2和1:3)。图2为FTPU-1:2脆断面SEM照片及电容式压力传感器结构示意图,由图2a~图2c可见,所得TPU微孔片材的表面微凸及基体内均形成了均匀的微孔结构。

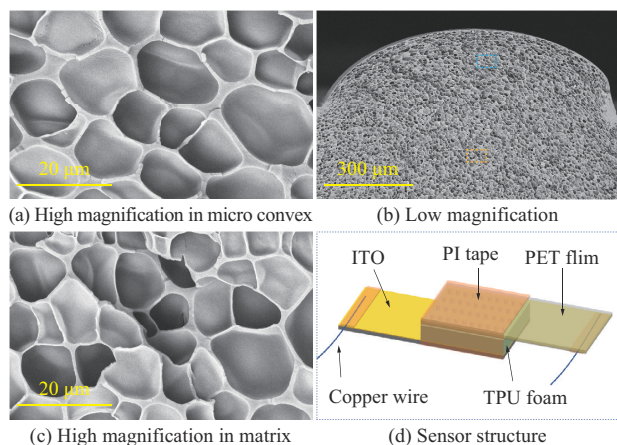


图2 FTPU-1:2脆断面SEM照片及电容式压力传感器结构示意图

Fig. 2 SEM photos of FTPU-1:2 brittle fracture surface and schematic diagram of capacitive pressure sensor structure

(3)无表面微凸TPU微孔片材的制备。

将TPU圆形小片材放置于无多孔板的受限发泡模具内,将该模具放入提前预热好(110℃)的反应釜釜腔内,后续按照上述(2)的步骤,制备得到无表面微凸TPU微孔片材,并标记为FTPU-w/o。

1.4 传感器组装

将TPU微孔片材裁剪成10 mm×10 mm尺寸,并以此为介电层,将ITO/PET导电膜裁剪成25 mm×10 mm的长方形条状作为电极层;用PI胶带将铜导线固定在导电膜的ITO侧;将该介电层置于两个电极层之间,制得简易电容式压力传感器。为了避免ITO和介电层之间存在较大间隙以及产生明显松动,用PI胶带紧绕该传感器,以进行封装固定和保

护。所得传感器结构如图2d所示。以FTPU-1:*x*和FTPU-w/o为介电层的传感器分别标记为S-FTPU-1:*x*和S-FTPU-w/o。

1.5 测试与表征

(1) SEM表征。

从TPU微孔片材中裁剪出约10 mm×5 mm的小长条,放入液氮中浸泡1 h后脆断。对脆断面进行喷金处理,然后采用SEM对TPU微孔片材脆断面进行观察并拍照。

(2)三维超景深显微镜表征。

使用三维超景深视频显微镜观察TPU微孔片材的表面并拍照,获得样品表面形貌,采用该视频显微镜的3D测量模块测得样品表面某一局部方向上的切面高度数据。

(3)TPU多孔片材力学性能测试。

依据GB/T 1041-2008,分别从FTPU-1:*x*和FTPU-w/o片材中裁剪出10 mm×10 mm的小样品,使用万能材料试验机测试样品的压缩性能。采用压力控制模式,压力增加速率0.2 N/s,范围0~60 N。

(4)传感器压强-电容响应性能测试。

通过万能材料试验机向组装好的传感器上表面施加外部载荷,并采用LCR仪记录实时电容(*C*)数据,可分别获得传感器的实时电容响应数据。LCR测试仪的测量参数:工作频率为1 kHz、偏置电压为1 V。材料试验机开始测试之前施加一个0.01 N的预压力,来实现导电膜与TPU之间的贴合。测试压力增加速率为0.2 N/s。传感器的灵敏度*S*可通过式(1)计算得到。

$$S = \frac{\delta(\Delta C/C_0)}{\delta P} \quad (1)$$

式中:电容变化量(ΔC)为实时电容*C*和初始电容*C*₀的差值,*P*为传感器所受压强值, $\delta(\Delta C/C_0)$ 和 δP 分别为相对电容变化的改变量和压强的改变量。

2 结果与讨论

2.1 TPU多孔片材的表面结构

图3为TPU微孔片材的表面形貌照片。由图3可见。FTPU-1:1的表面出现了明显的圆形轮廓,尺寸约800 μm,此为该样品表面的凸起结构。FTPU-w/o表面较为光滑。图4切面高度曲线表明,FTPU-1:2的凸起结构近似为圆锥状,高约240 μm。这表明,采用Sc-CO₂发泡可制备出表面微凸TPU多孔片材。当间距比从1:2增加至1:1或者降低至1:3时,表面微凸的高度均降低且顶部曲率均变小。结合

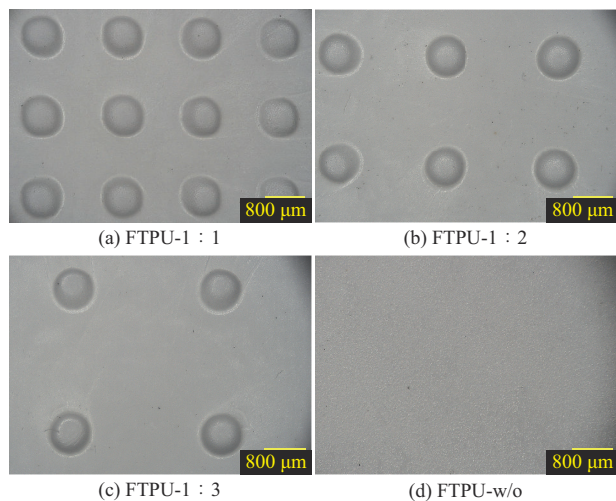


图3 TPU微孔片材的表面形貌照片

Fig. 3 Surface morphology photos of TPU microporous sheets

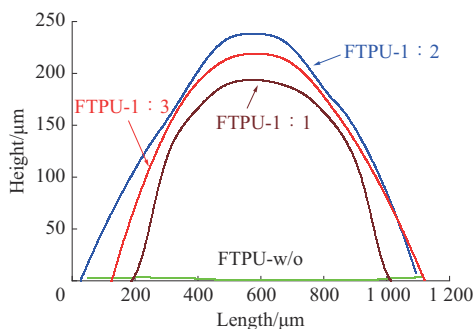


图4 TPU微孔片材的表面微凸高度

Fig. 4 Surface micro-convex height of TPU microporous sheets

上述4个样品的表面形貌特征,在压缩力学性能以及相应电容器压强-电容相应测试表征中,选取了无表面微结构(即 FTPU-w/o)、表面微结构较高(即 FTPU-1:2)和较低(即 FTPU-1:3)的三种样品进行进一步实验。

2.2 TPU泡沫的压缩力学性能

图5为TPU微孔片材在0~600 kPa压强范围内的压缩应力-应变曲线。由图5可见,FTPU-w/o的

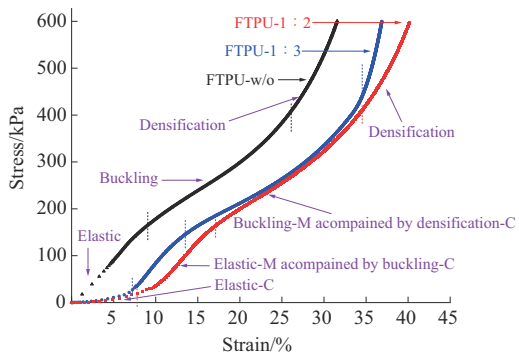


图5 TPU微孔片材的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves for TPU microporous sheets

应变随应力增加而增加的趋势在不同应力区间下表现出差异,根据趋势的不同,可将FTPU-w/o的压缩应力-应变曲线分为三个应力区间:第1区间内,应变随应力增加而近似线性增加,曲线较陡;随着应力的增加,曲线进入第2区间,该区间内,应变快速拓展,曲线较缓;随着应力的进一步增加,曲线进入第3区间,该区间内,应变增加速率较慢,较大的应力增加量仅引起应变小幅增加。上述三个区间内的形变机理分别为多孔结构的线性弹性区(Elastic)、屈曲区(Buckling)和致密区(Densification)。

FTPU-1: x 的应力-应变曲线与FTPU-w/o的明显不同,前者应变较大,这表明前者的形变能力比后者强。此外,FTPU-1: x 样品的应力-应变曲线在低应力区间范围内出现了极为平缓的阶段,该阶段内应变随应力的增加而陡增。随着应力增加,三条曲线走势的变化与FTPU-w/o的类似,呈现出近似的应力区间。这四个区间由下至上依次被定义为:表面微凸线性弹性区(Elastic-C)、基体线性弹性区(Elastic-M)并伴随着表面微凸内泡孔壁的屈曲形变(Buckling-C)、基体的屈曲区(Buckling-M)并伴随着表面微凸结构内泡孔的致密化(Densification-C)、基体内泡孔的致密化(Densification)并伴随着表面微凸内泡孔的进一步致密化。

不同样品的应力-应变曲线在不同区间内的斜率为该样品在该区间内的等效模量,反映了样品形变能力的强弱。图6为TPU微孔片材在不同区间内的模量值。由图6可见,FTPU-w/o在线性弹性区和屈曲区的模量与FTPU-1: x 在其基体线性弹性区和基体屈曲区内的模量分别处于相同水平。这表明,FTPU-w/o泡孔形变能力与FTPU-1: x 基体内的泡孔形变能力相当。与FTPU-1:3相比,FTPU1:2在表面微凸线性弹性区的模量略低,这表明后者表面微

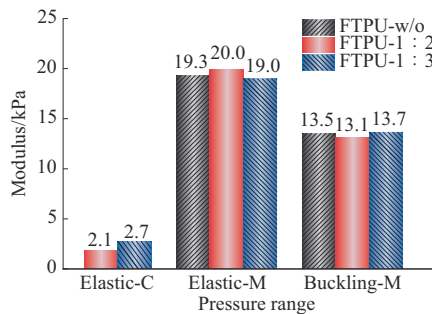


图6 TPU微孔片材在不同区间内的模量

Fig. 6 Modulus in different regions for TPU microporous sheets

凸结构的形变能力较强,这可能与后者表面微凸结构较高和曲率较大有关。

2.3 TPU微孔片材的压力传感性能

在0.2 N/s的力增加速率下,对传感器进行压强电容响应性能测试,对数据进行处理,可得相对电容变化($\Delta C/C_0$)-压强(P)关系曲线,如图7所示。由图7可见,S-FTPU-w/o的 $\Delta C/C_0$ 随着 P 增加而逐渐增加,这可能与多孔结构被压缩所导致的介电层厚度减小以及泡孔内低介电常数空气在压缩过程中被高介电常数聚合物实体所取代有关。与S-FTPU-w/o不同,S-FTPU-1: x 的 $\Delta C/C_0$ 值明显较高,这表明后者的压强电容响应性能较好,这可归因于S-FTPU-1: x 介电层表面微凸结构较强的形变能力。

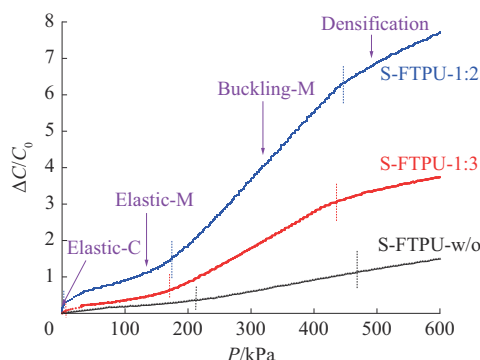


图7 传感器的 $\Delta C/C_0$ - P 关系曲线

Fig. 7 $\Delta C/C_0$ - P curves for the sensors

S-FTPU-1: x 的 $\Delta C/C_0$ - P 曲线根据其走势的不同,分为4个 P 区间,其范围与其介电层的应力-应变曲线的应力区间范围相近。采用最小二乘法,将图7中各传感器在不同 P 区间内的 $\Delta C/C_0$ - P 数据点分别进行线性拟合,可得传感器在不同压力区间下的灵敏度 S (斜率)及线性度(R^2)。图8为传感器在不同压强区间内的灵敏度,由图8可见,S-FTPU-1:2和S-FTPU-1:3在微凸线性弹性区的灵敏度分别为74.4 MPa⁻¹和13.3 MPa⁻¹,显著高于S-FTPU-w/o同

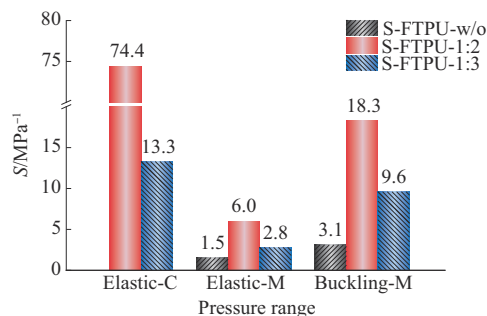


图8 传感器在不同压强区间内的灵敏度(S)

Fig. 8 Sensitivity (S) in different pressure ranges of sensors

压力范围下的灵敏度(1.5 MPa⁻¹)。S-FTPU-1:2的灵敏度与S-FTPU-w/o的相比提升了48.60倍。此外,在基体线性弹性区和基体屈曲区内,S-FTPU-1: x 的灵敏度明显比S-FTPU-w/o的高,S-FTPU-1:3在基体线性弹性区和基体屈曲区内的灵敏度与S-FTPU-w/o的相比,分别提高了0.87和2.10倍。S-FTPU-1: x 较高的灵敏度与其介电层表面强形变能力的微凸结构有关,该微凸结构的尖端在压缩过程中被逐渐压平,从而使介电层与电极层接触面积显著增加,进而引起电容值随压力的增加而急剧增加,最终使得相应的传感器表现出较高的灵敏度。与S-FTPU-1:3相比,S-FTPU-1:2的灵敏度更高,尤其在微凸线性弹性区,S-FTPU-1:2的灵敏度比S-FTPU-1:3的提高了459%。S-FTPU-1:2较高的灵敏度与其介电层表面微凸结构的顶部曲率较大有关:一方面,较大顶部曲率的微凸结构与电极层的初始接触面积较小,更容易发生压缩形变,使得介电层厚度显著减小;另一方面,较大的顶部曲率可使得微凸结构与电极层接触面积在压缩过程中(尤其是在微凸线性弹性区)大幅增加。这两方面作用均导致传感器灵敏度的显著增加,从而使得S-FTPU-1:2在各个压力区间(尤其是微凸线性弹性区)均表现出较高的灵敏度。

线性度是评价压力传感器性能的一个重要指标,线性度可以用上述最小二乘法拟合过程中所得的 R^2 ,该值越趋近于1表明传感器的线性度越好。表1为传感器在不同压力区间下的线性度,由表1可见,所制传感器在不同压力区间内的 R^2 值均超过了0.97,尤其是S-FTPU-1:2,该传感器在各个压力区间内的 R^2 值均达到了0.99以上。表明所研制的传感器(尤其是S-FTPU-1:2)在不同压力区间内均表现出较好的线性度。

表1 传感器在不同压力区间下的线性度

Tab. 1 Linearity of sensor under different pressure ranges

Pressure range	S-FTPU-1:2	S-FTPU-1:3	S-FTPU-w/o
Elastic-C	0.993	0.999	
Elastic-M	0.997	0.969	0.987
Buckling-M	0.999	0.999	0.998
Densification	0.995	0.991	0.997

2.4 传感器的其他性能及应用

经过上述压力传感性能电容变化分析,可见S-FTPU-1:2传感器在灵敏度方面具有明显优势,因此后续的性能测试均选用该传感器进行详细评估。

2.4.1 阶梯响应特性

图9为S-FTPU-1:2传感器在压力阶梯式增加时的电容响应,在加载压力由1 N增加到1.1 N时,由图9中放大区域可见,电容相对变化具有明显的上升,可见S-FTPU-1:2传感器的分辨率可低至0.1 N(对应100 Pa)。随着压力差的增加,响应的区分度越来越明显。该传感器在低压下较好的分辨率可归因于介电层样品表面微结构。

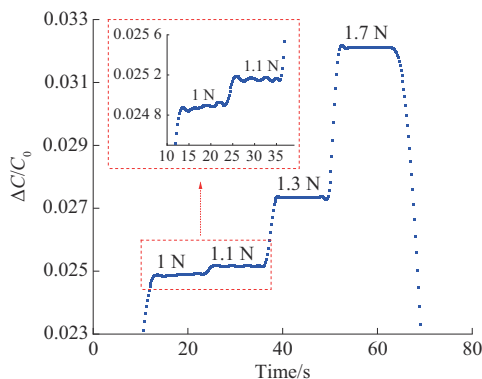


图9 S-FTPU-1:2传感器在压力阶梯式增加时的电容响应

Fig. 9 Capacitance response during stepwise pressure increase of S-FTPU-1:2 sensor

为了进一步考察电容式压力传感器在实际应用中不同压强下的检测能力,对S-FTPU-1:2传感器依次施加1, 5, 20 kPa和60 kPa的载荷,并记录其相对电容的变化。由图10可见,传感器在1 kPa载荷下即表现出稳定的电容响应。随着载荷的增加,电容响应显著提升。

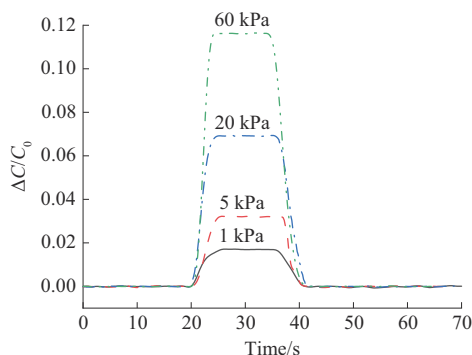


图10 S-FTPU-1:2不同载荷下的响应曲线

Fig. 10 Response curves under different loading pressure of S-FTPU-1:2

2.4.2 循环稳定性

循环稳定性反映了传感器在多次加载与释放压力循环后输出信号能否保持一致,是评价长期可靠性的重要指标。为此,在200 kPa压力条件下,对S-FTPU-1:2传感器进行了100个F加载与释放循环测试,并记录了其相对电容响应,测试结果如图11

所示。由图11可见,S-FTPU-1:2传感器响应曲线的峰值始终稳定在1.5;从循环曲线中选取的两段放大图显示,两者的形态极为相似。这表明传感器在反复使用过程中,能够维持高精度和稳定性,从而具备优良的长期使用可靠性。

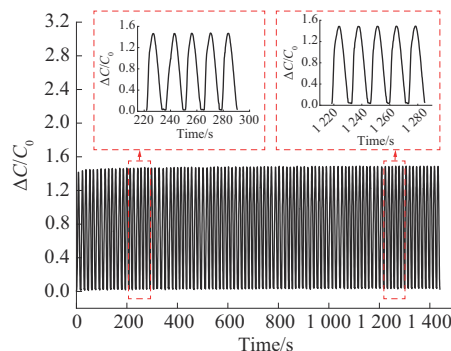


图11 S-FTPU-1:2的循环稳定性测试

Fig. 11 Cyclic stability test for S-FTPU-1:2

2.4.3 鼠标点击及摩斯电码应用

依托于传感器的高灵敏度和精确的响应能力,其应用前景同样十分广泛。例如,在手指敲击测试中,传感器能够捕捉到微弱的指尖震颤并将其转换为数字信号。如图12a所示,通过连续敲击,传感器输出的信号清晰反映了手指震颤的变化。由于帕

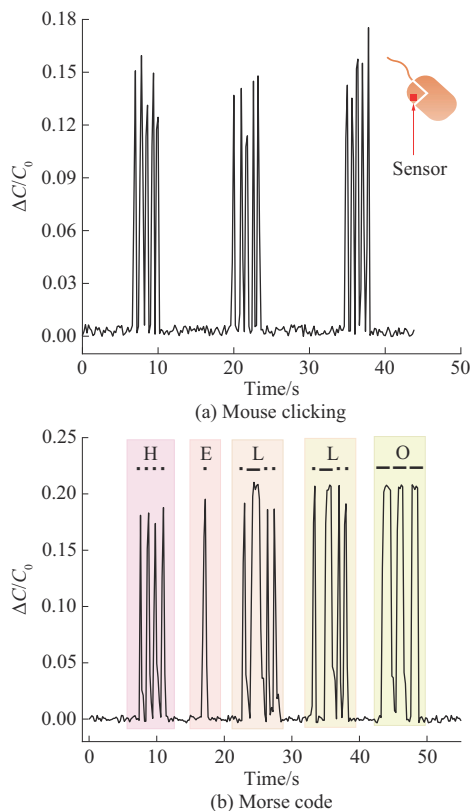


图12 S-FTPU-1:2的鼠标点击和摩斯电码响应

Fig. 12 Responses of mouse clicking and morse code for S-FTPU-1:2

金森病早期患者通常存在不易察觉的静止性震颤,该传感器能够精准监测并识别这一信号,为疾病早期诊断提供有力依据。

此外,通过连续敲击操作还可生成明确的开关信号,用以传递特定信息。在摩斯电码中,字母与符号均由短点与长划构成,而传感器能够精确识别这些敲击模式,从而生成对应的字符。如图12b所示,通过点触和长按操作,传感器成功生成了“HELLO”的摩斯电码信号。这一功能不仅展示了传感器在信息传递方面的独特优势,同时也为运动障碍或完全瘫痪的患者提供了一种便捷高效的交流方式,使其能够借助手指敲击与外界实现有效沟通。

3 结论

采用Sc-CO₂发泡技术,成功制备了具有表面微凸结构和内部微孔结构的TPU微孔介电层。研究发现,与无表面微凸结构的相比,表面微凸TPU介电层所制传感器展现出较高的灵敏度。与S-FTPU-w/o相比,S-FTPU-1:2在微凸线性弹性区、基体线性弹性区和屈曲区的灵敏度分别提高了48.60、0.87和2.10倍。S-FTPU-1:2较高的灵敏度与其介电层表面微凸结构有关,该微凸结构尖端在压缩过程中被逐渐压平,从而使介电层与电极层接触面积显著增加,进而引起传感器电容值随压力的增加而急剧增加。且随着表面微凸结构顶部曲率的增加,传感器灵敏度进一步提升。S-FTPU-1:2传感器在阶梯响应和循环稳定性测试中表现出色,分辨率可低至0.1 N,经过100次反复加卸载后性能稳定。实际应用中,所制传感器能够精确捕捉手指点击信号,实现鼠标点击与摩斯电码的信息识别与传递,在人体运动监测和医疗诊断领域具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] YUAN H, ZHANG Q R, ZHOU T, et al. Progress and challenges in flexible capacitive pressure sensors: Microstructure designs and applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149926.
- [2] LI X Y, LIU Y N, DING Y R, et al. Capacitive pressure sensor combining dual dielectric layers with integrated composite electrode for wearable healthcare monitoring[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(10):12 974–12 985.
- [3] 曾鹏程,肖书平,吴焕东,等.较强形变能力的聚丙烯基多孔材料的制备及其压力传感性能研究[J/OL]. *高分子学报*, 2024:1–12. [2024-08-27]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GFXB20240823001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [4] ZENG Pengcheng, XIAO Shuping, WU Huandong, et al. Preparation of polypropylene-based porous materials with strong deformability and study on its pressure sensing performance[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024:1–12. [2024-08-27]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GFXB20240823001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [5] LI T, DUAN Z H, HUANG Q, et al. Integrated surface microstructure and enhanced dielectric constant for constructing simple, low-cost, and high-performance flexible capacitive pressure sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 376. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115629.
- [6] ZHANG P, ZHANG J, LI Y X, et al. Flexible and high sensitive capacitive pressure sensor with microstructured electrode inspired by ginkgo leaf[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2021, 54(46). DOI: 10.1088/1361-6463/ac1ddc.
- [7] LU P, WANG L, ZHU P, et al. Iontronic pressure sensor with high sensitivity and linear response over a wide pressure range based on soft micropillared electrodes[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(11): 1 091–1 100.
- [8] WANG J, SUN H X, CHEN S H, et al. Flexible capacitive pressure sensors with porous double microstructured layers[J]. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 2024, 29(3). DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0344.
- [9] 陈昌华,周建平,许燕,等.电纺PVDF纤维膜为基底的传感器制备及性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(11):57–63. CHEN Changhua, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Preparation and performance of sensors based on electrospun PVDF fiber film[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(11):57–63.
- [10] XU K, WANG C T, ZHANG Z X, et al. Flexible capacitive pressure sensor based on electrically assisted micro-nanoimprinting[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(29):13 575–13 590.
- [11] WANG J, LOU Y Y, WANG B, et al. Highly sensitive, breathable, and flexible pressure sensor based on electrospun membrane with assistance of AgNW/TPU as composite dielectric layer[J]. *Sensors*, 2020, 20(9). DOI:10.3390/s20092459.
- [12] 董点点,张静雯,唐杰,等.基于天然高分子的导电材料制备及其在柔性传感器中的应用[J]. *高分子学报*, 2020, 51(8): 864–879. DONG Diandian, ZHANG Jingwen, TANG Jie, et al. Fabrication of conductive materials based on natural polymers and their application in flexible sensors[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2020, 51(8): 864–879.
- [13] ZHANG Y Q, LIU S D, MIAO Y H, et al. Highly stretchable and sensitive pressure sensor array based on icicle-shaped liquid metal film electrodes[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(25):27 961–27 970.
- [14] CAO Y J, LIAO J H, JU Y L, et al. Study on the construction of dual-structured flexible pressure sensor based on breath figure

- process[J]. Polymer, 2023, 286. DOI: 10.1016/j.polymer.2023.126400.
- [14] 孟金华,李沂蒙,魏乐倩,等.双重导电网络柔性应变/温度传感器的制备及健康监测应用[J/OL].高分子学报,2024:1-14.[2024-06-12]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GFXB20240611001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. MENG Jinhua, LI Yimeng, WEI LeQian, et al. Preparation and health monitoring application of flexible strain/temperature sensor with dual conductive network[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-14. [2024-06-12]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GFXB20240611001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [15] HUANG H Z, RAN X, WAN S, et al. A flexible capacitive pressure sensor with a hybrid porous PDMS/SA hydrogel structure for touch/pain detection[J]. Nanoscale, 2024, 16(38):17 926-17 933.
- [16] YAO J J, QU C M, CHEN Z H, et al. High-sensitive wearable capacitive pressure sensor with hemispherical porous electrode[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2024, 6(4):2 649-2 658.
- [17] CHEN Y C, LI D Y, ZHANG H, et al. Antishrinking strategy of microcellular thermoplastic polyurethane by comprehensive modeling analysis[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(19):7 155-7 166.
- [18] WANG G L, LIU J X, ZHAO J C, et al. Structure-gradient thermoplastic polyurethane foams with enhanced resilience derived by microcellular foaming[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2022, 188. DOI:10.1016/j.supflu.2022.105667.
- [19] GAO X L, CHEN Y C, CHEN P, et al. Supercritical CO₂ foaming and shrinkage resistance of thermoplastic polyurethane/modified magnesium borate whisker composite[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2022, 57. DOI:10.1016/j.jcou.2022.101887.
- [20] WU H D, XIAO S P, ZENG P C, et al. Capacitive pressure sensor with high sensitivity and wide pressure detection range based on a micro-porous elastomer dielectric layer fabricated *via* supercritical carbon dioxide foaming[J]. Polymer, 2025, 323. DOI: 10.1016/j.polymer.2025.128177.
- [21] SU Q, HUANG X, ZHANG Y B, et al. Tunable flexible pressure sensor based on bioinspired capillary-driven method[J]. Micro-electronic Engineering, 2020, 231. DOI: 10.1016/j.mee.2020.111370.
- [22] 李洁,王晨,方兆舟,等.界面缓冲层对全旋涂式PVDF-TrFE/ZnO量子点传感器压电性能的影响[J].工程塑料应用,2020,48(10):13-18.
LI Jie, WANG Chen, FANG Zhaozhou, et al. Effects of interface buffer layer on piezoelectricity of PVDF-TrFE/ZnO quantum dots sensors prepared by a fully spin-coating method[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10):13-18.
- [23] 范强,苗锦雷,刘旭华,等.基于仿生MXene纤维导电网络的柔性透明电极及电容传感器[J].高分子学报,2022,53(6):617-625.
FAN Qiang, MIAO Jinlei, LIU Xuhua, et al. Flexible transparent electrode and capacitance sensor based on bionic-MXene fiber conductive network[J]. Acta Polymerica Sinica, 2022, 53(6): 617-625.