

文章编号: 1001-1455(2012)03-0231-06

# PBX 炸药本构关系的实验研究\*

傅 华<sup>1</sup>, 李俊玲<sup>1,2</sup>, 谭多望<sup>1</sup>

(1. 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 621900;

2. 国防科技大学理学院技术物理研究所, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 在 SHPB 装置上开展了某典型 PBX 炸药的单轴压缩、间接拉伸实验。利用入射波整形技术, 结合半导体应变片和石英晶体联合测试的方法, 实现了 PBX 炸药的应力平衡和恒应变率加载, 得到了不同应变率下某 PBX 炸药的压缩应力应变曲线, 初步建立了该炸药的修正 Sargin 唯象模型; 开展了 3 种 PBX 炸药的动态巴西实验, 通过高速摄影获得了炸药的破坏过程, 结合数字相关技术, 获得了试样裂纹附近的应变场分布, 初步建立了描述 3 种炸药动态拉伸行为的修正 Johnson-Cook 模型。模型曲线与实验结果符合较好。

**关键词:** 固体力学; 本构模型; SHPB; PBX 炸药; 巴西实验

**中图分类号:** O347.3

**国标学科代码:** 13015

**文献标志码:** A

高能炸药是核武器和常规武器战斗部杀伤、破坏和动力能源的关键材料, 随着现代高性能武器系统的飞速发展, 对提高高能炸药在各种条件下安全性的要求日益迫切。在冲击作用下, 高能炸药初始力学响应会影响炸药后续的反应特性和起爆机制, 对炸药的安全性产生重要影响。当前对高速侵彻武器战斗部装药生存能力的评估除了开展模拟环境条件实验和综合考核实验, 通常借助数值模拟技术对过程特征状态进行量化分析, 而计算能否如实反映过程特征参量, 很大程度上取决于计算模型中炸药的强度参量是否准确、本构模型能否描述过程的机制本质和量化特征。因此, 高能炸药的动态力学研究对评估高过载条件下炸药的生存能力具有重要意义, 是开展炸药安全性研究的重要内容。近年来, 许多学者致力于研究炸药在不同条件下的动态力学行为。G. Goudreau 等<sup>[1]</sup>采用 SHPB 对 PBXW-113 炸药的动态力学性能进行了研究, 给出了应变率为  $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  条件下的压缩、拉伸应力应变曲线。H. J. Hoffman<sup>[2]</sup>研究了多种固体推进剂在高应变率下的力学响应, 对固体推进剂的有效模量、应力强度进行了分析。W. R. Blumenthal 等<sup>[3]</sup>对 PBXN-110 炸药在不同温度、应变率条件下的压缩性能进行了研究。

本文中拟在 SHPB 实验装置上开展某 PBX 炸药的单轴压缩实验, 初步建立该炸药的压缩唯象本构模型; 并开展 3 种 PBX 炸药的间接拉伸(动态巴西)实验, 初步建立 PBX 炸药的动态拉伸本构模型。

## 1 实验

### 1.1 压缩实验

SHPB 是研究材料在应变率  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  范围内力学性能的常用实验装置, 对炸药这类脆性材料, 破坏应变小, 波阻抗低, 透射信号弱, 当外界干扰信号的强度与透射信号强度在同一个量级时, 实验的测量精度将受到严重影响。另外, 由于炸药应力波波速较低, 上升前沿较陡的加载波可能导致试样中应力应变处于不均匀状态, 不能满足 SHPB 实验的基本前提。

为了获得准确有效的实验信号, 实验中杆件均采用铝材; 应变片选用高灵敏度的半导体应变片, 可得到信噪较高的应变信号; 利用嵌入杆端的石英压电晶体片直接获得试样两端的应力信号, 同时可以直

\* 收稿日期: 2011-03-14; 修回日期: 2011-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(10902100);

中国工程物理研究院科学技术重大项目(2009A0201008);

冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金项目(9140C6709020907, 9140C6709021005)

作者简介: 傅 华(1979—), 男, 博士研究生, 副研究员。

观地检测试样两端的应力平衡状态;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,并实现恒应变率加载。实验装置如图 1 所示。

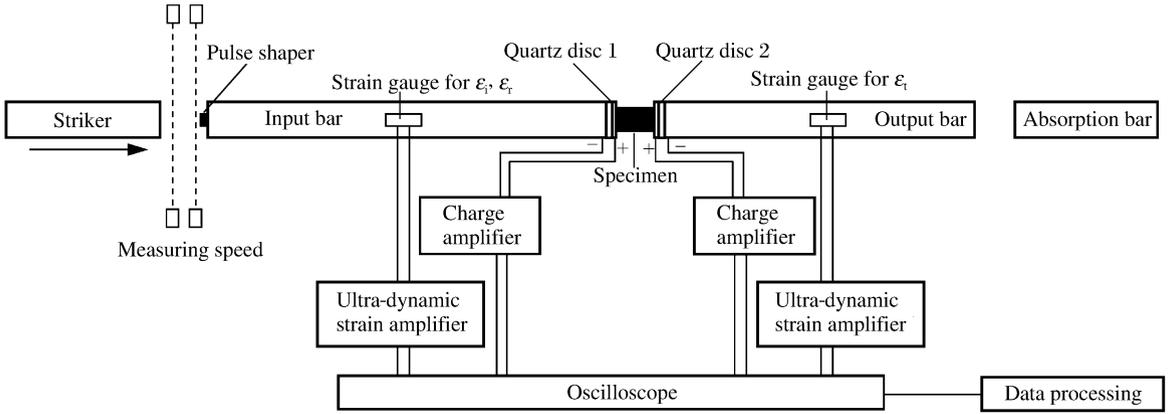


图 1 SHPB 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the split Hopkinson pressure bar (SHPB) setup

### 1.2 间接拉伸实验

炸药的拉伸强度通常较低,加工直接拉伸用的试样难度大,目前常采用间接拉伸的实验方法,即巴西实验<sup>[4-7]</sup>。巴西实验装置如图 2 所示,除增加高速数字相机外,其他布局与图 1 相同。试样的加载过程由高速数字相机实时拍摄,数字图像经由数字散斑相关方法处理得到应变场分布。炸药试样采用平台巴西盘,根据弹性理论,中心点处的拉伸应力

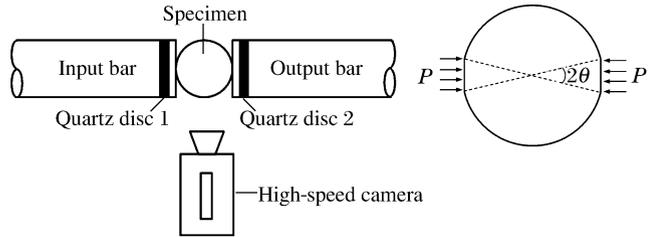


图 2 动态巴西实验示意图

Fig. 2 Schematic of the dynamic Brazilian test

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi\delta d} Y(\theta) \tag{1}$$

式中: $P$  为作用在试样上的载荷, $\delta$  为圆盘的厚度, $d$  为圆盘直径, $2\theta$  为加载平面所对应的圆心角; $Y$  为与  $\theta$  密切相关的因数,当  $2\theta=20^\circ$  时, $Y(\theta) = 0.964$ 。当载荷  $P$  达到最大时,可得到拉伸强度。

## 2 实验结果

### 2.1 压缩实验

#### 2.1.1 压缩实验结果

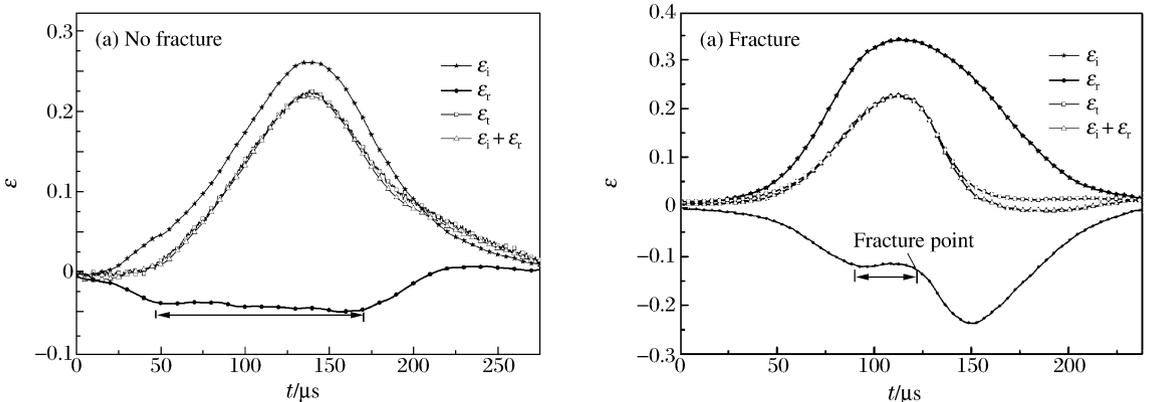


图 3 PBX1 试样在恒应变率加载下的应变历史曲线

Fig. 3 Strain history curves of the PBX1 sample subjected to a constant strain rate

PBX1 试样是由炸药晶体和粘接剂按一定比例压制而成的塑料粘接炸药，初始密度为  $1.86 \text{ g/cm}^3$ ，尺寸为  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。利用半导体应变片和石英晶体片联合测试的方法，对 PBX1 炸药进行了不同应变率条件下的单轴压缩实验，结合波形整形器实现了较好的恒应变率加载。图 3 是 PBX1 炸药的恒应变率加载波形。图 3(a) 中的反射波为近似平台，PBX1 试样没有破坏；从图 3(b) 可以看出在 PBX1 试样破坏之前，反射波为近似平台，表明在试样破坏前实现了恒应变率加载。

4 种不同应变率下 PBX1 的应力应变关系曲线如图 4 所示，除应变率为  $90 \text{ s}^{-1}$  的曲线外，其他曲线均表明试样发生了破坏，试样表现出明显的率相关性，曲线变化规律基本一致。试样破坏前弹性变形较明显，之后表现为粘塑性，应力上升变缓，破坏应变较小，约为 0.013，试样破坏后应力下降，为塑性软化阶段。材料的弹性模量、强度和破坏应变随着应变率的增加均略有增加。

2.1.2 压缩本构

S. O. Niels 等<sup>[8]</sup>曾指出，对多相混合材料，在压缩过程中塑性硬化之后会出现塑性软化效应。M. Sargin<sup>[9]</sup>提出了用于描述塑性硬化/软化行为的本构模型，但该模型中没有考虑应变率效应的影响，认为试样破坏时的应力  $\sigma_f$  和应变  $\epsilon_f$  都是常数，与应变率无关。本文中在原 Sargin 模型进行粘性修正，建立唯象本构模型来描述 PBX1 的动态压缩力学行为

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = \frac{-\sigma_f(\dot{\epsilon}) [-A\epsilon/\epsilon_f(\dot{\epsilon}) + (D-1)(\epsilon/\epsilon_f(\dot{\epsilon}))^2]}{1 - (A-2)\epsilon/\epsilon_f(\dot{\epsilon}) + D(\epsilon/\epsilon_f(\dot{\epsilon}))^2} \quad (2)$$

式中： $A = E_d/E_f$ ， $E_d$  是动态模量， $E_f$  是破坏模量， $E_f = \sigma_f/\epsilon_f$ 。动态模量  $E_d$  为 PBX1 炸药的应力应变曲线上沿的线性段斜率，因数  $D$  是描述试样破坏后软化阶段的参数，这里  $D = 0.35$ 。

实验曲线与粘性修正后的本构模型曲线的比较如图 5 所示。修改后的模型在估算破坏应力和应变时较准确，对较高应变率的情况符合较好，在受较低应变率 ( $150 \text{ s}^{-1}$ ) 加载时，试样塑性响应不明显，此时的模型曲线与实验曲线稍有出入。描述软化阶段的参数  $D$  越小，应力下降得越快。对于 PBX1 炸药，不同应变率条件下对应的  $D$  值基本不变。

2.2 动态巴西实验

2.2.1 实验结果

巴西实验试样分 3 种，除 PBX1 炸药外，还采用密度分别为  $1.85$  和  $1.71 \text{ g/cm}^3$  的 PBX2 和 PBX3 炸药，尺寸均为  $\varnothing 20 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。实验过程中试样两端受到的载荷  $P$  由石英晶体片获得，其中一发实验石英晶体片的压力信号如图 6 所示。在应力加载前沿缓慢上升，试样两端应力基本重合，达到受力平衡，当到达峰值点时，试样中心区域沿加载方向出现裂纹，继而逐渐发生破裂。试样两端的破裂差异

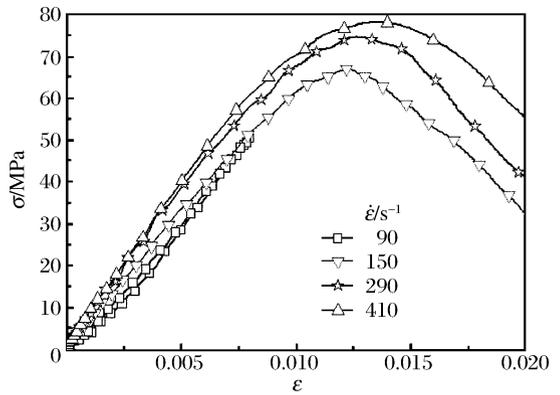


图 4 不同应变率下 PBX1 试样的应力应变曲线  
Fig. 4 Dynamic stress-strain curves of the PBX1 sample at different strain rates

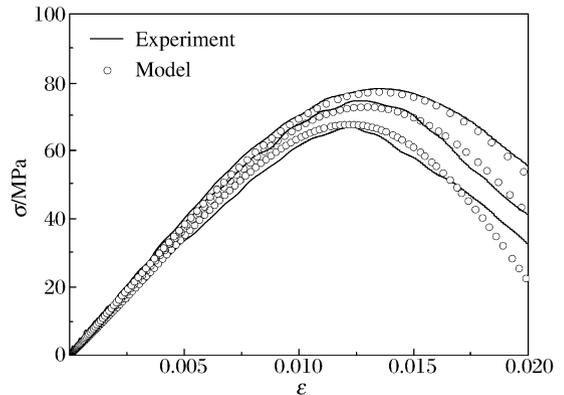


图 5 实验结果与修正的本构模型计算结果的比较  
Fig. 5 Comparison between the experimental data and the modified constitutive model

会导致应力在卸载过程出现差异,通过式(1)可获得试样中心区域的拉应力。读取压力峰值可以获得 PBX 炸药的拉伸强度,3 种 PBX 炸药的拉伸强度与应变率之间的关系如图 7 所示。从图中可以看出,3 种 PBX 炸药的拉伸强度均随应变率的增加而增加,且炸药密度越大,拉伸强度越大。

应变测量一般采用应变片,对巴西实验,可将应变片直接粘贴在测量区域,但对炸药这类破坏应变极小的材料,粘贴应变片的方法对应变有增强作用,这将影响对炸药拉伸应变的准确测量。本文中采用数字散斑相关方法来对 PBX 炸药的动态拉伸应变进行测量,炸药试样加载过程的数字图像由高速相机获得,获得运算区域的应变场后,取试样中心应变区域的平均应变为试样拉伸应变。

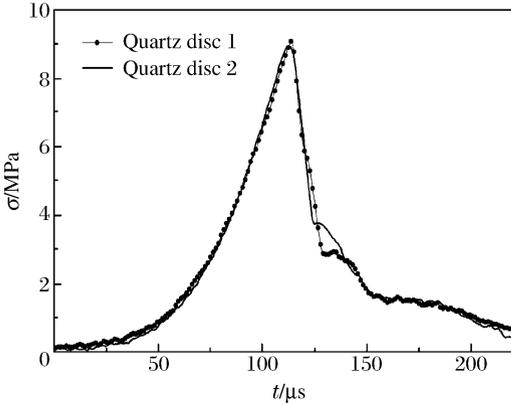


图 6 试样两端晶体片所测应力波形

Fig. 6 Stress waves obtained by using the quartz crystals at the two sides of the sample

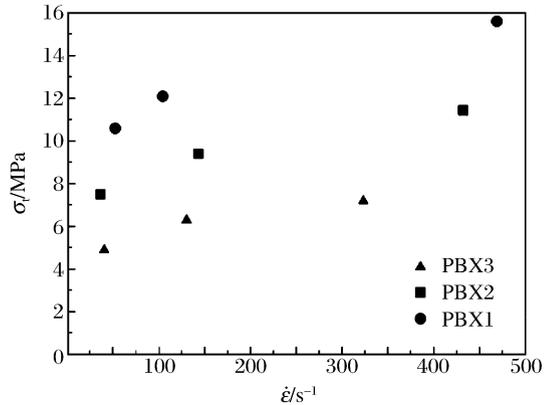


图 7 3 种 PBX 炸药试样不同应变率下的拉伸强度  
Fig. 7 Tensile strengths of the three PBX explosives at different strain rates

2.2.2 应变场分布

试样的破裂过程用高速相机实时拍摄,拍摄频率为  $180 \text{ ms}^{-1}$ ,分辨率为  $256 \text{ 像素} \times 80 \text{ 像素}$ ,相机触发信号由测速信号给出。将高速相机拍摄的时间与试样加载过程相关联,确定记录零时。PBX1 炸药高速摄影图像如图 8 所示。

将不同加载时刻的数字图像与初始图像进行数字散斑相关处理,相关区域如图 8 中虚线框区域所示,获得不同加载时刻的应变场如图 9 所示。在加载初期,应变较小,最大为 0.002 4。由于炸药试样为多组分材料,应变场并没有出现沿加载轴线的拉压对称分布,随着载荷的增加,拉伸应变逐渐增加,最大值为 0.003 2。在加载后期,出现了拉伸应变集中区域,最大拉应变为 0.009 4,并呈现出沿加载轴线的对称分布,此时预示试样表面即将出现裂纹。

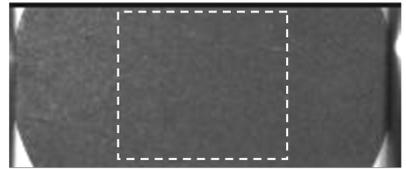


图 8 巴西实验初始时刻, PBX1 炸药的高速摄影图像  
Fig. 8 High-speed photography of the PBX1 explosive at the initial time in the dynamic Brazilian test

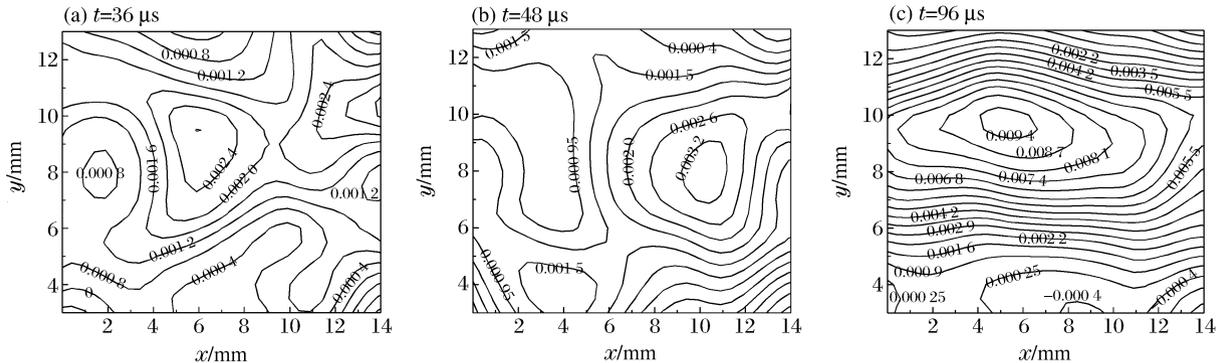


图 9 不同时刻运算区域的应变场

Fig. 9 Strain fields in the computational domain at different times

2.2.3 拉伸本构

由式(1)获得拉伸应力,采用数字相关方法获得拉伸应变,据此获得了3种炸药在不同应变率下的应力应变关系,如图10所示。3种炸药动态拉伸性能均表现出应变率相关性,拉伸强度随着应变率增加而增加,基于实验曲线的特征,采用修正的Johnson-Cook模型<sup>[10]</sup>描述3种炸药的动态拉伸行为

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = (A\epsilon - B\epsilon^n)[1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (3)$$

式中:等号右边第1部分描述炸药材料弹性和应变硬化特征,第2部描述应变率对炸药材料力学性能的影响,A、B具有应力量纲,n和C为量纲一常数,参考应变率 $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ 。利用模型描述3种PBX炸药动态拉伸本构关系的材料参数见表1。

表1 3种PBX炸药的材料参数

Table 1 Material parameters for three kinds of PBX explosives

炸药	A/GPa	B/GPa	n	C
PBX1	11.37	11.640	1.007	1.813
PBX2	6.47	6.990	1.021	1.829
PBX3	0.50	0.883	1.153	1.861

修正的本构模型曲线与实验数据对比如图10所示。从图中可知,采用表1中的材料参数,修正的Johnson-Cook模型能较好地描述3种炸药在不同应变率下的动态拉伸行为,模型曲线与实验数据符合较好。受数字相关方法采用的高速数字相机幅频的限制,仅能获得一定脉宽内的几个时刻的应变值,应变仅取到试样表面出现裂纹为止。

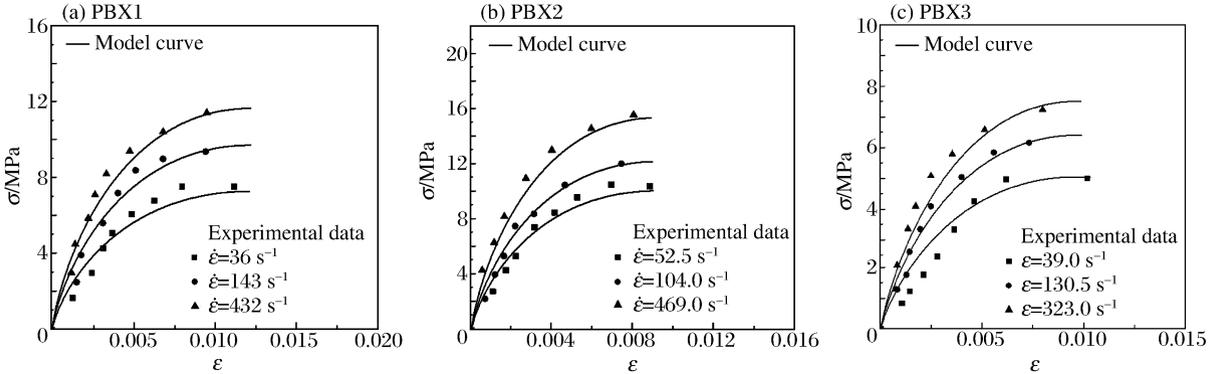


图10 3种炸药动态拉伸本构模型曲线与实验数据的对比

Fig. 10 Comparison between dynamic tension models and experimental data for three explosives

3 结 论

(1)采用 SHPB 入射波整形技术,实现了PBX炸药的恒应变率加载,采用半导体应变片与石英晶体联合测试的方法,得到了不同应变率下PBX1炸药的压缩应力应变曲线。

(2)PBX1炸药表现出明显的率相关性,其弹性模量、破坏强度和破坏应变随着应变率的增加而增加。对Sargin模型进行了修正,初步建立了该炸药的唯象模型。

(3)开展了3种PBX炸药的动态巴西实验,采用数字相关方法获得了试样裂纹附近的应变场分布,建立了可初步描述3种PBX炸药动态拉伸行为的修正的Johnson-Cook模型。

(4)拉、压实验结果的比较表明,PBX1炸药具有明显的拉压不对称性。

参考文献:

[1] Goudreau G, Moen W, Breithaupt D. Evaluation of mechanical properties of PBXW-113 explosive[R]. UCID-20358, 1985.  
 [2] Hoffman H J. High-strain rate testing of gun propellants[R]. ADA208826, 1988.  
 [3] Blumenthal W R, Thompson D G, Cady C M, et al. Compressive properties of PBXN-110 and its HTPB-based binder as a function of temperature and strain rate[C]//Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. Washington, DC: Office of Naval Research, 2002:530-549.

- [4] Johnson H D. Mechanical properties of LX-10-1 evaluated with the diametric disc test[R]. MHSMP-79-8, 1979.
- [5] Johnson H D. Diametric disc and standard tensile test correlation study[R]. MHSMP-81-22, 1981.
- [6] Rae P J, Gbldrein H T, Palmer S J P, et al. Studies of the failure mechanisms of polymer-bonded explosives by high-resolution moire interferometry and environmental scanning electron microscopy[C]//Proceedings of the 11th International Detonation Symposiums. Washington, DC: Office of Naval Research, 1998:235-239.
- [7] Quidot M, Racimor P, Chabin P. Constitutive models for PBX at high strain rate[C]//Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter-1999. New York: American Institute of Physics, 2000: 687-690.
- [8] Niels S O, Matti R. The mechanics of constitutive modeling[M]. Great Britain: Division of Solid Mechanics, Lund University, 2005:205-230.
- [9] Sargin M. Stress-strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete sections[J]. Solid Mechanics, 1971,6(4):23-46.
- [10] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Journal of Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(1):31-48.

## Experimental study on constitutive relations for plastic-bonded explosives<sup>\*</sup>

FU Hua<sup>1</sup>, LI Jun-ling<sup>1,2</sup>, TAN Duo-wang<sup>1</sup>

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. *Institute of Technical Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)*

**Abstract:** Dynamic uniaxial compression and indirect tensile (Brazilian) tests were conducted for certain typical plastic-bonded explosives on a split Hopkinson pressure bar (SHPB), respectively. The stress equilibrium and constant strain rate of low impedance materials were achieved by using the pulse shaper technique, and the stress-strain curves of the plastic-bonded explosives were obtained by combining the semi-conductor strain gauges and piezoelectricity quartz gauges. Based on the experimental data obtained, the phenomenological constitutive model for a certain plastic-bonded explosive was proposed by modifying the Sargin model. The fracture processes on the explosive sample surfaces were captured by using a high-speed camera in the dynamic Brazilian tests and the strain field was calculated by the digital speckle correlation method. And the modified Johnson-Cook models were obtained for three kinds of the plastic-bonded explosives. The obtained models are consistent with the experimental data.

**Key words:** solid mechanics; constitutive model; SHPB; plastic-bonded explosives; Brazilian test

\* Received 14 March 2011; Revised 6 September 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10902100)

Corresponding author: FU Hua, Huafu\_103@163.com