

文章编号: 1673-3193(2024)05-0557-08

# 基于PVDF薄膜的冲击波压电传感器基底构型优化

常瀚林<sup>1</sup>, 谢林<sup>2</sup>, 杨晓鹏<sup>1</sup>, 范志强<sup>1</sup>

(1. 中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 根据柔性压电薄膜的压电原理, 设计了复合压电效应传感器来用于冲击波信号测量。为研究传感器基底构型对其测量性能的影响规律, 分别制备了不同孔径变形区的基底, 调整压电薄膜的变形模式以调控其冲击波测量性能。实验结果表明: 通过增大聚氯乙烯(PVC)基底的孔径, 可以大幅度增加聚偏二氟乙烯(PVDF)薄膜传感器的灵敏度系数, 并且随着变形区直径的增加, 信号的脉宽也随之增大。最后通过爆炸实验, 研究了PVC基底对PVDF薄膜传感器信号的影响, 验证了变形区直径8 mm基底的PVDF传感器在爆炸冲击波测量中的准确性。这为今后PVDF薄膜传感器PVC基底变形区的选择提供了参考。

**关键词:** PVC基底; PVDF传感器; 灵敏度系数; 复合压电效应

**中图分类号:** TP212

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.05.001

**引用格式:** 常瀚林, 谢林, 杨晓鹏, 等. 基于PVDF薄膜的冲击波压电传感器基底构型优化[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(5): 557-564.

CHANG Hanlin, XIE Lin, YANG Xiaopeng, et al. Substrate configuration optimization of PVDF thin film sensor based on shock waves composite piezoelectric effect[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(5): 557-564.

## Substrate Configuration Optimization of PVDF Thin Film Sensor Based on Shock Waves Composite Piezoelectric Effect

CHANG Hanlin<sup>1</sup>, XIE Lin<sup>2</sup>, YANG Xiaopeng<sup>1</sup>, FAN Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A composite piezoelectric effect sensor was designed based on the principles of flexible piezoelectric films for the measurement of shock wave signals. To investigate the impact of sensor substrate configurations on its measurement performance, different substrates with varying aperture sizes in the deformation region were prepared. This allowed for the adjustment of the deformation modes of the piezoelectric film, thereby controlling its performance in measuring shock waves. Experimental results reveal that increasing the aperture size of the polyvinyl chloride(PVC) substrate significantly enhances the sensitivity coefficient of the polyvinylidene fluoride (PVDF) film sensor. Moreover, as the diameter of the deformation region increases, the signal's pulse width also increases accordingly. Finally, through explosive experiments, the influence of the PVC substrate on the

**收稿日期:** 2023-07-18

**基金项目:** 省部共建动态测试技术国家重点实验室开放基金(2022-SYSJJ-06); 国家自然科学基金(12072326)

**作者简介:** 常瀚林(1993-), 男, 硕士生, 主要从事复合压电效应传感器研究。

**通信作者:** 范志强(1989-), 男, 副教授, 博士, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: fanzhq@nuc.edu.cn.

signal of the PVDF film sensor was studied, confirming the accuracy of the PVDF sensor with an 8mm deformation region diameter in measuring explosive shock waves. This study provides valuable insights for future selection of PVC substrate deformation regions in PVDF film sensors.

**Key words:** PVC substrate; PVDF sensor; sensitivity coefficient; composite piezoelectric effect

## 0 引言

在现代战争中,实现战场感知对传感器提出了轻量化、柔性化以及可穿戴化的要求<sup>[1-3]</sup>。传统的硬质压电或压阻型传感器由于固定困难、外部电源需求等特性,不适用作为随体冲击波测量设备<sup>[4]</sup>。因此,基于PVDF薄膜压电材料的传感器成为学者们研究的热点,因为它们可以通过受压产生电荷,安装方便,成本较低,且能适应恶劣环境<sup>[5-7]</sup>。

PVDF柔性传感器与人体阻抗相似,因此在人体脉搏测试等领域得到应用<sup>[8-10]</sup>。此外,基于PVDF材料制作的柔性传感器在医疗健康<sup>[11]</sup>、人造皮肤<sup>[12]</sup>、人机交互<sup>[13]</sup>、柔性显示屏<sup>[14]</sup>等方面也有广泛应用。因此,将PVDF柔性传感器制作成随体冲击波测量设备有望实现战场感知的目标。

由于作用在人体表面的低强度冲击波通常持续时间短,只有几十微秒至几毫秒,幅值也相对较低,仅有几百千帕。为应对这种情况,测量元件需要具备高频响和力电转换敏感性。传统测量方式假设内部元件为面外单向受压状态,即 $d_{33}$ 单一压电工作模式<sup>[15]</sup>,这在测量低强度冲击波时可能导致有效电荷输出与噪声相近,从而使测量信噪比低、稳定性差。为解决这一问题,范志强等<sup>[16]</sup>在以往压电效应的基础上,引入了复合压电效应,综合利用压电薄膜在3个方向上的力电响应,大幅度提升了传感器的灵敏度系数。本文将进一步研究不同基底构型对信号质量改善的影响,并选择了信号质量最佳的情况进行了爆炸冲击波下的测试。

## 1 理论分析及实验装置

### 1.1 复合压电效应理论分析

如图1(a)所示,传统的PVDF压电薄膜是当冲击波作用于方向3上时,同时测量3个方向上的电荷量。在冲击波作用下,PVDF压电薄膜材料向面内压缩产生电荷。然而,由于PVDF薄膜压电材料在面内工作时的敏感区变形较小,导致产

生的电荷量较少且变形形状不易控制。当加载的冲击波信号较为复杂时,在方向1和2上通常还会存在轻微干扰。因此,为了增加压电薄膜材料的电荷产生量并控制传感器在冲击波加载时的变形形状,提出了能使传感器变形区域变大的复合压电效应<sup>[16]</sup>。

根据第一类压电方程,压电薄膜元件的压电效应可以表示为

$$[q] = [d][\sigma] + [\epsilon]^T[E], \quad (1)$$

式中: $q$ 为在薄膜传感器敏感区单位面积上产生的电荷量密度; $d$ 为薄膜传感器的名义灵敏度系数矩阵; $\sigma$ 为在冲击波加载下的薄膜传感器的应力张量; $\epsilon$ 为介电常数; $E$ 为外部施加的电场。在忽略外部电场对传感器结果的影响时,电荷量密度可以简化为

$$[q] = [d][\sigma]. \quad (2)$$

具体表达式为

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

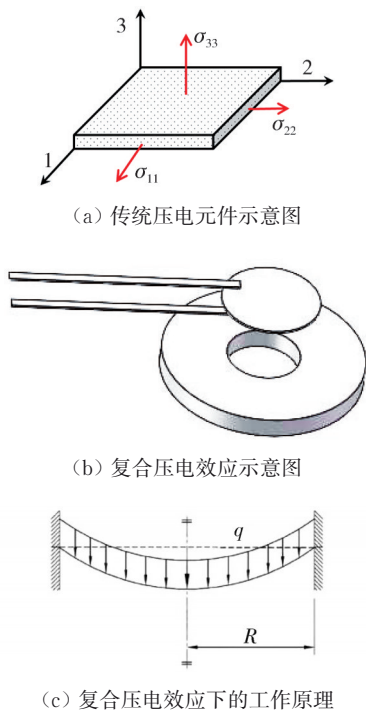
因此,方向3上的电荷量输出可以表示为

$$q_3 = d_{31}\sigma_{11} + d_{32}\sigma_{22} + d_{33}\sigma_{33}. \quad (4)$$

根据方程(4),电荷量与方向1和2上的力电响应相关。为了增加PVDF传感器的电荷产生量,设计了图1(b)所示的基底。考虑到PVDF薄膜传感器与PVC基底固定在一起,在传感器受到冲击波作用时,可以将其视为四周固支的薄板,受力状态如图1(c)所示。此时,面内的方向1和2的拉应力以及面外的方向3的压缩应力都会对电荷量的正向输出做出贡献。通过这种微结构设计,实现多个方向压电效应的综合利用,与传统压电模式有所不同,本文将其称为复合压电效应。这种模式可以将作用在薄膜传感器表面幅值较低的冲击波转化为较高幅值的面内拉应力。

在低强度冲击波作用于传感器敏感区时,本文设计通过在基底预留一定高度的开孔,使得传感器

变形区域仍能够产生较大的形变,从而增加电荷产生量。这一改进显著提升了PVDF传感器的灵敏度系数,进而增强了传感器对冲击波的响应能力。



(a) 传统压电元件示意图

(b) 复合压电效应示意图

(c) 复合压电效应下的工作原理

图 1 传感器工作示意图

Fig. 1 Sensor working diagram

### 1.2 复合压电效应结构的自振频率

本文复合压电效应设计的意义在于,在冲击波强度较低时,通过复合压电效应使传感器的变形区域产生更大的挠度,从而提高压电材料产生的电荷量,进而增加传感器的灵敏度系数与信噪比。然而,当冲击波信号频率较低,与结构的自振频率接近或者相当时,容易发生谐振现象<sup>[14]</sup>,导致信号达到振幅峰值并在高频部分产生高频振荡。在实际测试爆炸冲击波时,考虑到爆炸冲击波作用时间极短,持续时间仅为几十微秒到几毫秒,若传感器测试信号存在高频振荡和过冲现象,将导致难以准确测量冲击波的具体信息。因此,在应对不同类型的冲击波时,有必要计算和分析传感器结构的固有频率,并评估测试信号的可行性。

为确保测量的准确性,要求传感器必须具备足够大的脉宽和高自振频率。传感器自振频率的计算公式为<sup>[17]</sup>

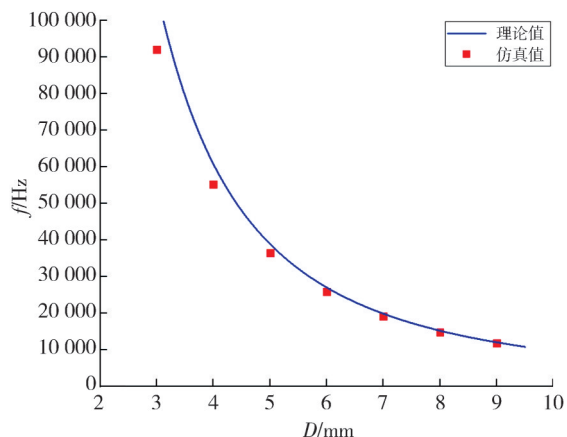
$$f_0 = \frac{5.11h}{2\pi r^2} \left[ \frac{E}{3(1-\mu^2)\rho} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

式中:  $f_0$  为传感器的自振频率;  $h$  为传感器的厚度;  $r$  为传感器的半径;  $E$  为传感器材料的弹性模量;  $\mu$  为材料的泊松比;  $\rho$  为材料密度。由式(5)可知,传感器的自振频率与其厚度成正比,与其半径的平方成反比。

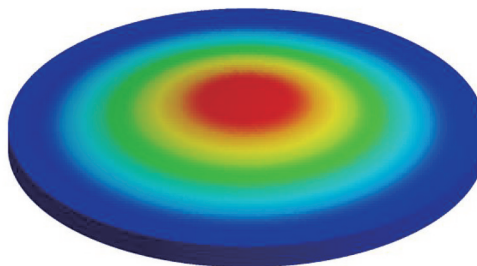
本文实验参数为  $h=0.4 \text{ mm}$ ,  $E=2.5 \text{ GPa}$ ,  $\mu=0.35$ ,  $\rho=1.7 \text{ g/cm}^3$ , 可得传感器自振频率  $f_0(\text{Hz})$  与变形区直径  $D(\text{mm})$  满足方程

$$f_0 = 973\ 066.66D^{-2}. \quad (6)$$

利用有限元软件 ANSYS 对不同孔径的传感器进行模态分析,得到其自振频率如图 2 (a) 所示。结果表明,传感器自振频率随孔径的减小而上升,这与理论预测一致。考虑到爆炸冲击波的频段主要在 10 kHz 左右,为确保传感器的良好响应,其固有频率应为高于冲击波主频。通过考察参数和仿真结果,选择变形区直径小于 8 mm 的传感器的孔径作为最适当的孔径,其一阶振型如图 2 (b) 所示。



(a) 变形区直径与传感器固有频率关系图



(b) 敏感元件一阶振型

图 2 传感器变形元件的频率与振型分析图

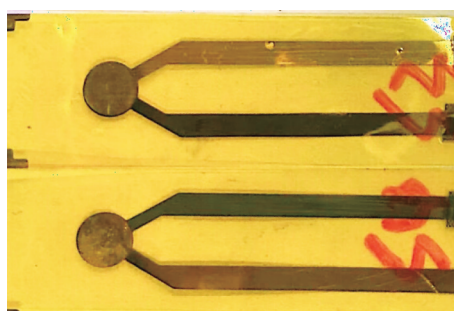
Fig. 2 Frequency and mode shape analysis of sensor deformation element

传感器的变形区大小由PVC基底的孔径确定。理论和仿真结果均表明,改变PVC基底的孔径大小能有效提升PVDF薄膜传感器的自振频率。当PVC基底的孔径分别为8, 5和3 mm时,传感器的自振频

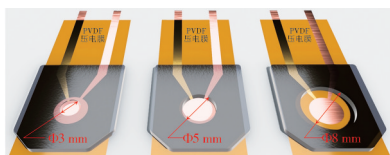
率分别为15 204.17, 38 902.93和108 063.71 Hz, 这些频率分别是冲击波高频段主频(约10 kHz)的1.5倍、4倍和10倍。之后, 通过实验对比不同PVC基底配置的传感器信号的质量, 评估孔径配置对传感器性能的影响, 以确定最佳的孔径配置。

### 1.3 实验装置

本文首先采用磁控溅射和高压电场极化技术制备了一种厚度为28  $\mu\text{m}$ 的PVDF压电薄膜。制备过程中, 通过调整溅射电极和局部极化工艺, 实现对压电变形区直径的精确控制。图3(a)展示了自制PVDF压电传感器, 其敏感区的直径为5 mm。为了确保其性能和稳定性, 采用了双面丝印密封胶的聚酰亚胺薄膜进行封装, 总体厚度约为130  $\mu\text{m}$ 。



(a) PVDF压电传感器



(b) PVC基底



(c) 激波管设备

图3 实验设备

Fig. 3 Experimental equipment

图3(b)展示了用于固定PVDF传感器的PVC基底, 其具备不同孔径的变形区。可以通过设计基底的开孔方式来直接影响PVDF传感器敏感区的变形模式。实验中, 使用图3(c)中所示的激波管设备来生成冲击波, 并将其加载到配置好的传感器上, 进行冲击波标定实验。标定过程中, 采用PCB 113B24标准传感器作为PVDF传感器信号的校准基准。激波管设备被分为驱动端和被驱动端, 长度分别为53 cm和300 cm。为了

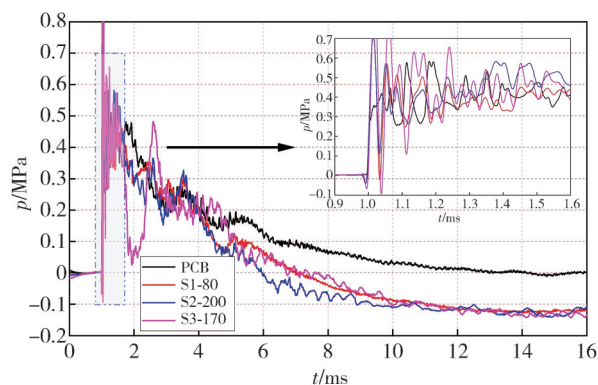
确保实验结果的准确性, 使用厚度分别为50, 100和200  $\mu\text{m}$ 的Mylar膜来调节冲击波的强度, 并研究了冲击波的强度范围, 以确保实验的可靠性。

## 2 冲击波测试与分析

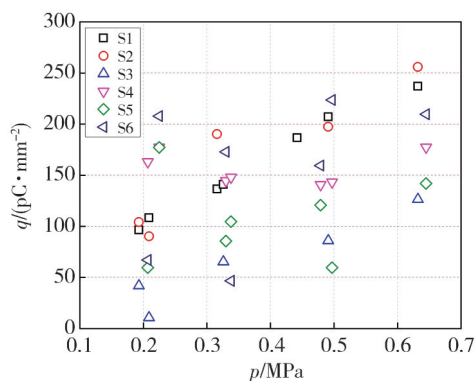
使用激波管, 在不同冲击波强度下对薄膜传感器进行冲击波测量以及灵敏度标定实验。分别制备3, 5及8 mm孔径的PVC基底, 通过批量化标定实验统计传感器输出电荷量密度随压力的变化规律并且评估其力电响应特征, 此外, 统计不同PVC基底变形区同批次传感器输出的个体差异, 从而综合评估不同基底对柔性传感器冲击波测量性能的影响。

### 2.1 3 mm直径变形区的冲击波测量结果

图4为变形区直径3 mm的PVDF传感器在不同冲击波强度作用下的压力随时间变化的曲线以及该传感器的力电响应统计图。



(a) 压力变化曲线



(b) 力电响应特征

图4 3 mm直径变形区冲击波测量结果

Fig. 4 Measurement results for shock waves with deformation zone diameter of 3 mm

由图4(a)可以看出, 3支PVDF传感器和PCB传感器在测量波形方面的吻合度较低, 高频

信号振荡严重。经分析认为,这种现象与冲击波在测量元件表面产生的反射与高频振动效应有关。在这种基底条件下,PVDF传感器的过冲信号幅值为0.186~0.598 MPa,远远超过同等压力下PCB传感器的过冲信号幅值。同时,PVDF传感器的脉宽不超过5 ms,远远小于PCB传感器的脉宽,这不利于PVDF传感器对信号的准确测量。

图4(b)为3 mm孔径基底条件下PVDF传感器的力电响应结果统计图。从统计结果来看,此时力电响应特征较差,表现出明显的非线性特征。此外,同一批次不同传感器之间的力电响应结果吻合度较低,传感器之间存在较大的个体差异性。传感器的名义灵敏度为80~200 pC/N,并且在当前压力幅值下,灵敏度系数波动较大,信号放大倍数差值超过一倍。推测可能是由于3 mm变形区的面积较小,导致在相同压力下传感器敏感区的变形挠度较小,只能在压电片表面产生较少的电荷,从而导致较低的灵敏度系数和较大的误差。

### 2.2 5 mm 直径变形区冲击波测量结果

对5 mm直径变形区传感器进行冲击波加载实验,通过加载不同强度的冲击波来分析在这种基底条件下的信号质量。通过图5(a)可知,当PVC基底变形区孔径为5 mm时,其过冲信号幅值为0.164~0.496 MPa,与PCB标准传感器的0.027~0.066 MPa相比,这个幅度明显大的多。除此之外,三支PVDF传感器之间的信号匹配程度较好,但信号的脉宽只有5 ms,远低于PCB传感器的脉宽范围。

如图5(b)所示,对于单个PVDF传感器,其输出电荷量密度与压力整体为线性递增函数。通过观察同批次不同PVDF传感器的力电响应特征,可以发现各传感器之间的一致性较好,灵敏度系数较为稳定,大体在700~800 pC/N之间。综上所述,在基底上预设5 mm直径的圆孔作为PVDF传感器的变形区,有助于在冲击波作用下,传感器敏感区产生稳定电信号。

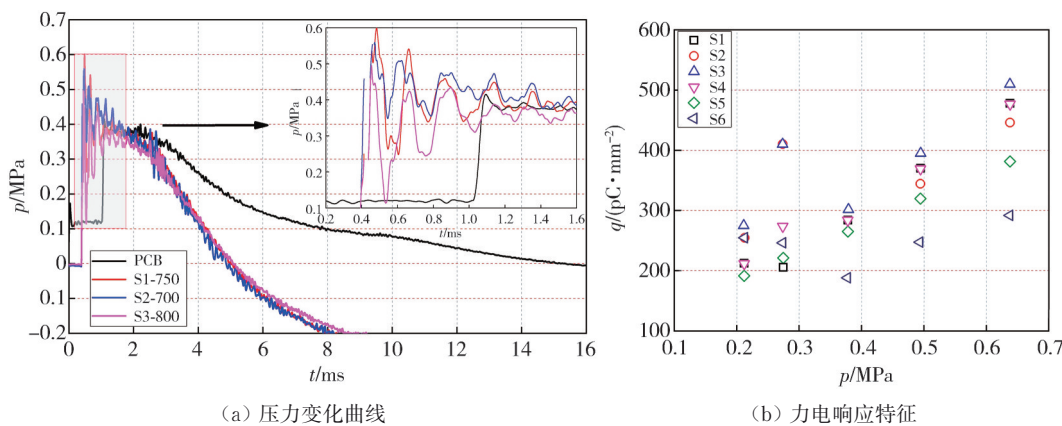


图5 5 mm直径变形区的冲击波测量结果

Fig. 5 Measurement results for shock waves with deformation zone diameter of 5 mm

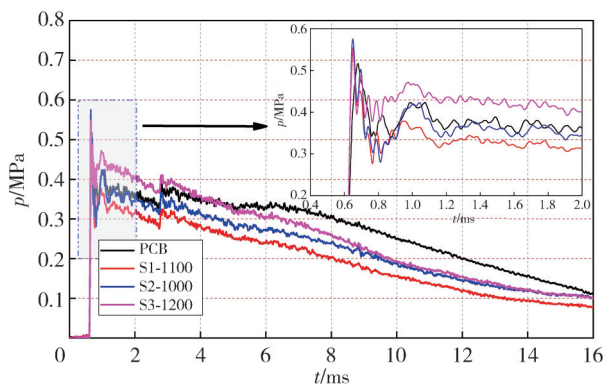
### 2.3 8 mm 直径变形区的冲击波测量结果

图6为变形区直径8 mm的PVDF传感器在不同冲击波强度作用下压力随时间变化的曲线以及该传感器的力电响应统计图。由图6(a)可以看出,3支PVDF传感器的一致性很高,且脉宽相较于基底孔径5 mm的实验结果有较大提升,略小于PCB传感器的脉宽。通过分析实验结果,发现PVDF的过冲信号幅度约为0.026~0.276 MPa,此时PCB标准传感器的过冲信号幅值为0.029~0.094 MPa。说明在一定范围内,改变PVC基底孔径的大小,能够有效降低过冲信号幅值,保证信号测试的准确性与稳定性。

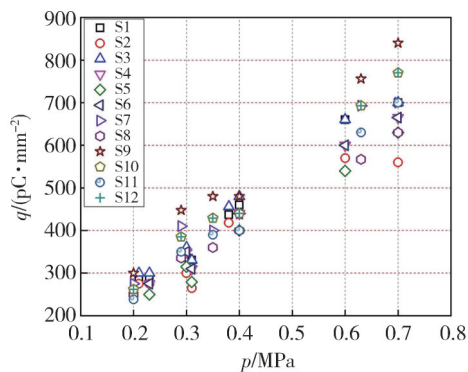
由图6(b)可知,电荷量密度随压力值的增加而增加。相较于3 mm和5 mm孔径基底条件下的实验结果,从拟合关系上看,薄膜传感器的电荷量密度与压力值呈较好的线性关系,说明在这个压力范围内,传感器的灵敏度系数保持较好的稳定性。此外,受粘贴手法、压电膜的平整度等传感器制作工艺因素的影响,各个传感器之间会存在个体性的差异。此时PVDF传感器的名义灵敏度为1 000~1 200 pC/N,在这个系数范围内,可以近似将其看作常数。同时,随着PVC基底孔径的增大,PVDF传感器的名义灵敏度显著提升。

通过上述实验可知,3 mm变形区直径的传感器的性能最不稳定,表现为较低的灵敏度系数,

并且极易受到干扰。相比之下, 5 mm 孔径的 PVDF 传感器则具有更高的灵敏度系数和更优质的输出信号, 但其脉宽较窄, 且在高频部分呈现明显振荡。这两种高频传感器的性能均未达到预期水平。



(a) 压力变化曲线



(b) 力电响应特征

图 6 8 mm 直径变形区冲击波测量结果

Fig. 6 Measurement results for shock waves with deformation zone diameter of 8 mm

与上述两种传感器相比在, 8 mm 的孔距配置下, 尽管传感器的频响略有下降, 但整体性能表现更出色。其具有较高的灵敏度、较低的振荡, 同时小幅过冲信号方面的性能得到明显改善。这些特性使得 8 mm 孔径传感器成为目前最佳的配置选择, 适用于爆炸冲击波的测量应用。

实验结果还表明, 在运用复合压电效应之后, PVDF 薄膜传感器的灵敏度系数有显著提升, 且在同一组传感器之间的差异较小。但是, 即使采用基底孔径为 8 mm 的 PVC 基底, PVDF 传感器的脉宽仍然远远小于 PCB 脉宽, 且在高频部分的振荡仍然较为明显。因此, 为提高传感器性能, 后期工作将对此进行调整, 需要在保持带宽的基础上, 增加传感器的结构自振频率, 目前考虑通过采用更厚的传感器来实现。

### 3 爆炸冲击波测试

上述实验均是在激波管设备上加载冲击波来测试 PVDF 传感器的结果。然而, 在实际的爆炸冲击波测试中, 冲击波的强度通常较低且持续时间较短。常规军事行动中很少会出现持续 20 ms 的冲击波。因此, 为了评估传感器的测试性能, 需要将爆炸实验产生的窄脉冲宽度的冲击波加载到传感器上, 并分析 PVDF 传感器的响应结果以确定传感器是否能准确测量冲击波信号。在测试爆炸冲击波时, 除了需要传感器具有足够的灵敏度系数外, 还需要其具有可靠的整体结构和较高的固有频率, 以避免传感器与冲击波信号发生共振而引起信号的高频振荡。

通过外场爆炸实验检测研制的冲击波压力传感器的冲击波测量效果。实验采用 100 g 和 200 g 两种规格的 TNT 药柱, 分为自由场超压测试和反射场超压测试两个部分, 旨在验证传感器的测试性能。地面反射场的超压测试位置距离 TNT 炸药 1.2 m, 而自由场传感器与 TNT 炸药处于同一水平位置, 距离为 1.42 m。自由场和反射场标准压力信号分别通过 PCB 137 B22 笔式自由场超压传感器和 PCB 113 B24 反射超压传感器测量, 现场布置如图 7 所示。



图 7 炸药以及传感器现场布置

Fig. 7 Explosives and sensor field deployment

图 8(a) 展示了 PVDF 传感器在自由场超压测试中的实验结果。将 PVDF 传感器粘贴在自由场标准传感器上, 使用自由场标准传感器对 PVDF 传感器的灵敏度系数进行校准。由图 8(a) 可以看出: 自由场标准传感器的信号脉宽约为 1 100  $\mu$ s, 而 PVDF 传感器的信号脉宽略低于自由场标准传感器。从信号的形状来看, 自制的

PVDF 传感器的测试信号与标准传感器相似，二者信号衰减形状较为一致。测试信号的准确性要求传感器具有足够大的灵敏度系数，以确保传感器的相对稳定性。与标准传感器相比较，PVDF 传感器在自由场冲击波测试中的信号上升沿时间大约比标准传感器快 30  $\mu\text{s}$ 。因为信号脉宽持续时间较长，所以由信号上升沿时间差异带来的测试误差不会影响测试的准确性。在自由场中进行的冲击波测试中，由于冲击波强度较低，这就要求 PVDF 传感器具有较大的灵敏度系数，测试结果显示 PVDF 传感器的灵敏度系数为 800pC/N，该灵敏度系数能够满足测试的需求。

性的影响较小。与自由场超压测试中的 PVDF 传感器测试的结果相比，反射场超压测试中 PVDF 传感器的测试信号脉宽与标准传感器更为接近，信号衰减形状也更为一致。因此，在使用孔径 8 mm 变形区基底的 PVDF 传感器进行信号测试时，可以获得良好的测试结果。实验表明，这种传感器的灵敏度系数较高也相对稳定。

### 4 结 论

本文基于复合压电效应制备了不同基底的 PVDF 薄膜传感器，通过理论分析和系统实验，探讨不同变形模式对传感器性能的影响。得到的结论如下：

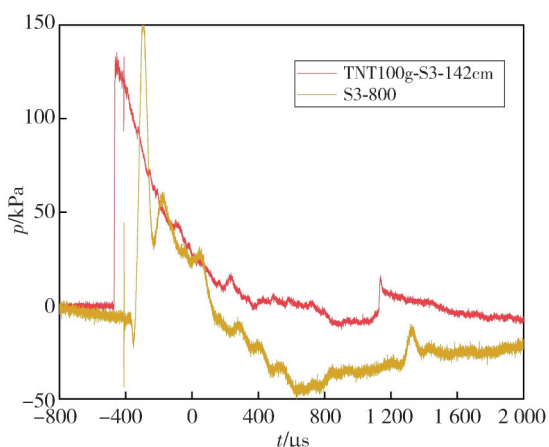
- 1) 对于基底孔径为 3 mm 的 PVDF 传感器，由于变形区的面积较小，传感器的一致性和灵敏度系数的稳定性易受影响，导致信号质量差，信号振荡严重。
- 2) 将孔径增大至 5 mm 后，传感器灵敏度系数和信号质量显著提高，但信号脉宽仍然较窄，且在高频部分仍存在较严重的振荡现象。
- 3) 将孔径增大至 8 mm 后，传感器的信号脉宽和灵敏度系数再一次提升。同时，过冲信号幅度降低，这进一步确保了信号测试的准确性和稳定性。
- 4) 爆炸实验表明 8 mm 孔径的 PVDF 传感器能够准确测量爆炸冲击波信号。该传感器具有较高的灵敏度系数和结构的稳定性，能够有效避免共振和高频振荡现象的发生。

综上所述，通过对 PVC 基底的孔径和结构进行优化，可以提高传感器的灵敏度和信号质量。这为柔性测试技术在低强度冲击波测量领域的应用提供了新的可能性。后续研究将进一步关注如何优化传感器的脉宽并减少高频振荡，以提高信号的稳定性和准确度。

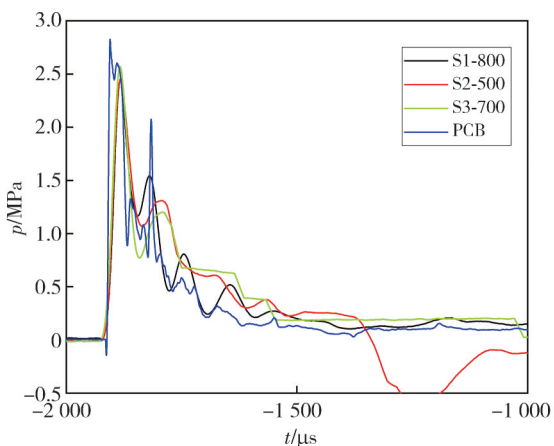
### 参考文献：

[ 1 ] CLIPPINGER F W, AVERY R, TITUS B. A sensory feedback system for an upper-limb amputation prosthesis[J]. Bulletin of Prosthetics Research, 1974, 10: 247-258.

[ 2 ] HAMMOCK M L, CHORTOS A, TEE B C K, et al. 25th anniversary article: The evolution of electronic skin (e-skin): A brief history, design considerations, and recent progress[J]. Advanced Materials,



(a) 自由场冲击波信号



(b) 反射场冲击波信号

图 8 超压测试结果

Fig. 8 Results of overpressure testing

图 8(b) 为 PVDF 传感器在反射场超压测试中的实验结果。3 支传感器的信号形状相似，灵敏度系数均在 500~800 pC/N 之间，整体上比较稳定。相较于 PCB 传感器，PVDF 传感器的信号上升沿时间略长，约为 25  $\mu\text{s}$ ，但是对信号测试准确

- 2013, 25(42): 5997-6038.
- [3] HUANG Y, FAN X, CHEN S C, et al. Emerging technologies of flexible pressure sensors: Materials, modeling, devices, and manufacturing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(12): 1808509.1-1808509.24.
- [4] 骆泽伟, 田希悦, 范基辰, 等. 智能时代下的新型柔性压阻传感器[J]. *材料导报*, 2020, 34(1): 1069-1079.  
LUO Zewei, TIAN Xiyue, FAN Jichen, et al. Novel flexible resistive sensors in the age of intelligence[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(1): 1069-1079. (in Chinese)
- [5] 彭军, 李津, 李伟, 等. 柔性可穿戴电子应变传感器的研究现状与应用[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(1): 57-62.  
PENG Jun, LI Jin, LI Wei, et al. Research progress and application of flexible wearable electronic strain sensor[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(1): 57-62. (in Chinese)
- [6] 赵帅, 朱荣. 多感知集成的柔性电子皮肤[J]. *化学学报*, 2019, 77(12): 1250-1262.  
ZHAO Shuai, ZHU Rong. Flexible electronic skin with multisensory integration[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2019, 77(12): 1250-1262. (in Chinese)
- [7] 周剑, 侯占强, 肖定邦. 极端环境下压力传感器的研究进展[J]. *国防科技*, 2015, 36(4): 15-19.  
ZHOU Jian, HOU Zhanqiang, XIAO Dingbang. Review on pressure sensors in harsh environment[J]. *National Defense Science & Technology*, 2015, 36(4): 15-19. (in Chinese)
- [8] WANG G, LIU T, SUN X C, et al. Flexible pressure sensor based on PVDF nanofiber [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2018, 280: 319-325.
- [9] GUO R, ZHANG H, CAO S, et al. A self-powered stretchable sensor fabricated by serpentine PVDF film for multiple dynamic monitoring [J]. *Materials and Design*, 2019, 182: 108025.
- [10] KOH A, KANG D, XUE Y, et al. A soft, wearable microfluidic device for the capture, storage, and colorimetric sensing of sweat [J]. *Science Translational Medicine*, 2016, 8(366): 366165.
- [11] CHU Y, ZHONG J W, LIU H L, et al. Human pulse diagnosis for medical assessments using a wearable piezoelectric sensing system[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(40): 1803413.
- [12] MU J K, HOU C Y, WANG G, et al. An elastic transparent conductor based on hierarchically wrinkled reduced graphene oxide for artificial muscles and sensors[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(43): 9491-9497.
- [13] GUO Y J, GAO S, YUE W J, et al. Anodized aluminum oxide-assisted low-cost flexible capacitive pressure sensors based on double-sided nanopillars by a facile fabrication method[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(51): 48594-48603.
- [14] WANG X D, ZHANG H L, YU R M, et al. Dynamic Pressure mapping of personalized handwriting by a flexible sensor matrix based on the mechanoluminescence process [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(14): 2324-2331.
- [15] WANG A, HU M, ZHOU L, et al. Self-Powered wearable pressure sensors with enhanced piezoelectric properties of aligned P(VDF-TrFE)/MWCNT composites for monitoring human physiological and muscle motion signs[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(12): 1021.
- [16] 范志强, 常瀚林, 何天明, 等. 基于PVDF复合压电效应的低强度冲击波柔性测量[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(1): 73-85.  
FAN Zhiqiang, CHANG Hanlin, HE Tianming, et al. Flexible measurement of low-intensity shock wave based on coupling piezoelectric effect of PVDF [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(1): 73-85. (in Chinese)
- [17] 吴如兆. 高频冲击波测量专用压力传感器研究[D]. 上海: 复旦大学, 2010.