

文章编号: 1001-1455(2005)04-0350-05

# 混凝土结构内冲击波应力传感器设计及其行为\*

余尚江<sup>1,2</sup>, 李科杰<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081;

2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 为测量混凝土结构内的冲击波应力, 研制了 PVDF 压力传感器; 介绍了传感器的原理和设计思想, 通过传感器的标定试验, 得出传感器与混凝土介质匹配性能稳定, 通过修正传感器灵敏度或采用将传感器打入包体标定的方法可减小应力测量误差; 最后介绍了传感器在混凝土结构内药包爆炸应力波测试中的应用。

**关键词:** 爆炸力学; PVDF 传感器; 标定试验; 混凝土; 冲击波

**中图分类号:** O384

**国标学科代码:** 130 · 3599

**文献标志码:** A

## 1 引言

混凝土是一种应用广泛的工程复合材料, 由于施工方便、价格低廉, 一直是最基本的建筑材料和国防、人防工程中的主要防护材料。混凝土和混凝土类材料在冲击荷载作用下的性能, 在研究地震、突发冲击或爆炸等极端条件下的安全方面不可缺少。研究混凝土冲击或抗爆性能需要了解结构构件在荷载作用下内部应力的分布情况。目前, 随硬目标侵彻武器的发展, 钻地武器的侵彻机理研究以及侵彻爆炸效应研究也需要测量混凝土靶板或结构内的冲击应力, 以便为侵彻武器的研究与性能改进以及防护材料和防护结构的研究提供必要的的数据。此外, 混凝土或岩石等材料内爆炸冲击应力波测试, 对爆破破岩机理的研究都很有意义。

混凝土材料内冲击波的压力测量, 应用较多的是应变式和压电晶体式压力传感器。随着新材料和加工技术的发展, 也开发了很多新原理和结构的传感器。J. K. Gran 等<sup>[1]</sup>研制了扁平式镱应力传感器, 利用金属镱材料的压阻效应, 测量直径 50 mm 的射弹侵彻抗压强度 43 MPa 的混凝土目标的过程中侵彻轨迹附近径向、切向和轴向应力。席道瑛等<sup>[2]</sup>、刘剑飞等<sup>[3]</sup>将 PVDF 薄膜夹持在由四段短试件粘接成的长试件的各段之间, 在 Hopkinson 杆装置上研究了应力波在铝、大理石、砂岩试件中的衰减规律, 同时, 还用 PVDF 薄膜研究了低阻抗介质(硬质聚氨酯泡沫塑料)的动态应力应变关系。

本文中主要介绍 PVDF 压力传感器及其应用于混凝土结构内测量冲击波压力的试验。

## 2 PVDF 压力传感器原理及设计

PVDF 压力传感器是利用聚偏氟乙烯(PVDF)薄膜的压电效应制成的。PVDF 薄膜经过极化处理, 受压时, 在垂直于极化方向的表面上产生电荷, 即 PVDF 薄膜有了压电效应。当把极化方向为厚度方向的 PVDF 薄膜置于三维压力场中时, 根据 PVDF 薄膜的压电方程, 在垂直于厚度方向的表面上产生的电荷

$$Q = d_{33} S_0 p_3 + d_{32} S_0 p_2 + d_{31} S_0 p_1 \quad (1)$$

式中:  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  分别为长度、宽度、厚度方向(设为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向)上受到的压力;  $d_{33}$ 、 $d_{32}$ 、 $d_{31}$  分别为  $p_3$ 、 $p_2$ 、 $p_1$  在  $z$  方向的压电常数;  $S_0$  为 PVDF 薄膜的有效表面积;  $Q$  为  $z$  方向产生的电荷。

PVDF 薄膜的压电常数  $d_{33}$ 、 $d_{32}$ 、 $d_{31}$  在数值上为同一个数量级, 由式(1)可看出, PVDF 薄膜直接用

\* 收稿日期: 2004-09-10; 修回日期: 2004-11-01

作者简介: 余尚江(1968—), 男, 博士研究生, 副研究员。

来测量介质内的压力时,输出的电荷反映的是三个方向压力的综合,而实际使用时,希望测量介质内某一方向的压力。为此在设计 PVDF 压力传感器时,需设法减小 PVDF 薄膜在  $x$ 、 $y$  方向上的敏感性,即降低传感器的横向灵敏度。在式(1)中,当  $d_{32}S_0p_2 + d_{31}S_0p_1 \ll d_{33}S_0p_3$  时,则  $Q \approx d_{33}S_0p_3$ , 此时,传感器输出的电荷反映的是  $z$  方向的受力情况,即认为传感器具有单向敏感性。

要保证  $Q \approx d_{33}S_0p_3$  成立,只有使横向灵敏度比  $m = (d_{32} + d_{31})/d_{33} \ll 1$ 。PVDF 薄膜的输出归根是由在压力作用下的薄膜变形引起的,因此在设计以 PVDF 薄膜为敏感元件的压力传感器时,应尽量减少 PVDF 薄膜在  $x$ 、 $y$  方向上的受力变形。将 PVDF 薄膜粘接固定在刚度较大的钢板上,这样在受到同样大小的压力时,在  $x$ 、 $y$  方向上通过钢板传递到 PVDF 薄膜上的变形则要比 PVDF 薄膜在自由状态下的受力变形小得多,而在  $z$  方向上可以自由变形。实际上相当于改变了 PVDF 薄膜在  $x$ 、 $y$  方向的压电常数,使传感器的横向灵敏度比大大减小。采用专门设计的加载装置,使采用此方法设计的传感器在  $x$  方向或  $y$  方向单独受力。测试出传感器在  $x$  和  $y$  方向的灵敏度(即横向灵敏度),将这两个横向灵敏度之和与传感器在  $z$  方向的灵敏度进行比较,可得出传感器的横向灵敏度比。试验表明,传感器的横向灵敏度比为  $3.1\%^{[4]}$ 。

设计的 PVDF 压力传感器如图 1 所示,将 PVDF 压电薄膜粘接固定在不锈钢底座上,引线处用压线块压紧,并采用胶密封,一方面起防潮作用,另一方面减小了传感器埋入介质后引线焊点处受力的影响。由于 PVDF 压电薄膜对弯曲很敏感,基片钢板不仅具有减小传感器横向灵敏度比的作用,还具有减小弯曲影响的作用,因此基片要有一定厚度。

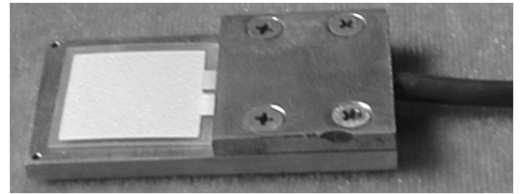


图 1 PVDF 压力传感器

Fig. 1 Photograph of the PVDF pressure sensor

### 3 传感器的标定试验

#### 3.1 准静态标定试验

准静态标定是将传感器浸入液压标定油罐中,通过活塞压力计加压,最高压力为 60 MPa,传感器的输出经电荷放大器转换放大后,由数字电压表记录。准静态标定的目的就是为得出传感器的静态灵敏度,同时也能反映传感器的线性度、重复性和迟滞等静态特性指标。PVDF 压力传感器准静态标定的典型曲线如图 2 所示,试验得出传感器的三个主要静态性能指标均小于  $1\%$ 。

#### 3.2 动态标定试验

动态标定试验在  $\varnothing 100$  mm 霍普金森压杆装置上进行,如图 3 所示。由于试验中把 PVDF 粘贴在霍普金森压杆端面上,与 PVDF 压力传感器中 PVDF 粘贴在厚不锈钢板上一致,所以该标定方法实质上是对 PVDF 压力传感器进行动态校准。标定时通过输入杆和输出杆上的应变计记录的应变值换算出作用于 PVDF 薄膜上的压力值,由记录的 PVDF 薄膜的输出可计算出传感器的动态灵敏度。由于每片的厚度及粘胶厚度稍有不同,每片受力大小不同使每片输出电荷有差别,由于同批同类型的 PVDF 薄膜的输出灵敏度相差很小,所以数据处理时可取 6 片输出的平均值。应变片记录的入射波、透射波和 PVDF 记录的压力波形如图 4~6 所示(图中压应变为负)。动态标定的结果为传感器动、静灵敏度基本一致。

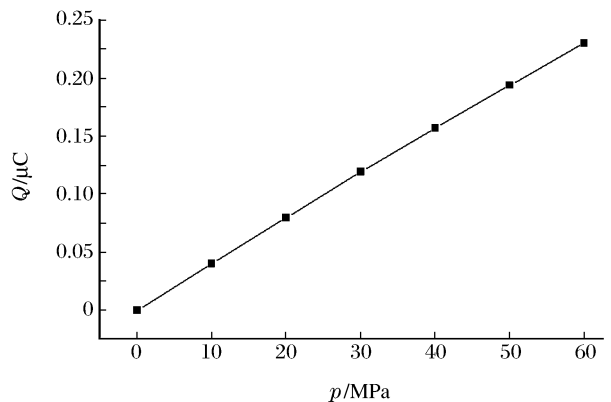


图 2 传感器准静态标定曲线

Fig. 2 Quas-static calibration curve of the PVDF sensor

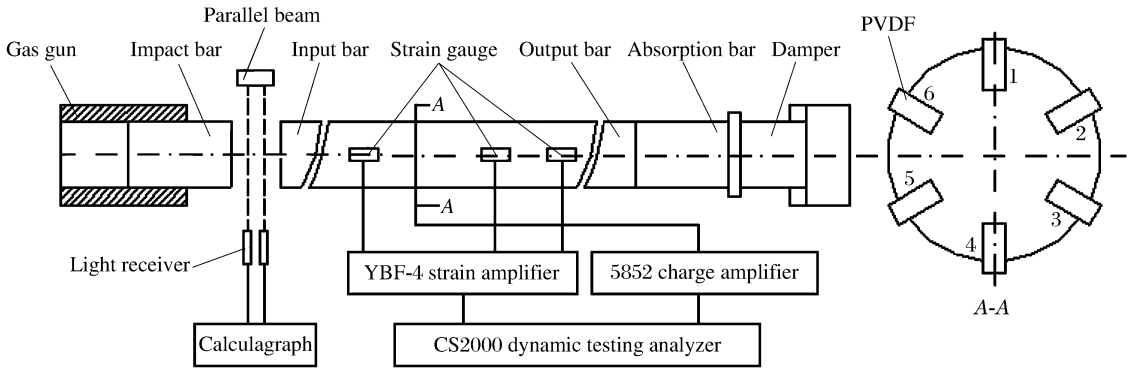


图 3 霍普金森压杆标定装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the SHPB apparatus

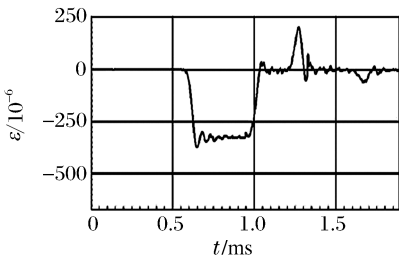


图 4 应变片记录的入射波波形  
Fig. 4 Incident wave measured with strain gauge

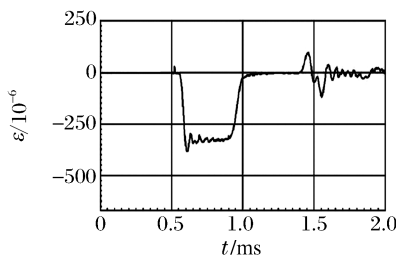


图 5 应变片记录的透射波波形  
Fig. 5 Transmitted wave measured with strain gauge

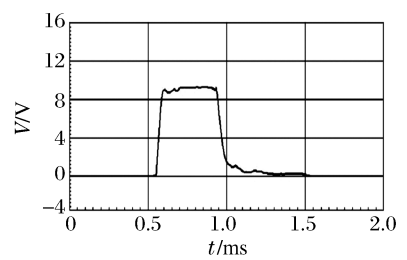


图 6 PVDF 记录的波形  
Fig. 6 Waves measured with PVDF sensor

### 3.3 混凝土中动态标定试验

混凝土中动态标定试验是将传感器打筑在圆饼状试块中心,试块制作模具及制作后的试块如图 7 所示。制作好的试块两个端面经过研磨并保证两端面平行。此次试验为和静态标定比较,要在较大压力下标定传感器,要求试块具有较高的抗压强度,因此混凝土配料选用金刚砂和 525 水泥,制作后的试块抗压强度为 70~80 MPa。



图 7 试块制作模具及制作后的试块

Fig. 7 Photographs of the mould and specimen

试验在霍普金森杆装置上进行,试验装置如图 3 所示,将打筑有传感器的混凝土试块夹在霍普金森杆的输入杆和输出杆之间。炮弹撞击输入杆产生的应力波经试块传到输出杆,由于试块很短,应力在试块内没有衰减,这从输入杆和输出杆上应变片实测的应变值相等也得到证实。测得的人射波、透射波以及传感器测得的压力波形如图 8~10 所示。

混凝土中动态标定试验结果为,传感器在混凝土试块中的动态灵敏度比准静态和动态标定灵敏度约大 10%~15%。这反映了传感器与混凝土介质的匹配误差。

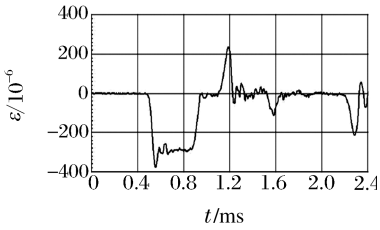


图 8 应变片记录的人射波波形  
Fig. 8 Incident wave measured with strain gauge

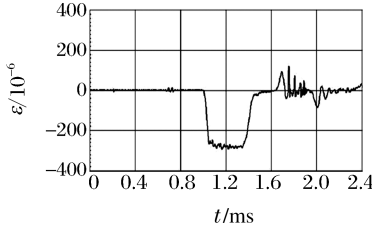


图 9 应变片记录的透射波波形  
Fig. 9 Transmitted wave measured with strain gauge

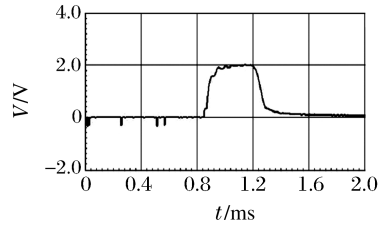


图 10 传感器记录的压力波形  
Fig. 10 Pressure waves measured with PVDF sensor

### 3.4 试验结果

(1)传感器的动态灵敏度与静态灵敏度一致,试验时可用静态灵敏度代替动态灵敏度。

(2)如果传感器在打筑过程中与混凝土介质接触较好,传感器在混凝土介质中的灵敏度与静态标定灵敏度的差值变化不大,即传感器与混凝土介质的匹配性能较稳定,在精度要求不高的情况下,可将准静态标定时的灵敏度进行修正后作为混凝土介质中的灵敏度。传感器灵敏度修正系数与传感器的结构和形状等因素有关,对于本文中研制的 PVDF 压力传感器,修正系数为 1.15<sup>[4]</sup>。

(3)如果对测试精度要求较高,可将传感器打筑在与被测混凝土配方相同的试块包体中,通过对试块包体进行动态或静态标定,得到传感器在混凝土介质中的灵敏度,然后将试块打入混凝土结构中测量冲击波应力,这样可以消除传感器在混凝土浇注过程中的误差以及与混凝土介质的匹配误差。

## 4 混凝土中药包爆炸应力波测试

已在多次试验中用 PVDF 压力传感器测量混凝土中的冲击波应力,这里只介绍传感器用于某聚集爆炸模拟试验测试混凝土中药包爆炸应力波的情况。试验如图 11 所示,传感器打筑在长 500 mm、宽 500 mm、高 400 mm 的素混凝土体内,传感器感压面朝向药包方向,测量药包爆炸后在混凝土内产生的应力波。此次试验中传感器的灵敏度采用先准静态标定,然后进行修正的方法得到。图 12 为其中一个构件内两个传感器记录下的应力波波形,靠近药包的传感器记录的应力波峰值压力为 0.46 MPa,另一个传感器记录的峰值压力为 0.37 MPa,反映了应力波在混凝土内的衰减及爆炸压力的特征。

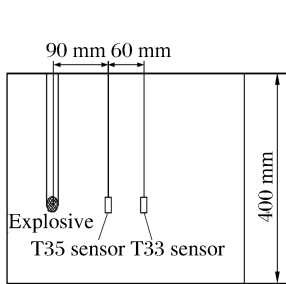


图 11 混凝土试件  
Fig. 11 Specimen of concrete

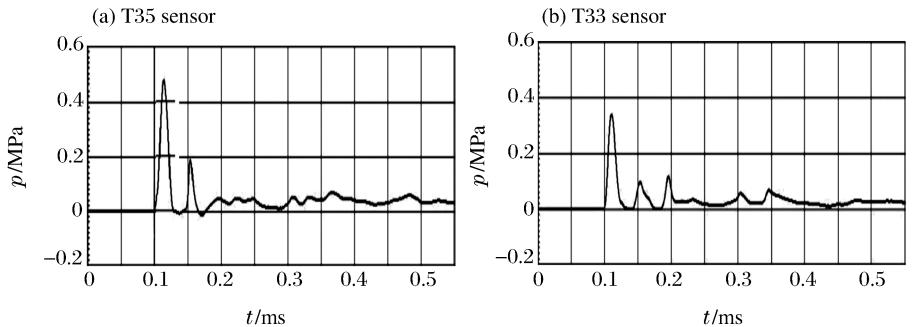


图 12 实测压力波形  
Fig. 12 Pressure waves measured with PVDF sensor

## 5 结论

PVDF 压力传感器体积小、结构扁平,是一种利用新材料制成的传感器,具有灵敏度高、量程范围宽、频响较高、价格低廉等优点;传感器的结构设计减小了横向灵敏度,且考虑了安装定位孔,便于传感器的安装埋设。试验表明,传感器与介质的匹配误差小且稳定,通过修正可减小应力测量误差;测量混凝土类介质的传感器一般都存在与介质的匹配问题,直接利用单体标定时的灵敏度会引起测量误差,岩土压力传感器应加强与介质的匹配误差研究。总之,PVDF 压力传感器的研制为混凝土结构内的冲击

波应力的测试提供了一种新的手段,为混凝土类介质中应力测量提供了能够降低测试误差的试验方法和途径。

### 参考文献:

- [1] Gran J K, Moxley R E, Adley M D. Measurement of triaxial stresses during deep penetration into concrete[A]. Proceedings of the 9th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures[C]. Berlin: Strausberg, 1999: 307-314.
- [2] 席道瑛, 郑永来. PVDF 压电计在动态应力测量中的应用[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2): 174-179.  
XI Dao-ying, ZHENG Yong-lai. Application of PVDF gauges to dynamical stress measurements[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2): 174-179.
- [3] 刘剑飞, 胡时胜. PVDF 压电计在低阻介质动态力学性能测试中的应用[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 229-234.  
Liu JIAN-fei, HU Shi-sheng. Application of PVDF gauges to determine dynamic mechanical behaviour of low wave impedance material[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(3): 229-234.
- [4] 曾辉, 余尚江. PVDF 传感器性能试验报告[R]. 中国国防科学技术报告. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 2003.

## Design and performance of PVDF pressure sensor for shock wave measurement in concrete structures

YU Shang-jiang<sup>1,2\*</sup>, LI Ke-jie<sup>1</sup>

(1. School of Mechano-Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology,  
Beijing 100081, China;

2. The Third Science and Technology Institute of Engineering Corps, General Staff, PLA,  
Luoyang 471023, Henan, China)

**Abstract:** PVDF pressure sensor has been developed to measure shock waves in concrete structures. The work principle and design methodology of the sensor are briefly introduced. Stable capacity of the sensor has been verified through calibration tests, and the measuring error of the sensor can be reduced by sensitivity correction. Finally, application in stress wave measurement of explosion in concrete is discussed.

**Key words:** mechanics of explosion; PVDF sensor; calibration test; concrete; shock wave

---

\* Corresponding author: YU Shang-jiang  
E-mail address: sj\_yu@126.com  
Telephone: 0379-65981431