文章编号：1000-5773(2011)02-0159-06

某 PBX 炸药的动态力学性能研究*

李俊玲[1,2]，卢芳云[1]，傅　华[2]，赵玉刚[2]，谭多望[2]

(1.国防科技大学理学院工程物理研究所，湖南长沙　410073；
2.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
国防科技重点实验室，四川绵阳　621900)

摘要：PBX 炸药作为现代武器的主装药，它的力学行为决定着武器的生存能力。为了研究 PBX 炸药的动态力学特性，采用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)作为加载手段，结合半导体应变片测试技术和压电晶体监测技术，保证了实验数据的有效性。利用 SHPB 加载波整形技术，实现了材料两端应力平衡和常应变率加载，得到了不同应变率(90～410 s^{-1})下材料的应力-应变曲线。根据材料的模量、破坏强度和破坏应变随应变率的变化规律，采用粘性修正的 Sargin 模型，得到了该 PBX 炸药在单轴压缩下的唯象本构模型，模拟结果与实验曲线符合较好。

关键词：固体力学；分离式霍普金森压杆；应变率效应；本构模型
中图分类号：O347.3；TQ560.7　　**文献标识码**：A

1　引　言

随着现代高性能武器系统的飞速发展，弹药的安全性问题日益突出。例如：在可变形定向战斗部中，主装药起爆前将受到辅装药爆轰的冲击作用；钻地弹战斗部在侵彻过程中将受到强过载冲击。这些新型常规武器弹药对装药的起爆性能提出了更高的要求。为了适应高性能武器装备发展的需要，各国都积极开展了对钝感高能炸药的各项性能研究。炸药在服役前所承受的力学环境会在很大程度上影响其爆轰性能，进而影响武器的生存能力和作战效能，所以炸药的动态力学性能作为安全性研究的一个重要组成部分倍受关注。

许多学者都致力于研究含能材料在不同条件下的力学响应，尤其是动态力学性能。Goudrean 等人[1]采用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)系统对 PBXW-113 炸药在高应变率下的动态性能进行了研究，给出了应变率为 10^3～10^4 s^{-1} 时拉伸动态应力-应变曲线，但实验数量很少。Hoffman[2]用 Hopkinson 压杆技术研究了多种固体推进剂在高应变率下的力学响应，由应力-应变曲线分析了材料的有效模量、应力强度等，但没有给出规律性总结。Blumenthal[3]利用 SHPB 对 PBXN-110 炸药和以 HTPB 为基的炸药在不同温度和应变率条件下的压缩性能进行了研究。国内，罗景润[4]采用 SHPB 技术研究了 JOB-9003 炸药的动态力学性能，进一步探讨了动态压缩力学性能的实验方法。李英雷等人[5]用 SHPB 技术考察了应变率在 4 000～8 000 s^{-1} 下的 TATB 炸药的动态压缩性能，建立了以 ZWT 粘塑性本构模型为基础的本构关系。吴会民等人[6]对某 PBX 炸药和压装 B 炸药进

* **收稿日期**：2010-01-13；**修回日期**：2010-04-11
基金项目：国家自然科学基金(10672177，10872215，10902100)；中国工程物理研究院科学技术基金重点项目(2009A0201008)；冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金(9140C6709020907)
作者简介：李俊玲(1984－)，女，博士研究生，主要从事材料动态力学性能研究. E-mail：jl_lee@nudt.edu.cn
通讯作者：卢芳云(1963－)，女，博士，教授，主要从事材料动态力学性能研究. E-mail：fylu@nudt.edu.cn

行了准静态和动态压缩实验，得到了两种炸药在不同应变率下的应力-应变曲线，建立了两种炸药含应变率效应的本构方程。陈荣等人[7]对某含铝炸药进行了准静态和动态压缩实验，建立了材料在不同初始密度、不同应变率下的本构模型，并对该炸药在不同密度下的力学行为和应变率效应进行了较系统的分析。

本研究针对某 PBX 炸药的力学特征，利用传统的 SHPB 技术进行加载，采用半导体应变片和石英压电晶体联合测试方法，进行一系列动态压缩实验，以期获得能够反映该 PBX 炸药破坏信息的唯象本构模型。

2 实验方法

本研究使用的 PBX 炸药（密度为 1.86 g/cm^3）是以 HMX 炸药为基，添加粘结剂和钝感剂后合制而成，具有复合材料的特征。由于 PBX 炸药的成型工艺及材料结构特殊，它的力学性能不仅与单质炸药和粘结剂（高聚物）有关，还受各组分含量及制作过程影响，因此其固有的力学特性就显得十分复杂。HMX 炸药是该 PBX 炸药的主要成分，所以该 PBX 炸药具有明显的脆性材料特征，此外聚合物的粘弹塑性也对其力学行为有一定影响。对于成型的 PBX 炸药，其力学行为还明显依赖于加载方式、加载历史和环境因素等[4]。本研究采用 SHPB 加载方式，仅讨论该 PBX 炸药在动态单轴压缩下的力学响应。

SHPB 是研究应变率为 $10^2 \sim 10^4$ s^{-1}时材料力学性能的常用方法。但直接利用传统的 SHPB 来测试 PBX 炸药的动态力学性质，需要解决以下两方面问题。

（1）由于 PBX 炸药的加载强度较低，应力信号非常弱，干扰信号的影响较大，因而很难得到正确的实验结果。采用铝杆、空心杆或者粘弹性杆作为输入/输出杆，通过降低波阻抗来增大杆的应变，可以提高信号值，但信噪比的提高幅度很小。采用石英压电晶体测试方法可以提高灵敏度[8]，但若只采用晶体测试手段，则得不到入射波和反射波信息。对于 PBX 炸药，加载波幅值不能太高，入射、反射信号却需要放大。为此，本研究采用半导体应变片测试方法，使入射、反射和透射信号同时放大。考虑到半导体应变片具有不稳定性，在每组实验前对其进行重新标定，此外利用嵌入杆中的石英晶体信号，监测半导体应变片信号的稳定性，同时验证试样两端的应力平衡情况。这样就可以获得信噪比高且真实有效的实验数据。

（2）由于 PBX 炸药的应力波波速很低，在相当长的时间内试样中的应力和应变均处于不均匀状态，不能满足 SHPB 实验的基本前提。采用入射波整形技术延缓应力上升前沿，使试样内部的应力、应变趋于均匀，从而很好地实现常应变率加载。恒应变率（$\dot{\varepsilon}$）的实现使原来的自变量 $\dot{\varepsilon}$ 成为固定参量，大大减小了横向惯性效应对测试的影响，有利于更清楚地认识材料性质。

实验装置如图 1 所示，其中实验杆材料为 LC4 铝，直径为 20 mm，子弹长 200 mm，入射杆长2.0 m，

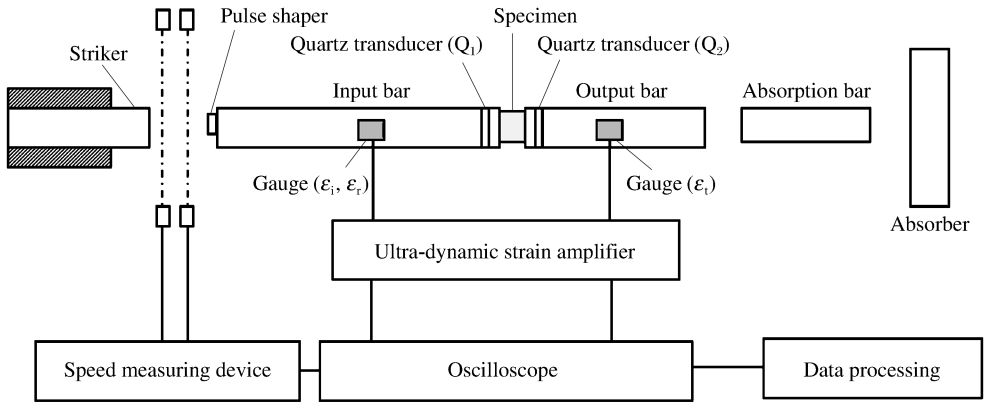


图 1 SHPB 实验装置图

Fig. 1 Schematic illustration of the SHPB experimental setup

透射杆长 1.0 m。应变测试采用半导体应变片(以串联方式连接),由超动态应变仪采集信号,并由数字示波器存储。利用电荷放大器,将石英压电晶体受压产生的极化电荷放大并转换成电压信号,由示波器存储。

3 结果及分析

图 2 为 SHPB 实验典型的原始波形,其中 CH1 记录入射波和反射波,CH2 和 CH3 分别记录试样两端的石英压电晶体响应的应力信号,CH4 记录透射波。试样破坏前,反射波为一个平台,意味着试样破坏前为常应变率加载。CH2 和 CH3 的波形和幅值很一致,证实试样两端的应力平衡。半导体应变片和晶体输出的透射应力信号吻合得很好(见图 3),说明半导体应变片的响应比较稳定,实验获得的数据真实有效。

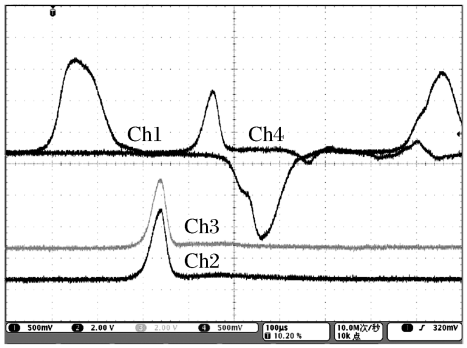


图 2 SHPB 测试得到的原始曲线

Fig. 2 Original records of a typical SHPB test

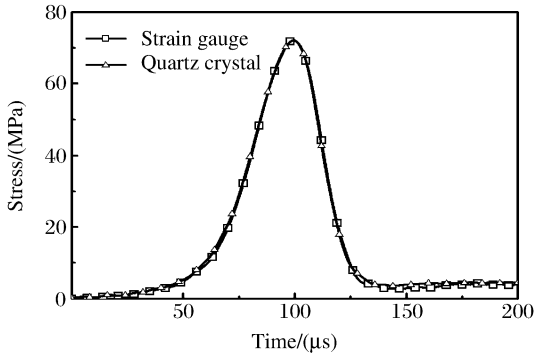
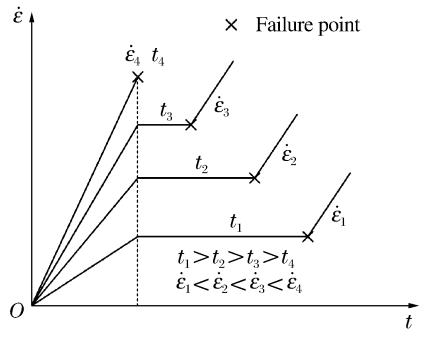


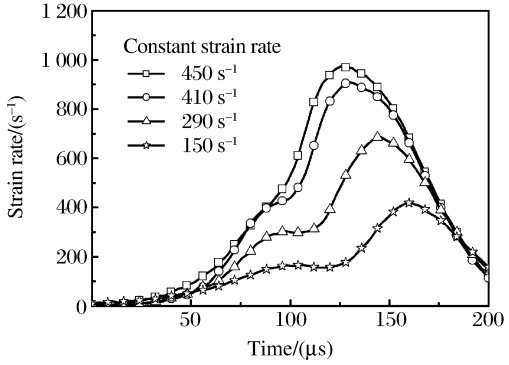
图 3 半导体应变片与石英压电晶体信号对比

Fig. 3 Comparison of signals from the strain gauge and quartz transducer

经过多次实验发现,采用∅3 mm×1 mm 的橡皮对入射波整形可以实现很好的常应变率加载,如果改变加载强度,只需对整形器尺寸做较小的变化。图 4 为 SHPB 实验获得的有效应变率变化曲线。由图 4(a)可知,当应变率较低时,恒应变率加载时间较长(即应变率曲线中的平台较宽),应变率高时则相反[9]。当达到某一应变率时,还没有实现常应变加载,试样就直接被破坏,称此应变率为极限应变率。从图 4(b)中可以很清晰地看到:当应变率超过 410 s^{-1}时,很难实现破坏前的常应变率加载,即极限应变率为 410 s^{-1};应变率为 150~410 s^{-1}时,平台宽度随应变率增加逐渐减小,说明该 PBX 炸药的破坏基本是由应变来控制,应变率越高,PBX 炸药就越快被破坏,在此过程中应变始终保持在 1.3%左右。



(a) Model curves



(b) Experimental curves

图 4 SHPB 实验的有效应变率曲线

Fig. 4 Effective strain rate curves for SHPB experiments

为了检验材料的稳定性以及实验系统的可靠性,需要进行重复性加载。实验结果如图 5 所示。由

图 5 可知,4 条曲线两两重合得很好,说明该实验系统稳定可靠,并且该 PBX 炸药的力学响应也比较稳定。因此,可以通过不同应变率的加载,获得一系列材料的单轴压缩应力-应变曲线,并由此总结响应规律,得出力学本构模型。

图 6 给出了 4 个不同应变率下材料的应力-应变曲线。除了应变率为 90 s^{-1}时试样没有发生破坏以外,其余的情况下应力随应变变化的规律很一致。样品从弹性变形到发生破坏期间,经历了塑性变形,致使应力上升变缓。与静态加载时不同,试样破坏后应力并非直线下降,而是缓慢卸载,也被称为塑性软化。该 PBX 炸药的破坏应变极小,一般在 1.3%左右。由于粘结剂的存在,材料的粘性效应比较明显。材料的强度和破坏应变随着应变率的增加略有增加。由于 SHPB 实验数据处理方法具有局限性,拟合应力的线性上升段时得到的斜率并不是弹性模量,但在模拟材料的应力-应变响应时又必须考虑应力上升斜率随应变率的变化,因此,为了叙述方便,将应力线性上升段的斜率取名为动态模量 E。

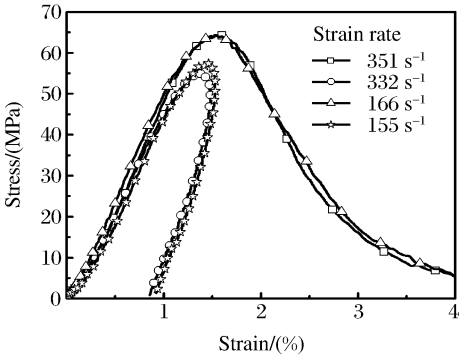


图 5 重复性实验得到的应力-应变曲线

Fig. 5 Dynamic compressive stress-strain curves from repeated tests

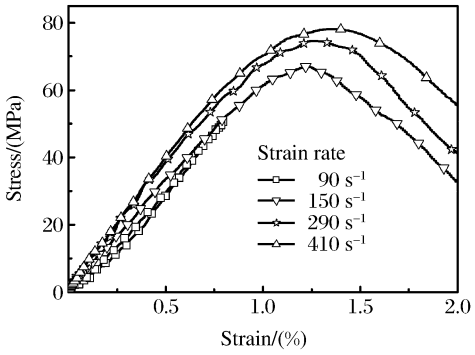


图 6 不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 6 Dynamic compressive stress-strain curves under different strain rate loadings

4 本构关系研究

由于炸药结构非常复杂,目前的模型一般只能描述炸药破坏前的应力上升阶段,不能预测破坏点及破坏后的卸载行为。实际上,大部分 PBX 炸药的结构与混凝土、岩石相似,动态压缩应力-应变响应规律(见图 6)也与混凝土、岩石类似。Ottosen 和 Ristinmaa[10] 曾指出,压缩混凝土和岩石一类材料时,塑性硬化之后会产生塑性软化效应。Sargin[11] 在 1971 年提出了用于模拟塑性硬化/软化行为的本构关系,但他没有考虑应变率的影响,认为试样破坏时的应力 σ_f 和应变 ε_f 都是常数。本研究采用粘性修正后的 Sargin 模型唯象描述 PBX 炸药的动态压缩力学响应,即

$$\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon}) = \frac{-\sigma_{fd}(\dot{\varepsilon})\left[-\alpha(\dot{\varepsilon})\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_{fd}(\dot{\varepsilon})}+(D-1)\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_{fd}(\dot{\varepsilon})}\right)^2\right]}{1-(\alpha(\dot{\varepsilon})-2)\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_{fd}(\dot{\varepsilon})}+D\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_{fd}(\dot{\varepsilon})}\right)^2} \tag{1}$$

式中:$\alpha=E/E_f$,E_f 为破坏时的切割模量,即 $E_f=\sigma_f/\varepsilon_f$;参数 D 主要影响试样破坏之后的软化阶段;下标 d 表示动态参数,对应的量为应变率的函数。

表 1 列出了 PBX 炸药的动态破坏数据,从中可以看出,材料的破坏强度和应变随应变率的增加线性增加(见图 7(a)),破坏应变也有类似的线性关系。将该 PBX 炸药在不同应变率下的动态模量代替 Sargin 模型中的弹性模量 E,并认为当应变率在 $0\sim10^2$ s^{-1}的范围内时,动态模量的变化可以用二次函数来模拟(见图 7(b))。将上述参数的变化规律用于修正控制曲线上升的参数 α,得到以下关系式

$$E_d(\dot{\varepsilon})/E_s = -4.003\,e^{-14}(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^2 + 1.946\,e^{-6}(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0) + 0.664 \tag{2}$$

$$\sigma_{fd}(\dot{\varepsilon})/\sigma_{fs} = 2.371\,e^{-7}(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0) + 2.009 \tag{3}$$

$$\varepsilon_{fd}(\dot{\varepsilon})/\varepsilon_{fs} = 6.838\,e^{-8}(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0) + 0.965 \tag{4}$$

式中:加载应变率 $\dot{\varepsilon}$ 为 2×10^{-4} s^{-1},E_s、σ_{fs} 和 ε_{fs} 分别为静压下 PBX 炸药单轴压缩的杨氏模量(8.23 GPa)、强度(30.89 MPa)和破坏应变(1.22%)。

表 1　PBX 炸药的动态破坏数据

Table 1　Dynamic failure data of the PBX explosive

$\dot{\varepsilon}$ /(s^{-1})	σ_f/(MPa)	ε_f/(%)	$\dot{\varepsilon}$ /(s^{-1})	σ_f/(MPa)	ε_f/(%)	$\dot{\varepsilon}$ /(s^{-1})	σ_f/(MPa)	ε_f/(%)
150	67.0	1.23	320	74.2	1.33	410	78.0	1.35
290	74.0	1.26	380	74.5	1.34	430	77.2	1.36

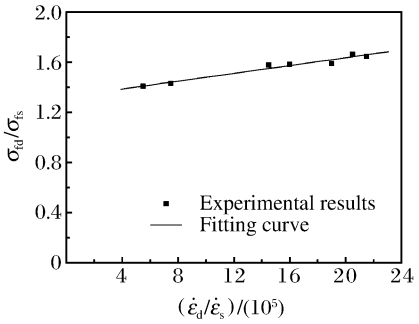


图 7(a)　动态强度随应变率的变化关系

Fig. 7(a)　Variation of the dynamic strength with strain rate

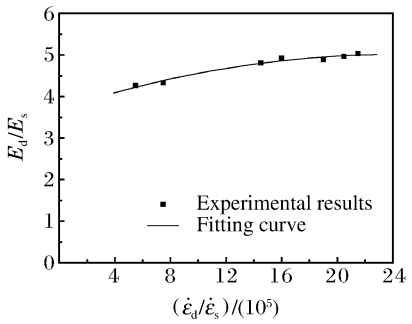


图 7(b)　动态模量随应变率的变化关系

Fig. 7(b)　Variation of the dynamic modulus with strain rate

利用(1)式～(4)式,对实验结果进行拟合,取 $D=0.35$,模拟结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出:利用修正后的模型可以比较准确地估算破坏应力和应变;应变率较高时,模拟结果与实验结果也符合得较好;在较低应变率(小于 150 s^{-1})加载下,试样的塑性响应不明显,因此模拟结果与实验数据稍有出入。参数 D 是描述应力卸载段的参数,D 值越小,应力下降得越快。对于本研究的 PBX 炸药,3 条曲线对应的最佳 D 值均在 0.35 左右,在 90～410 s^{-1} 的应变率范围内,参数 D 不需要做粘性修正。

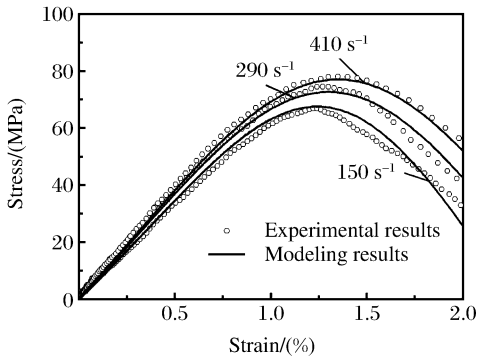


图 8　实验结果与本构模型对比

Fig. 8　Comparison of experimental and modeling results

5　结　论

(1) 利用半导体应变片测试技术和晶体片监测技术,得到了准确且信噪比高的某 PBX 炸药的动态压缩实验数据。

(2) 采用加载波整形技术,延缓了加载波上升沿,成功实现了常应变率加载,得到了某 PBX 炸药在 90～410 s^{-1} 应变率范围内的应力-应变曲线,分析认为该 PBX 炸药的极限常应变率在 410 s^{-1} 左右。

(3) 由于实验用 PBX 炸药表现为粘弹塑性,因此利用修正后的 Sargin 模型,建立了唯象本构模型。模拟结果表明,该模型能较好地描述该 PBX 炸药在单轴压缩下的应力-应变响应,并能反映炸药的破坏规律。

References:

[1]　Goudreau G, Moen W, Breithaupt D. Evaluation of Mechanical Properties of PBXW-113 Explosive, UCID-20358 [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.

[2] Hoffman H J. High-Strain Rate Testing of Gun Propellants, AD-A208826 [R]. Columbia: Chemical Propulsion Information Agency, 1989.

[3] Blumenthal W R, Thompson D G, Cady C D, et al. Compressive Properties of PBXN-110 and Its HTPB-Based Binder as a Function of Temperature and Strain Rate [A]//The 12th International Detonation Symposium [C]. San Diego, California, 2002.

[4] Luo J R. PBX's Damage, Fracture and Constitutive Relationship [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2001. (in Chinese)
罗景润. PBX 的损伤、断裂及本构关系 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2001.

[5] Li Y L, Li D H, Hu S S, et al. An Experimental Study on Constitutive Relation of TATB Explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4): 355-359. (in Chinese)
李英雷, 李大红, 胡时胜, 等. TATB 钝感炸药本构关系的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 355-359.

[6] Wu H M, Lu F Y, Lu L, et al. Experimental Studies on Strain-Rate Effects of Mechanical Behaviors of Energetic Materials [J]. Energetic Materials, 2004, 12(4): 227-230. (in Chinese)
吴会民, 卢芳云, 卢 力, 等. 三种含能材料力学行为应变率效应的实验研究 [J]. 含能材料, 2004, 12(4): 227-230.

[7] Chen R, Lu F Y, Lin Y L, et al. Mechanical Behavior and Constitutive Model of Pressed Aluminized Explosive [J]. Energetic Materials, 2007, 12(5): 460-464. (in Chinese)
陈 荣, 卢芳云, 林玉亮, 等. 一种含铝炸药压缩力学性能和本构关系研究 [J]. 含能材料, 2007, 12(5): 460-464.

[8] Chen W, Lu F, Zhou B. A Quartz-Crystal-Embedded Split Hopkinson Pressure Bar for Soft Materials [J]. Exp Mech, 2000, 40(1): 1-6.

[9] Pan Y, Chen W, Song B. Upper Limit of Constant Strain Rates in a Split Hopkinson Pressure Bar Experiment with Elastic Specimens [J]. Exp Mech, 2005, 45(5): 440-446.

[10] Ottosen N S, Ristinmaa M. The Mechanics of Constitutive Modeling [M]. Oxford, UK: Elsevier Ltd., 2005.

[11] Sargin M. Stress-Strain Relationships for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections [M]. Waterloo, Canada: University of Waterloo, 1971.

Research on the Dynamic Behavior of a PBX Explosive

LI Jun-Ling[1,2], LU Fang-Yun[1], FU Hua[2], ZHAO Yu-Gang[2], TAN Duo-Wang[2]

(1. *Institute of Engineering Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*;
2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: PBX explosive is the main charge of modern weapons, so its mechanical behavior determines the survival ability of weapons. To study the dynamic behavior of PBX explosive, a series of split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests for PBX explosive have been carried out. With combination of the semiconductor strain gauge and quartz crystal transducer, the validity of the experimental data was obtained. In addition, the stress equilibrium of the specimen and constant strain rate loading were realized experimentally using wave shaping technique. The stress-strain curves of PBX explosive under different strain rates (90～410 s^{-1}) were acquired. According to the variations of the dynamic modulus, failure strength and failure strain with strain rate, a constitutive model of the PBX explosive under uniaxial compression was proposed. The fitted curves derived from the developed model agree well with the experimental results.

Key words: solid mechanics; split Hopkinson pressure bar; strain rate effect; constitutive model