

由上可见, 结合应力波理论来判读分析等差条纹图, 能使条纹分布与应力分布密切结合, 也能更准确地判定各条纹的级数。

4 结 语

动光弹等差条纹的分析与判读, 是动光弹应用中的关键步骤。本文在阐述动光弹基本原理的同时, 也回答了惯性力能否忽略不计等问题。本文还提出了把应力波理论与动光弹等差条纹分析判读相结合的方法。并以一维杆为例, 从理论上进行了讨论。实践表明, 这样不仅使等差条纹运动变化的概念更加清晰明确, 而且能使等差条纹的分析判读更准确、更方便。

参 考 文 献

- 1 Durelli AJ, Shukla A. Identification of isochromatic fringes. *Exp Mech*, 1983, 23(1): 111~119
- 2 苏先基, 励争. 固体力学动态测试技术. 北京: 高等教育出版社, 1997. 115~158 (Su Xianji, Li Zheng. Dynamic Test Technique of Solid Mechanics. Beijing: Higher Education Press, 1997. 115~158 (in Chinese))
- 3 柯克斯 A, 罗伯逊 G 著. 王夔山等译. 光弹性应力分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. 443~453 (Kuske A, Robertson G. Photoelastic Stress Analysis. John Wiley & Sone. Shanghai: Shanghai Science Technology Press, 1979. 443~453 (in Chinese))
- 4 天津大学材料力学教研室光弹组. 光弹性原理及测试技术. 北京: 科学出版社, 1980. 95 (Material Mechanics Staff Room of Tianjin University. Photoelastic Principal and its Test Technique. Beijing: Science Press, 1980. 95 (in Chinese))
- 5 杨桂通, 张善元. 弹性动力学. 北京: 中国铁道出版社, 1988. 13

(Yang Guitong, Zhang Shanyuan. Elastic dynamics. Beijing: China Railway Press, 1988. 13 (in Chinese))

- 6 王礼立. 应力波基础. 北京: 国防工业出版社, 1985. 1~4, 5~16 (Wang Lili. Stress wave basis. Beijing: National Defence Industry Press, 1985. 1~4, 5~16 (in Chinese))

STRESS WAVE AND IDENTIFICATION OF ISOCHROMATIC FRINGES IN DYNAMIC PHOTOELASTICITY

LU Yusheng* ZOU Tongbin*

LIAN Zhiying† GUO Zhikun*

*(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

†(Engineering Design Academy of PLA Second Artillery, Beijing 100011, China)

Abstract In this paper, the fundamental principle of dynamic photoelasticity is introduced. Some issues concerned such as the applicability of stress-optics law and whether the inertia force can be neglected or not etc., are answered theoretically. Based on summarizing all sorts of identification ways, a method to combine stress wave theory with analyzing isochromatic fringes is proposed. As a result, not only the concept of identification is made more distinct, but also the accuracy of analysis and identification can be increased.

Key words dynamic photoelasticity, isochromatic fringes, stress wave

PVDF 压电薄膜在应力波测量中的应用

赵红平* 叶琳† 陆中琪†

*(清华大学工程力学系, 北京 100084; 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

†(第二炮兵工程设计研究院, 北京 100011)

摘要 综合介绍了 PVDF 压力传感器的测试原理、动态标定实验, 并采用定制的 PVDF 压力传感器测量了不同类型分层介质在冲击载荷作用下的压力衰减, 说明了 PVDF 压力传感器在压力测量中有着很好的前景。

关键词 PVDF 薄膜, 轻气炮, 泡沫铝, 应力波

1 前 言

聚偏氟乙烯薄膜 (PVDF) 是近年来发展较快的一种新型高分子敏感和换能材料。它是以 $-\text{CH}_2-\text{CF}_2-$ 为单位

的长链状高分子。由于 $-\text{CH}_2-$ 是强偶极子, 因此它具有较高的压电效应。在正常状态下, PVDF 薄膜是没有极化的, 但是在高温电场、电晕放电或离子极化后, 可以使它成为一种很强的感应体。当压力作用于极化后的 PVDF 压电薄膜上时, 就可以将压力信号转变成为易被外围电路处理的电信号, 从而成为一种非常有用的压力传感器。

早在 1921 年, D.A. Keys 就利用某些介质的压电现象来制作压力传感器, 但是把 PVDF 薄膜作为压力传感器则要归功于 1981 年法国的 Bauer。PVDF 压力传感器具有压

2002-12-25 收到第 1 稿, 2003-09-17 收到修改稿。

电系数大、频响宽、声阻抗易于匹配、机械强度高、质量轻和耐冲击的特点,因此易于加工成大面积且可重复性使用的传感器.由于PVDF薄膜在厚度上远比其他诸如石英、铌压电传感器要小很多,其厚度的量级为微米,故常常安置在被测材料的内部,因此又往往被称作材料传感器.美国Sandia国家实验室运用PVDF压力传感器用于监测地下核实验产生的地震波,可以测定出作用于其上的巨大压力.在我国,运用PVDF压力传感器进行动态压力测量的工作也取得了一定的进展,本文将运用PVDF压力传感器测量不同类型的分层介质在冲击载荷作用下的压力变化,以此讨论不同类型的分层介质的动态冲击响应.

2 PVDF 压力传感器的测试原理^[1]

无论对于什么压电介质,只有当压电材料的两极有了一定的压力梯度,才会在两极之间产生一定量的电荷,压电现象才会由此产生.一般而言,有

$$\sigma(0,t) = \frac{fA}{t_0} i(t), \quad 0 < t < t_0 \quad (1)$$

式中 $\sigma(0,t)$ 是在电极0以及在时间 t 时的应力, f 是压电系数, A 是压电敏感面积, t_0 则是波通过传感器的时间, $i(t)$ 是在时间 t 时的电荷量.传感器产生的电荷正比于两个电极间不同的应力水平.如图1所示,在 t_1 时刻,假定作用在PVDF压力传感器两端的应力分别为 σ_1 和 σ_2 ,因而有

$$i(t) \propto \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t_0} \quad (2)$$

$$t_0 = \frac{U}{x_0} \quad (3)$$

其中, U 是脉冲速度, x_0 是传感器的厚度.如图1(a)所示,当脉冲在 t_1 时刻通过PVDF传感器时,对于传感器两端的压力梯度 $\sigma_1 - \sigma_2 > 0$,则PVDF两极之间输出净电荷;当脉冲在 t_2 时刻通过PVDF传感器时,对于传感器两端的压力梯度 $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$,则PVDF两极之间输出零电荷;当脉冲在 t_3 时刻通过PVDF传感器时,对于传感器两端的压力梯度 $\sigma_1 - \sigma_2 < 0$,则PVDF两极之间输出反向净电荷.相应的电荷-时间曲线如图1(b)所示.由(2)式,

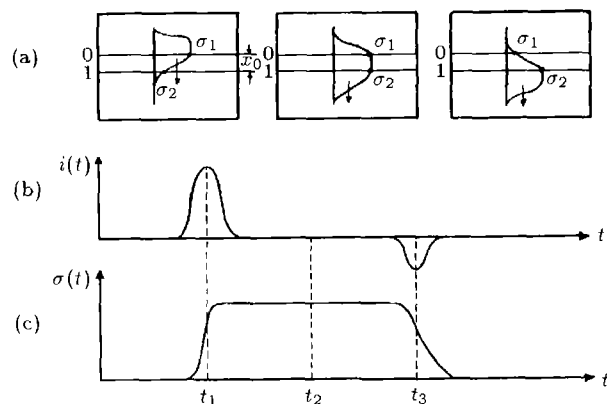


图1 PVDF 压电传感器测试原理曲线图

因此有

$$\sigma \propto \int i(t) dt \quad (4)$$

得到的应力波形如图1(c)所示.

根据静电学理论^[2],在无外加电场或恒电场条件下,因为电场强度 $E=0$,取PVDF压力传感器电荷密度为 D (也叫做电位移矢量),则通用的压电方程为

$$\left. \begin{aligned} D_x &= d_{11}\sigma_{xx} + d_{12}\sigma_{yy} + d_{13}\sigma_{zz} + d_{14}\sigma_{yz} + \\ &\quad d_{15}\sigma_{zx} + d_{16}\sigma_{xy} \\ D_y &= d_{21}\sigma_{xx} + d_{22}\sigma_{yy} + d_{23}\sigma_{zz} + d_{24}\sigma_{yz} + \\ &\quad d_{25}\sigma_{zx} + d_{26}\sigma_{xy} \\ D_z &= d_{31}\sigma_{xx} + d_{32}\sigma_{yy} + d_{33}\sigma_{zz} + d_{34}\sigma_{yz} + \\ &\quad d_{35}\sigma_{zx} + d_{36}\sigma_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

上式可以用矩阵形式来表示

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, $d_{ij}(i=1,2,3;j=1,2,\dots,6)$ 是压电应力系数或压电模量.考虑到PVDF压力传感器厚度方向上的尺寸远小于另外两个方向的尺寸,在实际运用中,一般都设计得使PVDF压力传感器在简单的受力状态,这样压电方程就可以大大得以简化.当在厚度方向(以 x 轴为例)受到外力作用而其它方向的作用力为零时,有 d_{21}, d_{31} 为0; $\sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \sigma_{xy}$ 为0,则在垂直于 x 轴的两平面上产生的电荷密度为

$$D_x = d_{11}\sigma_{xx} \quad (7)$$

$$q = d_{11}P = d_{11}A\sigma_{xx} \quad (8)$$

也就是说,PVDF压力传感器表面输出的电荷量是与垂直于其表面的应力成正比关系的.

3 PVDF 压力传感器的动态标定

采用辽宁锦州产的压电薄膜,根据实际运用的需要而设计制作了一种圆片型PVDF压力传感器.如图2所示.

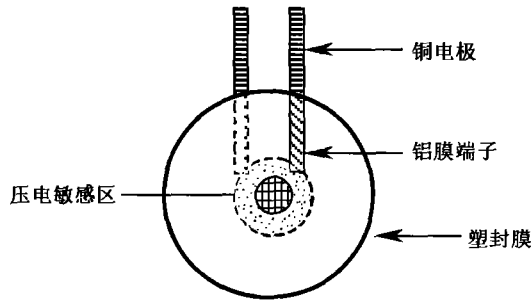


图 2 定制的 PVDF 压力传感器

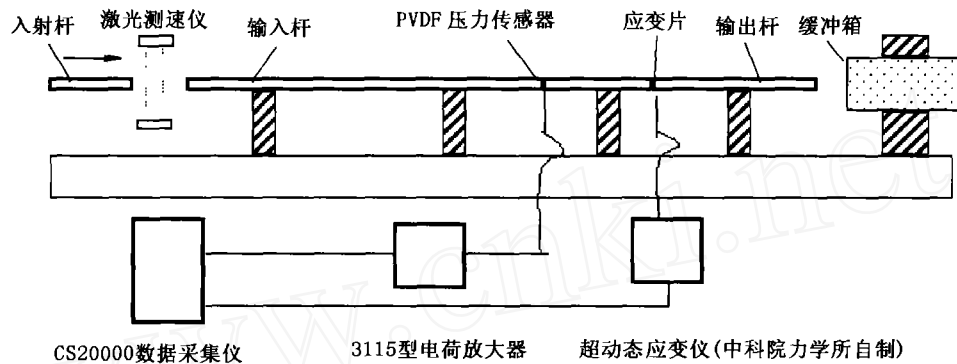


图 3 PVDF 压力传感器的动态标定实验系统

15 mm，被当作一般的试件夹置在输入杆和输出杆之间。考虑到输入杆和输出杆的质量较大，特地在缓冲箱的前面放置了直径为 30 mm 长度为 1 m 的能量吸收杆。在实验中我们发现，由于铜电极是非常良好的热传导介质，当把连接在铜电极的输出线焊接到连接在电荷放大器的低噪声电缆上时，往往会因为热的快速传导使 PVDF 压力传感器由于热应力的缘故而发生变形，导致 PVDF 压力传感器的损坏。因此我们在铜电极上钻孔，并利用绝缘黑胶布的自身黏性来连接 PVDF 压力传感器的输出线，从而避免了 PVDF 压力传感器在实验前的损伤。

(1) 依据 SHPB 技术，我们考虑应力和应变在试件内最终会达到均匀分布，也就是说根据一维应力波理论，弹性波在试件内来回反射若干次以后，试件两端面的应力可以达到平衡，有 $\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t)$ ，其中 $\varepsilon_I, \varepsilon_R, \varepsilon_T$ 分别表示入射波、反射波、透射波的弹性应变波形。因此我们只在输出杆的中部粘贴了一个电阻应变片，测量其透射波的弹性应变波形，从而利用公式 $\sigma(t) = \rho_0 c_0^2 [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t)] = \rho_0 c_0^2 \varepsilon_T(t)$ 得到 PVDF 压力传感器端面的应力 $\sigma(t)$ 。

(2) 通过电荷放大器的差分放大器和电容负反馈进行的电荷变换，电荷放大器输出的电压 $U(t)$ 正比于 PVDF 压力传感器输出的电荷量的大小 $q(t)$ 。令 $U(t) = kq(t)$ ，又 $q(t) = d_{11} A \sigma_{xx}(t)$ ，此处的 $\sigma_{xx}(t)$ 与上面描述的 $\sigma(t)$ 是一致的。

(3) 由以上两点，我们可以得到如下的关系式

$$U(t) = k d_{11} A \sigma(t) = K \sigma(t) = K \rho_0 c_0^2 \varepsilon_T(t) \quad (9)$$

对于同一批同直径的 PVDF 压力传感器，系数 K 基本

动态标定方法同席道瑛等^[3]的标定方法一样，采用 SHPB 技术。基于一维应力波理论，在子弹长度和输入、输出杆尺寸满足一定关系的条件下，可以忽略弹性波在细长杆中传播时的弥散效应，这样通过应变传感器测定输出杆上某点的应变来标定 PVDF 压力传感器输出的电荷量，从而得到压电应力系数，最终转换成输出电压与应力之间的关系，完成对 PVDF 压力传感器的动态标定，如图 3 所示。

在实验中，输入杆和输出杆是直径 30 mm，长度为 2 m 的钢杆。PVDF 压力传感器的薄膜厚 40 μm ，敏感区半径为

上是一致的。在不同类型的分层介质应力波压力测量中，只要测得电荷放大器输出的电压信号，我们就可以计算出 PVDF 压力传感器表面的应力。电阻应变片记录了透射波的应变波形，经折算得到的透射波应力波形如图 4 所示，PVDF 压力传感器记录的应力波形如图 5 所示。经计算，本文采用的

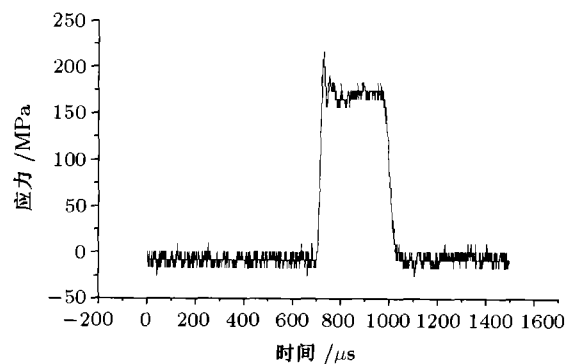


图 4 透射波应力波形

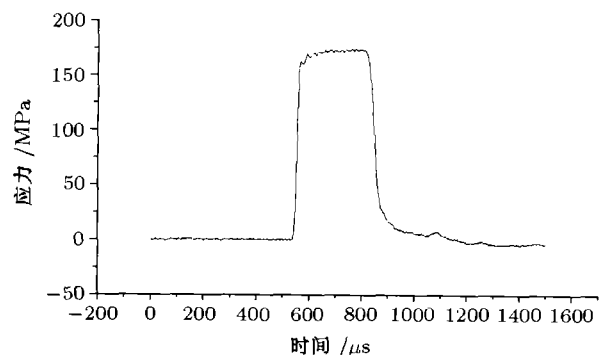


图 5 PVDF 压力传感器记录的应力波形

PVDF 压力传感器的动态实验标定系数 K 为 $3.15 \times 10^{-2} \text{ V} / \text{MPa}$.

由图 4, 图 5 可知, 对于透射波, 电阻应变片得到的应力波形与 PVDF 压力传感器记录的应力信号脉冲在幅值、脉冲宽度上基本是一致的, 但是前者波形毛刺较多, 而后者波形很光滑, 噪音信号很小. 在这一点上, 至少可以说明 PVDF 压力传感器的频响是很高的, 与应变传感器的频响相当, 噪音信号较后者更小, 在今后的冲击测量中可以发挥更大的作用.

4 不同类型的分层介质应力波衰减实验

为了研究由岩石、钢纤维混凝土、泡沫材料和水等不同类型的分层介质在冲击载荷作用下的应力衰减规律, 本文利用已经标定过的 PVDF 压力传感器来测量各分层介质之间的压力变化. 不同类型的分层介质组合方式如下所述. 在实验中

采用 37mm 口径气炮进行低速冲击, 采用激光测速仪测量出膛速度, 其中输入杆 $\phi 60 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 前端有圆锥形过渡段, 输出杆 $\phi 60 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 子弹 $\phi 36.5 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 在本次实验中还对于不同分层介质特制了一套支撑结构. 实验系统示意图见图 6 所示. 实验测量系统采用的是 PVDF 压力传感器 -3115 型电荷放大器 -CS20000 数据采集及分析系统.

实验中采用不同类型的分层介质, 如花岗岩、钢纤维混凝土 (SFRC)、水、泡沫铝等. 其中岩石、钢纤维混凝土、泡沫铝等材料的试样加工成圆柱形, 直径 60 mm, 高度 20 mm, 其中钢纤维混凝土标号为 CF80, 选用鞍山市宏昌钢纤维厂的剪切螺纹钢纤维, 花岗岩采自北京房山, 泡沫铝由东北大学材料加工实验室提供, 其密度约为 0.8 kg/m^3 ; 盛水容器加工成圆筒形, 其内径为 80 mm, 高度为 30 mm. 在不同类型的分层介质界面之间放置标定好的 PVDF 压力传感器.

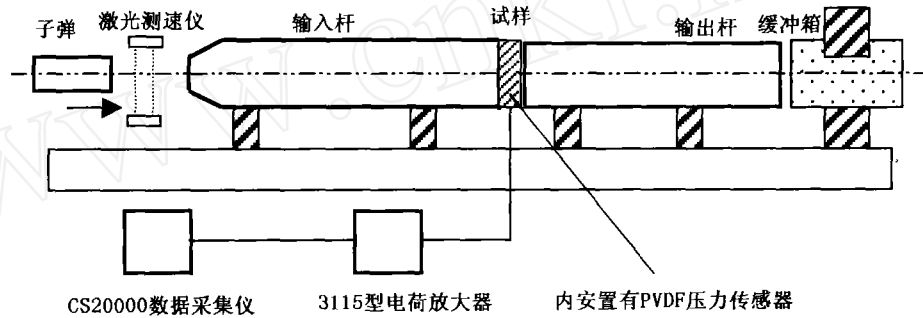


图 6 试验装置示意图

(1) 分层类型 1: 花岗岩和钢纤维混凝土试样组合

花岗岩和钢纤维混凝土块组合, 在花岗岩与输入杆、花岗岩和钢纤维混凝土块之间以及钢纤维混凝土块与输出杆间放置压电薄膜 p_1, p_2 和 p_3 , 如图 7 所示. 子弹冲击速度为 7.3 m/s . 试验测得各界面的压力曲线如图 8 所示.

由图 8 可知, p_1, p_2, p_3 所测得压力峰值随着应力波传播距离的增加和材质的不同有着明显的下降. 对于花岗岩和钢纤维混凝土, 应力波的衰减程度是略有差别的. 3 个波形加载与卸载过程基本一致, 随着应力波传播距离的增加, 3 个波形有逐渐变窄的趋势, 这说明了在应力波传播过程中,

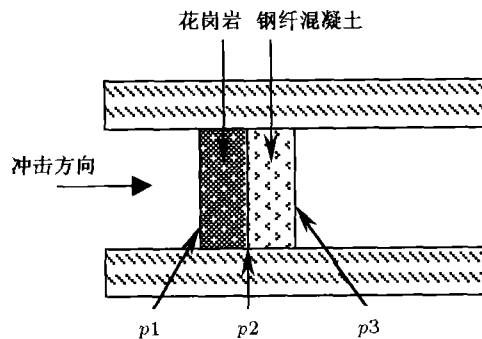


图 7 试件和压电薄膜放置图

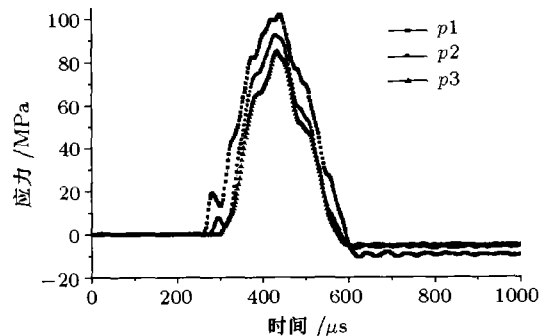


图 8 花岗岩和钢纤维混凝土组合的应力波形曲线图

卸载波在追赶加载波. 对于花岗岩试样, 冲击后表面无明显裂纹; 对于钢纤维混凝土试样, 已经基本碎裂, 大块较多, 各碎块的整体性较好.

(2) 分层类型 2: 花岗岩、泡沫铝、已盛满水的水盒与钢纤维混凝土组合

试样组合及压电薄膜安设情况如图 9 所示. 泡沫铝厚度为 20 mm, 钢纤维混凝土厚度为 20 mm, 花岗岩厚度为 20 mm, 水的厚度为 40 mm, 入射杆速度为 7.3 m/s . 试验中 p_5 压力计因测试过程的疏忽没有得到信号, 其他各界面的压力波形如图 10 所示. 由于分层中含有泡沫铝作为吸能层、水作为传压和卸压介质, 这 4 个波形的加载和卸载都比

图 8 中的要平缓, p_1 测得的信号波形带有一定的震荡. 对于分层中的不同介质, 应力波衰减的程度是不一致的, 泡沫铝作为吸能层, 达到了削波的作用. 实验中密封的水盒被打开, 有少量水溢出, 从 p_3, p_4 的压力峰值可以看到水的卸压作用. 整个作用时间明显比图 8 中的加卸载时间长, 也是因为含有泡沫铝和水的作用. 同样地, 这 4 个波形加载与卸载过程基本一致, 随着应力波传播距离的增加, 这 4 个波形也有逐渐变窄的趋势, 这也说明了在应力波传播过程中, 卸载波在追赶加载波.

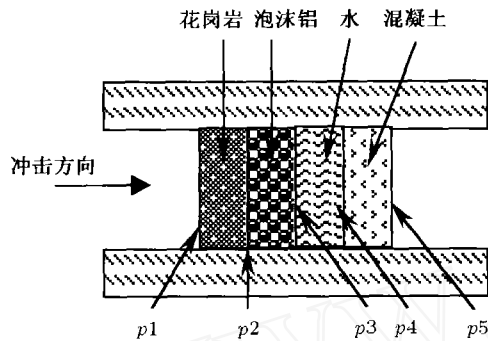


图 9 试件和压电薄膜放置图

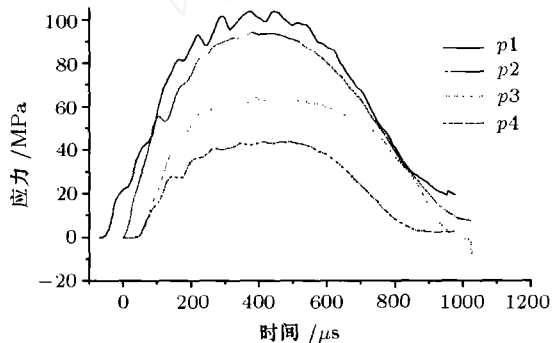


图 10 分层类型 2 的应力波形曲线图

5 结 论

通过对 PVDF 压力传感器在 SHPB 的动态标定和在口径 37 轻气炮上运用 PVDF 压力传感器来测量不同分层类型的压力衰减, 证明了 PVDF 压力传感器因其尺寸小、频响高、动态线性压力范围大, 在动态冲击测量中将有着明显的优势. 实验说明了不同介质对于应力波有着不同的衰减程度, 泡沫铝可以作为一种良好的吸能削波介质, 水的传压和卸压作用也在实验中得到了体现.

致谢: 感谢中科院力学所魏征、黄聪、杨全文等在实验上给予的帮助!

参 考 文 献

- 1 Meyers MA. Dynamic Behavior of Materials. A Wiley Interscience Publication, 1994. 282~285
- 2 高全臣, 刘殿书. 岩石爆破测试原理与技术. 北京: 煤炭工业出版社, 1995. 55~56 (Gao Quanchen, Liu Dianshu. The Measurement Principle and Its Technique of Rock Blasting. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1995. 55~56 (in Chinese))
- 3 席道瑛, 郑永来. PVDF 压电计在动态应力测量中的应用. 爆炸与冲击, 1995, 15(2): 174~179 (Xi Daoying, Zheng Yonglai. Application of PVDF gauge to dynamical stress measurements. *Explosion and Shock Wave*, 1995, 15(2): 174~179 (in Chinese))

APPLICATION OF PVDF GAUGE TO STRESS WAVE MEASUREMENT

ZHAO Hongping* YE Lin[†] LU Zhongqi[†]

* (1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

[†] (Engineering Design Academy of the Second Artillery, Beijing 100011, China)

Abstract PVDF is a kind of gauges used to measure pressure, velocity, and acceleration. The principle of PVDF gauge is systematically described in the paper. Split Hopkinson pressure bar (SHPB) was used to have the dynamic calibration of customized PVDF gauges. It showed that the dynamic frequency response of PVDF gauges were high enough for impact loading and noise signal was smaller compared with the signal from resistance strain gauges. We are used to PVDF gauges to measure the propagation and attenuation of stress wave under impact loading to different assembled layers with different materials by 37 mm caliber gas gun, including water, aluminum foam, granite and steel fiber reinforced concrete. The experiments show that aluminum foam is a good material for energy absorption and water is a nice material to unload when it overflowed under dynamic loading. We conclude that PVDF gauges are suitable for dynamic stress wave measurement for its small size, high dynamic frequency response and wide linear pressure measurement.

Key words PVDF gauge, gas gun, aluminum foam, stress wave, SHPB