DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0846-06

浇铸类炸药应力应变曲线的 SHPB 测量*

李克武,赵　锋,傅　华

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室,四川 绵阳 621999)

摘要:浇铸类炸药由于质地软、波阻抗及波速都很低,通过传统 SHPB 实验方法无法得到准确的应力应变数据。透射杆信号幅值过低、试样应力平衡均匀性不高以及大应变加载引起的入射波反射波重叠失效,是进行浇铸类炸药 SHPB 实验的难点所在。本文中对传统 SHPB 实验方法进行改进,在试样两端面加装石英晶体应力计,引入石英计所获得的应力数据与应变片测得数据共同对试样应力应变状态进行计算。该方法可以提高透射信号幅值,提供试样大应变加载,避免了入射波反射波重叠导致的信号失效问题,修正了 SHPB 实验过程中的应力时空不均匀性的影响,提高了实验结果的可靠性。利用改进后的实验方法对典型浇铸类炸药进行了实验研究,得到了较准确的应力应变曲线。

关键词:爆炸力学;应力不均匀;SHPB 实验;浇铸类炸药;低阻抗材料

中图分类号:O381　　**国标学科代码**:13035　　**文献标志码**:A

浇铸类炸药在无论民用工业还是军事上都有着广泛的应用,其动态力学响应特性是大家非常关注的问题。SHPB 实验是研究材料动态力学响应特性的最重要实验手段。但低阻抗材料的质地软、波阻抗及波速都很低,对传统 SHPB 实验来说,会使透射杆上信号幅值很低信噪比不高,同时造成试样内部较长时间的应力不均匀,在数据处理时会产生信号失真。

对于这一难题,许多研究者进行了各种改进。对于信噪比问题,研究者通过改换铝杆、聚碳酸酯杆[1]或空心杆[2]等低阻抗杆,或者使用高灵敏度的半导体应变片[3-4]以提高透射杆信号幅值,或者利用 PVDF[5]、石英[6-7]等压电材料测量透射杆应力信号。而针对应力不均匀问题,一方面,研究者们通过适当减小试样厚度[4,7]、入射波整形[6,8-10]等方法缓解试样内部应力不均匀性,另一方面在数据处理时对波形进行修正[3-4,11-12]。但在典型浇铸类炸药的 SHPB 实验中,在使用铝杆与高灵敏度半导体应变片的情况下,透射波信号幅值依然不能让人满意。虽然使用波形整形技术,并在保证一维应力波的前提下尽可能减小试样的厚度,但是试样两端的应力时程曲线表明应力依然在较长时间内处于不平衡状态。同时,针对浇铸类炸药所使用的波形整形技术,入射脉宽在 300 μs 以上,测得的反射波与入射波重叠,造成信号失效。

在嵌入石英应力计测试技术的基础上,本文中通过改进实验方法,避免低阻抗材料 SHPB 实验中入射脉宽较长导致的信号失效问题,解决 SHPB 实验过程中的应力时间空间不均匀性问题,提高实验结果的可靠性。

1　传统 SHPB 实验方法

传统 SHPB 实验中,打击杆以一定速度撞击入射杆,在入射杆上输入一个入射波。试样在入射波作用下受载变形,其力学响应信息则可以通过入射杆与透射杆上测得的应变波形推算出来。根据一维应力假定,通过下式可以得到试样受载过程的应变率、应变和应力:

* **收稿日期**:2014-05-07;**修回日期**:2014-09-03

第一作者:李克武(1983—　),男,博士,助理研究员;**通讯作者**:赵　锋,ifpzf@163.com。

$$\begin{cases}\sigma(t)=\dfrac{1}{2}\dfrac{A}{A_0}E\left[\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t)+\varepsilon_t(t)\right]\\ \dot{\varepsilon}(t)=\dfrac{c_0}{L_0}\left[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t)-\varepsilon_t(t)\right]\\ \varepsilon(t)=\int_0^t\dot{\varepsilon}(t)\mathrm{d}t\end{cases}\tag{1}$$

式中：应力、应变均以压为正，ε_i、ε_r及 ε_t分别为压杆中的入射、反射及透射应变波，E、c_0和 A 分别为压杆的弹性模量、弹性波速和横截面面积；A_0、L_0分别为试样的横截面面积和初始长度。

若应力均匀性较好，可以利用应力均匀性假定

$$\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t)=\varepsilon_t(t)\tag{2}$$

将式(1)简化为

$$\begin{cases}\sigma(t)=\dfrac{A}{A_0}E\varepsilon_t(t)\\ \dot{\varepsilon}(t)=-\dfrac{2c_0}{L_0}\varepsilon_r(t)\\ \varepsilon(t)=\int_0^t\dot{\varepsilon}(t)\mathrm{d}t\end{cases}\tag{3}$$

但是，典型浇铸类炸药的一维应力弹性纵波声速仅达 10^2 m/s 量级，图 1 为实验实测试样两端的典型应力时程曲线，尽管使用了波形整形技术延缓应力上升前沿改善应力均匀性，并在保证一维应力波的前提下尽可能减小试样厚度，但在较长时间内试样内应力均匀性不满足要求。在此情况下，假如继续使用式(3)计算试样的动态应力应变曲线，必然造成很严重的失真。此外，从图 2 可以看出透射信号的信噪比不足，也是有待解决的问题。

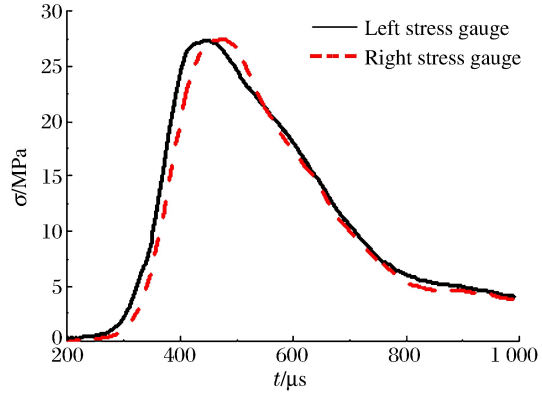

图 1 试样两端的应力时程曲线

Fig. 1 Dynamic stress equilibrium processing of specimen

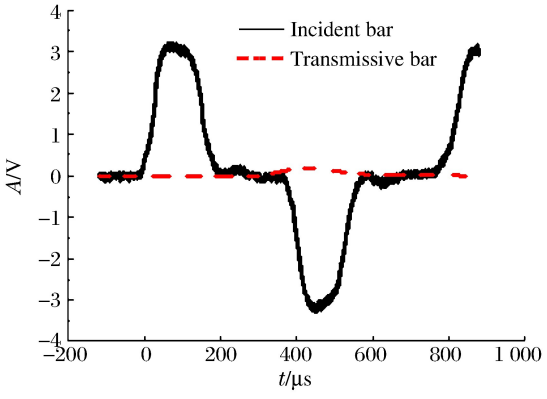

图 2 传统 SHPB 信号

Fig. 2 Signal of conventional SHPB test

同时在实验中还注意到入射波脉宽受 SHPB 实验硬件限制。传统 SHPB 实验装置入射杆设计如图 3 所示，应变片设置在入射杆中段位置。将入射杆一维弹性波声速记为 c_0，则入射波到达应变片位置被记录后，经过 l_1/c_0时间到达入射杆/试样界面处发生反射。反射波再经过 l_1/c_0时间回到入射杆应变片处被记录下来，SHPB 实验装置的入射波与反射波时间间隔为 $t_{ir}=2l_1/c_0$。

由于试样较软，需要使用长脉宽入射波对试样加载，使之产生较大应变才能获得较完整的应力应变曲线，再加上使用了波形整形技术，造成入射波脉宽较长。假如入射波脉宽超过了 t_{ir}，则反射波波头将与入射波波尾相混杂。而直接将混杂信号作为反射波信号进行数据处理的话，根据数据处理公式(3)，反射波与试样应变率直接成线性关系，通过积分运算将导致获得的全程应变信息错误。因此，在入射脉宽的限制下，传统实验方法通常只能得到浇铸类炸药在小应变范围内的应力应变曲线。

通过上述分析，可见为得到准确的应力应变曲线，需要解决如下问题：其一，材料波阻抗过低，导致

透射波信号幅值过低，如图 2 虚线所示，测量信号信噪比并不理想，必然影响实验精度；其二，反射波起始信号可能与入射脉宽重叠失效的问题；其三，数据处理时对 t_{ir}、t_{sample} 和 t_{rt} 值的判读有很高的准确性要求，特别是材料分散性明显，t_{sample} 值会随实验条件不同而变化。

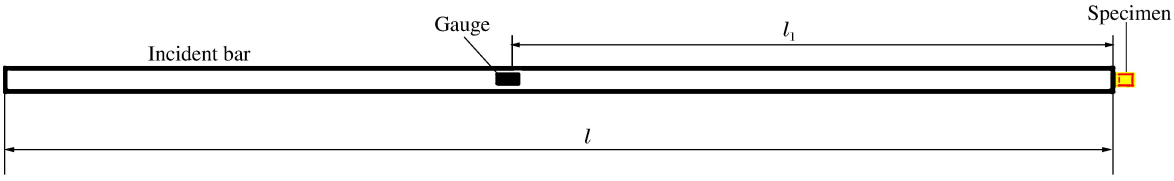

图 3 入射杆简要示意图

Fig. 3 Sketch of incident bar

2 SHPB 实验方法的改进

从图 1 可以看出，试样的入射杆端应力和透射端应力的形态和幅度较为接近，具有相当的一致性，样品中的应力无明显衰减。因此，可以使用波形平移的数据处理方法来解决应力的时空不均匀问题。因此，根据文献[11]，通过入射波、透射波和反射波 3 个实测的波形共同计算以消除应力分布的空间不均匀性，通过对波形的时间平移以消除应力的时间不均匀性。

因此，我们对 SHPB 实验测试系统进行了改进，在试样两端的铝杆上嵌入石英晶体片，如图 4 所示。利用石英晶体片的压电效应，直接对试样两端的受力状况进行测量。石英应力计稳定灵敏，不受环境温湿度影响，测量得到的应力信号信噪比令人满意。针对铝杆与半导体应变片不能将应变信号信噪比提高至合适的程度，我们直接使用石英应力计的测量数据来配合应变片测量数据共同计算材料的动态响应状况。

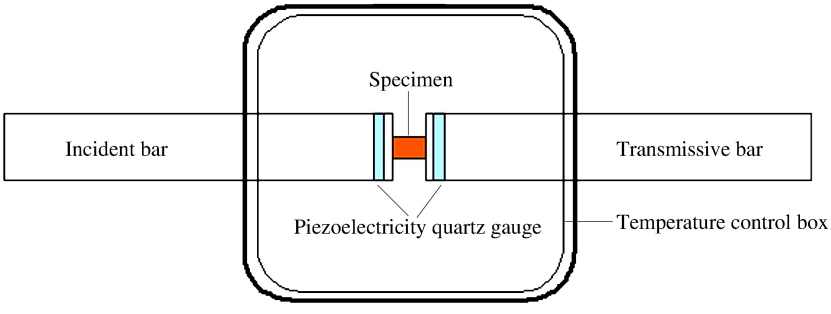

图 4 实验示意图

Fig. 4 Diagram of modified SHPB test

石英应力计测量得到的是试样入射杆端应力 $\sigma_i(t)$ 和透射杆端应力 $\sigma_t(t)$，同时有：

$$\sigma_i(t)=E\frac{A}{A_0}(\varepsilon_i(t-t_{ir})+\varepsilon_r(t)) \tag{4}$$

$$\sigma_t(t-t_{sample})=E\frac{A}{A_0}\varepsilon_t(t-t_{sample}-t_{rt}) \tag{5}$$

代入公式(1)可得

$$\begin{cases}\sigma(t)=\dfrac{1}{2}(\sigma_i(t)+\sigma_t(t-t_{sample}))\\ \dot{\varepsilon}(t)=\dfrac{2c_0}{L_0EA}(EA\varepsilon_i(t+t_{ir})-A_0\sigma(t))\\ \varepsilon(t)=\displaystyle\int_0^t\dot{\varepsilon}(t)\mathrm{d}t\end{cases} \tag{6}$$

式中：t_{sample}为应力波传过试样所需时间，t_{ir}为入射波与反射波时间间隔，t_{rt}为反射波与透射波时间间隔，$\sigma_t(t-t_{sample})$表示将透射杆端石英计测得信号向前平移t_{sample}时间。

这样，在数据处理过程中，所使用的数据来源于入射杆上的应变片信号、试样入射杆端应力信号和透射杆端应力信号，避免了使用信号相对过于微弱的透射波信号和可能混有入射波的反射波信号，解决了上文提到的第1～2个问题，保证了最终应力应变曲线的可靠性。

对传统的SHPB实验方法来说，入射波脉宽极限为t_{ir}，即入射波加载部分与卸载部分的总和必须小于t_{ir}，而想要进一步提高t_{ir}值则需要进行耗费较大的硬件改造。而对于SHPB加载实验来说，通常只需要加载部分的信息，本实验方法就可以突破入射波加载部分与卸载部分的总和必须小于t_{ir}的限制，只需入射波加载部分小于t_{ir}即可。当入射波加载部分与卸载部分各占一半时，本实验方法相当于增加了实验装置容许入射波脉宽上限一倍，达到$2t_{ir}$。

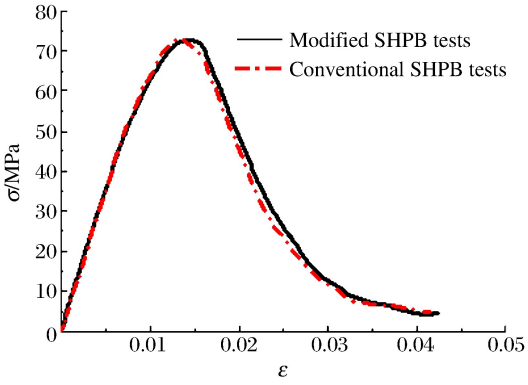

图5 对高阻抗材料的实验结果

Fig. 5 Results of both modified and conventional SHPB tests applied on high impedance materials

使用该数据处理方法对高阻抗材料的SHPB实验数据处理结果与传统实验方法处理结果对比如图5所示。对于t_{sample}可以忽略的SHPB实验，本方法的处理结果与传统方法没有区别，同样可以应用在高阻抗材料的SHPB实验上。

3 实验结果

应用改进后的SHPB实验方法进行了典型浇铸类炸药的动态应力应变曲线测量。

首先进行空杆实验，不安装样品，入射杆与透射杆直接对接。在空杆实验中，铝杆上任意一点处加载历程都是相同的，因此将入射应变片、透射应变片、入射石英计和透射石英计所测得信号处理变换为载荷信息，如图6所示，4条曲线基本重叠在一起，证实了石英计的可靠性，同时也标定了石英应力计的系数与t_{ir}值。

t_{sample}则利用实验测得的试样左右两侧应力曲线来推算。典型浇铸类炸药的SHPB实验信号如图7所示。根据数据分析，将图1中试样透射杆端应力曲线前移15 μs即可完成应力的时间不均匀性修正，t_{sample}值在本次实验中即为15 μs。平移后的试样两端应力曲线如图8所示。需要注意的是，经过平移后，左右应力在550 μs开始出现分叉，但此时试样已经完成受载，其后的应力响应信息不在关心范围。

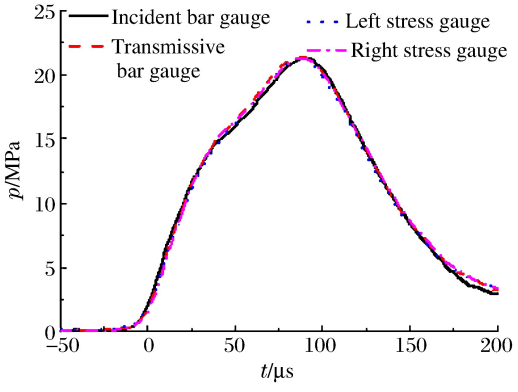

图6 各传感器载荷计算结果

Fig. 6 Calculation results of transducers

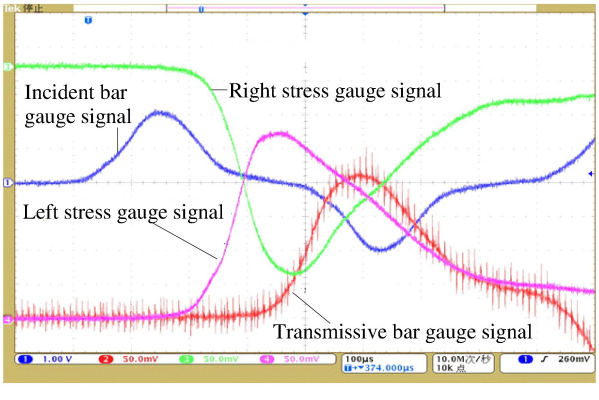

图7 典型信号波形

Fig. 7 Experimental record of modified SHPB test

使用这一改进后的实验方法，解决了 SHPB 对低阻抗材料的实验精度问题，并成功对典型浇铸类炸药进行了不同温度下的 SHPB 实验，获得了较为准确的动态力学响应数据，如图 9 所示。

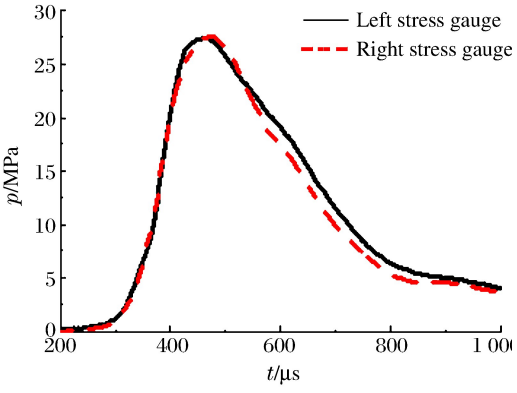

图 8 时间平移示意图

Fig. 8 Diagram of time-translation method

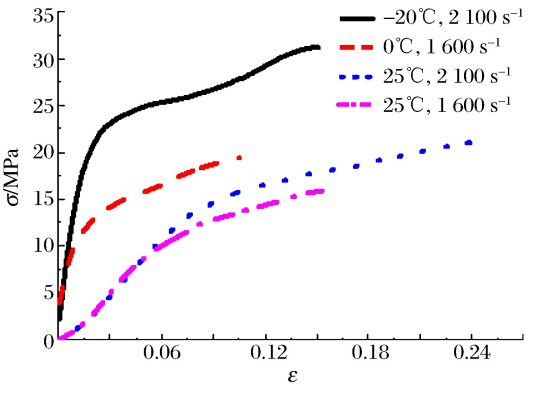

图 9 不同温度下的应力应变曲线

Fig. 9 Dynamic stress-strain curves under different temperatures

4 结 论

针对典型浇铸类炸药，对传统 SHPB 实验方法进行了改进。基于嵌入压电石英晶体实验技术，利用石英应力计测得的数据来替代透射波与反射波应变信号，提高信号信噪比的同时，避免了大应变加载时导致的入射波与反射波重叠失效。同时结合数据分析，提高了三波起跳时间间隔的判读精度。通过波形平移等方法，有效消除试样内部的应力不均匀性，得到了精度可靠的动态应力应变曲线。

参考文献：

[1] 张方举，何鹏，胡文军，等. 软材料的低阻抗 SHPB 实验技术与应用[J]. 中国测试，2012，38(2)：17-20.
Zhang Fang-ju, He Peng, Hu Wen-jun, et al. Application and experimental technique of low impedance SHPB for soft materials[J]. China Measurement & Test, 2012, 38(2): 17-20.

[2] Chen W, Zhang B, Forrestal M J. A split Hopkinson bar technique for low-impedance materials[J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(2): 81-85.

[3] 刘剑飞，王正道，胡时胜. 低阻抗多孔介质材料的 SHPB 实验技术[J]. 实验力学，1998，13(2)：218-223.
Liu Jian-fei, Wang Zheng-dao, Hu Shi-sheng. The SHPB experiment technology for low wave impedance porous materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(2): 218-223.

[4] 胡时胜，刘剑飞，王悟. 硬质聚氨酯泡沫塑料本构关系的研究[J]. 力学学报，1998，30(2)：151-156.
Hu Shi-sheng, Liu Jian-fei, Wang Wu. Study of the constitutive relationship of rigid polyurethane foam[J]. Acta Mechanica Sinica, 1998, 30(2): 151-156.

[5] 王永刚，施绍裘，王礼立. 低阻抗多孔动态性模量和剪切模量实验测定[J]. 宁波大学学报：理工版，2002，15(4)：22-26.
Wang Yong-gang, Shi Shao-qiu, Wang Li-li. Experimental measurement of dynamical Young's modulus and shear modulus of low-impedance porous materials, 2002, 15(4): 22-26.

[6] Chen W, Lu F, Zhou B. A quartz-crystal-embedded split Hopkinson pressure bar for soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(1): 1-6.

[7] 卢芳云，刘忠，林玉亮，等. 软材料的 Hopkinson 压杆实验技术研究[C]//第三届全国爆炸力学实验技术交流会论文集. 合肥，2004：7-17.

[8] 赵习金，卢芳云，王悟，等. 入射波整形技术的实验和理论研究[J]. 高压物理学报，2005，18(3)：231-236.
Zhao Xi-jin, Lu Fang-yun, Wang Wu, et al. The experimental and theoretical study on the incident pulse shaping technique[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 18(3): 231-236.

[9] 卢芳云，Chen W，Frew D J. 软材料的 SHPB 实验设计[J]. 爆炸与冲击，2002，22(1)：15-19.

Lu Fang-yun, Chen W, Frew D J. A design of SHPB experiments for soft materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(1):15-19.

[10] 宋力,胡时胜.一种用于软材料测试的改进 SHPB 装置[J].实验力学,2005,19(4):448-452.
Song Li, Hu Shi-sheng. A modified SHPB device for soft material testing[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005,19(4):448-452.

[11] 周风华,王礼立,胡时胜.高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性的影响[J].实验力学,1992,7(1):23-29.
Zhou Feng-hua, Wang Li-li, Hu Shi-sheng. On the effect of stress nonuniformness in ploymer specimen of SHPB tests[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1992,7(1):23-29.

[12] 宋博,宋力,胡时胜.SHPB 实验数据处理的解耦方法[J].爆炸与冲击,1998,18(2):167-171.
Song Bo, Song Li, Hu Shi-sheng. Coupling solved method of SHPB experimental data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 1998,18(2):167-171.

SHPB technique for the dynamic stress-strain curve measurements of casting explosive

Li Ke-wu, Zhao Feng, Fu Hua

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: It is generally impossible to obtain valid constitutive data of casting explosive by conventional SHPB tests, due to its low impedance and soft texture and to its inability to attain uniformity required. A modified SHPB method is therefore proposed to get reliable dynamic response data of casting explosive. The piezoelectricity quartz gauges have been used to directly measure dynamic stress processing of specimen. This modified data processing method has been adopted, which can eliminate the effect caused by stress non-uniformity. By using the modified data processing, the signal failure problem caused by long pulse incident can also be resolved. With the modified SHPB method, satisfactory results have been obtained in processing casting explosive.

Key words: mechanics of explosion; stress non-uniformness; SHPB tests; casting explosive; low impedance material

(责任编辑　曾月蓉)