

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.05.026

聚合物基电容式柔性压力传感器研究进展

马宁^{1,2}, 吴焕东^{1,2}, 列皓琰^{1,2}, 湛继宗³, 陈欣³, 肖书平^{1,2}, 徐百平^{1,2}, 黄嘉荣^{1,2}

(1. 五邑大学机械与自动化工程学院, 广东江门 529020; 2. 江门市高分子材料智能制造重点实验室, 广东江门 529020;

3. 广东恒申美达新材料股份公司, 广东江门 529100)

摘要: 简述了聚合物基电容式柔性压力传感器的常用材料、结构设计和性能优化。重点介绍了该类传感器复合改性及微观结构设计的研究进展, 如填料复合改性、表面微纳结构构筑、三维多孔结构制备和多级结构构筑对聚合物基电容式柔性压力传感器灵敏度的影响规律及其机理。此外, 回顾了电容式柔性压力传感器的实际应用环境和适应场景, 分析了该类传感器目前研制的难点和发展方向, 为未来高性能聚合物基电容式柔性压力传感器的研发与应用提供参考。

关键词: 电容式柔性压力传感; 聚合物; 填料复合改性; 多级结构; 灵敏度

中图分类号: TQ320.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)05-0221-06

Research progress on polymer-based capacitive flexible pressure sensor

MA Ning^{1,2}, WU Huandong^{1,2}, LIE Haoting^{1,2}, CHEN Jizong³, CHEN Xin³, XIAO Shuping^{1,2}, XU Baiping^{1,2}, HUANG Jiarong^{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; 3. Guangdong Highsun Meida New Materials Co., Ltd., Jiangmen 529100, China)

Abstract: This article briefly describes the commonly used materials, structural design and performance optimization of polymer-based capacitive flexible pressure sensors. Key strategies such as composite modification and microstructure design are discussed with respect to their influence laws and mechanisms on the sensor's sensitivity, including filler composite modification, construction of surface micro-nano structure, preparation of three-dimensional porous architectures, and construction of multi-level structure engineering. In addition, the practical application environments and suitable scenarios of the capacitive flexible pressure sensors are reviewed, and the current research difficulties and development directions of such sensors are analyzed, offering valuable insights for future research, development, and application of high-performance polymer-based capacitive flexible pressure sensors.

Keywords: capacitive flexible pressure sensor; polymer; filler composite modification; multi-level structure; sensitivity

柔性压力传感器是一种能够感知和监测外界压力变化的电子器件, 具有良好的柔韧性和延展性, 打破了传统压力传感器刚性大的缺陷。因此, 该类传感器已被广泛应用于可穿戴设备、人机交互、电子皮肤和医疗康复等领域中^[1-4]。

根据传感器感知机理的不同, 柔性压力传感器主要分为晶体管型^[5]、压电式^[6]、摩擦电型^[7-8]、压阻式^[9]和电容式^[10-12]。其中, 电容式柔性压力传感器具有结构简单、能耗低、可适用于动静态压力检测等优点, 因此在人体运动监测方面显示出巨大的应用潜力。电容式柔性压力传感器具有典型的电极层-介电层-电极层结构。目前, 其电极层和介电层材料种类

繁多, 主要可分为离子液体^[13]、天然材料^[14]、液态金属^[15]和聚合物^[16]等。其中, 聚合物材料兼具易加工成型、可变形性好和成本低廉等优点, 成为电容式柔性压力传感器研制的常用材料之一。随着社会信息化程度的不断提高, 对聚合物基电容式柔性压力传感器的性能提出了更高的要求, 集中体现在灵敏度(S)、压力检测范围两方面。宽压力检测范围和高 S 成为目前聚合物基电容式柔性压力传感器制备研究的热点之一。而该类传感器的性能主要依赖于其电极层或介电层传感材料的改性及其微观结构。

本文从电容式柔性压力传感器的结构和工作原理出发,

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515011787, 2023A1515110321), 五邑大学创新创业基金(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; 黄嘉荣, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为弹性体智能化与可穿戴技术

收稿日期: 2026-03-23

引用格式: 马宁, 吴焕东, 列皓琰, 等. 聚合物基电容式柔性压力传感器研究进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(5): 221-226.

MA Ning, WU Huandong, LIE Haoting, et al. Research progress on polymer-based capacitive flexible pressure sensor[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(5): 221-226.

对聚合物基电容式柔性压力传感器电极层和介电层的常用材料、材料改性、微纳结构和多级结构的设计和构建及其对传感器 S 和工作压力范围的影响机理进行综述。最后,介绍了聚合物基电容式柔性压力传感器目前面临的挑战及其发展前景。

1 传感材料及其复合改性

电容式压力传感器呈现出典型的“三明治”结构,由上、下两个电极层和中间介电层组成。与传统的平行板电容器类似,电容式柔性压力传感器的电容(C)与介电层厚度(d)、电极层/介电层接触面积(A)呈现出如式(1)的关系。

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (1)$$

式中: ε 为介电层的介电常数。

由式(1)可知,传感器在外界压力作用下 ε 、 d 或 A 的改变均可引起传感器 C 的改变。因此,电容式柔性压力传感器的传感机制可分为变 A 型、变 d 型和变 ε 型三种基本类型。

1.1 常用材料

聚合物基电容式柔性压力传感器的整体性能强烈依赖于其介电层和电极层材料特性。为了改善传感器柔韧性,研究者经常采用聚合物弹性体作为介电层和电极层的基体材料。例如,聚二甲基硅氧烷(PDMS)因其优异的柔韧性、低模量和良好的生物相容性被广泛应用于该类传感器的基体材料。Hwang等^[17]对PDMS基体进行改造,并作为介电层,相应PDMS基电容式传感器多用于可穿戴电子设备领域,在检测用户的手指敲击和呼吸状态中表现出较高 S 和较短松弛响应时间的优点。Mahata等^[18]以玫瑰花瓣作为仿生原型,通过生物模拟法在PDMS基体上构建出双层级微纳结构介电层,并采用模板复刻、旋涂固化及层压组装机工艺制备出高性能电容式压力传感器,在健康监测领域中应用广泛,传感器在手腕脉搏实时监测中表现出较高 S 。

虽然PDMS具有良好的柔韧性,但是其难以热塑性加工,这使PDMS相关制品在回收再加工重复利用方面受限。因此研究者尝试采用聚偏氟乙烯(PVDF)等具有可热塑性加工特性的塑料来作为传感器介电层。例如Zhang等^[19]采用仿生大豆根瘤菌珠状结构,以PVDF为基体通过热压工艺制备传感材料,相应传感器可监测人体肘部弯曲、咀嚼、吞咽、手指敲击和膝盖弯曲等多种运动,并具有高 S 。虽然PVDF具有良好的热塑性加工性,但是其柔韧性较差,通常以薄膜形式用作传感器的介电层材料,当厚度增加会使传感器丧失柔韧性。

近几年,热塑性聚氨酯弹性体(TPU)也逐渐被应用于电容式压力传感器的研制中。例如五邑大学高分子材料智能制造重点实验室团队以TPU为基体,通过模压和超临界二氧化碳(Sc-CO_2)间歇发泡步骤制备电容式柔性压力传感材料,相应传感器在宽压力范围内的动态和静态压力检测中表现较为出色,展现出较高的 S ^[20]。Ke等^[21]将TPU混合其他填料通过熔融加工、压缩模塑等工艺制备电容式柔性压力传

感器,并广泛应用于假肢、压力绷带、可穿戴电子设备等领域。

综上,聚合物基电容式压力传感材料主要以PDMS、PVDF和TPU等聚合物弹性体或塑料为主。其中,TPU不仅兼具了PDMS良好的柔韧性和生物相容性,而且具有PVDF的可热塑性加工的特点,成为一种极具应用前景的电容式压力传感材料。

1.2 填料复合改性

聚合物基电容式柔性压力传感器的 S 与其介电层材料的 ε 大小密切相关,因此将导电填料或高 ε 的陶瓷填料与柔性聚合物基体复合,制备聚合物基复合材料介电层,以提升其 ε ,可显著改善电容式柔性压力传感器的 S 。

碳酸钡(BaTiO_3)^[22-23]和钛酸铜钙(CCTO)^[24-25]等高 ε 陶瓷类填料常被用作聚合物基电容式柔性压力传感材料介电改性剂。例如,Chhetry等^[24]以CCTO为介电改性剂,通过超声浸涂和表面改性法将其分散在聚氨酯(PU)海绵中,制得CCTO@PU杂化海绵基电容式传感材料。当CCTO质量分数达到30%时, ε 从纯PU的3.0达到最大值167.05,相应传感器 S 从 0.02 kPa^{-1} 提升到 0.73 kPa^{-1} (压力 $<1.6 \text{ kPa}$)。然而当CCTO含量过高时会由于渗流结构形成而引起材料急剧变硬、形变能力下降,从而不利于传感器 S 提升。另外,Wang等^[26]在研究 BaTiO_3 对传感器 S 的影响时发现,当 BaTiO_3 /多壁碳纳米管/PDMS复合材料介电层内的 BaTiO_3 质量分数从20%提高至30%时,相应传感器 S 反而降低。

此外,银(Ag)^[27]、氧化锌(ZnO)^[28]、银纳米线(AgNWs)^[29-30]等金属类和炭黑(CB)^[15]、碳纳米管(CNTs)^[3,31]等碳素类填料因其良好的导电性也常被用作改善电容式柔性压力传感材料的介电性能。Liu等^[27]通过溶液混炼、热固化和化学发泡等步骤制备得到多孔Ag/PDMS复合材料介电层,并研究了Ag添加量对传感器 S 的影响规律,发现Ag质量分数为20%的Ag/PDMS复合材料相应传感器在0~100 kPa压力范围内的 S 是未添加的约2.01倍。Liu等^[28]通过溶液混炼将半导体ZnO纳米线与PDMS复合,并通过颗粒模板沥滤法制得多孔PDMS基复合海绵介电层,相应传感器 S 显著提升:当ZnO剂量为200 mg(质量分数约45%)时,传感器在2.5~7.5 kPa压力范围内 S 达到最高值,为 0.1279 kPa^{-1} ,较未添加时提升2.5倍。

Ni等^[29]以PDMS为基底、将不同浓度AgNWs分散液涂覆在PDMS基纳米复合材料上作为电极层得到电容式压力传感器,研究了AgNWs浓度对传感器性能的影响,结果表明,在0~60 kPa压力范围内传感器 S 达 0.059 kPa^{-1} 。Ma等^[31]通过仿生制备树枝状胶体聚氨酯(DCPU),混合CNTs与 BaTiO_3 填料,再将该填料涂覆于PU泡沫骨架上构建介电层制成高性能电容式压力传感器。研究发现当CNTs质量分数为10%时,传感器在0~100 kPa压力范围内 S 达到最高,为 2.51 kPa^{-1} ,是未添加时的84倍。Liu等^[32]通过超声波分散、溶液混炼和溶剂浇注等步骤得到PU/石墨烯复合材料薄膜,并将其用作电容式柔性压力传感器的介电层。研究发现石

墨烯掺杂量对传感器 S 有较大影响,石墨烯质量分数从0.5%增加到1.5%时,相应的传感器在小于3 kPa压力范围内的 S 从 0.4 kPa^{-1} 增加到 1.9 kPa^{-1} 。

掺杂导电填料以提高聚合物介电层的 ϵ 时,并非导电填料含量越高越好。当填料含量低于某一值(渗流阈值)时,复合材料的 ϵ 与填料含量呈正相关。但当填料含量高于渗流阈值时,因导电渗流结构形成,介电层内形成导电通路,会引起 ϵ 大幅度下降。因此,聚合物基电容式柔性压力传感器的 S 与聚合物介电层中导电填料掺杂量也表现出类似关系。例如,Xiao等^[15]将石墨烯纳米片(GNPs)和CB与多孔PDMS海绵复合,将所得复合材料作为传感器介电层,研究发现当GNPs和CB总质量分数为0.1%时,传感器电容响应 $\Delta C/C_0$ 最强;然而,随GNPs和CB总含量的进一步增加, $\Delta C/C_0$ 反而下降,导致 S 降低。Shi等^[33]在研究AgNWs含量对PDMS薄膜介电层压力传感器 S 影响时,也发现了类似规律:AgNWs质量分数为0.12%时,传感器的 S 达到 0.059 kPa^{-1} ,是未添加的约5倍;然而当AgNWs质量分数提高至0.24%时,传感器的 S 反而降低。

多种填料复合会影响复合材料的渗流行为,进而影响其介电性能。例如,Zhang等^[34]以纳米纤维(FIBER)和多壁碳纳米管(MWCNT)为填料,通过模板法和浸渍法制备了PDMS/FIBER@MWCNT复合材料泡沫介电层,在保证PDMS和FIBER配比不变的情况下,通过增加浸泡次数以增加MWCNTs的含量。研究发现,适中的浸泡次数可显著提升传感器的 S 。例如,当浸泡次数为4次时,传感器在0~20 kPa和20~70 kPa范围内的 S 分别达到了 0.07 、 0.69 kPa^{-1} ;当浸泡次数超过4次时, S 反而开始下降。Ke等^[21]通过熔融混炼石墨烯纳米片(GNP)和CNTs与TPU,制备得到TPU/GNP/CNTs复合材料介电层。在保证GNP和CNTs总质量分数(2.0%)不变的情况下,逐步改变GNP与CNTs的质量比测试传感器 S ,发现GNP和CNTs质量分数分别为0.5%及1.5%时,所对应的传感器在0.1~1.3 MPa的压力范围内的 S 最高达到了 $(2.05 \pm 0.13) \text{ MPa}^{-1}$ 。

此外,导电填料的长径比也会在一定程度上影响电容式柔性压力传感器的 S 。例如,Guo等^[35]采用不同长径比的CNTs与PDMS混合形成复合介电层,当CNTs的长径比从200提升至3 750时,传感器在0~450 Pa压力范围内的 S 从 0.58 kPa^{-1} 增加到 1.87 kPa^{-1} 。

综上,无论是高介电常数的陶瓷填料,还是金属类或碳系类填料,其适量添加可有效改善聚合物基介电层的介电性能,从而显著提升传感器 S 。然而过高含量下,由于渗流网络形成,会引起材料形变能力急剧下降或导电通路形成,反而引起传感器 S 急剧下降。此外,在聚合物基电容式压力传感领域,填料复合多以溶液混炼法为主,有机溶剂使用量大。熔融混炼虽然也有报道,但是受限于其混合能力,性能提升幅度有限。

2 传感材料的微纳结构

2.1 表面微纳结构

近年来,表面微纳结构以其较强的可变形能力被广泛应用于电容式柔性压力传感器的介电层或电极层制备研究中。目前,所广泛应用的表面微纳结构主要为金字塔^[36-37]、微球^[38]、微柱^[39-40]、微褶皱^[41]和仿生结构^[42-43]等。

Zhao等^[37]以表面金字塔结构PDMS为介电层,制备电容式柔性压力传感器,对比研究了金字塔尺寸和阵列密度(用相邻金字塔间距表征)对传感器 S 的影响规律。研究发现,与无表面微结构的PDMS介电层相比,所研制的表面金字塔介电层相应传感器的 S 在小于 1 kPa^{-1} 压力范围内提升160.34%。随着金字塔尺寸的增加,传感器 S 呈现出持续上升趋势。相邻金字塔间距与 S 呈正相关,当间距为 $20 \mu\text{m}$ 时传感器达到最优传感性能。Sun等^[38]通过层压法,将PDMS微球结构引入至两层TPU薄片之间,形成复合结构介电层,相应传感器 S 相较于单纯TPU薄片提升约8倍(压力 $<10 \text{ kPa}$)。Wang等^[41]通过溶液浇注法制备了表面微褶皱结构的PDMS薄片,采用两层微褶皱交叉叠加作为介电层,相应传感器的 S 较非优化结构从 1.727 kPa^{-1} 提升至 3.19 kPa^{-1} (压力 $<50 \text{ Pa}$)。Guo等^[44]利用3D打印构建仿生蜂窝结构介电层,并对比研究了蜂窝形状和结构参数对传感器 S 的影响:与截面矩形蜂窝状结构介电层相应传感器相比,截面星形结构的电容响应明显较强,且随着蜂窝壁厚减小, S 进一步提升。

Luo等^[44]通过溶液涂敷法在介电层表面构筑微柱阵列结构。研究发现具有微柱阵列结构的传感器在低压($<1.5 \text{ kPa}$)下的 S 比无微柱阵列结构的高2倍,达到 0.626 MPa^{-1} 。此外,该项工作还对比研究了微柱阵列结构的倾斜与否对传感器 S 的影响,结果表明倾斜微柱阵列结构以其较强的变形能力使得传感器表现出较高的 S 。

与单面微纳结构相比,双面微纳结构更有利于改善电容式压力传感器的性能。例如,Su等^[45]通过溶液旋涂法,并借助于拉伸作用使得溶液在毛细效应下流动充填至微腔,从而制得双面微柱阵列结构介电层。与单面微柱阵列介电层相比,双面微柱阵列介电层相应传感器在压力 $<0.5 \text{ kPa}$ 范围内的 S 提升了 5.632 kPa^{-1} 。

Li等^[46]采用溶液旋涂法,制得微金字塔阵列结构PDMS薄膜,探究了传感器组装方式对 S 的影响:相比于传统的ITO电极层-PDMS薄膜-ITO电极层组装方式,ITO电极层-聚对苯二甲苯介电层-ITO涂敷PDMS微结构电极层组装方式使得传感器展现出极强的相对电容变化,在微压区(压力 $<50 \text{ Pa}$)下 S 达到了 70.6 kPa^{-1} ,是前者的22.7倍,这与后者组装方式下传感器明显较低的初始电容值有关。Zhang等^[47]利用微型腔抽真空法诱发铺设在模具上的有聚酯薄膜支撑的液态金属电极层发生形变,制得表面冰锥状结构电极层,并对比研究了冰锥结构的尺寸对传感器性能的影响:纵横比为0.53时,所获得的传感器的 S 达到了 46.8 kPa^{-1} (压力0~1 kPa),比无微结构的高2.4倍。Xiong等^[48]利用溶液旋涂法制得表面

微凸阵列结构的PDMS薄膜,并在其上喷金,从而获得表面微凸结构电极层薄膜,将两片薄膜微结构相对放置组装传感器,所得传感器在低压(<130 Pa)范围内展现出极高的 S ,达到了 30.2 kPa^{-1} 。

表面微纳结构的尺度对传感器的 S 亦有显著影响。例如,Yang等^[49]分别以纳米级褶皱铜箔和微型腔阵列结构铜片为模板,以紫外光固化胶黏剂为过程介质,通过溶液浇注法-模板刻蚀等步骤,分别制备表面纳米级褶皱结构和微柱阵列结构的石墨烯电极层。微柱阵列结构电极层相较于纳米级褶皱具有较大的粗糙度,因此在相同的外部负载下,前者相应的传感器表现出更大的变形能力,其 S 是后者的11倍。

为了进一步提高电容式柔性压力传感器的 S ,可尝试在传感器的电极层和介电层表面同时构筑微纳结构。例如,Li等^[50]以仿生微腔结构PDMS为柔性基底,并喷金制得阵列微腔柔性电极层,然后直接以聚苯乙烯(PS)微球为介电层,相应传感器在低压下的 S 达到了 0.815 kPa^{-1} ,是表面平整柔性电极层的约26倍。前者具有较高 S 主要源于其外部压力作用下微结构柔性电极层较强的形变能力引起的介电层厚度急剧减小,以及PS微球重排与微腔内电极层接触面积激增。

综上,电容式压力传感材料表面微结构的复刻加工多以溶液浇注或溶液旋涂为主,所构筑的金字塔、微柱、微褶皱等表面结构可有效改善传感器低压下的电容响应,显著提升其低压甚至是微压下的 S ,这与外力作用下表面微结构处的应力集中现象,以及压缩过程中其与介电层接触面积的急剧变化有关,且其压强电容相应强烈地依赖于微结构的形状和尺寸等。

2.2 三维多孔结构

相比于表面微纳结构介电层,三维多孔结构的介电层不仅兼具表面微纳结构变形能力强的优点,而且具有形变不易饱和的优势。目前,所涉及的多孔结构涵盖开孔、闭孔和多尺度复合结构等^[51]。制备三维多孔结构介电层的常用方法为颗粒沥滤^[52-53]、静电纺丝^[6]、化学发泡^[51,54]和超临界流体发泡^[20]。

Han等^[52]将糖颗粒与PDMS混合,然后通过糖颗粒沥滤制得多孔PDMS介电层,并通过控制糖颗粒尺寸控制孔尺寸。研究发现 $600 \mu\text{m}$ 孔隙尺寸的多孔PDMS介电层相应传感器在低压力(<5 kPa)范围内 S 最高,可达 6.4 kPa^{-1} ,较无孔隙PDMS介电层传感器 S 提升16~18倍。Chen等^[54]采用碳酸氢铵(NH_4HCO_3)作为化学发泡剂制备多孔PDMS介电层,所得多孔介电层相应传感器在0.33~250 kPa的 S 是实体PDMS的33倍。Zhao等^[55]通过静电纺丝法制备了AgNWs包裹TPU纳米纤维的三维多孔复合薄膜(NCFs)介电层,并发现三维多孔结构与AgNWs协同作用共同提升材料压力传感性能,与实体纯TPU薄膜传感器的 S (0.012 kPa^{-1})相比,前者 S 大幅度提升,达 1.21 kPa^{-1} (压力<28 kPa)。

此外,多孔介电层的孔径大小和孔隙率会影响着电容式柔性压力传感器的 S 等性能。例如,Kang等^[56]采用不同直径

的PS微球为模板,通过溶液刻蚀制得均匀多孔结构PDMS介电层。相应传感器的 S 随着PS微球直径(对应泡孔直径)的增加而增加,当PS微球直径从 $2 \mu\text{m}$ 增加至 $6 \mu\text{m}$ 时,相对应的传感器在低压(<1 kPa)范围内的 S 从 0.41 kPa^{-1} 增加到 0.63 kPa^{-1} 。这归因于较大孔径的PDMS膜具有较强的可压缩性和变形能力。

Huang等^[57]采用颗粒沥滤法制备得到多孔PDMS泡沫,并将其用作电容式柔性压力传感器的介电层。通过调控颗粒的含量改变孔隙率,从而研究了孔隙率对传感器的 S 的影响。结果表明,传感器在压力<100 kPa的 S 随孔隙率的增加而提升,原因如下:高孔隙率使PDMS泡沫含大量空气间隙,在压力下介电层有效 ϵ 变化更显著,使得电容变化率提升。当孔隙率为63.94%时,传感器 S 可达实体PDMS介电层的5倍以上。

为了进一步提高电容式柔性压力传感器在宽动态响应范围内的 S ,Li等^[58]以NaCl粉末和金属针阵列为模板制备得到同时具备贯通孔阵列的多孔PDMS材料作为介电层,通过研究贯通孔阵列的疏密对传感器 S 的影响后发现,在100~400 kPa压力范围内 4×4 阵列和 6×6 阵列相应的传感器 S 相较于无阵列分别从 0.006 kPa^{-1} 提高至 0.014 kPa^{-1} 和 0.020 kPa^{-1} 。这归因于贯通孔阵列的引入进一步增强了介电层的可压缩性。Hwang等^[17]通过颗粒模板法和乳液模板法制备得到孔径双峰分布的大孔/微孔PDMS多孔材料,并研究了其对传感器 S 的影响。结果表明,大孔/微孔PDMS多孔材料相应的传感器在压力5 kPa下 S 达到了 0.18 kPa^{-1} ,是单一微孔结构的18倍,单一大孔结构的约2倍。

综上,三维多孔电容式压力传感材料的传感性能主要依赖于其孔径大小及孔隙率。较大的孔径往往可赋予孔结构较大的压缩变形能力,较高的孔隙率则可提供材料压缩过程中较大的有效介电常数变化,因此相应传感器 S 可大幅度提升。然而,该类结构仅在低压及以上范围内有效,在微压区,其压力感知能力依然较弱。因此,多级结构构筑在电容式压力传感材料研制中具备显著优势。

3 传感材料多级结构的构筑

在介电层中构造多孔结构或掺杂纳米填料虽然可以提高电容式柔性压力传感器的 S ,但有效工作范围依然主要在低压及以上区域且线性度仍有待提高。相反地,在电极层和介电层表面引入微纳结构可以提高传感器低压甚至是微压下的 S 和压力检测范围。因此,为了实现电容式柔性压力传感器在超低压检测的同时具有高 S ,Zhang等^[59]采用硅模板法和颗粒沥滤法制备得到了具有表面微金字塔结构阵列的多孔薄膜电极层,相应传感器在低压下也展现出较高 S :0~30 kPa范围内达 2.51 kPa^{-1} ,且检测下限可低至2.0 Pa。

为了进一步提高电容式柔性压力传感器的工作压力范围和 S ,Zhang等^[60]以铺设铜导电层的仿生微结构PDMS薄膜为电极层,以多孔CB/TPU复合材料为介电层,构筑多级结构压力传感器,其 S 在0~1 kPa、1~50 kPa和50~300 kPa

分别达到了1.397、0.072、0.009 kPa⁻¹。Kim等^[61]通过光刻技术和乳液模板法同步制备表面微锥结构和多孔结构的PDMS介电层材料。研究发现在介电层表面引入微锥结构后,介电层变形能力较单一多孔结构有了显著提升,相应传感器 S 达到4.99 kPa⁻¹,是单一多孔结构传感器的6倍。

此外,为了克服电容式柔性压力传感材料单层表面微结构有限的可压缩性、低耐久性和高黏性等缺点,Lin等^[62]利用光刻技术和静电纺丝技术开发了一种由PVDF微纤层和表面微柱阵列PDMS层构成的双介电层,PVDF较强的压电效应、微纤的蓬松结构所赋予的较高孔隙率,以及微柱阵列结构的强形变能力,使得传感器在7 kPa以下压力范围内的 S 达到0.6 kPa⁻¹,是单一PVDF微纤介电层的4倍、单一微柱阵列结构介电层的1.5倍。

综上,与单一结构相比,无论是以表面微结构和内部多孔结构为特点的多级结构介电层,还是表面微结构电极层和多孔介电层所组装而成的多级结构传感器,均具备优异的传感性能。

4 电容式柔性压力传感的应用

目前电容式柔性压力传感器的应用领域大致可分为健康监测、机器感知和人机交互三大类。

在医疗健康监测领域,大多数是将该类传感器贴敷于皮肤表面以实现人体脉搏^[4]、心率^[56]、足底压力^[19]和呼吸率^[20]等的实时监测,辅助疾病诊断和治疗。如Liu等^[4]将所制备的一种新型多重交联双网络离子水凝胶电容式压力传感器贴于脉搏处,并把获取的脉搏波与训练后的神经网络模型相结合,成功实现了血压预测。Peng等^[23]设计的柔性层级梯度混合电容式压力传感器具有宽压力范围(高达500 kPa)和50 Pa最低检测限。其凭借层级梯度混合结构构建出智能鞋垫系统所拥有的8个传感器可以轻松识别出行走、跑步和跳跃等实时运动行为。

在机器感知应用领域中,电容式柔性压力传感器一般被贴附于机械人手指处,使得机械手能够感知进而便于掌控抓取力度,例如Su等^[63]将传感器单元集成到触觉手套中,通过采集手套不同测量点的实时压力变化,反映机械手抓取力度。此外,电容式柔性压力传感器在将人的机械操作转换成电信号以控制机器或提供反馈方面发挥着重要的作用,例如Pan等^[64]提出一种基于多通道电容式压力传感器的无线智能手套,通过在手套上集成16个电容式压力传感器以捕捉手势变化,并成功应用于手语识别。Zhao等^[55]将AgNWs@TPU纳米纤维复合介电层电容式柔性压力传感器集成为具有10个独立传感通道的无线智能钢琴手套,通过数据采集系统监测手指关节压力变化,将信号转化为数字指令并无线传输至移动应用,实现钢琴实时演奏。

5 总结与展望

本文综述了聚合物基电容式柔性压力传感器的常用传感材料及其复合改性、微纳结构(表面微纳结构、三维多孔结构)和多级结构构筑、电容式柔性压力传感的应用。

大量研究表明,聚合物弹性体材料在该类传感器关键材料研制方面展现出良好的应用效果。相比于单一的表面微纳结果和三维多孔结构,多级结构可有效提升传感器在低压和中压范围内的传感性能。目前该类传感器在健康监测、机器感知和人机交互三大类领域内均展现出了较好的应用效果。

然而该领域目前面临的一个亟待解决的难点是:宽压力检测范围和高 S 难以同步实现。此外,现阶段的微纳结构化聚合物基电容式柔性压力传感器大多数是在科研探寻的情况下研制出来的,未来开发新的制备技术,以简化生产工艺、降低成本,从而适用于工业级规模化生产,这将是聚合物基电容式柔性压力传感技术研究和发展的方向之一。

参考文献

- [1] ZHANG J, et al. *Advanced Healthcare Materials*, 2025, 14(31). DOI:10.1002/adhm.202501798.
- [2] ZHANG X H, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 505. DOI: 10.1016/j.ccej.2025.159369.
- [3] GUO X H, et al. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(13):15 626–15 639.
- [4] LIU C X, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(26): 34 042–34 056.
- [5] CHENG G Y, et al. *Carbon*, 2023, 204:456–464.
- [6] ZHANG Q Y, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 498. DOI: 10.1016/j.ccej.2024.155661.
- [7] CHEN S, et al. *Skin Research and Technology*, 2022, 28(2): 280–290.
- [8] 张瑶. 密封式可穿戴摩擦电传感器件的制备与性能优化[D]. 上海: 东华大学, 2021.
ZHANG Yao. Preparation and performance optimization of sealed wearable triboelectric sensor devices[D]. Shanghai: Donghua university, 2021.
- [9] SUN J T, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(19): 25 422–25 431.
- [10] HAMED O, et al. *Micromachines*, 2024, 15(2):1-19.
- [11] CHENG A J, et al. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(11). DOI:10.1002/admt.202201959.
- [12] MA Z Y, et al. *Nano Materials Science*, 2023, 5(3):265–277.
- [13] LI L T, et al. *Nano Energy*, 2023, 105. DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.108012.
- [14] WANG J Y, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 303. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2025.140702.
- [15] XIAO Y, et al. *Journal of Materials Science & Technology*, 2026, 240:87–97.
- [16] ZHAO J T, et al. *Advances in Mechanical Engineering*, 2024, 16 (10):1–10.
- [17] HWANG J, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2021, 211. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108607.
- [18] MAHATA C, et al. *Measurement*, 2020, 151. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107095.

- [19] ZHANG L M, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, 142. DOI: 10.1002/app.57283.
- [20] WU H D, et al. *Polymer*, 2025, 323. DOI: 10.1016/j.polymer.2025.128177.
- [21] KE K, et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 126. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105614.
- [22] LI R Q, et al. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 321. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112425.
- [23] PENG R B, et al. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(27). DOI: 10.1002/adfm.202316519.
- [24] CHHETRY A, et al. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(31). DOI: 10.1002/adfm.201910020.
- [25] WANG W Q, et al. *Polymers*, 2021, 13(7). DOI: 10.3390/polym13071075.
- [26] WANG F F, et al. *Materials Letters*, 2021, 303. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130512.
- [27] LIU S Y, et al. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(5): 1 870–1 876.
- [28] LIU X Y, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2740(1). DOI: 10.1088/1742-6596/2740/1/012061.
- [29] NI C E, et al. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(24): 40 532–40 540.
- [30] SU D J, et al. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 659: 1 042–1 051.
- [31] MA Z Y, et al. *Composites Science and Technology*, 2022, 227. DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109595.
- [32] LIU F, et al. *Chemistry – A European Journal*, 2018, 24(63): 16 823–16 832.
- [33] SHI R L, et al. *Science China Materials*, 2018, 61(12): 1 587–1 595.
- [34] ZHANG T, et al. *Journal of Porous Materials*, 2023, 30(6): 1 797–1 806.
- [35] GUO Z X, et al. *Micromachines*, 2019, 10(11). DOI: 10.3390/mi10110715.
- [36] AN T G, et al. *ACS sensors*, 2024, 9(2): 726–735.
- [37] ZHAO K, et al. *Nanomaterials*, 2023, 13(4). DOI: 10.3390/nano13040701.
- [38] SUN Y P, et al. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2021, 38(7). DOI: 10.1002/ppsc.202100019.
- [39] XU Z R, et al. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 62. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102076.
- [40] HUA T, et al. *Sensors*, 2023, 23(9). DOI: 10.3390/s23094323.
- [41] WANG S L, et al. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, 35(78): 1–10.
- [42] GUO X H, et al. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, 71(7): 4 283–4 291.
- [43] GUO X H, et al. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(9): 13 937–13 945.
- [44] LUO Y S, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(19): 17 796–17 803.
- [45] SU Q, et al. *Microelectronic Engineering*, 2020, 231. DOI: 10.1016/j.mee.2020.111370.
- [46] LI M M, et al. *Sensors*, 2020, 20(2). DOI: 10.3390/s20020371.
- [47] ZHANG Y Q, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(25): 27 961–27 970.
- [48] XIONG Y X, et al. *Nano Energy*, 2020, 70. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104436.
- [49] YANG J, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(16): 14 997–15 006.
- [50] LI T, et al. *Small*, 2016, 12(36): 5 042–5 048.
- [51] MASHIHI S, et al. *ACS Sensors*, 2021, 6(3): 938–949.
- [52] HAN M, et al. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 305. DOI: 10.1016/j.sna.2020.111941.
- [53] XIA Y, et al. *Sensors*, 2021, 21(4). DOI: 10.3390/s21041119.
- [54] CHEN S J, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(31): 20 364–20 370.
- [55] ZHAO S F, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(28): 32 023–32 030.
- [56] KANG S B, et al. *Advanced Electronic Materials*, 2016, 2(12). DOI: 10.1002/aelm.201600356.
- [57] HUANG L X, et al. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(10): 12 048–12 056.
- [58] LI W, et al. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(33): 11 468–11 476.
- [59] ZHANG Z A, et al. *Advanced Electronic Materials*, 2021, 7(7). DOI: 10.1002/aelm.202100174.
- [60] ZHANG P, et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(46). DOI: 10.1088/1361-6463/ac1ddc.
- [61] KIM Y, et al. *Materials & Design*, 2021, 197. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109203.
- [62] LIN M F, et al. *Organic Electronics*, 2021, 98. DOI: 10.1016/j.orgel.2021.106290.
- [63] SU M, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(41): 48 683–48 694.
- [64] PAN J M, et al. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2020, 67(9): 1 624–1 628.