注塑保压参数对导电塑料压力传感器电学稳定性的影响

雷 铭[1],郭公社[1],曹 婷[2]

(1.周口理工职业学院,河南 周口 466000;2.南阳理工学院,河南 南阳 473000)

摘 要:采用注塑成型工艺制备热塑性聚氨酯/炭黑(TPU/CB)导电复合材料压力传感器,系统研究保压压力、保压时间和保压速度等注塑保压参数对传感器电学稳定性的影响规律。通过电阻测试、压力-电阻响应测试、循环加载测试和温度稳定性测试等手段表征不同保压参数下传感器的电学性能和稳定性。结果表明:当保压压力在60~80 MPa范围内时,传感器的初始电阻最低且稳定性最佳。当保压时间为12~15 s时,导电网络形成最为完善,电学性能最优。适当的保压速度(40~50 mm/s)有利于导电粒子的均匀分散和导电网络的稳定形成。在优化后的保压参数条件下(保压压力70 MPa、保压时间13 s、保压速度45 mm/s),制备的压力传感器表现出优异的电学稳定性,在0~5 MPa的压力范围内灵敏度达到0.083 MPa^{-1},循环1 000次后电阻漂移率小于3.5%,在-20~80 ℃温度范围内电阻温度系数小于0.15%/℃。研究结果表明,合理控制注塑保压参数是获得高稳定性导电塑料压力传感器的关键。

关键词:导电塑料;压力传感器;注塑成型;保压参数;电学稳定性

中图分类号:TP212;TB33 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0150-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.026

Effect of Injection Molding Holding Pressure Parameters on Electrical Stability of Conductive Plastic Pressure Sensors

LEI Ming[1], GUO Gongshe[1], CAO Ting[2]

(1. Zhoukou Polytechnic Vocational College, Zhoukou 466000, China;
2. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, China)

Abstract: Thermoplastic polyurethane/carbon black (TPU/CB) conductive composite pressure sensors were fabricated via injection molding, and the effects of packing parameters (packing pressure, packing time, and packing speed) on the electrical stability of the sensors were systematically investigated. The electrical performance and stability of the sensors under different packing parameters were characterized through resistance measurements, pressure-resistance response tests, cyclic loading tests, and temperature stability tests. The results showed that when the packing pressure was in the range of 60~80 MPa, the sensors exhibited the lowest initial resistance and the best stability. When the packing time was 12~15 s, the conductive network was most effectively formed, resulting in optimal electrical performance. An appropriate packing speed (40~50 mm/s) facilitated the uniform dispersion of conductive particles and the stable formation of the conductive network. Under the optimized packing parameters (packing pressure of 70 MPa, packing time of 13 s, and packing speed of 45 mm/s), the fabricated pressure sensors demonstrated excellent electrical stability, with a sensitivity of 0.083 MPa^{-1} in the pressure range of 0~5 MPa, a resistance drift of less than 3.5% after 1 000 loading cycles, and a temperature coefficient of resistance of less than 0.15%/℃ over the temperature range of -20 ℃ to 80 ℃. The findings indicated that proper control of injection molding packing parameters was crucial for achieving high-stability conductive plastic pressure sensors.

Keywords: Conductive plastic; Pressure sensor; Injection molding; Holding pressure parameters; Electrical stability

收稿日期Submitted date 2025-11-18;修回日期Revised date 2025-12-10;录用日期Accepted date 2026-01-13

基金项目:河南省科技攻关项目(242102220020);河南省高等学校重点科研项目(24B470003)

联系人,421800715@qq.com

引用本文:雷铭,郭公社,曹婷.注塑保压参数对导电塑料压力传感器电学稳定性的影响[J].塑料科技,2026,54(8):150-155.

Citation: LEI M, GUO G S, CAO T. Effect of injection molding holding pressure parameters on electrical stability of conductive plastic pressure sensors[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 150-155.

导电塑料压力传感器作为一类新型柔性传感元件，凭借轻质、低成本、易加工及优异柔韧性等特点，在智能穿戴、人机交互、健康监测与机器人触觉领域展现出广阔的应用前景[1-3]。导电塑料通常以高分子聚合物为基体，通过掺入炭黑(CB)、碳纳米管(CNT)或石墨烯等导电填料复合而成。填料在基体内相互搭接形成连续导电网络，使材料获得导电特性[4-6]。当受到外部压力时，导电网络结构发生变化，导致电阻发生改变，从而实现压力信号向电信号的转换[7-12]。

注塑成型作为塑料制品的核心加工工艺，具有高效率、优异的产品一致性及易于自动化等特点，是制备导电塑料压力传感器的理想选择[13-14]。然而，注塑成型工艺参数，尤其是保压阶段的参数，对制品性能具有决定性影响[15]。保压过程在注射填充后进行，通过对型腔内熔体持续施压补偿收缩，确保制品密实与尺寸稳定。保压参数不仅决定制品的宏观外观与尺寸精度，还能够调控熔体流动与压缩行为，直接影响导电填料的分散状态及导电网络质量，从而最终决定传感器的电学性能与长期稳定性[16-17]。

目前，关于导电塑料压力传感器的研究主要集中在材料配方优化、导电填料类型选择及复合改性等方面。KURNAZ等[18]探讨了热塑性聚氨酯(TPU)与活性炭(AC)复合材料的电学特性，系统阐明了填料含量对导电行为与力学性能的调控机制。ALI等[19]采用丝网印刷技术制备不同多壁碳纳米管(MWCNT)质量分数(2%、4%、7%)的传感层，系统分析其电学、力学及电阻响应特性，验证填料含量调控灵敏度的可行性，为高性能柔性压力传感器的工业化制备提供参考。LI等[20]引入微胶囊自愈合剂，使石墨烯/聚二甲基硅氧烷(PDMS)传感器在微裂纹处能自动愈合，保持原始电学性能，为柔性传感器的长寿命应用提供新思路。CHUNG等[21]采用太赫兹时域光谱系统研究MWCNT/高密度聚乙烯(HDPE)纳米复合材料在太赫兹波段的电学和光学特性，为太赫兹电子器件材料设计提供实验依据。近年来，部分研究开始关注加工工艺对导电塑料性能的影响。BHATT等[22]证实了混炼工艺的关键作用，发现内部混炼机能够高效分散CB颗粒，形成更致密的导电网络，从而显著降低天然橡胶复合材料的电阻率。然而，针对注塑成型工艺参数，特别是保压参数对导电塑料压力传感器电学稳定性影响的系统研究仍较缺乏。

电学稳定性是评价压力传感器性能的重要指标，主要包括初始电阻稳定性、压力-电阻响应重复性、长期循环稳定性及温度稳定性等[23-25]。传感器不仅需要高灵敏度和宽检测范围，更需要在长期使用中保持稳定可靠的性能。保压参数能够影响导电填料的分布状态、导电通路的连续性及聚合物基体的结晶度等微观结构，从而对传感器电学稳定性产生重要影响。保压压力过低会导致制品收缩严重，使导电网络不完整；过高则可能破坏已形成的导电网络，并增加残余应力。保压时间不足会使导电网络固化不充分，影响稳定性；过长则会延长生产周期，降低效率。保压速度也会影响导电填料的重新分布和导电网络的最终结构。

本研究以TPU/CB导电复合材料为研究对象，采用注塑成型工艺制备压力传感器，系统研究保压压力、保压时间和保压速度对传感器电学稳定性的影响规律，旨在获得具有优异电学稳定性的导电塑料压力传感器，为导电塑料压力传感器的工业化生产提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

TPU，1185A，邵A硬度85，熔体流动速率(MFR)(190 ℃，2.16 kg) 15 g/10 min，密度1.12 g/cm^3，德国巴斯夫公司；CB，N330，平均粒径30 nm，比表面积82 m^2/g，卡博特化工(上海)有限公司；邻苯二甲酸二丁酯(DBP)，吸油值102 mL/100 g，卡博特化工(上海)有限公司；抗氧剂1010，化学纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤出机，SHJ-20，南京橡塑机械厂有限公司；注塑机，HTF86X1，海天塑机集团有限公司；精密数字万用表，34465A，美国Keysight Technologies公司；电子万能试验机，CMT4104，深圳市新三思计量技术有限公司；压力传感器测试系统，包括压力加载装置、数据采集卡和测试软件，自制；高低温试验箱，GDJS-100，上海实验仪器厂有限公司；电阻率测试仪，ZC-90G，上海嘉鹏科技有限公司；精密电子天平，ME204E，梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 TPU/CB导电复合材料的制备

将TPU树脂在80 ℃真空烘箱中干燥4 h，去除水分。称取一定量的TPU和CB (质量分数15%)并加入适量抗氧剂1010 (质量分数0.3%)，在双螺杆挤出机中进行熔融共混。挤出温度设定为：一区175 ℃、二区180 ℃、三区185 ℃、四区190 ℃、五区185 ℃、机头温度180 ℃。螺杆转速200 r/min。挤出的条料经水冷，切粒，得到TPU/CB导电复合材料粒料。将粒料在80 ℃真空烘箱中干燥4 h，备用。

1.3.2 压力传感器的注塑成型

采用注塑机将TPU/CB导电复合材料粒料注塑成型为压力传感器试样。模具为自行设计的标准试样模具，制品尺寸为50 mm×50 mm×2 mm的方形薄片。注塑工艺参数设定如下：料筒温度一区175 ℃、二区180 ℃、三区185 ℃、四区180 ℃，喷嘴温度180 ℃，模具温度40 ℃，注射压力80 MPa，注射速度60 mm/s，冷却时间20 s。为研究保压参数的影响，设置不同的保压压力(40、50、60、70、80、90、100 MPa)、保压时间(5、8、10、12、13、15、18 s)和保压速度(20、30、40、45、50、60、70 mm/s)进行试验，其他参数保持不变。每组参数下制备10个试样，用于后续性能测试。

1.4 性能测试与表征

电阻测试：采用四探针法测量试样的电阻。在试样表面涂覆银浆作为电极，电极间距为40 mm，电极宽度为5 mm。将试样放置在绝缘平台上，使用精密数字万用表

在室温(25 ℃)、相对湿度50%的条件下测量电阻。每个试样测量5次,取平均值。初始电阻的稳定性用电阻的相对标准偏差(RSD)表示。

压力-电阻响应测试:采用自制的压力传感器测试试样的压力-电阻响应特性。将试样固定在压力加载装置上,电子万能试验机施加压力范围为0~5 MPa,加载速度为1 mm/min。采用数据采集卡实时记录试样的电阻变化。测试过程在室温下进行,每个试样重复测试3次。根据压力-电阻曲线计算传感器的灵敏度。

循环稳定性测试:采用压力传感器进行循环加载测试,评价传感器的循环稳定性。在0~2 MPa压力范围内进行加载-卸载循环,加载速度为1 mm/min,保压时间为5 s,卸载速度为1 mm/min。连续循环1 000次,记录每次循环的初始电阻和在2 MPa压力下的电阻并计算电阻漂移率。重复性用相邻100次循环的电阻RSD表示。

温度稳定性测试:将试样放入高低温试验箱中,在-20、0、25、40、60、80 ℃温度下分别恒温30 min后,使用精密数字万用表测量电阻。每个温度点测量3次,取平均值,计算电阻温度系数(TCR)。

力学性能测试:按照GB/T 1040.1—2025,采用电子万能试验机测试试样的拉伸性能。试样尺寸为150 mm×10 mm×2 mm,试样为哑铃形,拉伸速度为50 mm/min。每组参数下测试5个试样,取平均值。

2 结果与讨论

2.1 保压压力对传感器电学稳定性的影响

保压压力对制品的密实度、尺寸精度和内部应力分布有直接影响。对于导电塑料而言,保压压力还会影响导电填料的分散状态和导电网络的形成质量。在保压时间12 s、保压速度40 mm/s的条件下,研究保压压力对传感器性能的影响。图1为保压压力对TPU/CB压力传感器初始电阻的影响。从图1可以看出,随着保压压力从40 MPa增加至100 MPa,传感器的初始电阻先降低后升高。当保压压力为70 MPa时,传感器的初始电阻最低,为1.25 kΩ。此时,RSD达到最小值,为2.8%,表明此时传感器的电阻稳定性最好。

当保压压力较低(40~50 MPa)时,熔体在型腔内的压实程度不足,导致制品内部存在较多的微孔和疏松结构。这些缺陷能够破坏导电网络的连续性,使导电通路不完整,电子传输受阻,电阻较高。同时,由于不同试样中缺陷的分布和数量存在差异,使电阻的波动较大,RSD较高。随着保压压力的增加,熔体得到更充分的压实,微孔和疏松结构减少,导电网络趋于完善,电阻降低,稳定性提高。

当保压压力达到60~80 MPa的适中范围时,熔体压实充分,导电填料在基体中分散均匀,形成连续完整的导电网络。此时CB粒子之间的接触良好,电子传输通道畅通,因此电阻较低。特别是在70 MPa时,导电网络的形成达到最优状态,表现为最低的初始电阻和最小的RSD。结果表明,适当的保压压力能够促进导电填料的均匀分布和导电网络的稳定形成。

当保压压力继续增加至90~100 MPa时,初始电阻反而升高,RSD也增大。原因是过高的保压压力会对已经形成的导电网络产生破坏作用。在高压作用下,聚合物基体发生更大程度的流动和重排,可能导致部分导电通路被拉断或被聚合物分子链隔离,从而增加电阻。同时,过高的保压压力会在制品内部引入较大的残余应力,这些应力在后续使用过程中的释放会导致导电网络结构的变化,影响电学性能的稳定性。此外,高压还可能导致粒子的团聚,使导电填料分布不均匀,进一步增加电阻的波动。

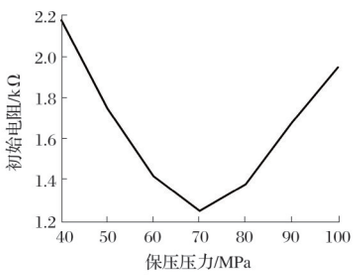


图1 保压压力对TPU/CB压力传感器初始电阻的影响
Fig.1 Effect of holding pressure on initial resistance of TPU/CB pressure sensors

表1为保压压力对TPU/CB压力传感器性能的影响。从表1可以看出,保压压力不仅影响初始电阻,还对传感器的灵敏度、响应时间、恢复时间和线性度等关键性能指标产生显著影响。当保压压力为70 MPa时,传感器表现出最优的综合性能,灵敏度达到0.083 MPa^{-1},响应时间仅为125 ms,恢复时间为145 ms,线性度高达0.996。适当的保压压力对获得高性能压力传感器的重要性。结合图1可以得出结论:保压压力通过影响制品的密实度和导电网络的完整性,从而对传感器的整体性能产生决定性影响。

表1 保压压力对TPU/CB压力传感器性能的影响
Tab.1 Effect of holding pressure on performance of TPU/CB pressure sensors

保压压力/MPa	初始电阻/kΩ	灵敏度/MPa^{-1}	响应时间/ms	恢复时间/ms	线性度
40	2.18	0.065	185	220	0.972
50	1.75	0.072	165	195	0.983
60	1.42	0.078	142	168	0.991
70	1.25	0.083	125	145	0.996
80	1.38	0.079	135	158	0.994
90	1.68	0.071	158	182	0.985
100	1.95	0.068	172	205	0.978

2.2 保压时间对传感器电学稳定性的影响

保压时间直接影响熔体的冷却固化过程以及导电网络的最终形成状态。在保压压力70 MPa、保压速度45 mm/s的条件下,探究保压时间对TPU/CB压力传感器性能的影响,结果如图2所示。从图2a可以看出,随着保压时间从5 s增加至18 s,初始电阻先降低后趋于稳定再略有上升。当保压时间为13 s时,初始电阻达到最低值,为1.25 kΩ。

图2b为在不同保压时间下传感器经过1 000次循环后的电阻漂移率变化。当保压时间较短(5~8 s)时,熔体尚未充分冷却固化,导电网络的形成处于不稳定状态。在这种情况下,卸压后制品会发生一定程度的回弹和收缩,导致导电填料的分布发生变化,部分导电通路可能被拉断或重新排列。因此,初始电阻较高,且不同试样之间的差异较大。从图2b可以看出,当保压时间为5 s时,电阻漂移率高达6.8%,说明不完全固化的导电网络在后续使用过程中容易发生结构变化,严重影响电学性能的长期稳定性。

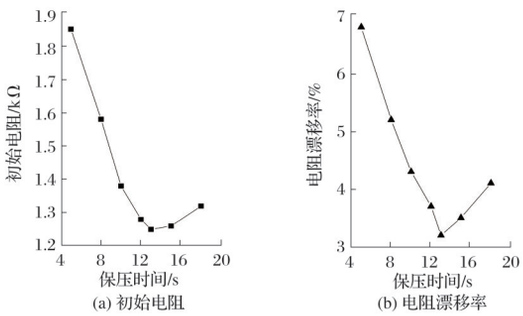


图2 保压时间对TPU/CB压力传感器性能的影响

Fig.2 Effect of holding time on performance of TPU/CB pressure sensors

随着保压时间增加至10~15 s的适中范围,熔体得到充分的冷却和固化,导电网络在压力作用下形成稳定的三维空间结构。在这个阶段,粒子之间的接触点被有效地固定,导电通路得以维持。特别是在13 s时,冷却固化程度最为理想,导电网络达到最优化状态,表现为最低的初始电阻(1.25 kΩ)和最佳的循环稳定性(电阻漂移率仅为3.2%)。当保压时间继续延长至18 s时,初始电阻略上升至1.32 kΩ,电阻漂移率也增加至4.1%。这可能是由于过长的保压时间使制品内部产生过大的残余应力。随着冷却的进行,聚合物的收缩受到模具的限制,在制品内部积累较大的内应力。这些残余应力会对导电网络产生破坏作用,特别是在后续脱模和循环使用过程中,应力的释放可能导致导电通路的局部断裂,从而降低循环稳定性。

表2为保压时间对TPU/CB压力传感器稳定性的影响。从表2可以看出,随着保压时间的延长,拉伸强度呈上升趋势,原因是延长保压时间有利于聚合物的充分冷却和结晶,提高材料的力学性能。当保压时间为13 s时,传感器的重复性最好(重复性RSD为2.8%),这与图2b展示的循环稳定性趋势一致。综合考虑电学稳定性、力学性能和生产效率,13 s是较为理想的保压时间。表2与图2的分析相互印证,共同说明保压时间对传感器长期稳定性的重要作用。

2.3 保压速度对传感器电学稳定性的影响

保压速度影响熔体在型腔内的流动和重新分布过程。在保压压力70 MPa、保压时间13 s的条件下,探究保压速度对TPU/CB压力传感器灵敏度和TCR的影响,结果如图3所示。从图3可以看出,当保压速度较慢(20~30 mm/s)时,压力的建立过程缓慢,熔体有较充分的时间进行流动和重新分布。虽然有利于熔体的充分填充,但过慢的保压速度可能导致在压力建立过程中部分区域已经开始冷却固化,造成材料内部密度不均匀。这种密度差异会导致导电填料分布不均匀,影响导电网络的连续性。当保压速度为20 mm/s时,传感器的灵敏度仅为0.076 MPa^{-1},TCR较高,达0.16%/℃,说明传感器对压力和温度的响应稳定性均较差。

表2 保压时间对TPU/CB压力传感器稳定性的影响

Tab.2 Effect of holding time on stability of TPU/CB pressure sensors

保压时间/s	初始电阻/kΩ	电阻漂移率/%	重复性RSD/%	拉伸强度/MPa
5	1.85	6.8	5.2	28.5
8	1.58	5.2	4.5	30.2
10	1.38	4.3	3.8	31.8
12	1.28	3.7	3.2	33.5
13	1.25	3.2	2.8	34.2
15	1.26	3.5	3.0	34.8
18	1.32	4.1	3.5	35.2

随着保压速度增加至40~50 mm/s的适中范围,压力建立的时间适当,既保证熔体的充分流动,又避免在保压过程中出现局部过度冷却的现象。在这种条件下,导电填料能够在基体中实现比较均匀的分散,形成稳定的导电网络。当保压速度为45 mm/s时,各项性能指标达到最优,灵敏度为0.082 MPa^{-1},TCR降至0.12%/℃,表明传感器具有优异的压力响应性能和温度稳定性。

当保压速度继续增加至60~70 mm/s时,压力建立非常迅速,熔体来不及充分流动和调整。当保压速度为70 mm/s时,灵敏度下降至0.075 MPa^{-1},TCR上升至0.18%/℃。这种快速的压力变化可能对已经初步形成的导电网络产生冲击,导致部分导电通路被破坏或重新排列。同时,高速保压还可能在材料内部引入剪切应力,影响导电填料的取向和分布,从而降低传感器的综合性能。

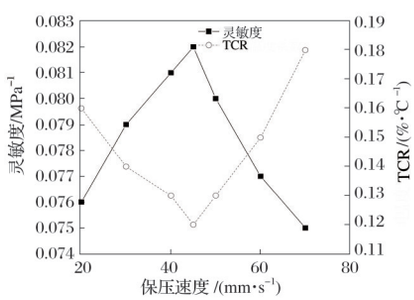


图3 保压速度对TPU/CB压力传感器灵敏度和TCR的影响

Fig.3 Effect of holding speed on sensitivity and TCR of TPU/CB pressure sensors

表3为保压速度对TPU/CB压力传感器性能的影响。从表3可以看出,适当的保压速度(45 mm/s)不仅能够获得

最优的电学性能，还能保持良好的力学性能，断裂伸长率达到525%。在这种保压速度下，材料内部形成均匀完整的结构，既能保证导电网络的稳定性，又能维持聚合物基体的柔韧性。表3与图3的数据相互验证，共同说明保压速度对传感器综合性能的重要影响。

表3 保压速度对TPU/CB压力传感器性能的影响

Tab.3 Effect of holding speed on performance of TPU/CB pressure sensors

保压速度/(mm·s^{-1})	初始电阻/kΩ	灵敏度/MPa^{-1}	TCR/(%·℃$^{-1}$)	断裂伸长率/%
20	1.52	0.076	0.16	485
30	1.38	0.079	0.14	502
40	1.28	0.081	0.13	518
45	1.25	0.082	0.12	525
50	1.30	0.080	0.13	520
60	1.38	0.077	0.15	512
70	1.45	0.075	0.18	505

2.4 优化参数下传感器的综合性能

基于上述单因素试验结果，确定了最优的保压参数组合：保压压力70 MPa、保压时间13 s、保压速度45 mm/s。在此优化参数条件下制备TPU/CB压力传感器，并对其进行全面的性能测试，以验证其综合性能和实际应用潜力。图4为优化保压参数下TPU/CB压力传感器的综合性能。

从图4a可以看出，在0~5 MPa的压力范围内，传感器表现出良好的线性响应特性，线性相关系数(R^2)达到0.996。根据曲线的斜率计算得到传感器的灵敏度为0.083 MPa^{-1}，在同类型传感器中处于较高水平，表明传感器对压力变化具有良好的响应能力。

图4b为传感器在0~2 MPa压力下连续1 000次加载-卸载循环测试中，每隔100次循环记录的归一化电阻。从图4b可以看出，传感器在整个循环过程中能够保持稳定的电阻响应，归一化电阻始终保持在1.000±0.032范围内，说明传感器具有优异的循环稳定性。第一次循环和第1 000次循环的电阻响应几乎一致，电阻漂移率仅为3.2%，远低于一般应用要求的5%标准。

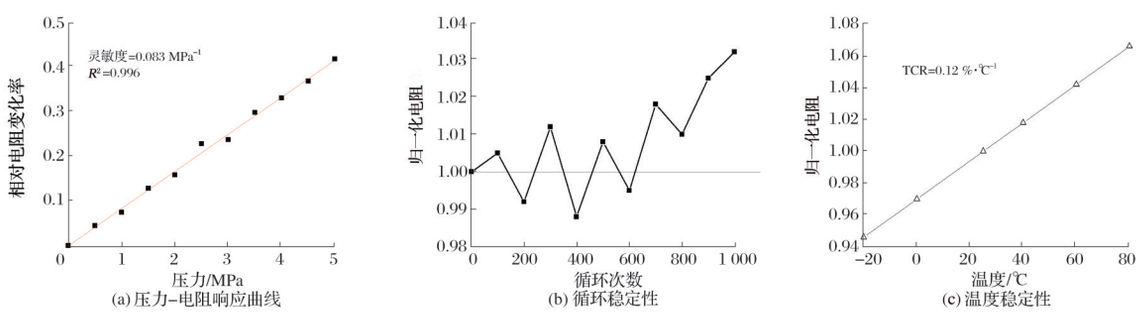


图4 优化保压参数下TPU/CB压力传感器的综合性能

Fig. 4 Comprehensive performance of TPU/CB pressure sensor under optimized holding pressure parameters

图4c为传感器在-20~80 ℃温度范围内的归一化电阻。从图4c可以看出，传感器的电阻随温度升高呈线性增加的趋势。原因是温度升高使聚合物基体膨胀，粒子之间的距离增大，电子传输隧道效应减弱，从而使电阻增加。根据数据计算得到的TCR为0.12%/℃，表明传感器具有良好的温度稳定性，能够在较宽的温度范围内保持稳定的性能。

表4为优化参数下TPU/CB压力传感器的综合性能指标。从表4可以看出，传感器在压力响应、循环稳定性、温度稳定性等多个方面均表现出优异的性能。传感器不仅具有较低的初始电阻(1.25 kΩ)和良好的稳定性(初始电阻RSD为2.8%)，还表现出优异的压力响应性能(灵敏度为0.083 MPa^{-1}，线性度为0.996)、快速的动态响应(响应时间为125 ms，恢复时间为145 ms)、出色的循环稳定性(1 000次循环后漂移率仅为3.2%)以及良好的温度稳定性(TCR为0.12%/℃)。同时，传感器还保持优良的力学性能(拉伸强度为34.2 MPa，断裂伸长率为525%)。上述综合性能指标充分证明了优化保压参数对于制备高性能导电塑料压力传感器的重要性。

表4 优化参数下TPU/CB压力传感器的综合性能指标

Tab.4 Comprehensive performance indicators of TPU/CB pressure sensors under optimized parameters

项目	数值
保压压力/MPa	70
保压时间/s	13
保压速度/(mm·s^{-1})	45
初始电阻/kΩ	1.25
初始电阻RSD/%	2.8
灵敏度/MPa^{-1}	0.083
压力检测范围/MPa	0~5
R^2	0.996
响应时间/ms	125
恢复时间/ms	145
电阻漂移率(1 000次循环)/%	3.2
重复性RSD (100次循环)/%	2.8
TCR/(%·℃$^{-1}$)	0.12
工作温度范围/℃	-20~80
拉伸强度/MPa	34.2
断裂伸长率/%	525

3 结论

本文系统研究了注塑成型保压参数对TPU/CB导电复合材料压力传感器电学稳定性的影响规律，通过单因素试验优化保压压力、保压时间和保压速度等关键工艺参数，并对优化参数下制备的传感器进行全面的性能评价。结果表明：保压压力对传感器的初始电阻和电学稳定性有显著影响。当保压压力为60~80 MPa时，导电网络较为完善，传感器表现出较低的初始电阻和良好的稳定性。保压压力过低会导致制品疏松，导电网络不完整；保压压力过高则会破坏已形成的导电网络并引入过大的残余应力。当保压压力为70 MPa时，获得最优性能。此时，初始电阻为1.25 kΩ，RSD为2.8%，灵敏度达到0.083 MPa^{-1}。保压时间是影响导电网络稳定形成的关键因素。当保压时间为12~15 s时，熔体得到充分冷却固化，导电网络结构稳定。保压时间过短会导致导电网络固化不充分，影响长期稳定性；保压时间过长则会引入过大的残余应力。当保压时间为13 s时，获得最佳循环稳定性，1 000次循环后电阻漂移率仅为3.2%，重复性RSD为2.8%。适当的保压速度有利于导电填料的均匀分散和导电网络的稳定形成。当保压速度在40~50 mm/s范围内时，压力建立过程适中，既能够保证熔体的充分流动，又能够避免对导电网络的破坏。保压速度在45 mm/s时获得最优综合性能，TCR为0.12%/℃，显示出良好的温度稳定性。在优化的保压参数组合(保压压力70 MPa、保压时间13 s、保压速度45 mm/s)条件下，制备的TPU/CB压力传感器表现出优异的综合性能。

本研究揭示了注塑成型保压参数对导电塑料压力传感器电学稳定性的影响机理，为导电塑料压力传感器的工业化生产提供参考。后续研究可以进一步探讨其他注塑工艺参数(如熔体温度、模具温度和注射速度等)的影响以及不同导电填料类型和含量对传感器性能的作用，从而全面优化工艺条件，开发出性能更加优异的导电塑料压力传感器。

参考文献

[1] 孟凡杰, 陈思, 李日东. 针织材料基柔性压阻式压力传感器的研究进展 [J]. 毛纺科技, 2025, 53 (9): 129-137.
[2] WANG Y L, ZHU W, DENG Y, et al. High-sensitivity self-powered temperature/pressure sensor based on flexible Bi-Te thermoelectric film and porous microconed elastomer[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, DOI:10.1016/j.jmst.2021.07.008.
[3] MEN H J, SUN Y W, LI J C. Effect of nano-filler/matrix interfacial friction on temperature-dependent fatigue property of flexible pressure sensor[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 495: 153566.
[4] 陈柏文, 黄继伟, 凌新龙. 智能可穿戴产品用柔性传感器的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2025, 42(2): 63-76.
[5] 宿荣芳, 文心仪, 王俊, 等. 智能可穿戴柔性压力传感器的研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(8): 98-108.
[6] 苏树盛. 智能可穿戴柔性压力传感器的研究现状与发展趋势[J]. 纺织科技进展, 2023, 45(7): 5-10.
[7] 胡海龙,马亚伦, 张帆, 等. 柔性纳米复合材料压阻式应变传感器的研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 1-22.
[8] 姜妞, 朱雨田, 胡跃鑫, 等. 基于高分子导电复合材料的柔性传感材料研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(7): 6-10.
[9] 孟非然, 郑骏驰, 孟征, 等. 聚合物导电复合材料的设计与制备研究进展[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(8): 157-163.
[10] TONKOV D, VASILYEVA E, TOLOCHKO O, et al. Conductive and tensoresistive properties of flexible polymer compositres: Experimental study and modeling[C]//2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). Saint Petersburg, Russian Federation: IEEE, 2024.
[11] FENTA E W, MEBRATIE B A. Advancements in carbon nanotube-polymer composites: Enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques[J]. Heliyon, 2024, 10(16): e36490.
[12] 唐梦璇, 张旭, 雷程, 等. 高抗干扰压阻式压力传感器设计与制备(英文)[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2026, 17(1): 125-132.
[13] DING J T, LI X P, ZHAO Y, et al. Investigating on molding process of steel-polyurethane flexible composite components and the interfacial bonding strength[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 59(14): 73-82.
[14] 王佳敏, 匡唐清, 柳和生, 等. 长玻纤增强聚丙烯流体辅助注塑管件的工艺影响[J]. 复合材料学报, 2024, 41(5): 2436-2444.
[15] KARIMI K, FARDOOST A, MHATRE N, et al. A thorough review of emerging technologies in micro- and nanochannel fabrication: Limitations, applications, and comparison[J]. Micromachines, 2024, 15 (10): 1274.
[16] LARSEN T, LARSEN T, ANDREASEN S J, et al. Pressure-independent through-plane electrical conductivity measurements of highly filled conductive polymer composites[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(33): 12493-12500.
[17] 孙雪虎, 潘亭亭, 卢柏声, 等. 碳纳米管填充聚合物复合材料电导率仿真研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(5): 604-608.
[18] KURNAZ S. Tailoring admittance, conductance, and susceptance in TPU/activated carbon films for flexible electronics[J]. Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 2025, 12(3): 788-797.
[19] ALI S R, ADITYA A L G N, MEGALAI E, et al. Electrical, mechanical, and electromechanical properties of screen-printed piezoresistive polydimethylsiloxane with multiwalled carbon nanotube nanocomposites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(14): 7445-7453.
[20] LI P F, LI Z J, CHEN H Y, et al. Graphene-based flexible strain sensor based on PDMS for strain detection of steel wire core conveyor belt joints[J]. Sensors, 2023, 23(17): 7473.
[21] CHUNG D C, PARK Y S, LEE K S, et al. Terahertz characterization of multi-walled carbon nanotubes/high-density polyethylene nanocomposites[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2022, 80 (3): 265-272.
[22] BHATT A, MAHADWAD O, PARIKH P. Effect of mixing methods and black conductive fillers on properties of natural rubber composites [J]. Journal of Research Updates in Polymer Science, 2024, 13: 175-186.
[23] CHEN J W, ZHU Y T, HUANG J R, et al. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications[J]. Polymer Reviews, 2021, 61(1): 157-193.
[24] KANOUN O, BOUHAMED A, RAMALINGAME R, et al. Review on conductive polymer/CNTs nanocomposites based flexible and stretchable strain and pressure sensors[J]. Sensors, 2021, 21(2): 341.
[25] VEERAMUTHU L, VENKATESAN M, BENAS J S, et al. Recent progress in conducting polymer composite/nanofiber-based strain and pressure sensors[J]. Polymers, 2021, 13(24): 4281.