盐模板法构筑梯度多孔热塑性聚氨酯/石墨烯复合材料及其高灵敏宽量程压力传感性能研究

沈红义[1],范彩霞[2]*

(1.鹤壁能源化工职业学院,河南 鹤壁 458030;2.河南理工大学机械工程学院,河南 焦作 454003)

摘　要:多孔导电聚合物是柔性压力传感器的主要材料。然而,均匀多孔结构受压时,孔隙快速塌缩并致密化,导致灵敏度高的器件难以兼顾宽量程与高线性度。以热塑性聚氨酯(TPU)为基体、石墨烯纳米片(GNP)为导电填料、氯化钠(NaCl)颗粒为牺牲模板,通过分层浇铸与溶剂脱除,在单一一体化试样内沿厚度方向构筑大-中-小孔的孔径与模量梯度,制得梯度多孔复合材料(TPU-G)。结果表明:TPU-G在受压时,软质大孔层在低压区优先塌缩;中孔层于中压区接力塌缩;硬质小孔层在高压区最后致密化,导电网络沿压力轴分段重构。TPU-G在0~500 kPa宽压力区间内保持连续、可分段线性标定的电学响应,低压段灵敏度可达2.28 kPa^{-1},各段线性度(R^2)均大于0.99;响应、恢复时间分别为62 ms和80 ms,迟滞约4.7%,经5 000次循环后响应保持率大于95%。将其用于脉搏、呼吸、手指按压、行走足底压力监测及4×4阵列压力分布成像,均获得清晰可辨的信号。该方法工艺简单,成本低廉,不需要冷冻干燥或增材制造等复杂设备。研究为宽量程柔性压力传感材料的规模化制备提供参考。

关键词:梯度多孔结构;石墨烯;热塑性聚氨酯;盐模板法;压力传感;宽量程

中图分类号:TQ323.8　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-3360(2026)09-0068-07

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.013

Study on Salt-templated Gradient Porous Thermoplastic Polyurethane/Graphene Composites for Highly Sensitive Wide-range Pressure Sensing Properties

SHEN Hongyi[1], FAN Caixia[2]*

(1. Hebi Vocational College of Energy and Chemistry, Hebi 458030, China; 2. School of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Porous conductive polymers are the primary materials for flexible pressure sensors. However, uniform porous structures undergo rapid pore collapse and densification upon compression, making it difficult to achieve both a wide sensing range and high linearity in high-sensitivity devices. In the study, thermoplastic polyurethane (TPU) was used as the matrix, graphene nanoplatelets (GNP) were used as the conductive filler, and sodium chloride (NaCl) particles were used as the sacrificial template. Through layer-by-layer casting and solvent removal, pore size and modulus gradients ranging from large to medium to small pores were constructed along the thickness direction within a single integrated specimen, yielding gradient porous composites (TPU-G). The results showed that upon compression, the soft macroporous layer collapsed preferentially in the low-pressure region, the medium-pore layer collapsed in the medium-pressure region, and the rigid microporous layer densified finally in the high-pressure region, with the conductive network being reconstructed segmentally along the pressure axis. The TPU-G maintained a continuous, segmentally linear calibratable electrical response over a wide pressure range of 0~500 kPa, with a sensitivity of up to 2.28 kPa^{-1} in the low-pressure segment and a linearity (R^2) greater than 0.99 for each segment. The response and recovery times were approximately 62 ms and 80 ms, respectively, with a hysteresis of approximately 4.7%, and the response retention rate remained above 95% after 5 000 cycles. When applied to pulse, respiration, finger pressing, plantar pressure monitoring during walking, and 4×4 array pressure distribution imaging, clear and distinguishable signals were obtained. The method features simple

收稿日期 Submitted date 2026-01-26;修回日期 Revised date 2026-02-24;录用日期 Accepted date 2026-03-19

基金项目:河南省2025年科技发展计划项目(252102110368)

*联系人,fancaixia@hpu.edu.cn

引用本文:沈红义,范彩霞.盐模板法构筑梯度多孔热塑性聚氨酯/石墨烯复合材料及其高灵敏宽量程压力传感性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):68-74.

Citation:SHEN H Y, FAN C X. Study on salt-templated gradient porous thermoplastic polyurethane/graphene composites for highly sensitive wide-range pressure sensing properties[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 68-74.

process, low cost, and no requirement for complex equipment such as freeze drying or additive manufacturing, providing a reference for the large-scale preparation of wide-range flexible pressure-sensing materials.

Keywords: Gradient porous structure; Graphene; TPU; Salt-templating method; Pressure sensing; Wide range

柔性压力传感器能够将机械刺激转化为电信号，在可穿戴健康监测、电子皮肤与人机交互领域发挥核心作用[1-3]。器件须对脉搏、呼吸等微弱信号与手指按压、足底负重等大负载保持高灵敏、宽量程与线性响应[4-6]。如何兼顾低压高灵敏与高压宽量程，是柔性压力传感器领域亟待解决的关键问题。向多孔聚合物基体中引入导电组分是提升灵敏度(S)的普遍策略[7-9]。多孔结构模量低，受压时孔壁靠近使导电通路激增，低压区S升高[10-12]。但在低应变下，均匀多孔的结构孔隙被压实，使导电网络饱和[13-15]，宏观表现为逾阈后S骤降，高压段非线性甚至饱和，高灵敏常以牺牲量程为代价[16-18]，这归因于多孔结构塌缩集中、缺乏层次。构筑模量和孔隙梯度是拓宽传感器量程的有效策略[19-21]。不同刚度梯度依次形变，使集中塌缩区域沿压力轴展开，从而有效抑制高压区S饱和现象[22-24]。然而，目前已报道的梯度结构主要通过冷冻干燥、微加工或增材制造等途径构建[25-27]，存在设备昂贵及难以实现连续一体化梯度等限制[28-29]。而可溶性盐牺牲模板的浇铸-脱除法工艺简单，成本低廉，孔径由盐粒径调控[30-31]，与分层浇铸结合可实现孔径沿厚度梯度分布。

本研究采用热塑性聚氨酯(TPU)为基体、石墨烯纳米片(GNP)为导电填料、氯化钠(NaCl)颗粒为牺牲模板，经不同粒径盐分层浇铸与脱盐，沿厚度构筑“大孔-中孔-小孔”的孔径与模量梯度，制得梯度多孔复合材料(TPU-G)，为低成本、规模化制备传感材料提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

聚醚型TPU，1185A，德国巴斯夫股份公司；GNP，片径5~10 μm，层数<10)，SE1132，常州第六元素材料科技股份有限公司；NaCl，分析纯，西陇科学股份有限公司；N,N-二甲基甲酰胺(DMF)，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；导电银浆，DAD-87，上海合成树脂研究所；无水乙醇，分析纯，江苏强盛功能化学股份有限公司；去离子水，自制。

1.2 仪器与设备

场发射扫描电子显微镜(SEM)，Regulus 8100，日本日立高新技术公司；显微共聚焦拉曼光谱仪(Raman)，LabRAM HR Evolution，法国HORIBA公司；电子万能材料试验机，UTM4104，深圳三思纵横科技股份有限公司；数字源表，2450，美国吉时利仪器公司；动态信号采集仪，DH5902N，江苏东华测试技术股份有限公司；程控伺服压力加载台，ZQ-990B，东莞智取精密仪器有限公司；电子分析天平，ME204，瑞士梅特勒-托利多公司；真空干燥箱，DZF-6050，上海一恒科学仪器有限公司；数控超声波清洗器，KQ-500DE，昆山市超声仪器有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 制备流程

梯度多孔材料的制备核心在于以过筛分档的NaCl颗粒作为尺寸可控的牺牲模板，通过分层浇铸将不同粒径的盐-浆混合物自下而上依次铺展，借助层间半干续浇实现各层的牢固黏接而不相互渗混。待溶剂脱除、盐颗粒经水浸洗出后，其占据的空间即转化为孔隙，从而在单一试样内沿厚度方向复制出大孔-中孔-小孔的孔径梯度。图1为梯度多孔TPU/GNP的制备流程。

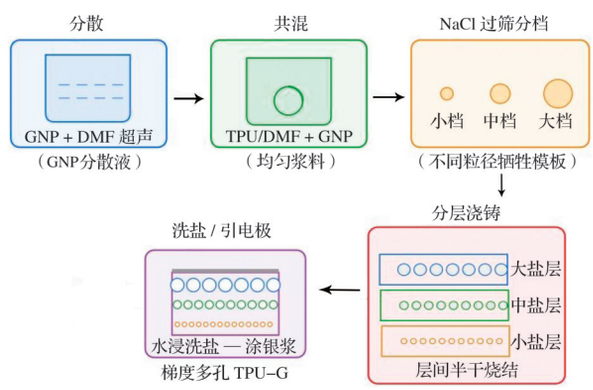


图1 梯度多孔TPU/GNP的制备流程

Fig.1 Fabrication process of gradient porous TPU/GNP

1.3.2 TPU/GNP浆料的配制

导电填料用量经预实验确定。将GNP与TPU共混，GNP占TPU的质量分数为1%~15%，不加NaCl模板，浇铸成致密复合薄膜，测定其体积电导率以考察逾渗行为，综合导电网络连通性与孔壁力学完整性选定GNP质量分数为8%的TPU/GNP浆料。按照GNP与TPU质量比为8∶100称取GNP，加入适量DMF中，冰浴下超声分散1 h，制得均匀的GNP/DMF分散液。另将TPU颗粒按质量分数为15%溶于DMF中，在60 ℃下磁力搅拌3 h至完全溶解，制得TPU/DMF溶液。将GNP/DMF分散液缓慢倒入TPU/DMF溶液中，继续搅拌2 h，超声30 min，得到分散均匀、黏度适中的TPU/GNP浆料。

1.3.3 NaCl模板的过筛分档

将NaCl研磨后经标准分样筛依次筛分。粒径300~450 μm为大档，粒径100~200 μm为中档，粒径小于50 μm为小档。80 ℃烘干备用。

1.3.4 分层浇铸与脱盐

采用自下而上的分层浇铸法构筑厚度方向梯度。将大档NaCl与TPU/GNP浆料按体积比为4∶1充分拌匀，浇入聚四氟乙烯模具中，刮平，在40 ℃条件下静置至表面半干，指压不粘，内部仍具流动性。依次浇筑中档、小档NaCl与浆料的混合物，每层均在前一层半干后续浇，以保证层

间良好黏结又不致相互渗混。三层浇筑完毕后，将试样在60 ℃条件下真空干燥12 h，以脱除DMF；再置于50 ℃去离子水中浸泡洗涤，每6 h换水一次，反复浸洗48 h，至洗出液经硝酸银检测无白色沉淀，确认NaCl完全脱除。在60 ℃条件下真空干燥12 h，得到沿厚度呈大孔-中孔-小孔梯度的一体化多孔复合材料，命名为TPU-G。

1.3.5 对照试样的制备

为厘清梯度结构的作用，制备大、中、小档NaCl的均匀多孔的对照试样，分别命名为TPU-L、TPU-M和TPU-S；制备不加NaCl的致密无孔试样，命名为致密TPU。各对照试样的浆料组成、盐-浆体积比、干燥与后处理条件均与TPU-G保持一致，仅孔结构不同，以实现“梯度/均匀”的单变量对比。图2为均匀多孔与致密对照试样的孔结构。所有试样均裁切为10 mm×10 mm×3 mm的试样，上下表面涂覆导电银浆并引出铜电极，构成三明治式压阻传感单元。

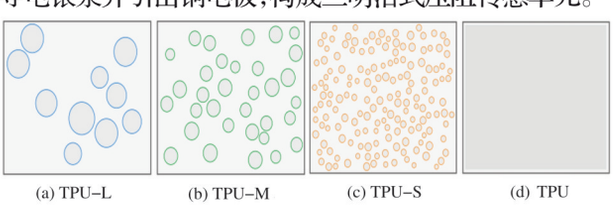


图2 均匀多孔与致密对照试样的孔结构

Fig.2 Pore structures of uniform porous and dense reference samples

1.4 性能测试与表征

形貌与孔结构表征：将试样经液氮脆断获得截面，喷金后用场发射扫描电子显微镜观察沿厚度方向的孔形貌与孔壁上GNP的分布，加速电压为5 kV。基于SEM截面照片，采用ImageJ软件对各层随机选取的不少于100个孔进行统计，得到各层孔径分布与平均孔径。

孔隙率测定：采用密度法测定各层孔隙率。分别测量多孔试样的表观体积与质量，得到表观密度(ρ_p)，按相同方法测得致密基体密度(ρ_s)，测量5个平行试样，取平均值。孔隙率(φ)的计算公式为：

$$\varphi=\left(1-\frac{\rho_p}{\rho_s}\right)\times 100\% \tag{1}$$

式(1)中：φ为孔隙率，%；ρ_p为多孔试样的表观密度，g/cm^3；ρ_s为致密基体的密度，g/cm^3。

拉曼光谱测试：采用532 nm激光激发，扫描范围为1 000~3 000 cm^{-1}。

电导率(σ)测试：采用四探针法结合数字源表测量不同GNP质量分数(1%~15%)复合材料的σ，用于确定导电填料的逾渗阈值与最优用量。

压缩力学性能测试：按照GB/T 1041—2008测试压缩力学性能，采用电子万能材料试验机在室温下对试样进行准静态压缩，压缩速率为2 mm/min，记录压缩应力-应变曲线。

压阻传感性能测试：将传感单元置于程控压力加载台，由数字源表在恒定偏压下实时采集电流，得到相对电流($\Delta I/I_0$)随压力(P)的变化关系。S定义为$S=\delta(\Delta I/I_0)/\delta P$。对各压力区段分别进行线性拟合，以评价线性度($R^2$)。同时测试器件的最低检测限、响应/恢复时间、加载-卸载迟滞以及5 000次循环加载下的稳定性。其中，响应时间定义为加载后归一化响应信号由稳态变化量的10%上升至90%所需的时间，恢复时间定义为卸载后响应信号由90%下降至10%所需的时间。对比梯度试样软层朝向载荷(软层朝上)与背向载荷(软层朝下)两种受压取向下的传感响应。

应用：将传感单元贴附于人体不同部位，监测腕部脉搏、平静呼吸、手指分级按压与行走足底压力等生理与运动信号。将16个传感单元组成4×4阵列，对置于其上的物体进行压力分布空间成像。

2 结果与讨论

2.1 TPU-G的SEM分析

图3为TPU-G断面的SEM照片。从图3a可以看出，整体截面显示试样沿厚度呈连续而清晰的孔径过渡。上部为孔径大且薄的大孔层，中部为孔径居中的中孔层，下部为孔径小且密的小孔层，3层衔接紧密，无明显分层缝隙，表明分层浇铸-半干续浇工艺成功实现了梯度结构的一体化成型。放大各层，从图3b~图3d可以看出，3层孔壁并非光滑致密，而是均匀镶嵌并搭接着片状GNP，形成贯穿孔壁的导电网络。受压时，相邻孔壁彼此靠拢，GNP片层接触增多，导电通路增加，宏观电阻下降。各层孔径按照模板粒径变化依次减小，验证了盐粒径直接调控孔径的可控性。

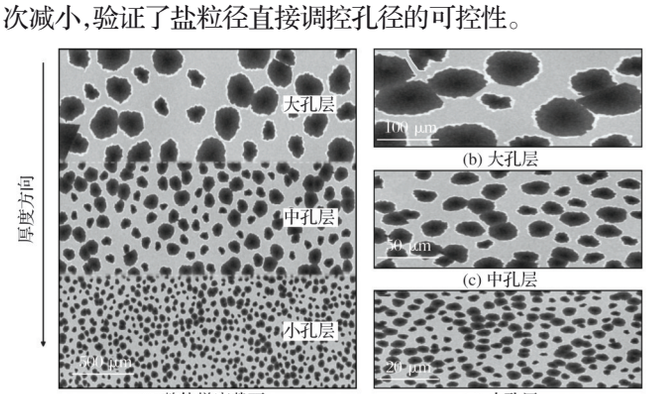


图3 TPU-G断面的SEM照片

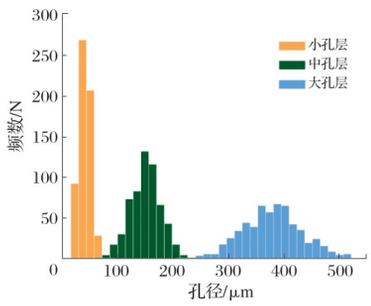
Fig.3 SEM images of cross-section of TPU-G

图4为TPU-G各层的孔径分布、孔隙率和平均孔径。从图4a可以看出，3层孔径分布相互分离，几乎无重叠，大、中、小孔层的平均孔径分别为382、151、41 μm，孔径跨度达一个数量级。从图4b可以看出，随着孔径的减小，各层孔隙率由大孔层的78%逐层降至小孔层的56%。孔径与孔隙率的双重梯度意味着各层有效模量依次升高，为“软层先塌缩、硬层后塌缩”的分级压缩奠定结构基础。

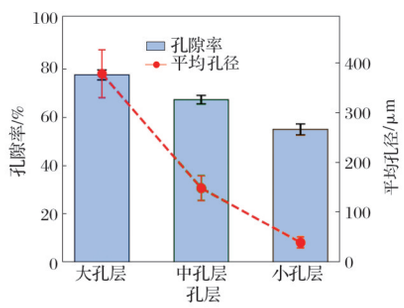
2.2 GNP与TPU-G的结构与导电网络分析

图5为GNP与TPU-G的拉曼光谱。从图5可以看出，GNP和TPU-G均在1 348、1 580、2 695 cm^{-1}处出现石墨类碳材料的特征峰，分别对应缺陷诱导的D峰、面内sp^{2}键伸缩的G峰以及二阶2D峰。GNP与TPU复合后各峰位置基本不变，表明GNP在与TPU共混及溶剂脱除过程中结构未明显

破坏，仍保持良好的石墨化程度，可在孔壁内提供高效电子传输通道。



(a) 孔径分布



(b) 孔隙率及平均孔径

图4 TPU-G各层的孔径分布、孔隙率和平均孔径

Fig.4 Pore size distribution, porosity and average pore diameter of each layer in TPU-G

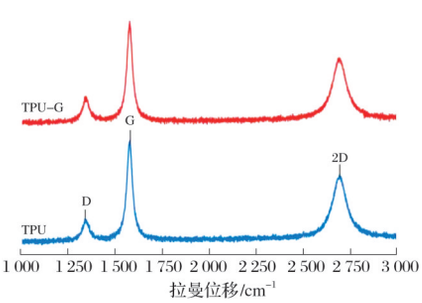


图5 GNP与TPU-G的拉曼光谱

Fig.5 Raman spectra of GNP and TPU-G

导电填料的含量决定孔壁导电网络的连通性，因此需要在S与信号强度之间取得平衡。图6为TPU-G的σ随GNP质量分数的变化曲线。内插图为逾渗区的双对数拟合。从图6可以看出，当GNP质量分数由3%增至4%时，复合材料的σ显著增加，表明导电网络开始快速连通。采用式(2)对逾渗区数据进行双对数拟合，得到逾渗阈值(w_c)约为2.6%、临界指数(t)约为2.0 (R^2=0.97)。

$$\sigma=\sigma_0(w-w_c)^t \tag{2}$$

因此，2.6%为模型拟合所得的w_c，而非直接由σ曲线的突跃位置读取。t接近三维逾渗网络的理论值，说明GNP在基体中构筑了较为均匀的三维导电通路。综合导电网络稳定性与孔壁力学完整性，将GNP质量分数固定为8% (远高于逾渗阈值，位于σ平台起始段)，并在全部试样中保持不变，从而将“梯度/均匀”的差异归因于孔结构本身。

2.3 TPU-G的压缩力学行为与分级压缩分析

图7为TPU-G与对照试样的压缩应力-应变曲线。从图7可以看出，3种对照试样的压缩应力-应变曲线均呈多孔材料典型的线弹性、塌缩平台及致密化3个阶段。TPU-L模量最低，最早进入致密化阶段；TPU-S模量最高，进入致密化阶段最晚。随着孔径的减小及孔隙率的降低，对照试样3条曲线均整体上移，模量升高，致密化拐点延后。3种对照试样塌缩平台阶段均较短，向致密化阶段过渡尖锐，意味着孔隙塌缩集中于狭窄应变阶段。TPU-G的压缩应力-应变曲线更平缓且呈多段渐进过渡。软质大孔层优先塌缩，低应变段斜率最小；中孔层、小孔层相继承载并塌缩，斜率逐级增大；塌缩过程沿应变轴被显著拉长。这种分段、逐级渐进的力学响应正是梯度模量结构的典型特征，从力学层面保障了传感器在宽压力区间内持续、稳定的电学输出。

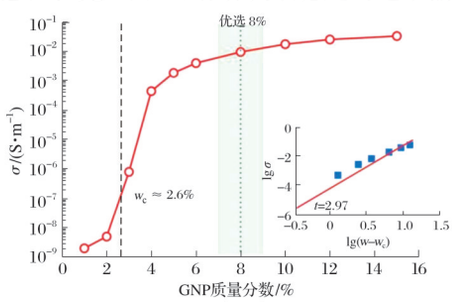


图6 TPU-G的σ随GNP质量分数的变化曲线

Fig.6 Variation curve of σ of TPU-G with GNP mass fraction

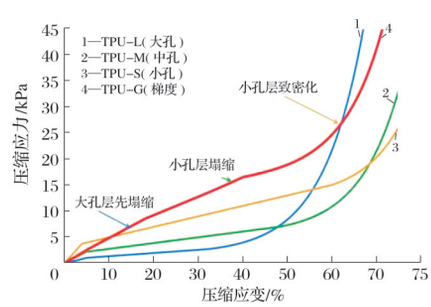


图7 TPU-G与对照试样的压缩应力-应变曲线

Fig.7 Compression stress-strain curves of TPU-G and control samples

图8为梯度多孔结构的分级压缩与分段电学响应机制，即“模量梯度→顺序机械响应→分段电学响应”。在受压时，均匀多孔结构全部孔隙在相近应力下几乎同时塌缩，导电网络在低压区急剧重构，故低压S高；进入致密化阶段，孔壁接触趋于饱和，电阻不再随压力变化，S急剧下降，信号饱和。这一现象从根本上揭示了均匀多孔结构“灵敏但量程窄”的内在矛盾。3层梯度结构利用层间模量差异，实现了宽压力范围内的分段响应。低压区软质大孔层优先塌缩，电阻陡降，赋予高S；中压区大孔层趋于压实，中孔层主导塌缩，维持中压段响应；高压区硬质小孔层致密化，支撑高压段的持续响应。3层结构分别针对不同压力窗口进行优化，如同3个“子传感器”串联于同一器件中。塌缩行为沿压力轴逐次展开，导电网络分段接力重构，电阻全程持续响应，从而避免单一尖锐的饱和拐点，拓宽量程。同时，各段响应曲线近似线性响应，实现宽压力区间内高S与高线性度的同步获取。

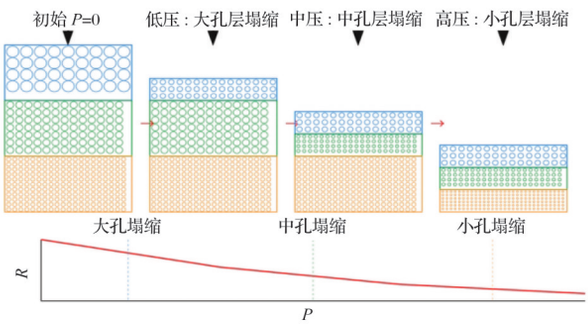


图 8　梯度多孔结构的分级压缩与分段电学响应机制

Fig.8 Hierarchical compression and segmented electrical response mechanism of gradient porous structures

2.4　TPU-G的压力传感性能与宽量程机制验证

图9为TPU-G与对照试样的$\Delta I/I_0$-P响应曲线。从图9可以看出，TPU-L在低压段响应陡峭但很快饱和；TPU-M的灵敏区间上移至中压段；TPU-S则在高压段才显现明显响应；任一单一对照试样均无法在全压力范围内保持灵敏。而TPU-G恰好将三者的高灵敏段“接力拼接”为一条连续、跨越低-中-高压的宽响应带。在对照试样饱和处，梯度试样凭借下一层的接力塌缩继续保持响应。图9直观印证图8的机制，即梯度结构以“分段接力”方式突破了单一均匀结构S与量程不可兼得的瓶颈。

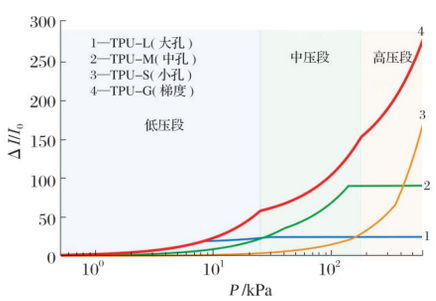


图 9　TPU-G与对照试样的$\Delta I/I_0$-P响应曲线

Fig.9 $\Delta I/I_0$-P response curves of TPU-G and control samples

图10为TPU-G压力响应曲线的分段线性拟合。从图10可以看出，响应可清晰划分为3个近似线性区段。低压段(0~20 kPa)灵敏度(S_1)为2.28 kPa^{-1}，中压段(20~150 kPa)灵敏度(S_2)为0.61 kPa^{-1}，高压段(150~500 kPa)灵敏度(S_3)为0.30 kPa^{-1}；三段R^2均大于0.99。S随压力分级递减，但各段保持良好的线性关系，说明梯度结构在拓宽量程的同时能够有效抑制高压段的非线性与饱和。表1为各试样的关键压力传感性能参数。从表1可以看出，TPU-G凭借一体化梯度结构将量程拓展至0~500 kPa，最低检测限低至约2 Pa，分段线性度显著提升，综合性能均衡。

2.5　受压取向对TPU-G传感性能的影响

对比TPU-G在软层(大孔层)朝向载荷(软层朝上)与背向载荷(软层朝下)两种受压取向下的响应，图11为不同受压取向下TPU-G的压力响应曲线。从图11可以看出，软层朝上时，低压区大孔层直接受压优先塌缩，器件在低压段即表现出陡峭响应与高灵敏；软层朝下时，载荷作用于硬质小孔层，低压区形变量小，导电网络变化有限，故低压S明显偏低，直至高压区，应力传递至软层后响应才逐渐增强。这一取向依赖性印证了各层依模量高低沿受力方向依次塌缩的分级压缩机制，也表明可通过调整梯度朝向剪裁器件在不同压力窗口的S分配，即面向低压高分辨应用时宜使软层迎向载荷，面向高压承载应用时可反向布置。孔径跨度、层数与孔隙率梯度陡度等参数亦可据此设计。研究为面向特定量程需求的梯度传感材料提供可调的结构自由度。

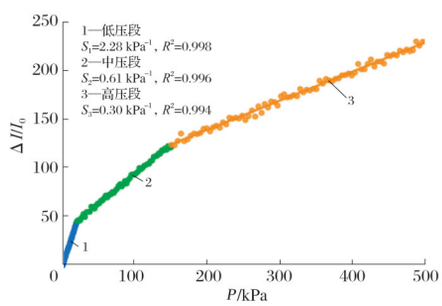


图 10　TPU-G压力响应曲线的分段线性拟合

Fig.10 Piecewise linear fitting of pressure response curve of TPU-G

表 1　各试样的关键压力传感性能参数

Tab.1 Key pressure sensing property parameters of each sample

试样	工作量程/kPa	低压S/kPa^{-1}	R^2	最低检测限/Pa
TPU-L	0~30	2.41	0.94	5
TPU-M	20~140	0.88	0.96	20
TPU-S	150~500	0.42	0.97	150
TPU-G	0~500	2.28	0.99	2

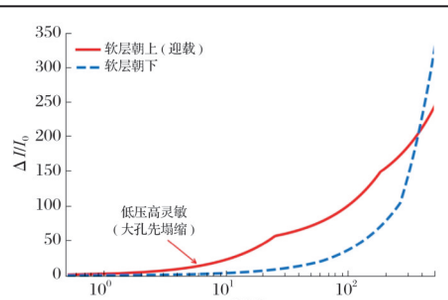


图 11　不同受压取向下TPU-G的压力响应曲线

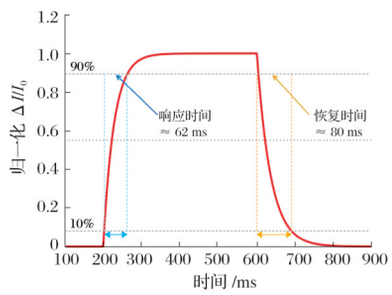
Fig.11 Pressure response curves of TPU-G under different compression loading conditions

2.6　TPU-G的动态响应分析

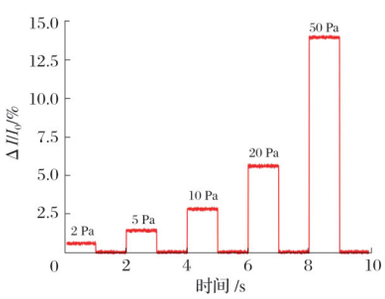
图12为TPU-G的响应/恢复时间与最低检测限。从图12a可以看出，以归一化响应信号的10%和90%作为时间判定阈值。阶跃加载后，信号由10%上升至90%所需时间约为62 ms；卸载后，信号由90%下降至10%所需时间约为80 ms，分别定义为器件的响应时间和恢复时间。结果表明，梯度多孔结构在快速加载条件下仍具有较好的形变跟随与回弹性能。从图12b可以看出，施加2~50 Pa的微小压力时，器件即产生清晰可分辨的阶梯状响应，最低检测限为2 Pa，可满足脉搏、呼吸等微弱信号的探测需求。

图13为TPU-G的加载-卸载迟滞与循环稳定性。从图13a可以看出，加载与卸载曲线基本重合，包络面积较

小，迟滞约为4.7%。孔壁弹性恢复良好，能量耗散低。这归因于TPU基体的高弹性回复与孔壁GNP网络的可逆搭接。从图13b可以看出，器件在恒定压力下连续5 000次循环加载的响应幅值波动很小，循环后保持率≥95%(内插图为局部放大的规整方波信号)。TPU-G具备良好的循环稳定性与耐久性，可满足长期、重复使用的工况要求。



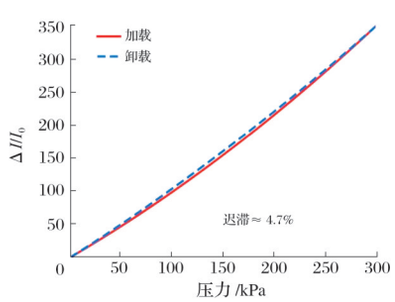
(a) 响应/恢复时间



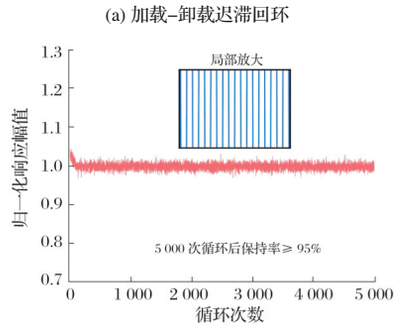
(b) 最低检测限

图12 TPU-G的响应/恢复时间与最低检测限

Fig.12 Response/recovery time and lowest limit of detection of TPU-G



(a) 加载–卸载迟滞回环



(b) 循环稳定性

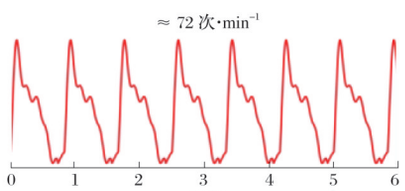
图13 TPU-G的加载-卸载迟滞与循环稳定性

Fig.13 Loading-unloading hysteresis and cycling stability of TPU-G

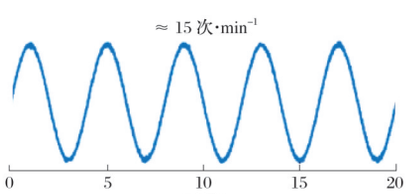
2.7 TPU-G在人体监测与压力分布成像中的应用效果

图14为TPU-G的应用效果。从图14a~图14d可以看出，低压区将器件贴于腕部与胸腹，可清晰记录含明显重搏特征的脉搏波形与平静呼吸的周期性起伏，波形规整，基线稳定。中压区器件能分辨手指由轻到重的分级按压，响应幅值随按压力度呈阶梯递增；高压区贴于鞋垫的器件可实时捕捉行走过程中足底压力的周期性双峰特征。从低压到高压的连续覆盖，正是梯度结构宽量程优势的直接体现。得益于宽量程与高灵敏的统一，TPU-G可在同一器件上覆盖从微弱生理信号到大负载运动信号的多层次探测。

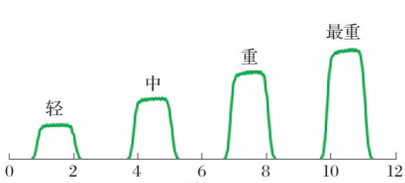
进一步将16个传感单元集成为4×4阵列，对置于其上的物体进行压力分布空间成像。从图14e和图14f可以看出，阵列可准确重构出物体的接触轮廓与压力强度分布，二维热图与三维映射均清晰可辨，与物体形状高度吻合。结果表明，TPU-G不仅可用于单点动态监测，还可扩展为面向电子皮肤与智能坐垫等场景的空间压力成像器件。



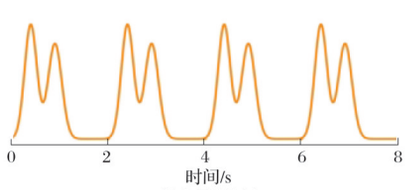
(a) 脉搏



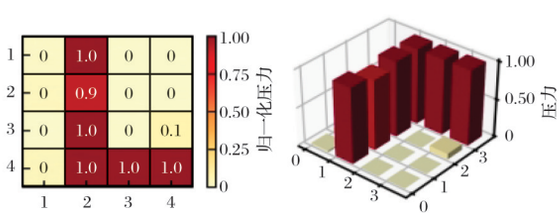
(b) 呼吸



(c) 手指分级按压



(d) 行走足底压力



(e) 4×4阵列压力成像　(f) 压力分布三维映射

图14 TPU-G的应用效果

Fig.14 Application effect of TPU-G

3 结论

本研究以TPU为基体、GNP为导电填料、NaCl颗粒为牺牲模板，通过分层浇铸与溶剂/盐相继脱除，制得TPU-G。该模板分层浇铸法不需要冷冻干燥或增材制造等复杂工序，原料易得，工艺简单，可一步获得经由大、中、小孔层连续过渡，层间紧密结合的梯度骨架，便于规模化制备。TPU-G在受压时梯度结构呈明显分级塌缩。软质大孔层在低压段优先塌缩，中孔层在中压段接力，刚性小孔层在高压段最后致密化，使导电网络沿压力轴分段重构。这一机制将均匀多孔材料在单一压力区间内的骤变响应转换为覆盖宽压力范围的多段连续响应，从结构层面破解多孔压阻材料“难以兼备高灵敏与宽量程”的矛盾。

TPU-G在0~500 kPa宽量程内保持连续、分段线性的电学响应，S_1达2.28 kPa^{-1}，S_2和S_3分别为0.61 kPa^{-1}和0.30 kPa^{-1}，各段R^2均大于0.99；响应时间和恢复时间分别为62 ms和80 ms，迟滞4.7%；5 000次循环后保持率超95%，最低检测限为2 Pa。该材料的柔性传感器在脉搏、呼吸、手指按压与足底压力监测中均能够输出清晰信号，可用于4×4阵列压力分布成像。盐模板梯度构筑为宽量程柔性压力传感材料的低成本、规模化制备提供了可行途径，后续可进一步优化梯度层数与粒径配比，以期拓展量程上限，提升长期服役可靠性。

参考文献

[1] 王平, 郑金直, 吴文俊, 等. 宽频域柔性压阻式压力传感器制备及振动声学测试应用[J]. 复合材料学报, 2025, 42(12): 7005-7014.
[2] 黄梁松, 王硕, 张鹏, 等. 基于双面多级微结构的柔性电容式压力传感器[J]. 传感技术学报, 2024, 37(10): 14-18.
[3] 赵航, 袁霖, 吴松松, 等. 基于石墨烯@石蜡复合微球的柔性压阻适变传感器[J]. 复合材料学报, 2025, 42(8): 4450-4458.
[4] 姚建涛, 于显河, 高炜骅, 等. 周向负泊松比约束下的并联柔性复合压力传感器[J]. 机械工程学报, 2025, 61(21): 129-142.
[5] 刘佳豪, 阚皞. 互锁结构离电式柔性压力传感器的制备及应用[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2026, 40(1): 83-91.
[6] 马文俊, 张洁, 李长江, 等. 利用空气层结构和碳纳米管修饰实现复合柔性压力传感器超宽检测范围[J]. 复合材料学报, 2024, 41(11): 6003-6013.
[7] 赵雨健, 孙萍, 缪璐蔚, 等. 宽线性柔性压阻式压力传感器的研究进展[J]. 复合材料学报, 2025, 42(8): 4283-4297.
[8] 杨宇轩, 王共冬, 邹爱丽, 等. 基于PDMS改性的具有梯度多孔结构的柔性压阻式压力传感器[J]. 复合材料学报, 2026, 43(2): 877-887.
[9] 张悦, 晏政江, 张昊, 等. 基于MXene/PEDOT：PSS复合材料多孔结构的柔性压阻式压力传感器制备[J]. 测试技术学报, 2026, 40(2): 213-220.
[10] 袁霖, 黄承毅, 黄培, 等. 基于多孔碳纳米管-羰基铁粉/硅橡胶复合材料的柔性压容传感器[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4740-4751.
[11] 陈续峰, 张宇, 秦亚飞, 等. 基于炭黑-钛酸钡/聚氨酯的柔性电容式压力传感器[J]. 复合材料学报, 2024, 41(11): 6055-6064.
[12] 张明康, 师文庆, 徐梅珍, 等. 隐式曲面多孔结构压缩性能与流体压降性能研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(18): 394-406.
[13] 赵苑, 尚琼, 刘现玉, 等. 离子导电凝胶在柔性压力与应变传感器中的应用及研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(9): 58-69.
[14] 高雅, 许高斌, 朱晓萌, 等. 小量程高灵敏度压阻式表压压力传感器的设计[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(11): 947-953.
[15] 冀彦秀, 宋振兴, 韦会鸽, 等. 聚丙烯酰胺基复合导电水凝胶在柔性压阻传感器领域中的应用[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(10): 53-58.
[16] ZHENG W K, LI Y H, TIAN C K, et al. Gradient macro-micro structured PEDOT：PSS/cotton fiber flexible piezoresistive sensor for wide-range high-frequency pressure sensing[J]. Polymer Composites, 2026, 47(2): 1707-1717.
[17] DUAN Y, AN H, WANG W G, et al. Intrinsic piezoresistive mechanism of conductive porous nano-composites with linearity assumption: Theoretical and experimental analyses[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2026, 14(20): 8560-8574.
[18] 杨泊苇, 毕志辉, 孙权, 等. 基于基底弹性模量梯度设计的灵敏度可调柔性应变传感器研究[J/OL]. 复合材料学报, 1-10 [2026-02-04]. https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251127.009.
[19] 张广明, 张栋梁, 侯宏瑞, 等. 基于高分辨率牺牲模具的透气传感器制备及应用[J]. 复合材料学报, 2026 ,43(7): 4248-4261
[20] HUANG J W, XU Z X, ZHANG J, et al. Recent advances in porous polymer-based flexible piezoresistive pressure sensors[J]. Polymers, 2025, 17(19): 2584.
[21] ZHAO Y B, ZHOU J Y, JIANG C K, et al. Highly sensitive and flexible capacitive pressure sensors combined with porous structure and hole array using sacrificial templates and laser ablation[J]. Polymers, 2024, 16(16): 2369.
[22] LI L X, DENG J Q, KONG P, et al. Highly sensitive porous PDMS-based piezoresistive sensors prepared by assembling CNTs in HIPE template[J]. Composites Science and Technology, 2024, 248: 110459.
[23] ZHANG J P, WEI S, LIU C C, et al. Porous nanocomposites with enhanced intrinsic piezoresistive sensitivity for bioinspired multimodal tactile sensors[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2024, 10: 19.
[24] YANG X L, HE F R, QIAO H H, et al. A breathable, highly sensitive, and wearable piezoresistive sensor with a wide detection range based on gradient porous PU@MXene/CNT film for electronic skin[J]. Polymers, 2025, 17(11): 1530.
[25] 苏和平, 王晨雪, 朱阳阳, 等. 石墨烯压力传感器在可穿戴电子器件中的研究进展[J]. 液晶与显示, 2023, 38(8): 1062-1074.
[26] MAJI A, KUILA C, MURMU N C, et al. Interface-engineered hybrid networks to resolve the trade-off between sensitivity and detection range in flexible strain sensors[J]. IEEE Sensors Letters, 2026, 10(1): 2500204.
[27] CHUN B, UNIVERSITY H, PARK J, et al. Polypyrrole/polydimethylsiloxane sponge-based flexible pressure sensors with enhanced sensitivity and a wide detection range using programmable gradient pore density[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2025, 7 (13): 6002-6014.
[28] LEI M, ZHOU B P. Cactus-inspired dual-sided micro-cilia arrays with swelling-induced CNT networks for high-performance wearable pressure sensing[J]. Nanoscale, 2025, 17(42): 24726-24741.
[29] XIA H, WANG L, ZHANG H, et al. MXene/PPy@PDMS sponge-based flexible pressure sensor for human posture recognition with the assistance of a convolutional neural network in deep learning[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2023, 9: 155.
[30] SIDHU J S, MISRA A, BHARDWAJ A. Development of flexible piezoresistive pressure sensors via direct ink writing of MWCNT/PDMS nanocomposite inks: Rheological and electromechanical characterization[J]. Nanoscale Advances, 2025, 7(21): 6941-6953.
[31] ZHANG Q F, LI Y, WANG X Y, et al. Flexible piezoresistive sensor with high stability based on GO@PDMS-PU porous structure[J]. Symmetry, 2025, 17(5): 773.