PDMS/压电陶瓷复合柔性传感材料的制备及在水工结构应变监测中的应用

谭海涛[1],卢为伟[2],徐金顺[1]

(1.雅砻江流域水电开发有限公司,四川 成都 610051;2.中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司,湖南 长沙 410014)

摘　要:研究以加成型聚二甲基硅氧烷(PDMS)为柔性基体,以锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷粉体为压电填料,制备PDMS-PZT复合柔性传感材料,系统研究PZT含量对复合材料力学性能、介电性能、压电性能及应变-电信号响应行为的影响。结果表明:随着PZT含量的增加,复合材料的弹性模量和介电常数显著提高,但断裂伸长率逐渐降低,体系在增强效应与柔性保持之间呈现权衡关系。PDMS-PZT20样品在力学稳定性和介电损耗控制方面表现出较优平衡,在5 Hz、30 kPa条件下,其峰值电压达到±11.8 V,明显高于其他样品,在5 000次循环加载后仍保持89.2%的电压保持率。在拉伸模式下,PDMS-PZT20样品在1%~30%应变范围内表现出良好的线性应变-电信号响应关系,响应速度快,2 000次循环后仍维持约91.0%的电压保持率。引入适量的PZT不仅能够保证材料柔性,还能显著提升压电响应能力。20% PZT为体系综合性能最佳的填料质量分数。

关键词:压电复合材料;聚二甲基硅氧烷;锆钛酸铅填料;应变-电响应;结构健康监测

中图分类号:TB34　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-3360(2026)09-0087-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.016

Preparation of PDMS/Piezoelectric Ceramic Composite Flexible Sensing Material and Its Application in Strain Monitoring of Hydraulic Structures

TAN Haitao[1], LU Weiwei[2], XU Jinshun[1]

(1. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd. , Chengdu 610051, China; 2. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: A PDMS-PZT flexible composite sensing material was prepared using addition-cure polydimethylsiloxane (PDMS) as the flexible matrix and lead zirconate titanate (PZT) piezoelectric ceramic powder as the piezoelectric filler. The effects of PZT content on the mechanical properties, dielectric properties, piezoelectric properties, and strain-voltage response behavior of the composites were systematically investigated. The results showed that with increasing PZT content, the elastic modulus and dielectric constant of the composites increased significantly, whereas the elongation at break gradually decreased, indicating a trade-off between reinforcement effect and flexibility retention. The PDMS-PZT20 sample exhibited a balanced performance in terms of mechanical stability and dielectric loss control. Under the conditions of 5 Hz and 30 kPa, its peak output voltage reached ±11.8 V, which was significantly higher than that of the other samples, and it maintained 89.2% of its voltage retention after 5 000 loading cycles. In the tensile mode, the PDMS-PZT20 sample demonstrated a good linear strain-voltage response relationship over a strain range of 1%~30%, with fast response speed and a voltage retention of approximately 91.0% after 2 000 cycles. The incorporation of an appropriate amount of PZT not only preserved the flexibility of the material but also significantly enhanced its piezoelectric response capability. 20% PZT was identified as the optimal filler mass fraction for achieving the best overall performance.

Keywords: Piezoelectric composites; PDMS; PZT filler; Strain-electric response; Structural health monitoring

收稿日期 Submitted date 2025-12-15;修回日期 Revised date 2026-01-28;录用日期 Accepted date 2026-02-24

基金项目:雅砻江锦屏一级、二级水电站2024~2028年工程安全监测观测、维护与资料分析项目(YLLS-JPA-ZD2023740)

联系人,tan12452026@163.com

引用本文:谭海涛,卢为伟,徐金顺.PDMS/压电陶瓷复合柔性传感材料的制备及在水工结构应变监测中的应用[J].塑料科技,2026,54(9):87-92.

Citation:TAN H T, LU W W, XU J S. Preparation of PDMS/piezoelectric ceramic composite flexible sensing material and its application in strain monitoring of hydraulic structures[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 87-92.

水工结构在长期服役过程中常处于湿热交变和复杂受力环境，对其应变监测用传感材料的柔性、耐久性及信号稳定性提出较高要求[1-2]。柔性压电传感材料能够与结构表面良好贴合，实现应变到电信号的直接转换，在水工结构应变监测中具有潜在应用优势[3-4]。然而，构建高性能的柔性压电传感材料需要在力学柔性与压电响应之间实现微妙平衡，既要足够柔软以适应复杂工况，又要具备足够的压电活性以确保信号可检测性[5]。

聚二甲基硅氧烷(PDMS)因较低的弹性模量、优异的柔韧性以及良好的耐候性和耐湿热性能，在柔性传感材料领域具有明显优势[6-7]。加成型PDMS的固化过程基于氢硅加成反应，不产生小分子副产物，有利于获得结构致密、界面缺陷较少的复合材料体系，使其在长期服役条件下表现出较好的稳定性[8]。锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷具有较高的压电常数和成熟的极化工艺，是目前应用广泛的压电功能材料[9-10]。然而，PZT属于刚性无机材料，将其引入柔性聚合物基体时，不可避免地面临力学失配问题。随着填料含量的增加，复合材料的柔性可能下降，颗粒团聚和界面相互作用不足也会对力学性能及压电响应产生不利影响。因此，在保持材料柔性的同时实现有效压电性能，是PDMS-PZT复合体系中亟待解决的关键问题。

近年来，PDMS-PZT压电陶瓷复合材料在柔性传感领域已取得一定研究进展[11-12]。JIANG等[8]开发0-3型锆钛酸铅/硅树脂柔性压电复合传感器(PZT/PDMS-FPCS)，成功用于飞机曲面结构的冲击应力波监测，验证其在复杂几何表面的贴附能力与信号灵敏度。WANG等[13]利用PVDF柔性压电薄膜实现盾构隧道管片接缝接触应力的原位感知，凸显柔性传感在地下工程结构中的应用价值。HAO等[5]构建1-3型PZT-PDMS复合结构，该结构能够显著提升水声换能器的柔性和声阻抗匹配性能。然而，上述研究分别聚焦于冲击载荷响应、地下隧道监测及水声换能等特定场景。针对水工混凝土结构在长期浸水、干湿循环及低频疲劳载荷下的应变监测需求，目前尚缺乏对PDMS-PZT复合材料综合性能，尤其是长期湿热稳定性与动态应变-电信号线性度的系统评估与优化策略。

因此，本研究以加成型PDMS为柔性基体，以PZT粉体为压电功能填料，制备PDMS-PZT复合柔性传感材料，系统研究PDMS-PZT复合柔性传感材料的力学性能、介电性能、压电性能及应变-电信号响应特性，探讨其在水工结构应变监测中的应用潜力。

1 实验部分

1.1 主要原料

PZT压电陶瓷粉体，平均粒径1~3 μm，质量分数≥99%，南京先丰纳米材料科技有限公司；PDMS弹性体预聚体及固化剂，Sylgard 184，美国Dow Corning公司；无水乙醇，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；异丙醇(IPA)，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；去离子水，电阻率18.2 MΩ·cm，实验室超纯水系统制备；银导电浆料，DAD-87，体积电阻率≤3×10^{-5} Ω·cm，日本Daiken Chemical公司；聚四氟乙烯(PTFE)脱模薄膜，厚度约50 μm，江西泰氟隆新材料有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平，ME204E，瑞士Mettler Toledo公司；行星式真空搅拌机，ARV-310，日本THINKY公司；超声分散仪，KQ-300DE，昆山市超声仪器有限公司；真空干燥箱，DZF-6050，上海一恒科学仪器有限公司；鼓风干燥箱，GZX-9240MBE，上海博迅实业有限公司；电子万能试验机，5943，美国Instron公司；动态疲劳加载测试平台，自制；数字源表，2450，美国Keithley (Tektronix)公司；阻抗分析仪，IM3536，日本HIOKI公司；扫描电子显微镜(SEM)，SU8010，日本Hitachi公司；铁电分析仪，TF Analyzer 2000，德国aixACCT Systems有限责任公司。

1.3 样品制备

表1为PDMS-PZT复合柔性传感材料的配方。将PZT粉体于80 ℃条件下真空干燥12 h，以去除其表面吸附水分。将PZT粉体加入PDMS预聚体组分中，采用机械搅拌与超声分散相结合的方式进行分散，机械搅拌转速为500 r/min，时间为20 min，超声分散时间为10 min，以减弱PZT粒子的团聚现象，获得分散较为均匀的复合体系。在上述混合体系中加入相应质量的PDMS固化剂组分，继续机械搅拌5 min，以促进体系均匀混合。将混合物置于真空条件下脱泡10 min，以去除体系中引入的气泡。脱泡完成后，将复合体系倒入预先制备好的模具中，在室温条件下静置固化24 h，随后在80 ℃条件下进行固化处理2 h，得到结构稳定的PDMS-PZT复合柔性传感材料。制备PZT质量分数分别为0、10%、20%、30%和40%的复合材料，样品分别命名为PDMS-PZT0、PDMS-PZT10、PDMS-PZT20、PDMS-PZT30和PDMS-PZT40。为赋予复合材料压电响应性能，将固化后的样品置于硅油介质中，在120 ℃条件下施加直流电场进行极化处理，极化电场强度为3 kV/mm，极化时间为30 min。极化完成后，样品在电场作用下冷却至室温，取出，备用。

表1 PDMS-PZT复合柔性传感材料的配方

Tab.1 Formula of PDMS-PZT composite flexible sensing materials

样品	w_{PZT}/%	$m_{PDMS预聚体}$/g	$m_{PDMS固化剂}$/g	$m_{PZT粉体}$/g
PDMS-PZT0	0	5.0	5.0	0
PDMS-PZT10	10	4.5	4.5	1
PDMS-PZT20	20	4.0	4.0	2
PDMS-PZT30	30	3.5	3.5	3
PDMS-PZT40	40	3.0	3.0	4

1.4 性能测试与表征

力学性能测试：采用电子万能材料试验机参考GB/T 1040.1—2025和GB/T 1040.2—2022进行测试。将试样裁剪为50 mm×10 mm×1 mm的长条状结构，标距设定为

20 mm，加载方式为位移控制，拉伸速率为5 mm/min。每种样品测试不少于5个平行试样，取平均值。

介电性能测试：采用阻抗分析仪参考GB/T 1409—2006进行测试。频率范围设定为10^2~10^6 Hz。样品制备成平行板结构，在其上下表面制备电极以保证良好的电接触，得到介电常数(ε_r)和损耗因子(tan δ)。

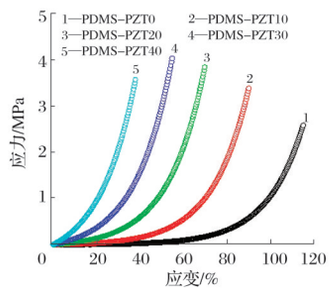
压电性能测试：采用准静态压电测试系统进行表征。测试过程中，在样品厚度方向施加周期性机械载荷，同步采集其输出电信号。由输出电压或电荷信号得到压电响应幅值，在相同加载条件下对不同样品进行对比。

应变-电信号响应性能测试：采用电子万能材料试验机与电信号采集系统联用的平台进行应变-电信号响应性能测试。在标准实验室温(25±2) ℃条件下进行，将试样固定于拉伸夹具上，采用单轴拉伸施加不同幅值的应变，同时实时采集材料在极化方向上的输出电信号。此外，在固定应变幅值条件下进行多次拉伸-释放循环测试，以评估材料在重复变形条件下的传感稳定性。

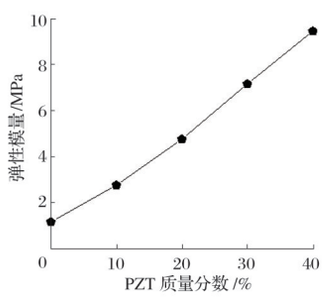
2 结果与讨论

2.1 复合柔性传感材料的拉伸性能分析

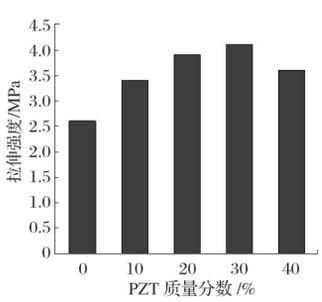
图1为PDMS-PZT复合柔性传感材料的拉伸性能。从图1a可以看出，PDMS-PZT0表现出典型弹性体的非线性拉伸特征[14]，应力随应变增加呈指数型上升趋势，并在约115.0%应变处发生断裂，其拉伸强度为2.58 MPa，体现出较高的延展性和明显的应变硬化行为。这种非线性来源于PDMS分子链在拉伸过程中的取向与构象转变[15]。随着PZT含量的增加，应力-应变曲线整体向“高应力、低应变”方向移动。PDMS-PZT10、PDMS-PZT20和PDMS-PZT30的断裂应变分别为89.9%、69.8%和54.7%；而PDMS-PZT40的断裂应变进一步降低至37.9%。与此同时，曲线初始段斜率明显提高，表明材料刚度增大。高填充样品(PZT质量分数为30%和40%)的非线性特征减弱，断裂发生提前，显示出更为明显的刚性增强复合材料特征。这说明随着刚性PZT颗粒含量的增加，基体链段运动自由度受到限制，材料逐渐由“高延展型弹性体”向“增强型复合材料”转变。从图1b可以看出，弹性模量呈近似单调增长趋势，说明高模量PZT填料在体系中逐渐形成有效的应力传递结构。从图1c可以看出，PDMS-PZT0的拉伸强度为2.58 MPa；PDMS-PZT10和PDMS-PZT20样品的拉伸强度分别提高至3.38 MPa和3.85 MPa；当PZT质量分数为30%时拉伸强度达到最大值，为4.03 MPa，较PDMS-PZT0提高56.2%。然而，当PZT质量分数进一步增加至40%时，拉伸强度下降至3.57 MPa，该趋势反映了增强效应与界面缺陷之间的竞争关系。在低至中等填充区间，PZT颗粒分散较为均匀，能够有效承担载荷并通过界面传递应力，从而提高强度；而在高填充条件下，颗粒间距减小，团聚概率增加，界面不连续区域增多，局部应力集中，导致拉伸强度下降。从图1d可以看出，断裂伸长率由PDMS-PZT0的114.9%逐步下降至89.9%、69.8%、54.7%和37.9%，整体下降趋势明显。PDMS-PZT40样品的断裂伸长率较PDMS-PZT0降低67.0%。原因是刚性颗粒能够限制聚合物链段运动的空间，同时填料-基体界面处的应力集中效应，随着填料含量的增加，体系由延展性断裂逐渐向准脆性断裂转变。



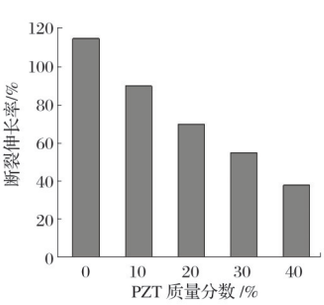
(a) 应力–应变曲线



(b) 弹性模量



(c) 拉伸强度



(d) 断裂伸长率

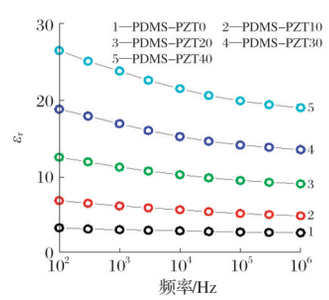
图1 PDMS-PZT复合柔性传感材料的拉伸性能

Fig.1 Tensile properties of PDMS-PZT composite flexible sensing materials

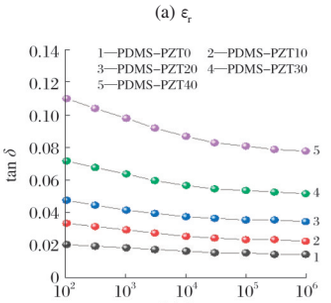
2.2 复合柔性传感材料的介电性能分析

图2为PDMS-PZT复合柔性传感材料的介电性能。从图2a可以看出，ε_r随PZT含量的增加呈显著上升趋势。在1 000 Hz下，PDMS-PZT0样品的ε_r约为2.87；当PZT质

量分数增加至10%时，ε_r提高至5.94，较PDMS-PZT0提升约107.0%；当PZT质量分数增加至20%时，ε_r进一步增加至10.85，较PDMS-PZT0提高约278.0%；当PZT质量分数增加至30%和40%时，ε_r分别达到16.12和22.95。这一显著增长主要来源于两方面：(1) PZT本身为高ε_r压电陶瓷，其ε_r远高于PDMS基体[16]，引入后能够直接提高体系的等效介电响应。(2)随着填料含量的增加，颗粒间距缩短，界面区域增多，Maxwell-Wagner-Sillars界面[17]极化效应增强，从而在低频电场下贡献额外极化响应。尤其在20%以上区间，ε_r增长幅度进一步扩大，表明体系逐渐形成较为连续的极化响应网络结构。从图2b可以看出，在1 000 Hz下，PDMS-PZT0样品的tan δ为0.018，表现出较低的tan δ。当PZT质量分数增加至10%和20%时，tan δ分别升至0.029和0.040；当PZT质量分数增加至30%和40%时，tan δ进一步提高至0.061和0.094。相较于PDMS-PZT20样品，PDMS-PZT40样品的tan δ提高135.0%。这一趋势表明，虽然填料能够提高极化能力，但同时也会引入更多界面缺陷与局部电场畸变区域，从而增强电能耗散。PDMS-PZT20样品ε_r显著提高的同时，tan δ仍控制在0.040的相对较低水平，表明其在极化增强与损耗控制之间实现较优平衡。而当PZT质量分数进一步增加至30%以上时，tan δ增加幅度明显加快，说明界面不均匀性及颗粒间相互作用开始对电学稳定性产生不利影响。



(a) ε_r



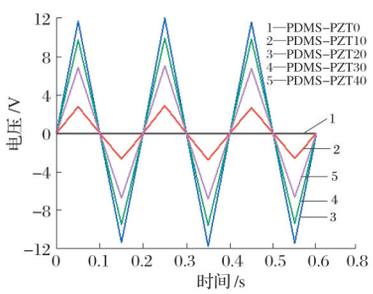
(b) tan δ

图2 PDMS-PZT复合柔性传感材料的介电性能

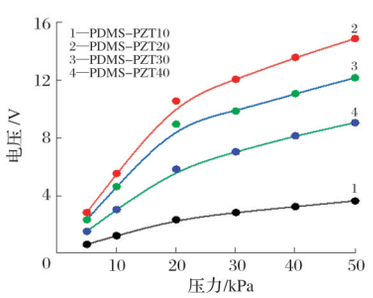
Fig.2 Dielectric properties of PDMS-PZT composite flexible sensing materials

2.3 复合柔性传感材料的压电性能分析

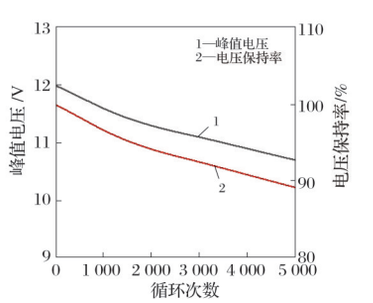
图3为PDMS-PZT复合柔性传感材料的压电性能。从图3a可以看出，在5 Hz、30 kPa条件下，PDMS-PZT0样品几乎无输出信号，说明基体不具备压电响应能力。加入PZT后，样品均呈现稳定、对称的正负交替电压信号，表明材料在周期加载下具有良好的压电响应行为。PDMS-PZT20样品的峰值电压最高(±11.8 V)，明显高于PDMS-PZT10样品(±2.8 V)、PDMS-PZT30 (±9.8 V)和PDMS-PZT40 (±6.9 V)。当PZT质量分数从10%提升至20%时，输出电压显著增强，说明此时体系已形成较为有效的极化响应网络。当PZT质量分数增加至30%以上时，电压反而下降，推测与填料团聚、界面缺陷增多及基体柔性下降有关[18]，从而削弱应力传递效率和有效极化程度。



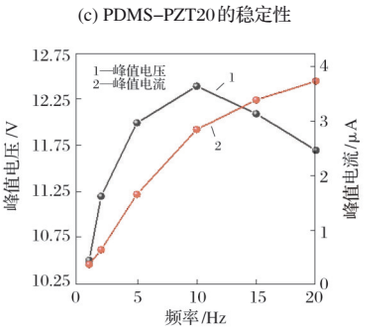
(a) 电压–时间响应曲线



(b) 电压–压力响应曲线



(c) PDMS–PZT20的稳定性



(d) PDMS–PZT20的频率响应

图3 PDMS-PZT复合柔性传感材料的压电性能

Fig.3 Piezoelectric properties of PDMS-PZT composite flexible sensing materials

从图3b可以看出，所有样品的电压均随压力升高而单调增加，表现出良好的线性响应趋势。在5~50 kPa范围

内，PDMS-PZT20样品始终保持最高输出水平。在50 kPa下，PDMS-PZT20电压达到14.8 V；而PDMS-PZT30和PDMS-PZT40电压分别为12.1 V和9.0 V；PDMS-PZT10样品响应较弱，电压仅为3.6 V。这表明引入适量PZT能够有效提高应力-电信号转换效率，但过高填料含量会因材料刚性增加和应变受限而降低单位压力下的电荷释放效率。PDMS-PZT20样品在极化增强与力学柔性之间实现较优的匹配。

从图3c可以看出，PDMS-PZT20的初始峰值电压为12.0 V，经5 000次循环后仍保持10.7 V，电压保持率约为89.2%。电压衰减过程较为缓慢且无明显突变，说明材料在重复压缩条件下具有良好的结构稳定性和界面稳定性[19]。这一结果与前文力学循环性能趋势一致，表明PDMS-PZT20可在保证压电输出的同时维持良好的耐久性。

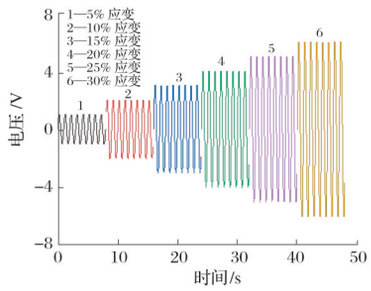
从图3d可以看出，随着加载频率从1 Hz增加至10 Hz，PDMS-PZT20的峰值电压从10.5 V增加至12.4 V，随后略有下降。峰值电流则随频率持续增加，在20 Hz时达到3.75 μA。原因是频率升高能够加快电荷释放速率，从而提高瞬时电流输出，而电压在中等频率下达到最大值后略有回落，可能与界面极化响应时间及电荷传输滞后有关。整体来看，PDMS-PZT20样品在宽频范围内表现出稳定而较高的输出能力。

2.4 复合柔性传感材料的应变-电信号响应性能分析

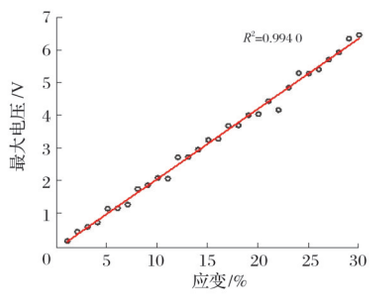
图4为PDMS-PZT20复合柔性传感材料的应变-电信号响应性能。从图4a可以看出，随着施加应变幅值逐级提高，输出电压幅值同步增大且始终保持稳定，呈对称的正负交替波形，说明材料在周期性拉伸过程中能够实现稳定的拉伸-极化耦合响应[20]。在5%应变下，峰值电压为±1.0 V；而在30%应变下，峰值电压提升至±6.3 V。整个加载过程中未出现明显波形畸变或基线漂移，表明材料内部极化结构在反复形变下仍保持良好的结构完整性和电学稳定性。应变升高导致压电相内部应力集中增强，从而提高瞬时电荷分离程度，是输出电压增大的主要原因。

从图4b可以看出，在1%~30%应变范围内，输出电压与应变呈现良好的线性关系，拟合相关系数接近1，表明材料在该形变区间内处于稳定的线性响应区[21]。线性斜率对应的应变灵敏度约为0.21 V/%，说明该体系能够实现较为精确的形变量-电信号转换。未观察到高应变下的明显饱和或非线性偏离现象，说明在此范围内基体仍具备足够柔性以保证有效应力传递，同时PZT颗粒未发生严重取向失稳或界面脱黏。

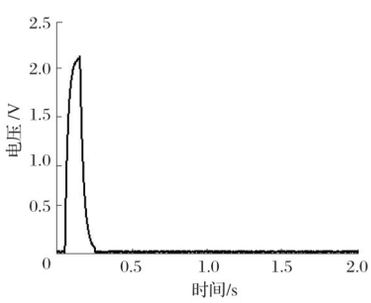
从图4c可以看出，电压信号在加载阶段迅速上升，并在卸载后快速衰减回零值。由曲线可估算其响应时间和恢复时间均处于几十毫秒量级，说明体系内部电荷生成与释放过程较为迅速。上升与下降曲线基本对称，未表现出明显滞后或拖尾现象，说明黏弹性效应对电信号输出的影响较小，快速响应特性有利于实时动态形变监测应用。



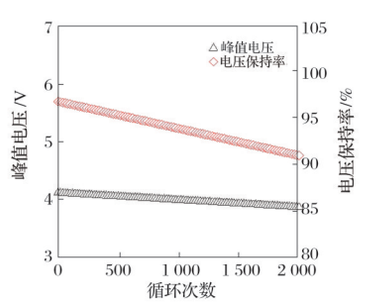
(a) 不同应变下电压–时间响应曲线



(b) 峰值电压应变响应



(c) 10% 应变下电压–时间瞬态响应曲线



(d) 10% 应变下2 000次循环拉伸的稳定性

图4 PDMS-PZT20复合柔性传感材料的应变-电信号响应性能

Fig.4 Strain-electrical signal response performance of PDMS-PZT20 composite flexible sensing material

从图4d可以看出，初始峰值电压约为4.25 V，在2 000次循环后仍保持约91.0%的电压保持率，衰减过程平缓且未出现突变。循环过程中峰值电压波形保持稳定，未观察到明显信号失真或随机波动增强现象，说明材料在长期交变应变作用下具有良好的界面稳定性和结构耐久性。轻微衰减可能来源于基体微观松弛或填料界面微裂纹的逐步演化，但整体电学响应仍维持在较高水平。综合应变依赖性、线性响应关系、瞬态响应速度以及循环稳定性可以看出，PDMS-PZT复合材料在拉伸模式下同样表现出稳定而可预测的压电输出行为。其应变-电信号转换具有良

好的线性度和重复性，同时兼具快速响应与长期稳定特征，进一步证明该体系不仅适用于压力检测，也具备作为柔性应变传感材料的潜在应用价值。

3 结论

本研究制备不同PZT含量的PDMS-PZT复合柔性传感材料，系统分析PZT含量对其力学性能、电学性能及机电耦合性能的影响规律。结果表明：随着PZT含量的增加，材料刚度与ε_t显著提高，但延展性和损耗控制能力逐步下降，体现出增强效应与界面缺陷之间的竞争机制。在PZT质量分数为20%条件下，复合体系的弹性模量、拉伸强度、ε_t及输出电压之间能够实现较优匹配，既保持了较好的柔性，又形成了相对连续的极化响应网络。在周期压力与拉伸条件下，该样品均表现出稳定线性的电信号输出特征，具有良好的循环耐久性。在PDMS-PZT复合体系中，填料含量并非越高越好，中等填充比例更有利于实现柔性与压电活性的协同优化。研究结果为柔性压电复合材料在水工结构应变监测中的应用提供参考。

参考文献

[1] 韩旭, 邢晓涛, 刘兵飞, 等. 基于应变传递模型的形状记忆合金混凝土结构裂缝损伤监测与修复研究[J]. 工程力学, 2025, 42(增刊 1): 251-259.

[2] GONG Y J, GUO Y X, XIONG L, et al. A high-sensitivity strain sensor with femtosecond fiber Bragg grating for pipeline deformation monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(9): 14830-14841.

[3] HUANG Y, FAN X Y, CHEN S C, et al. Emerging technologies of flexible pressure sensors: Materials, modeling, devices, and manufacturing[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(12): 1808509.

[4] JING X, LI H, MI H Y, et al. Highly transparent, stretchable, and rapid self-healing polyvinyl alcohol/cellulose nanofibril hydrogel sensors for sensitive pressure sensing and human motion detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 295: 159-167.

[5] HAO S H, ZHONG C, WANG L K, et al. A high-performance flexible hydroacoustic transducer based on 1-3 PZT-5A/silicone rubber composite[J]. Sensors, 2024, 24(7): 2081.

[6] MATSUDA R, ISANO Y, UENO K, et al. Highly stretchable and sensitive silicone composites with positive piezoconductivity using nickel powder and ionic liquid[J]. APL Bioengineering, 2023, 7: 016108.

[7] YANG H, YUAN L, YAO X F, et al. Monotonic strain sensing behavior of self-assembled carbon nanotubes/graphene silicone rubber composites under cyclic loading[J]. Composites Science and Technology, 2020, 200: 108474.

[8] JIANG S, SHEN Y, WANG S, et al. Flexible piezoelectric composite sensor for impact monitoring of curved structures[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 362: 114655.

[9] HAO S H, ZHONG C, ZHANG Y J, et al. Flexible 1-3 piezoelectric composites with soft embedded conductive interconnects for underwater acoustic transducers[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2023, 5(5): 2686-2695.

[10] MIRZA M S, YASIN T, IKRAM M, et al. Underwater characterizations of monolithic piezoceramic and 1-3 composite using a self-designed transducer[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2016, 73 (3): 30101.

[11] 汪洋. 锆钛酸铅基陶瓷/硅橡胶弹性体压电复合材料的制备及性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2023.

[12] WANG W Q. Flexible pressure sensors: Classification, cutting-edge advances and applications[M]//Proceedings of the 2025 2nd International Conference on Electrical Engineering and Intelligent Control (EEIC 2025). Dordrecht: Atlantis Press International BV, 2025.

[13] WANG X, ZHENG D Y, WANG C Q, et al. The effects of ceramic fillers' performance and preparation process on PZT-based/P(VDF-TrFE) flexible composite films[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2024, 35(16): 1081.

[14] CAO H L, MINTA K, BEIGI H A, et al. Experimental investigation of nonlinear stress-strain behaviour of various elastomeric materials under cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2026, 510: 145234.

[15] LU S, CAI W H, CAO N P, et al. Understanding the extraordinary flexibility of polydimethylsiloxane through single-molecule mechanics [J]. ACS Materials Letters, 2022, 4(2): 329-335.

[16] HABIB M, LANTGIOS I, HORNBOSTEL K. A review of ceramic, polymer and composite piezoelectric materials[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(42): 423002.

[17] SAMET M, KALLEL A, SERGHEI A. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of composite materials: Scaling laws and applications[J]. Journal of Composite Materials, 2022, 56(20): 3197-3217.

[18] WANG S J, LUO Z, LIANG J J, et al. Polymer nanocomposite dielectrics: Understanding the matrix/particle interface[J]. ACS Nano, 2022, 16(9): 13612-13656.

[19] LI Z J, YI H C, DING W Y, et al. Revealing the accelerated capacity decay of a high-voltage $LiCoO_2$ upon harsh charging procedure[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(14): 2312837.

[20] YU Z, RAO H, HU K, et al. Construction of high electric field polarization model and molecular dynamics simulation for P (VDF50-TrFE50) polymer[J]. Physica Scripta, 2025, 100(7): 0759b4.

[21] ZOU J, JING X, CHEN Z, et al. Multifunctional organohydrogel with ultralow-hysteresis, ultrafast-response, and whole-strain-range linearity for self-powered sensors[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33 (15): 2213895.