文章编号：1000-5773(2010)05-0359-09

PVDF 压电计的动态响应特性及其在橡胶材料 SHPB 实验中的应用*

庞宝君，杨震琦，王立闻，迟润强

（哈尔滨工业大学航天学院，黑龙江哈尔滨 150080）

摘要：通过夹心式 PVDF(Polyvinylide Fluoride)压电计的动态分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)标定实验，系统地讨论了传感器的动态响应特性，其中包括测量电路、PVDF 表面应力集中、压电计的材料及结构特性和同一压电计受多次撞击对测试信号的影响，为 PVDF 压电计的制作工艺研究提供参考。利用标定好的压电计测试了橡胶材料在 SHPB 实验中的动态应力均匀过程。结果表明：调节并联电阻值可以提高压电计的传感精度；增大压电计的敏感面积可以减小因应力集中所造成的信号失真；材料的热粘塑性性质、摩擦效应等将使信号振荡幅度偏小；多次撞击对信号的加载与卸载段都将产生影响，但当传感器表面未发生明显损伤时，测试的应力平台平均值与真实信号近似相同。

关键词：固体力学；PVDF 应力测量；分离式 Hopkinson 压杆实验；橡胶材料

中图分类号：O521.3；O347.4 **文献标识码**：A

1 引 言

PVDF(Polyvinylide Fluoride)薄膜经极化后具有很强的压电效应。作为压电计，其具有压电系数高、频响宽、横向尺寸薄、不需外加电源支持以及测量应力范围大等特点。自 1969 年 Kawai[1] 发现经拉伸和极化后的 PVDF 材料具有强压电特性以来，PVDF 压电计的研究与发展对应力波结构的测量技术产生了革命性的影响。20 世纪 80 年代，Bauer[2] 发明了循环极化法，实现了 PVDF 压电计在测量实验中的可重复性，使得 PVDF 压电计在爆炸冲击领域开始进入应用阶段。

国外 PVDF 压电计已经进入商业化，根据压电薄膜的制作方式不同，可大体分为两种类型——双轴拉伸多次循环极化的 Bauer 类压电计以及单轴拉伸一次极化的 Dynasen 类压电计。Bauer 等人[3] 首次将 PVDF 压电计应用于分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)动态实验中，但是由于 PVDF 薄膜受压后发生径向膨胀，使得测量值比理论值偏大。Obara 等人[4] 应用自制的 PVDF 压电计对平面撞击实验进行了标定，其标定的最高压力为 1 GPa，标定结果与传统的锰铜计传感器结果相差 2%。Salishbury 等人[5] 分别利用 PVDF 压电计与 VISAR 激光干涉仪同时测试了泡沫材料的冲击压缩响应，两种方法得到了一致的实验结果。

国内 PVDF 压电计尚未达到商业化水平，相关应用单位主要利用自制的夹心式 PVDF 压电计对应力波结构进行测试。席道瑛等[6] 应用 SHPB 设备对国产 PVDF 压电薄膜进行了动态标定实验(应力范

* **收稿日期**：2009-09-23；**修回日期**：2009-12-04

基金项目：国家空间碎片专题研究项目资助(kjsp06211)

作者简介：庞宝君(1963—)，男，教授，博士生导师，主要从事空间碎片超高速撞击航天器防护研究. E-mail：pangbj@hit.edu.cn

通讯作者：杨震琦(1981—)，男，博士研究生，主要从事材料动态力学行为及固体中的应力波传播研究. E-mail：yangzqi@hotmail.com

围 0～80 MPa),并对铝材料和岩石材料中的应力波传播以及衰减特性进行了研究。赵红平等人[7]在∅37 mm口径气炮上研究了岩石、泡沫铝等组合分层结构中的压力衰减。巫绪涛和胡时胜等[8]通过在∅37 mm 口径的 SHPB 设备上对 PVDF 压电计进行动态标定指出,实验中由于应力集中、横向泊松效应以及摩擦效应将对实验测试精度产生影响,并且应用 PVDF 压电计研究了混凝土材料的应力均匀性问题。目前,国内对 PVDF 压电计的研究大都集中在利用传感器测试不同条件下的应力波结构,只有少数文献[8]讨论了 PVDF 压电计的动态测量精度问题。

本工作在文献[8]的基础上,利用实验方法系统地研究了手工制作的夹心式 PVDF 压电计的动态响应特性,其中包括:测量电路、应力集中效应和材料与结构特性造成的信号失真;反复加载对测量数据的影响等。并且对设计适用于 SHPB 实验的 PVDF 压电计的制作工艺提出了建议。得到了压电计在 420 MPa 以下的标定曲线,并将 PVDF 压电计应用于橡胶材料的动态应力均匀性测试中,讨论了 SHPB 实验测量软材料的动态应力、应变数据的有效性。

2 PVDF 测试原理及标定方法

经极化后的 PVDF 薄膜具有强压电性,在加载压力的作用下,PVDF 薄膜两侧的电极将产生电荷[1],通过测试电路把放电电荷量记录下来并转化为压力的大小。PVDF 压电计的测试电路一般有电荷模式与电流模式[9]两种。电荷模式是通过测试与 PVDF 压电计并联的电容两端的电压值来得到 PVDF 压电计的放电电荷量,示波器得到的信号与输入的应力波结构一致;电流模式则是用与 PVDF 压电计并联的电阻两端的电压降来表示流过电阻的电流大小,通过积分得到 PVDF 压电计的放电电荷量。由于电荷模式要求硬件的带宽以及分辨率高,所以国内大多采用电流模式进行测试,本工作也采用电流模式。

压电计的敏感材料选用锦州科信电子材料有限公司生产的 30 μm 厚 PVDF 压电膜,利用∅40 mm 口径的 SHPB 进行标定实验,实验系统示意图如图 1 所示,自制的 PVDF 压电计如图 2 所示。

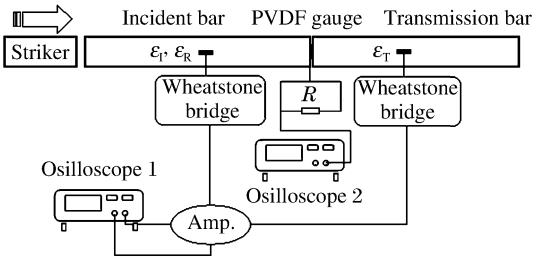


图 1 PVDF 压电计 SHPB 标定装置

Fig. 1 SHPB calibration system of PVDF stress gauges

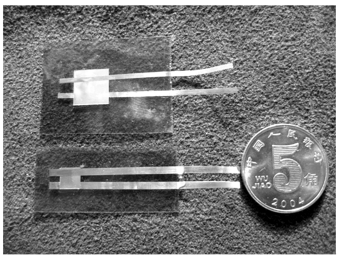


图 2 不同敏感面积的 PVDF 压电计

Fig. 2 PVDF stress gauges with different sensitive areas

将 PVDF 压电计置于入射杆与透射杆之间,在入射杆与透射杆上分别粘贴应变片,以测量实验中的入射、反射和透射应力波信号。实验发现,入射波与透射波的应力平台值近似相等,由 PVDF 压电计造成的反射信号很小,可以忽略不计。根据一维应力波理论,可以通过测量透射杆上的应变信号,得到作用在 PVDF 压电计上的应力值

$$\sigma_I(t)+\sigma_R(t)=\sigma_T(t) \tag{1}$$

式中:$\sigma_I(t)$为入射应力,$\sigma_R(t)$为反射应力,$\sigma_T(t)$为透射应力。

在示波器上记录测量电阻两端的电压信号,根据 PVDF 压电计电流模式的测试原理[6],得到 PVDF 压电计单位面积上的放电电荷量随时间的变化为

$$q(t)=\int_0^t \frac{U(t)}{RA}\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中:A 为 PVDF 压电计的敏感面积,$U(t)$为示波器记录的标定电压信号,R 为标定电阻值。PVDF 的

标定方程为

$$\sigma_T(t)=q(t)/d \tag{3}$$

通过分析 SHPB 设备不同弹速下所对应的 σ_T 与 q 的关系,可以确定 PVDF 压电计的动态压电系数 d 的取值。

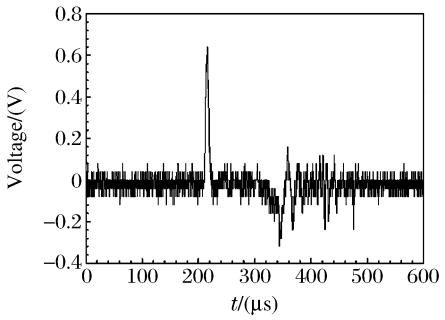
3　PVDF 压电计动态响应特性

3.1　测量信号失真分析

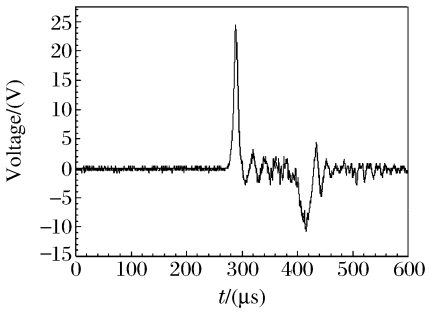
3.1.1　测量电路的影响

PVDF 压电计测量电路的并联电阻过小将降低系统的信噪比,过大的噪声信号会造成数值积分波形失真。对于压电计电流模式测量电路的设计,要合理选择测量电阻 R 值。测量电阻越小,电路响应时间越短,对于测试上升时间很短(纳秒级)的信号,其测量精度越高。但是在 SHPB 设备的子弹撞击速度范围内(5～35 m/s),加载应力脉冲上升沿一般在微秒级,所以无需考虑测量电路响应时间的影响。测量电阻应使测量信号具有较大的信噪比,以减小噪声信号所带来的误差。

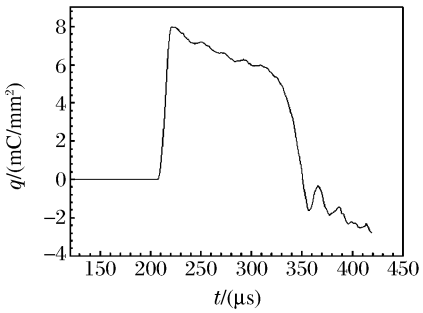
图 3 为用不同测量电阻所测得的信号及其积分信号:图 3(a)的测量电阻为 10 Ω,信噪比为 35 dB;图 3(b)的测量电阻为 120 Ω,信噪比为 80 dB,可见大电阻电路的信噪比较高。当系统信噪比为 35 dB 时,应力平台的振荡有效信号已被噪声信号淹没,信号噪声造成数值积分波形平台段振荡幅度偏低,平台倾斜(见图 3(c))。当信噪比为 80 dB 时,由噪声信号引入的误差可以忽略不计。经综合考虑,实验中选用 120 Ω 的测量电阻,以减小 PVDF 压电计测量电路所带来的误差。



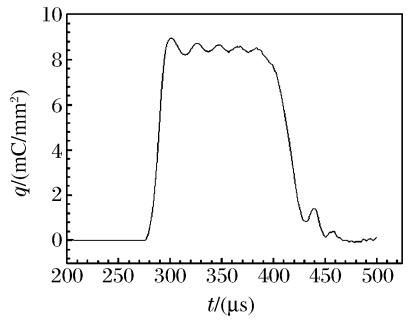
(a) PVDF experimental data(Resistance is 10 Ω)



(b) PVDF experimental data(Resistance is 120 Ω)



(c) PVDF interal signal(Resistance is 10 Ω)



(d) PVDF interal signal(Resistance is 120 Ω)

图 3　不同测试电阻下的 PVDF 压电计信号

Fig. 3　PVDF stress gauge signals with different test resistances

3.1.2　应力集中的影响

PVDF 压电计在敏感面积边缘与褶皱缺陷处出现应力集中,发生异常放电现象,使动态压电系数偏大,导致应力波形失真。为了研究这种现象,本工作采用 6 种不同敏感面积的 PVDF 压电计进行实验,

每次实验的撞击速度相同，得到PVDF压电计放电电荷面密度与敏感面积的关系。由于 PVDF 压电计都是利用同一张 PVDF 薄膜切割制作的，理想情况下单位面积的放电量应与 PVDF 压电计的敏感面积无关。但是，由图 4 可知，PVDF 压电计的敏感面积越小，放电电荷面密度的离散性越大，随着 PVDF 压电计敏感面积的增大，单位面积放电量逐渐收敛。研究发现，敏感面积 A 小于 36 mm^2 的压电计的电荷面密度离散性较大，且多数大于最终的收敛值。

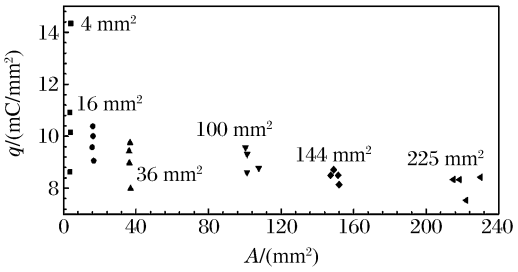
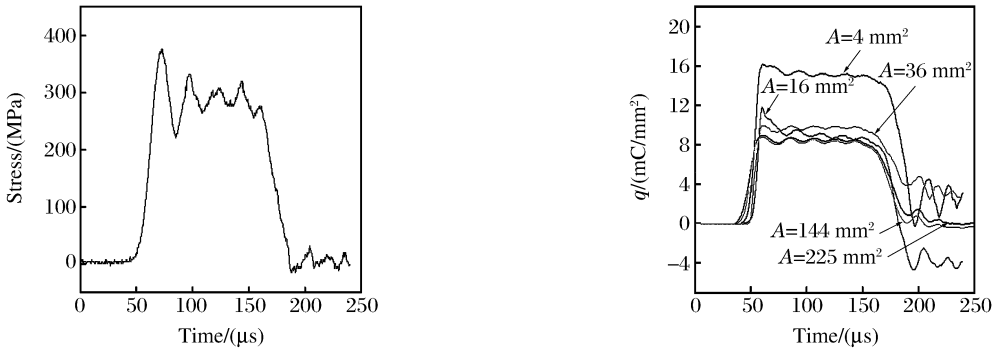


图 4 敏感面积与电荷面密度的关系

Fig. 4 Relationship between PVDF stress gauge area and charge density

图 5 为不同敏感面积的 PVDF 压电计和应变片测量波形的比较，PVDF 压电计积分波形与应变片测量波形相比均发生了不同程度的失真：A=4 mm^2 的 PVDF 压电计测量的应力平台向右倾斜，动态压电系数为 d=49.98 pC/N，远远大于静态压电系数 21 pC/N。A=16 mm^2 的 PVDF 压电计测量的应力波头发生严重过冲，造成整个应力平台倾斜。A=36 mm^2 的 PVDF 压电计的测量信号发生左偏，整个波形由于卸载段的变形被拉宽，且动态压电系数为 33.79 pC/N。A 为 144 mm^2 与 225 mm^2 的 PVDF 压电计的测量信号与应变片测量波形吻合，且动态压电系数均为(25±0.5)pC/N。



(a) Strain gauge (b) PVDF stress gauge

图 5 应变片信号与 PVDF 压电计信号比较

Fig. 5 Comparison between strain gauge signal and PVDF stress gauge signal

在数码显微镜下可观察到切割后的 PVDF 薄膜边缘存在许多毛刺，并且国产 PVDF 压电薄膜表面存在褶皱、划痕，手工封装的 PVDF 压电计涂胶不均匀，使得厚度不一致，均可能造成压电计在平面压缩过程中发生应力集中。在应力集中处 PVDF 压电计发生异常放电现象，使 PVDF 压电计的放电量增大。根据对不同大小敏感面积的 6 组 PVDF 压电计的实验结果，可以总结出如下规律(设实验中压杆的截面积为 A_0)：

(1) 随着 A 的增加，PVDF 压电计单位面积放电量的离散性减小，名义单位面积放电量更加接近真实值。

(2) 当 A/A_0<10%时，PVDF 压电计的测量信号会发生严重失真，名义压电系数大于 PVDF 压电计的真实压电系数。

(3) 当 A/A_0≥10%时，PVDF 压电计信号失真所造成的名义压电系数的变化可以忽略不计，测量的压电系数变化范围为±1 pC/N。同时对于 SHPB 实验，敏感面积尽量不超过待测试件的截面积。

除了减小应力集中效应，对于 PVDF 压电计敏感面积的设计还要考虑测量误差。由于手工切割 PVDF 薄膜可能会给压电计的敏感面积引入测量误差，从而造成名义单位面积放电电量与实际放电量

的差异。假设 Q 为 PVDF 压电计的实际放电电量,A_c 为名义面积,A 为实际面积,则压电计的名义单位面积放电电量 q_c 为

$$q_c = \frac{Q}{A_c} = \frac{A}{A_c} q \tag{4}$$

因此,由敏感面积测量引入的实际相对误差 δ 为

$$\delta = \frac{|q_c - q|}{q} \times 100\% = \left| \frac{A}{A_c} - 1 \right| \times 100\% \tag{5}$$

可见,随着敏感面积尺寸的增大,测量误差逐渐减小,应力集中对信号的影响也减小。为了尽量消除由敏感面积尺寸引入的误差,可以选用精度较高的量具对敏感面积进行测量。本工作对切割后的 PVDF 薄膜敏感面积采用数码显微镜进行精确测量,敏感面积尺寸精确到 0.01 mm^2。

3.1.3　材料特性与结构特性的影响

PVDF 薄膜在冲击压缩下的材料特性以及压电计的结构特性将会造成测量信号波形的振荡幅度小于真实信号的振荡幅度。本工作采用应变片与 PVDF 压电计同时测量不同形状的入射波,如图 6(a)所示,矩形应力波在长杆中传播时会发生弥散现象(Pochlammer Model),使应力波平台段产生振荡,PVDF 压电计测量的应力平台段振荡幅度明显小于应变片所测信号。针对这种现象,文献[8]进行了以下 3 个方面的解释:(1) PVDF 材料本身的热粘性效应造成卸载滞后;(2) 在压缩过程中 PVDF 材料发生轴向变形,当压力大于 PVDF 的屈服极限时会发生塑性变形,造成卸载滞后;(3) 由于夹心式 PVDF 压电计封装材料之间的摩擦效应造成卸载滞后。所以,PVDF 压电计适合测试变化缓慢的应力波结构,对于快速振荡的波形测试会产生失真。

利用不同的波形整形器,在压杆端部输入不同形状的应力波形,以研究 PVDF 压电计对不同输入脉冲的响应特性。如图 6 所示,两种测试手段在加载段的脉冲幅值以及脉冲形状一致,不同之处在于应变片记录的波形毛刺更多,PVDF 压电计的记录波形很光滑。这是由于测试电路采用电流模式,数值积分算法可以起到滤去杂波与毛刺的作用。由图 6(c)可以看出,PVDF 压电计记录的卸载段宽度明显小于应变片的记录波形,这是由于 PVDF 压电计在加载过程中其表面部分发生破坏,对于加载压力较高的情况,PVDF 压电计的卸载波形部分会发生失真。

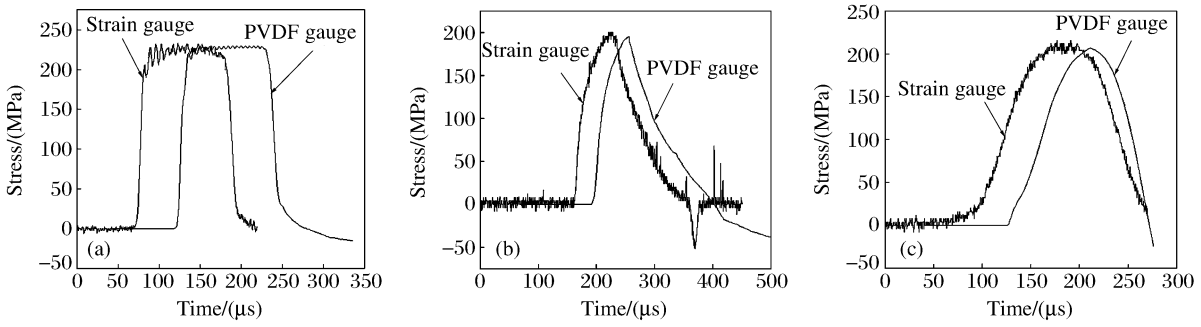


图 6　应变片与 PVDF 压电计波形比较

Fig. 6　Stress wave comparison between strain gauge and PVDF gauge

3.2　多次重复加载对测试信号的影响

PVDF 压电计在动态实验中一般是一次性消耗器件,但同一片压电计的多次重复压缩,其信号还可以表现出一定的规律性。在同一撞击速度下,对 PVDF 压电计进行重复加载实验,图 7(a)为敏感面积为 144 mm^2 的 PVDF 压电计在重复 6 次加载下的积分波形。由图 7(a)可见,撞击次数对于应力波加载段、脉冲持续段以及卸载段都产生了影响,撞击实验结果见表 1。

3.2.1 脉冲加载段

如图 7(b)所示,在脉冲加载段,随着加载次数的增加,加载时间变短,脉冲上升沿变陡。第一次加载的脉冲上升时间为 20.8 μs,与应变片测得的信号上升时间(21 μs)相近。随着重复加载的次数增加,上升时间逐渐减小,但减小的幅度不大,直到 PVDF 压电计发生明显破坏(第 6 次撞击)。造成这种现象的原因主要有两个。(1) PVDF 本身是一种热粘塑性材料,在单次加载后 PVDF 本身会产生塑性变形,造成 PVDF 压电计厚度变小,每次加载的应力脉冲不变,随着压电计厚度的减小,脉冲上升沿经过压电计的时间变短,因此,相应的加载时间变小;在后几次加载时,PVDF 材料经历了第一次冲击强化,塑性变形及压缩率降低,PVDF 压电计在几次加载过程中厚度变化很小,所以上升时间变化不大。(2) 多次冲击造成 PVDF 压电计表面损伤,使单位面积 PVDF 压电计放电量减小,脉冲持续阶段的平台降低,使测得的上升时间减小。

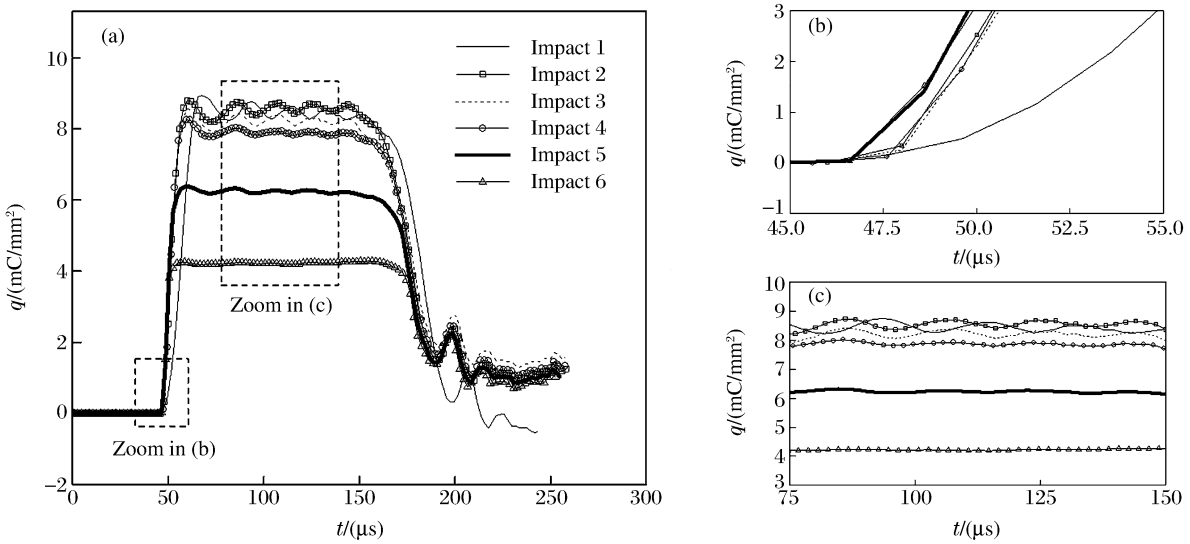


图 7 144 mm² 敏感面积的 PVDF 压电计 6 次冲击的积分波形

Fig. 7 Six-time impact integral waves measured by 144 mm² sensitive area PVDF stress gauge

表 1 多次撞击实验结果

Table 1 Results of multi-impact experiments

Impact time	Impulse rise time Δt_r/(μs)	Charge area density q/(mC/mm²)	Average area density / Max area density /(%)	Impulse decline time Δt_f/(μs)
1	20.8	8.53	95.42	40.2
2	14.8	8.51	96.68	41.6
3	14.4	8.25	96.71	41.6
4	14.4	7.91	96.80	42.4
5	13.8	6.25	98.12	42.0
6	10.0	4.22	99.29	42.0

3.2.2 脉冲持续段与卸载段

如图 7(c)所示,随着加载次数的增加,PVDF 压电计单位面积放电量逐渐降低,且振荡趋于平缓,平台阶段开始向上翘曲。前 3 次撞击产生的面电荷密度降低,这是由冲击引起的 PVDF 压电薄膜表面积增大所造成的,但由于采用的 PVDF 压电计本身敏感面积比较大,因此前 3 次平台曲线近似相等,对测得的名义压电系数影响很小。随着加载次数的增加,PVDF 压电计表面产生缺陷,造成本身压电系数降低,导致后 3 次撞击的曲线平台值明显降低。加载以后,PVDF 压电计本身以及外层的绝缘膜发生了

褶皱翘曲等现象,因此一次加载后的 PVDF 压电计在重复实验过程中要发生应力集中,这就造成所测的平台发生翘曲以及振荡趋于平缓。卸载段由于受到曲线平台翘曲的影响,积分后产生向上摆动的趋势,所以下降时间较第一次冲击增大。

通过单一压电计多次重复加载实验可以看出,多次撞击对测得的应力波形有很大的影响,将产生加载时间变短、应力平台发生变形以及卸载段曲线上摆等现象,但当压电计在重复冲击过程中表面未产生缺陷时,应力平台段与单次冲击的平台近似相等。

4　PVDF 压电计标定结果

对自制的敏感面积为 144 mm^2 的 PVDF 压电计进行了标定,标定压力最大值为 420 MPa,共进行 20 次标定实验。根据 SHPB 透射应力波的应力平台平均值与 PVDF 压电计积分信号平台平均值一一对应的关系,可以得到 0～420 MPa 压力范围内 PVDF 压电计的标定曲线,见图 8。由图 8 可知,PVDF 压电计标定曲线表现出良好的线性关系[6-8],所得的标定方程为

$$\sigma = 40.89q \tag{6}$$

式中:q 为电荷面密度,单位 mC/m^2;σ 为加载应力,单位 MPa,压电计的动态压电系数 $d=24.46$ pC/N。

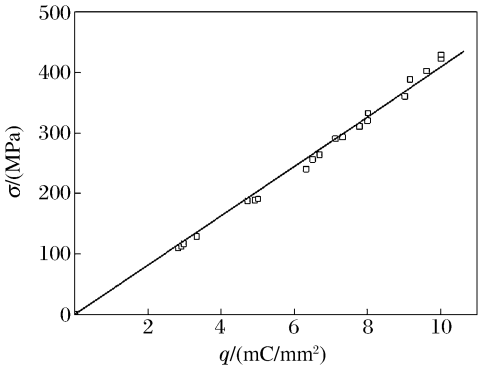


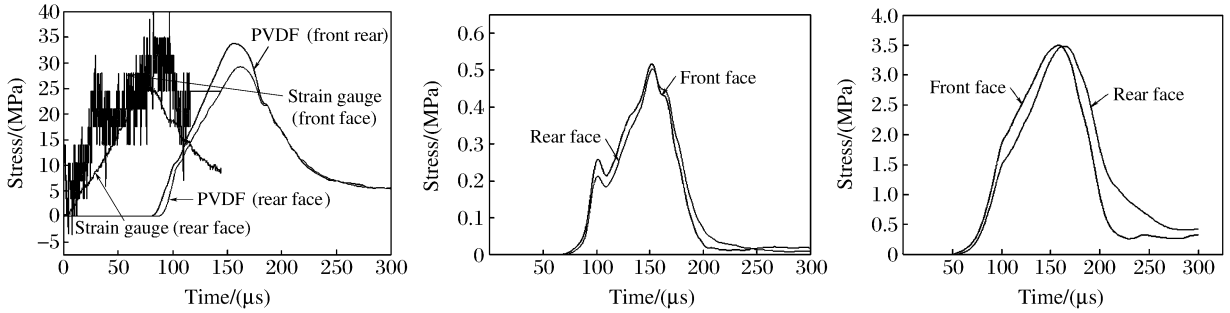
图 8　PVDF 压电计标定曲线

Fig. 8　PVDF stress gauge calibration curve

5　橡胶材料 SHPB 实验的应力均匀性

对于软材料,如橡胶、聚合物、泡沫塑料以及轻质泡沫金属等,由于其内部波速较低,因此在 SHPB 实验过程中要考虑试件前后表面应力均匀性对测试结果所造成的影响[10]。为了准确测试橡胶材料在 SHPB 实验中应力的均匀性,在试件两侧放置标定好的 PVDF 压电计,以测量试件前后表面的应力-时间关系。

橡胶材料动态压缩实验是在∅12.7 mm 口径 LC4 铝合金 SHPB 设备上进行的,采用敏感面积为 8 mm×8 mm 的 PVDF 压电计测试了橡胶材料前后表面的应力-时间数据,测试了 3 种直径为 10 mm、不同厚度的 3 种橡胶试件的应力均匀过程,试件材料分别为:炭黑母胶、泡沫橡胶以及硅橡胶,应力-时间曲线见图 9。



(a) Carbon black rubber with 3.26 mm thickness

(b) Foam rubber with 1.80 mm thickness

(c) Silicone rubber with 2.0 mm thickness

图 9　橡胶材料的前后表面应力-时间曲线

Fig. 9　Stress-time curves at front and rear surface of rubber materials

作为比较,将炭黑母胶材料前、后两表面利用应变片计算压力曲线与 PVDF 压电计得到的结果进行对比,如图 9(a)所示。由图 9(a)可见,由两种测试手段得到的波形近似一致,但是由于用应变片测量软材料时波形存在较大振荡,因此不适于判断应力均匀性。由 PVDF 压电计的测试波形可见,对于 3.26 mm 厚的炭黑母胶在脉冲加载过程中前后表面的应力差别很大,直到 162 μs 时材料前后两侧的应力曲线才近似重合;对于 1.80 mm 厚的泡沫橡胶材料,在整个脉冲传播过程中材料内部的应力状态近似是均匀的;厚 2.0 mm 的硅橡胶材料也表现出材料内部应力的不均匀性。Yang[11]用解析法计算了软材料经过多次反射的应力均匀性,根据文献[11]的定义,软材料的应力均匀性系数为

$$\alpha=(\sigma_{\mathrm{f}}-\sigma_{\mathrm{r}})/2(\sigma_{\mathrm{f}}+\sigma_{\mathrm{r}}) \tag{7}$$

式中:σ_{f} 为试件前表面应力,σ_{r} 为试件后表面应力,单位为 MPa。图 10 为用 PVDF 压电计测得的 3 种橡胶材料应力平衡因子随时间的变化,分别得到炭黑母胶、泡沫橡胶以及硅橡胶的应力平衡时间分别为 102、91 和 94 μs。图 11 为泡沫橡胶的动态应力-应变曲线,在初始阶段由于试件内部还未达到规定的平衡状态,因此,应力-应变关系在 *A-B* 段可能是不可靠的;当加载时间大于 91 μs,试件达到了应力平衡,*B-C* 段曲线是有效的。

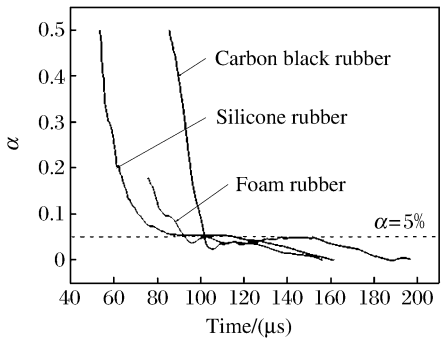


图 10 橡胶材料的应力均匀性系数

Fig. 10 Stress equilibrium factor of rubber materials

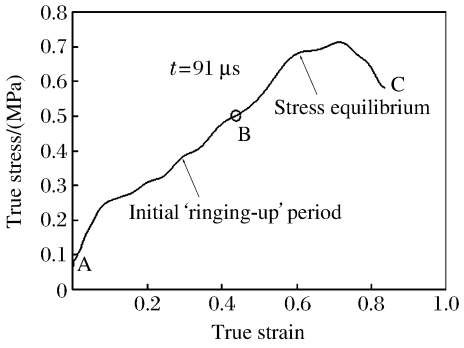


图 11 泡沫橡胶的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve of foam rubber

6 结 束 语

通过对夹心式 PVDF 压电计进行 SHPB 实验,分析了测量电路、应力集中、材料的热粘塑性性质、封装结构特性引起的信号失真现象,研究了同一压电计经多次撞击后的传感特性,可为适用于 SHPB 实验的 PVDF 压电计的制作工艺提供参考。最后,应用标定好的 PVDF 压电计测试了橡胶材料在冲击过程中的应力均匀过程,得到了以下结论:

(1) 在敏感面积相同的条件下,测量电阻阻值越大,系统信噪比越高。在 SHPB 实验中,选择的电阻值应尽量保证噪声信号对数值积分波形不产生影响。

(2) PVDF 薄膜在表面褶皱、划痕和边缘处产生应力集中,引起异常放电现象,会造成测量波形失真。随着敏感面积的增加,异常放电对测试结果造成的影响减小。在 SHPB 实验中,当 PVDF 压电计敏感面积尺寸占压杆截面积的 10%以上时,由应力集中造成的信号失真可以忽略不计。

(3) 同一压电计在多次撞击作用下,脉冲上升沿变陡,单位面积放电量降低,卸载段上翘。因此,虽然 PVDF 压电计是一次性消耗器件,但当 PVDF 表面未发生明显缺陷时,测得的应力平台近似不变。

(4) PVDF 压电计可以用作 SHPB 实验中软材料动态力学性能测试的辅助检测手段,为软材料应力-应变曲线数据的有效性提供实验依据。

References:

[1] Kawai H. The Piezoelectricity of Polyvinyldene Fluoride [J]. Jpn J Appl Phys, 1969, 8(7): 975-976.

[2] Bauer F. Method and Device for Polarizing Ferroelectric Materials: United States, 4611260 [P]. 1986-09-09.

[3] Bauer F, Lichtenberger A. Use of PVF2 Shock Gauges for Stress Measurements in Hopkinson Bar [A]// Schmidt S C, Holmes N C. Shock Waves in Condensed Matter-1987 [C]. California, 1987: 751-755.

[4] Obara T, Bourne N K, Mebar Y. The Construction and Calibration of an Inexpernsive PVDF Stress Gauge for Fast Pressure Measurements [J]. Measure Sci Tech, 1995, 6(4): 345-348.

[5] Salisbury D A, Winter R E, Taylor P, et al. The Response of Foams to Shock Compression [A]//Furnish M D, Chhabildias L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter-1999[C]. Snowbird, Utah: American Institute of Physics, 2000: 197-200.

[6] Xi D Y, Zheng Y L. Application of PVDF Gauges to Dynamical Stress Measurements [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2): 174-178. (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): 174-178.

[7] Zhao H P, Ye L, Lu Z Q. Application of PVDF Gauge to Stress Wave Measurement [J]. Mechanics in Engineering, 2004, 26: 34-41. (in Chinese)
赵红平, 叶　琳, 陆中琪. PVDF 压电薄膜在应力波测量中的应用 [J]. 力学与实践, 2004, 26: 37-41.

[8] Wu X T, Hu S S, Tian J. Stress-Measurement Method by PVDF Gauge and Its Application to Impact Test for Concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 141-145. (in Chinese)
巫绪涛, 胡时胜, 田　杰. PVDF 应力测量技术及在混凝土冲击实验中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 141-145.

[9] Field J E, Walley S M, Proud W G, et al. Review of Experimental Techniques for High Rate Deformation and Shock Studies [J]. Int Impact Eng, 2004, 30(7): 725-775.

[10] Gama B A, Lopatnikov S L, Gillespie J W. Hopkinson Bar Experimental Technique: A Critical Review [J]. Appl Mech Rev, 2004, 57(4): 223-250.

[11] Yang L M, Shim V P W. An Analysis of Stress Uniformity in Split Hopkinson Bar Test Specimens [J]. Int J Impact Eng, 2005, 31(2): 129-150.

PVDF Stress Gauges Dynamic Stress Measurement and Its Application to SHPB Experiment for Rubber Materials

PANG Bao-Jun, YANG Zhen-Qi, WANG Li-Wen, CHI Run-Qiang

(*School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: Dynamic calibration experiments of sandwich PVDF (Polyvinylide Fluoride) stress gauges have been investigated by split Hopkinson pressure bar (SHPB). Dynamic piezoelectricity of PVDF gauges has been discussed, including testing circuit, stress concentration effect of PVDF gauge surface, inherent characteristic and package of PVDF stress gauges and multi-impact effects on the testing signals. The stress uniformity state of rubber materials has been investigated by PVDF gauges. The results show that adjusting the testing resistance can improve the accuracy; increasing the PVDF gauge sensitive area can avoid the signal distortion caused by stress concentration; thermal-plastic characteristic and gauge package can cause the PVDF stress plate to vibrate less than real signal; multi-impact has influence on both the signal loading and unloading part, but when the gauge is un-damaged, the signal flat potion is similar to the real signal.

Key words: solid mechanics; PVDF measurement method; split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment; rubber material