文章编号：1000-5773(2004)03-0261-06

国产 PVDF 压电薄膜的冲击加载及卸载响应研究*

李 焰，张向荣，谭红梅，刘晓玲，裴明敬

（西北核技术研究所，陕西西安 710024）

摘要：对两种厚度的国产 PVDF 压电薄膜，用轻气炮和激波管进行了冲击加载应力-电荷曲线的标定，并与其它若干种国内外的 PVDF 标定曲线进行了对比和分析；采用阶梯卸载和同时测量质点速度的方法，研究了 PVDF 压电薄膜的冲击卸载响应特性，发现有明显的滞后效应存在。

关键词：PVDF；压电薄膜；动态响应；卸载；滞后效应

中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

PVDF 压电薄膜以其响应快（纳秒量级）、测压范围宽（0～20 GPa）、灵敏度高等许多优点，在冲击应力测量方面得到了很好的应用。为了实现对应力的精确测量，有必要对 PVDF 压电薄膜的冲击响应特性进行深入的研究，其中，应力-电荷曲线的标定和卸载响应特性的研究是两个重要的内容。国外在这方面的研究已相当深入[1～4]，且已经实现了 PVDF 应力传感器的标准化[5]和商业化。

国内目前已有若干个单位，如锦州电子材料厂、株州氟塑料研究所和兵器工业部五三所等，可以批量生产质量较好的 PVDF 压电薄膜，因此，在 PVDF 冲击应力传感器的应用上也越来越广泛。对 PVDF 应力传感器的标定，大多只局限于 Hopkinson 杆在较低应力（<0.3 GPa）下的标定[6,7]，很难满足在许多爆炸和冲击加载条件下的应力测量。温殿英[8]对 80 μm 厚的 PVDF 压电薄膜用火炮在 2～22 GPa 应力范围进行了标定，用数值模拟方法对其电响应特性进行了研究。但总的来说，对 PVDF 压电薄膜的冲击响应研究还远远不能满足实际应用的要求。

在冲击卸载响应的研究上，国内还未见有报道。一般而言，PVDF 压电薄膜有滞后效应，当应力卸载为零时，其电荷不回零，我们在 PVDF 的研究中也发现了这一点。但也有文献发现，PVDF 在小于 7.5 GPa 应力下没有明显的滞后效应[9]。

针对以上两点，采用轻气炮平面碰撞和激波管加载的方式，研究了两种国产 PVDF 压电薄膜的冲击加卸载响应特性。研究结果可为 PVDF 应力传感器的应用和研究提供参考。

2 实验方法

2.1 PVDF 应力传感器研制

采用锦州电子材料厂生产的 PVDF 压电薄膜，按图 1 所示的结构制成了两种 PVDF 应力传感器：一种厚 50 μm，面积 8 mm²（简称 1# PVDF）；另一种

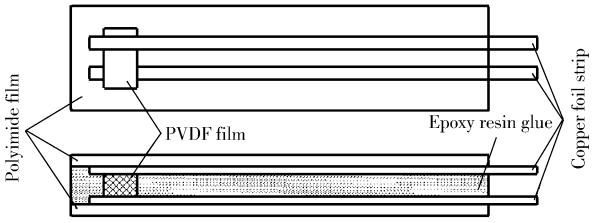


图 1 PVDF 应力传感器结构示意图

Fig. 1 The schematic structure of PVDF stress gauge

* **收稿日期**：2003-01-13；**修回日期**：2003-06-10

基金项目：抗辐射加固技术研究基金

作者简介：李 焰（1969—），男，副研究员，主要研究方向为爆炸力学，动态测试.

E-mail：liyan2003333@sohu.com

厚 40 μm,面积 16 mm²(简称 2# PVDF)。整个传感器厚 0.13～0.15 mm,其中,铜箔引线厚 0.02 mm,聚酰亚胺薄膜厚 0.03 mm。

2.2 冲击加载应力-电荷曲线的标定

较高应力下的标定实验在西北核技术研究所的∅57 mm 轻气炮上进行。弹速为 100～600 m/s,静态弹靶碰撞角度小于 0.5 mrad。实验装置简图如图 2 所示。飞片和靶采用同种材料(对称碰撞),按加载压力大小分别为 PMMA、LY12Al 和 H62Cu。靶按一定的宽厚比设计,以保证传感器在有效测量时间内不受边侧稀疏的影响。飞片碰靶速度(w)由激光测速系统得到。

标定原理:按照对称碰撞原理,靶中的质点速度 $u=w/2$,测量出靶中的应力波波速 D,则按冲击波关系式,有 $p=\rho_0 Du$。

PVDF 应力传感器的输出电荷采用图 3 所示的"电流法"进行测量。其中,R_1、R_2 都为 50 Ω。R_2 可以为电阻分压衰减器。示波器记录的电压波形通过积分的方法得到 PVDF 传感器的输出电荷波形。

较低冲击压力的标定实验在西北核技术研究所的∅130 mm 激波管上进行,如图 4 所示。实验参考压力由 ENDEVOC 公司的一种标准压力传感器测量得到。

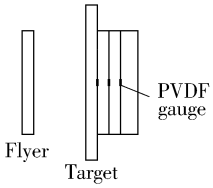


图 2 轻气炮标定实验简图

Fig. 2 The schematic of calibration experiment on light gas gun

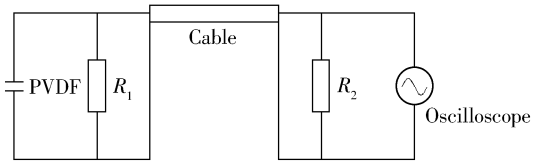


图 3 PVDF 应力计测量电路示意图

Fig. 3 Measurement circuit of PVDF stress gauge

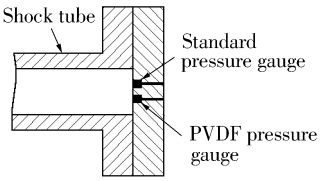


图 4 激波管标定实验简图

Fig. 4 The schematic of calibration experiment on shock tube

2.3 冲击卸载特性实验方法

在轻气炮平面碰撞实验中,采用高冲击阻抗的薄飞片,碰撞低冲击阻抗的厚靶,可以实现阶梯卸载(Step-Release)的应力波形(图 5、图 6)。Perez[10] 曾用这种方法研究碳应力计的卸载特性。在卸载应力的确定上,Perez 等人采用的是阻抗匹配计算方法。这里,我们采用测量质点速度的方法。

如图 5 所示,在与应力传感器相同的界面上安装有电磁粒子速度计,可以测量靶中质点的速度。测量原理为:埋入靶中的Ⅱ型金属箔随质点以相同速度运动,在垂直于金属箔运动方向上加有磁场 B,根据法拉弟电磁感应定律,金属箔切割磁力线产生的电动势为$V=BLu$(其中,L为金属箔切割磁力线的

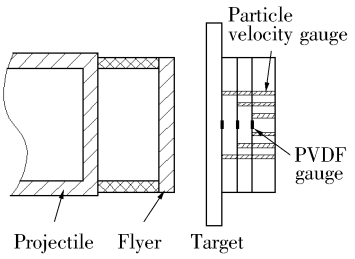


图 5 轻气炮阶梯卸载实验简图

Fig. 5 Schematic of the step-release experiment on light gas gun

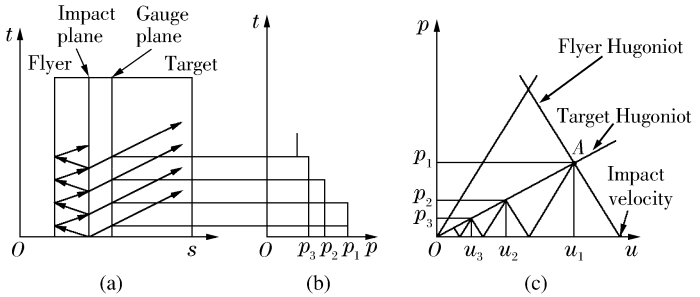


图 6 阶梯卸载实验原理图

Fig. 6 Schematic description of the step-release experiment

长度),由此可以确定质点的速度 $u=V/BL$。

卸载应力的确定方法如下:假设靶材料的冲击压缩曲线(p-u 曲线)为直线(图 6(c)中的 OA 线),卸载也沿着这条直线,则有

$$p_1/u_1=p_2/u_2=p_3/u_3=L=p_n/u_n \tag{1}$$

也即是

$$p_i=p_1u_i/u_1 \tag{2}$$

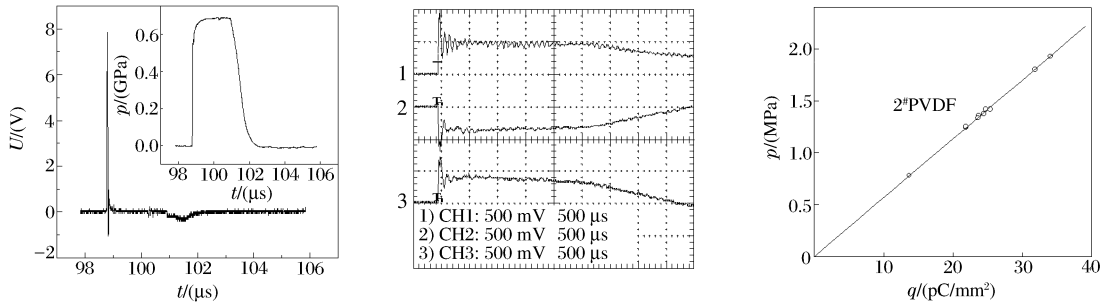
式中,$i=2,3,\ldots,n$,对应应力和质点速度波形的各个台阶。应力峰值 p_1 可以由 PVDF 应力传感器的冲击压缩应力-电荷曲线得到,质点速度的各个台阶值与峰值 u_1 的比值由实测电压波形直接得到(可以不用换算成质点速度),则各个卸载应力台阶值($p_2,p_3,\ldots,p_n$)可由(2)式计算得到。

以上通过测量质点速度(或台阶的相对比值)来确定卸载应力的方法,避开了阻抗匹配法计算过程中的累积误差,因而,相对来说,误差会更小一些。

3　实验结果与分析

3.1　PVDF 冲击加载应力-电荷曲线的标定结果与分析

图 7(a)给出了典型的轻气炮标定实验的电压波形和积分波形;图 7(b)给出了激波管标定实验典型的示波器记录波形(最上面为标准传感器的输出波形);图 7(c)给出了激波管的标定结果以及拟合直线。气炮和激波管的标定结果用最小二乘法拟合后,得到了用多项式表示的 PVDF 压电薄膜的冲击加载应力-电荷关系(见表 1)。为了便于比较,表 1 中还给出了若干种国内外文献中的 PVDF 压电薄膜的标定结果,图 8 绘出了他们的曲线。



(a) Typical voltage waveform and integrating waveform on gas gun　(b) Typical waveform on shock tube　(c) Results of the experiment on shock tube

图 7　PVDF 标定实验结果

Fig. 7　Results of calibration experiment for PVDF

表 1　PVDF 压电薄膜的标定结果以及与其它文献结果的比较

Table 1　Calibration results of our PVDF piezofilm and others

Name	Calibration equation p/(GPa);q/(μC/cm^2)	p /(MPa)	d_{PVDF} /(μm)	A /(mm^2)	K_{static} /(pC/N)	$K_{0.01}$ /(pC/N)	Author
1# PVDF	$p=0.891\,1q+0.414\,2q^2+0.350\,5q^3$	460～6 640	50	8	18	11.2	This article
2# PVDF	$p=0.472\,9q+1.293q^2-0.101\,7q^3$ $p=0.567\,2q$	150～9 600 0.78～1.93	40	16	18	16.6 17.6	This article
[1]	$p=0.764\,7q+0.145\,3q^2+0.109\,1q^3$	0～10^4	23	4		13.1	C. Cavailler
[11]	$p=0.58q+0.38q^{1.6}+0.055q^{3.5}$			10.1		16.6	CHI Jia-Chun
[2]	$p=1.262q^{1.408}$ $p=0.516q$	40～5 800 <30	25	11.4	18.5	27.4 19.38	R. E. Setchel
[8]	$p=5.044q^{1.409}$	(2～22)×10^3	80		20	12.1	WEN Dian-Ying
[3]	$p=0.629\,9q^{1.715}$	<15×10^3	40	3.9,1		89.3	F. Bauer

分析和讨论：

(1) 图 7(c)给出了 2# PVDF 压电薄膜在低应力(0.78～1.93 MPa)下的应力-电荷曲线，其线性相关系数为 $R=0.9993$，可见线性度相当好，这与许多其它文献报道的结果一致。

(2) 表 1 中定义的一个低应力下的动态压电系数

$$K_{0.01}=\left.\frac{q}{p}\right|_{p=0.01} \tag{3}$$

由标定曲线(有的需外延)在 $p=0.01$ GPa 处得到。计算结果表明，较高应力下的标定曲线计算的 $K_{0.01}$ 与静态压电系数和较低应力下的标定曲线计算的 $K_{0.01}$ 都有很大的差别。这说明，尽管有文献发现，(对某种 PVDF)准静态下的标定数据是动态标定曲线的自然延伸[9]，也有发现 PVDF 在 300 MPa 以下都保持很好的线性标定关系的[12]，但仍不能随意地将高应力下的标定曲线延伸到低应力下使用。

(3) 从图 8 可以看出，在同一应力下，不同的 PVDF 压电薄膜输出电荷的大小不同，这反映了各自的压电性能不同；文献[11]和文献[1]两条曲线很一致，估计是同一种 PVDF 压电薄膜，只是标定公式不同。相比较而言，国产 PVDF[8] 以及本研究使用的 1# 和 2# PVDF 压电薄膜的输出电荷较低，国外 Bauer 所用的 PVDF 压电薄膜输出电荷最大。这反映出国产 PVDF 压电薄膜在压电性能上与国外的相比还有一定的差距。这个差距与 PVDF 的生产过程、电极化方式等因素有关。

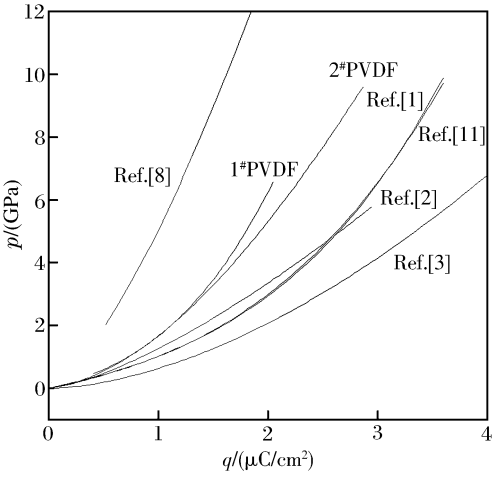


图 8 不同的 PVDF 压电薄膜的冲击应力-电荷曲线的比较

Fig. 8 Comparison between different PVDF on stress-charge curve under shock loading

3.2 阶梯卸载实验结果与分析

图 9 给出了典型的由钢飞片碰 PMMA 靶产生的阶梯卸载实验波形。其中，粒子速度波形的各个台阶值 u_i ($i=1,2,3,4$) 分别为：266.5、210.8、169.8、132.7 m/s)。由此按照(2)式计算的两炮卸载应力(p_{unload})数据如表 2 和图 10 所示。表 2 中还给出了卸载应力波形各台阶对应的电荷 q，以及相应的由冲击压缩应力-电荷标定公式得到的应力值 p_{load}。

从表 2 中给出的 p_{unload} 和 p_{load} 之间的相对偏差可以看出，PVDF 压电薄膜存在着明显的滞后效应。在我们的阶梯卸载实验中，1# PVDF 和 2# PVDF(共 7 片 3 个压力点)都表现出了这样的现象。

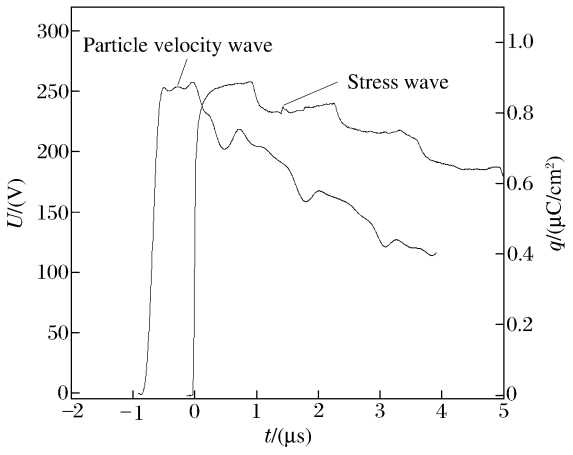


图 9 典型的卸载实验波形

Fig. 9 Typical waveform of the step-release experiment

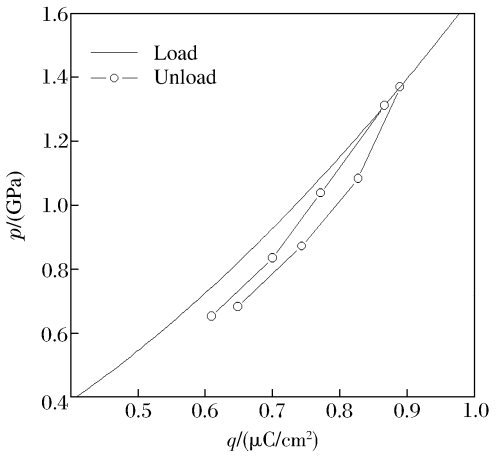


图 10 PVDF 的冲击卸载应力-电荷曲线

Fig. 10 Stress-charge curves of PVDF under shock unloading

表 2　阶梯卸载实验结果

Table 2　Results of the step-release experiment

TP14				TP15			
q /(μC/cm^2)	p_{load} /(GPa)	p_{unload} /(GPa)	$(p_{load}-p_{unload})/p_{unload}$ /(%)	q /(μC/cm^2)	p_{load} /(GPa)	p_{unload} /(GPa)	$(p_{load}-p_{unload})/p_{unload}$ /(%)
0.866	1.313	1.313	0	0.889	1.371	1.371	0
0.771	1.087	1.039	4.5	0.827	1.218	1.084	11
0.700	0.930	0.836	10	0.743	1.023	0.873	15
0.609	0.745	0.653	12	0.648	0.822	0.683	17

下面以第二个应力台阶 p_{unload} 为例,计算卸载应力的相对测量不确定度。由

$$p_2 = p_1 u_2 / u_1 = p_1 V_2 / V_1 \tag{4}$$

则 p_2 的相对测量不确定度为

$$\delta_{p_2} \leqslant \sqrt{\delta_{p_1}^2 + \delta_{V_1}^2 + \delta_{V_2}^2} \tag{5}$$

忽略 p_1 的标定误差,δ_{p_1}、δ_{V_1} 和 δ_{V_2} 主要由读数误差引起,分别小于 2%、1%和 7.5%,代入(5)式得到 $\delta_{p_1} \leqslant 7.8\%$,远小于表 2 中 p_{unload} 和 p_{load} 之间的相对偏差。因而,以上的结论可以排除误差的影响。另一方面,在 2.3 中假设了靶材料的冲击压缩曲线为直线,若按真实的曲线($p=\rho_0 Du=\rho_0(C_0+su)$,$u=Au+Bu^2$),曲线的形状向上弯曲,则 p_{unload} 和 p_{load} 之间的相对偏差会更大,也不影响以上结论的成立。

4　结　论

(1) 几种国产 PVDF 压电薄膜在压电性能上与国外 Bauer 的压电薄膜有一定的差距。

(2) PVDF 压电薄膜在高应力下的冲击压缩应力-电荷曲线具有很大的非线性性,当使用其标定曲线的延伸段时,可能会带来很大的误差。

(3) 实验所用的 PVDF 压电薄膜具有明显的滞后效应。

(4) 测量质点速度确定阶梯卸载应力的方法从理论上讲具有很高的精度,可用于应力传感器卸载曲线的标定。

References:

[1] Cavailler C, Bouchu M, Delaval J. Measurements of Dynamic Pressure by PVF2 Gauges [J]. IEEE, 1991, 284－287.

[2] Setchell R E. Response of Polyvinylidene Fluoride(PVF2) Gauges to Structured Waveforms [A]. Schmidt S C, Holmes N C. Shock Waves of Condensed Matter-1987 [C]. New York: Elsevier Science Publishers B V, 1988. 623－626.

[3] Bauer F, Moulard H. State-of-the-Art in the Research Work of Piezoelectric PVF2 Polymer Shock Gauges [A]. Schmidt S C, Holmes N C. Shock Waves of Condensed Matter-1987 [C]. New York: Elsevier Science Publishers B V, 1988. 627－630.

[4] Graham R A, Lee L M, Bauer F. Response of Bauer Piezoeletric Polymer Stress Gauges to Shock Loading [A]. Schmidt S C, Holmes N C. Shock Waves of Condensed Matter-1987 [C]. New York: Elsevier Science Publishers B V, 1988. 619－622.

[5] Reed R P, Graham R A, Moore L M, et al. The Sandia Standard for PVDF Shock Sensors [A]. Schmidt S C, Davison L W. Shock Compression of Condensed Matter-1989 [C]. New York: Elsevier Science Publishers B V, 1990. 825－828.

[6] Xi D Y, Zheng Y L. Application of PVDF Gauges to Dynamical Stress Measurements [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2): 174－179. (in Chinese)

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.

[7] Zhu W H,Li Z Y,Zhou G Q,et al. Measurement of Laser-Induced Shock Waves by PVDF [J]. Journal of Experimental Mechanics,1997,12(2):216－220. (in Chinese)
朱文辉,李志勇,周光泉,等. 用PVDF实时测量激光诱导的冲击波压力[J]. 实验力学,1997,12(2):216－220.

[8] Wen D Y,Lin Q W. Electrical Response of PVDF Film under Shock Loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2000,14(4):291－297. (in Chinese)
温殿英,林其文. 冲击波压缩PVDF膜的电响应研究[J]. 高压物理学报,2000,14(4):291－297.

[9] Charest J A,Lynch C S. The Response of PVF2 Stress Gauges to Shock Wave Loading [A]. Schmidt S C,Davison L W. Shock Compression of Condensed Matter-1989 [C]. New York:Elsevier Science Publishers B V,1990. 797－800.

[10] Perez M,Chartagnac P. Shock Loading and Unloading Behavior of Carbon Piezoresistive Gauges up to 5 GPa [J]. Rev Sci Instrum,1980,51(7):921－925.

[11] Chi J C,Ma B. Underwater Explosion Wave by a Spherical Charge of Composition B-3 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,1999,13(3):199－204. (in Chinese)
池家春,马 冰. TNT/RDX(40/60)炸药球水中爆炸波研究[J]. 高压物理学报,1999,13(3):199－204.

[12] Zang F J,Li S Z,Wang J,et al. Applications of PVDF Gauges for Shock Pressure Measurements [J]. Journal of Central South University of Technology,2001,32(special issue):32－25. (in Chinese)
张方举,李思忠,王 军,等. PVDF在冲击载荷测量中的应用[J]. 中南工业大学学报,2001,32(专辑):32－35.

Response of Homemade PVDF Piezofilm under Shock Loading and Unloading

LI Yan,ZHANG Xiang-Rong,TAN Hong-Mei,LIU Xiao-Ling,PEI Ming-Jing

(*Northwest Institute of Nuclear Technology,Xi'an* 710024,*China*)

Abstract: For two kinds of homemade PVDF piezofilm, the shock loading stress-charge curves were calibrated, using light gas gun and shock tube respectively. Results were compared with some other homemade and overseas' PVDF. By measuring the particle velocity in the step-release experiment, the shock release behavior of PVDF was also studied. The hystersis of PVDF was found obviously.

Key words: PVDF; piezoelectric film; dynamic response; unloading; hysteresis