

文章编号: 1006-9941(2011)06-0684-05

## PBX 一维动态拉伸性能实验研究

蓝林钢, 温茂萍, 李明, 庞海燕, 敬仕明

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 合理选择输入杆、输出杆长度和合适的应变片贴片位置, 以实现拉伸应力波。利用 PBX 压缩强度远大于拉伸强度的性质, 不采用承压环, 在反射式霍普金森拉杆(SHTB)上对采用与铝杆端面粘接的 PBX 动态拉伸样品进行动态拉伸性能测试。结果显示, TATB 基炸药的动态拉伸强度, 在  $30 \text{ s}^{-1}$  应变率下动态拉伸强度达到了 13 MPa, 远高于准静态下的拉伸强度 7 MPa。采用扫描电镜对样品细微破坏形貌进行了观察, 结果表明, 由于动静态下裂纹不同发展方式和动态下升温使粘结剂发生了软化, 准静态下的拉伸破坏模式和动态下的模式明显不同, 准静态下是沿晶断裂和穿晶断裂共存, 动态拉伸下属于粘结剂脱粘破坏。

**关键词:** 固体力学; 反射式霍普金森拉杆; PBX; 动态力学性能; 高应变率

**中图分类号:** TJ55; TQ021.5; O34

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.019

### 1 引言

随着弹药撞击下安全性、安定性研究的深入, 高聚物粘结炸药(PBX)在高应变率下的响应越来越受到关注。中物院的李英雷<sup>[1]</sup>采用分离式霍普金森压杆(SHPB)研究了 TATB 基钝感炸药的动态本构关系, 国防科技大学吴会民<sup>[2]</sup>研究了三种含能材料应变率效应, 美国 Los Alamos 实验室的 Philip J Rae<sup>[3]</sup>研究了 PBX9501 炸药的不同温度不同应变率下的压缩应力-应变曲线。对于 PBX 在动态载荷下细观破坏机理的研究也愈来愈受到重视。张鹏<sup>[4]</sup>等研究了 PBX 代用材料的动态力学行为和破坏模式, 梁增友<sup>[5]</sup>等研究了 PBX 炸药及其模拟材料冲击损伤行为, 周栋<sup>[6]</sup>采用冲击压缩方法, 研究了 PBX 细观损伤演化模式, 赵峰<sup>[7]</sup>研究了飞片撞击下 JO-9159 炸药的脆性损伤。侵彻武器多次穿靶中, 在反射拉伸波作用下易发生层裂, 造成弹药的损伤, 引起后续压缩严重的反应。S. Lecume<sup>[8]</sup>研究了在紧随压缩后的快速剪切引起的 PBX 物理和化学改变。PBX 的动态拉伸性能也是 PBX 动态响应的重要方面, 限于 PBX 炸药加工的困难, 对 PBX 的动态拉伸性能研究较少, 仅有的一些研究采用

巴西间接拉伸实验方法<sup>[9]</sup>。材料的动态拉伸实验一般通过 Hopkinson 拉杆实现, 其中反射式 Hopkinson 拉杆(SHTB)技术是在压杆基础上改进的, 成本较低, 且操作简单的测试方法。胡时胜<sup>[10]</sup>对反射式 SHTB 中的一些技术进行了探讨。本实验采用反射式 SHTB, 设计加工了适合的 PBX 动态拉伸试样, 利用 PBX 压缩强度远低于拉伸强度的性质, 针对采用承压环波形信号振荡较大的问题, 对测试方法进行了部分改进, 实现了 TATB 基 PBX 动态拉伸性能测试, 并采用扫描电镜对细观破坏形貌进行了观察。

### 2 实验

#### 2.1 实验方法

反射式 SHTB 装置的工作原理如图 1 所示。实验中子弹沿轴向撞击输出杆, 引起压缩应力波在杆中传播, 套在试件外面的是一个与压杆同种材料的承压环, 承受压缩脉冲的主要部分, 从而保证试件不被压坏, 但它不能承受拉伸脉冲, 因此当压缩脉冲在输入杆的自由端反射后成了拉伸脉冲, 它将作为入射波作用到拉伸试件上, 同时在两个杆中产生反射波和透射波, 即可得到该试件材料的冲击拉伸的应力-应变曲线。

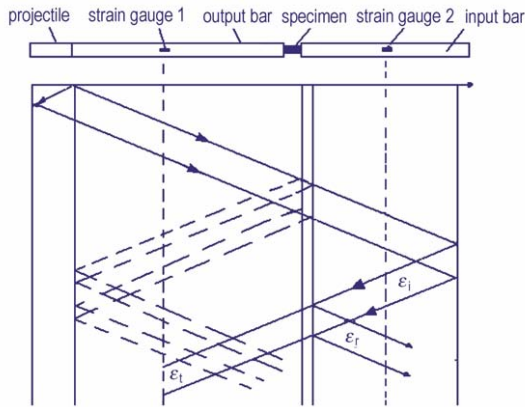
在采用承压环实验中发现波形有振荡, 所以, 利用 PBX 拉伸强度远低于压缩强度的性质, 本研究对 PBX 的实验方法进行改进, 示意图如图 1 所示。实验中不使用承压环, 通过控制加载强度, 即以较低的子弹速度, 使入射应力幅值低于 PBX 的屈服极限(该 PBX 准

收稿日期: 2010-07-12; 修回日期: 2011-04-25

基金项目: 中国工程物理研究院面上基金(2008B0203013); 自然科学基金(10832003)

作者简介: 蓝林钢(1972-), 男, 硕士, 助研, 从事炸药力学性能、库存性能研究。e-mail: llg20@sina.com

静态下的屈服强度为 32 MPa), 实现 PBX 样品的动态拉伸强度测试。文献[11]的研究表明, PBX 在准静态下第一次加载到接近屈服强度, 在第二次加载其破坏强度没有明显降低, 因此, 在本实验中初始压缩不会影响其拉伸强度<sup>[11]</sup>。



$\epsilon_i$ —incident wave,  $\epsilon_r$ —reflected wave,  $\epsilon_t$ —transmitted wave

图 1 反射式霍普金森拉杆 (SHTB) 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of reflected SHTB

### 2.2 实验样品

为保证一维应力状态, 借鉴准静态拉伸样品, 设计为哑铃型样品, 如图 2 所示。一般认为长径比  $L/d \geq 1.60$  时可获得比较稳定的数据<sup>[8]</sup>, 但是考虑应力平衡, PBX 样品尺寸太长, 则不容易达到应力平衡。因此设计长径比  $L/d = 2$ , 样品试验段直径和长度分别为 9, 18 mm, 哑铃端部直径和长度分别为 12, 5 mm, 标距长度 6 mm, 中间采用圆弧过渡。

金属样品一般采用螺纹连接, 但是 PBX 不能加工出螺纹, 因此通过端面粘接的方法实现动态拉伸试验, 粘胶采用自配的环氧胶, 固化时间为 8 h, 实现大于炸药拉伸强度的粘接强度。

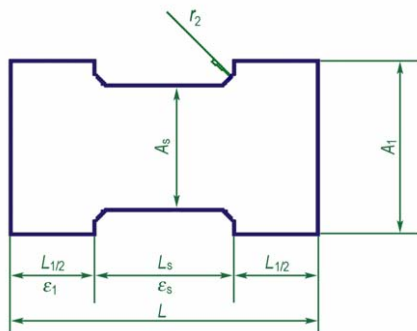


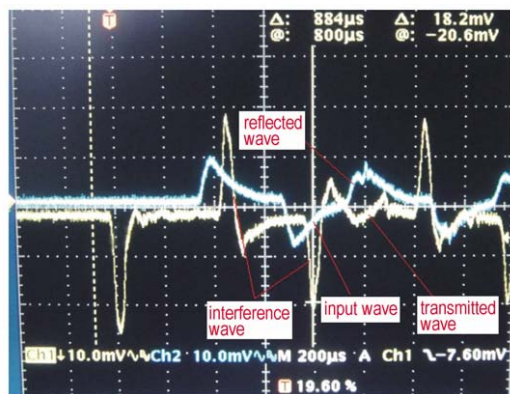
图 2 PBX 哑铃型样品

Fig. 2 Dog-bone sample of PBX

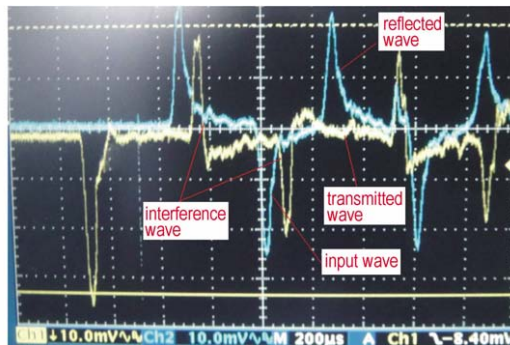
### 2.3 干扰波消除

螺纹结构的反射式拉伸试验中, 螺纹间隙的作用会产生干扰波。PBX 的拉伸实验中, PBX 阻抗比较低, 试样面积相对较大, 也会产生较大的反射波干扰信号。本研究哑铃型样品透射波缓慢卸载, 所得波形曲线较长, 进一步加剧各波形之间的叠加。这主要是哑铃型样品的应力波传播所致<sup>[12-13]</sup>。

为了消除干扰信号影响, 本研究选择长度为 100 mm 子弹, 缩短入射脉冲; 通过选配合适的杆长及选择合适的贴片位置以避免干扰信号, 选择入射杆为 1500 mm, 透射杆为 2000 mm, 输出杆应变片在距样品 1230 mm 处, 保证测到互不重叠的入射波  $\epsilon_i$  和反射波  $\epsilon_r$ , 同时在干扰压缩波到来前 400  $\mu s$  内样品处于拉伸波作用下, 应变片测试的透射波  $\epsilon_t$  也与干扰波时间上相互分离。图 3 为不采用承压环的拉伸试样和采用承压环的实验对比波形, 可见采用承压环的拉伸实验后期波形的震荡较大, 这是由于承压环不满足应力波的一维传播条件所致。不加承压环试样波形较光滑, 无明显振荡现象, 各波形幅值差距也较小。因此, 对于 PBX, 不采用承压环能够得到较好的结果。



a. diagram without ring



b. diagram with ring

图 3 反射式 SHTB 测得入射波、反射波、透射波

Fig. 3 Input wave, reflected wave, transmitted wave of SHTB

## 2.4 应变率、应变、应力计算

在满足应力波一维传播和应力平衡条件下, 拉伸应变率、应变、应力分别由式(1)~(3)计算<sup>[13]</sup>:

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2c\varepsilon_r}{l} \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2c}{l} \int_0^t -\varepsilon_r dt \quad (2)$$

$$\sigma_s(t) = \frac{AE\varepsilon_t}{A_s} \quad (3)$$

对于试件试验段应变计算, 如图2所示, 为了简化计算, 忽略圆弧过渡, 整个样品的应变为:

$$\varepsilon(t) = \frac{l_1}{l} \varepsilon_1 + \frac{l_s}{l} \varepsilon_s \quad (4)$$

假设弹性模量不变, 样品处于弹性状态, 可写为

$$\varepsilon(t) = \frac{l_1 A_s}{l A_1} \varepsilon_2 + \frac{l_s}{l} \varepsilon_s \quad (5)$$

试验段应变

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon(t) / \left( \frac{l_s}{l} + \frac{l_1 A_s}{l A_1} \right) = 1.3 \varepsilon(t) \quad (6)$$

式中,  $\dot{\varepsilon}_s(t)$  为应变率;  $\varepsilon(t)$  为样品应变;  $\sigma_s(t)$  为应力;  $\varepsilon$  为试样试验段应变;  $\varepsilon_1$  为试样端部的应变;  $l_1$  为试样试验段长度;  $l_2$  为试样端部长度;  $l$  为试样总长度;  $A_s$  为试样试验段面积;  $A_1$  为试样端部面积;  $A$  为 Hopkinson 试验杆的面积。

## 2.5 实验

实验在中物院化材所的 Hopkinson 杆上进行, 采用直径 20 mm 的 7075 铝杆, 测速采用国防科大研制的 KD205 红外测速仪, 应变测试采用国防科大研制的 KD205-1A 动态应变仪, 数据采集采用 Tektronix3014C 示波器。为了施加较低的压缩载荷, 加载速度为  $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为了消除高频振荡的影响, 采用两层胶布滤掉高频成分, 采用承压环的样品和不加承压环的样品各做三发, 实验如图4所示。

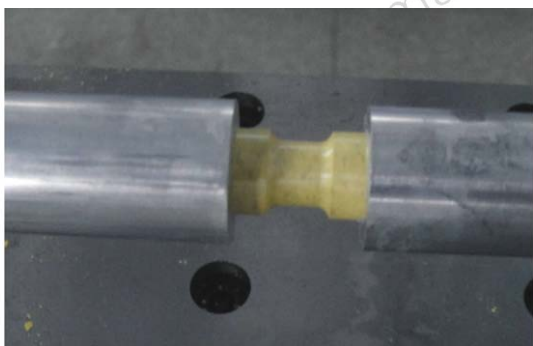


图4 不加承压环的 PBX 动态拉伸实验图

Fig.4 Diagram of dynamic tension PBX sample without ring

## 3 结果和讨论

### 3.1 PBX 动态拉伸性能实验的波形

PBX 动态拉伸性能实验结果如图5~图7所示, 图5、图6为测试得到入射波、反射波和透射波原始波形, 每  $0.2 \mu\text{s}$  采集一个点。图7为试样两端的应力平衡情况, 可见中间的两个曲线重合较好, 表明透射波、入射波与反射波之和基本相等, 较好地实现了两端应力平衡。实验样品在样品试验段断裂, 表明通过不加承压环的反射式 SHTB 方法能够实现 PBX 的动态拉伸性能测试。

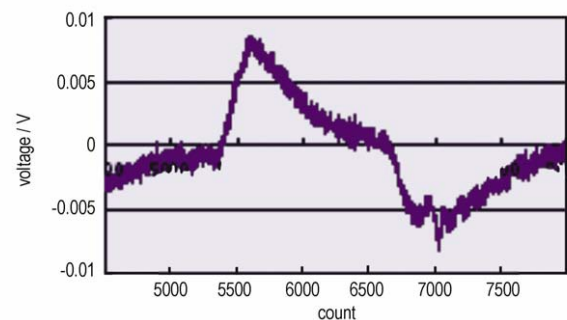


图5 拉伸入射波、反射波形图

Fig.5 Input wave and reflected wave

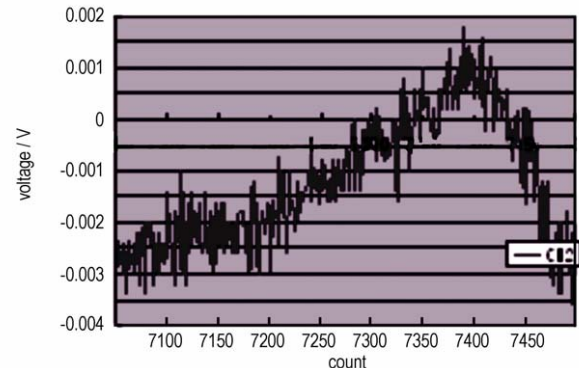


图6 拉伸透射波形图

Fig.6 Diagram of transmitted wave

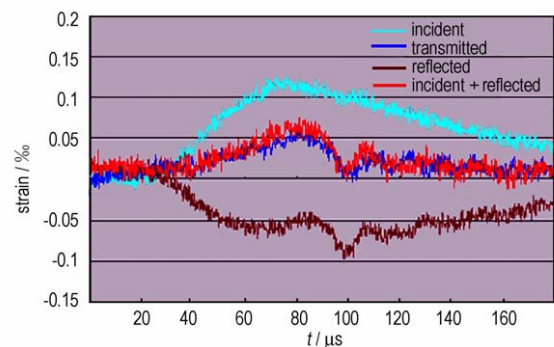


图7 应力平衡图

Fig.7 Diagram of stress equilibrium

### 3.2 PBX 动静态拉伸强度

利用公式(3)、公式(6),得到 TATB 基 PBX 的动态拉伸应力-应变曲线。为对比,选取了 INSTRON 5582 材料试验机上的数据作为 PBX 准静态下的拉伸性能,其中准静态拉伸样品为哑铃形样品,其尺寸为  $\Phi 15 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ ,加载速度为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,应变测试采用夹在样品上的 INSTRON 应变引伸计,应变率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$ 。采用 SHTB 得到的动态拉伸应力-应变曲线应变率为  $30 \text{ s}^{-1}$ 。

图 8 为 TATB 基 PBX 准静态下单轴拉伸应力-应变曲线和采用 SHTB 得到的动态拉伸应力-应变曲线。由图 8 可见,在  $30 \text{ s}^{-1}$  应变率下的动态拉伸强度达到了  $13 \text{ MPa}$ , $0.001 \text{ s}^{-1}$  应变率下的准静态拉伸强度为  $7 \text{ MPa}$ ,这表明,随着应变率的提高,动态拉伸强度有极大提高,与 PBX 动态压缩性能中显示的应变率效应相似。PBX 动态拉伸强度提高与不同状态下的细观破坏模式相关,也与粘结剂的粘弹性相关,应变率越高,初始弹性模量越高,因此动态拉伸强度越高。

### 3.3 动静态拉伸对样品形貌的影响

两种加载下破坏形貌的扫描电镜图如图 9 所示,准静态拉伸样品破坏形貌较粗糙,表面凹凸不平,颗粒状的破坏形态很常见。动态拉伸样品的破坏形貌则较光滑,没有颗粒状的破坏形态。在准静态拉伸时,在缺陷处初始裂纹扩展后该处应力得到松弛,从而在其它

缺陷处裂纹形成、扩展。而在动态拉伸下许多细小的裂纹来不及生长,沿主裂纹被拉断。

通过扫描电镜观察准静态拉伸样品和动态拉伸样品,结果如图 10、图 11 所示。

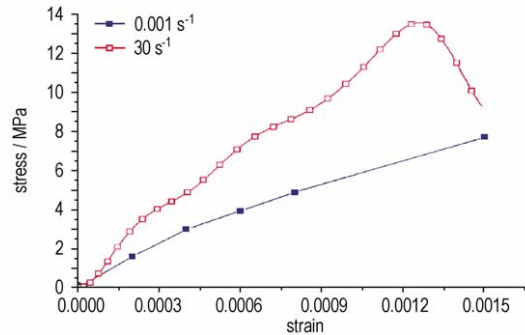


图 8 PBX 不同应变率下的拉伸强度

Fig. 8 Strength of PBX sample in different strain rate

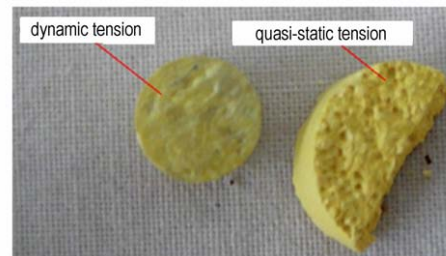


图 9 准静态拉伸和动态拉伸破坏样品断面形貌

Fig. 9 Diagram of destroyed photograph in the dynamic tension and static tension

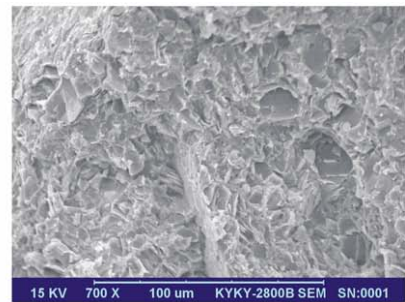
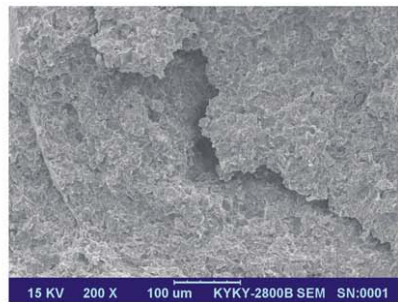
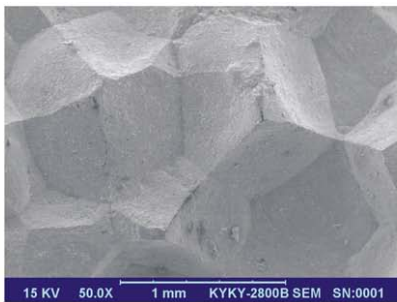


图 10 准静态拉伸破坏样品断面形貌

Fig. 10 Diagram of destroyed photograph in the static tension

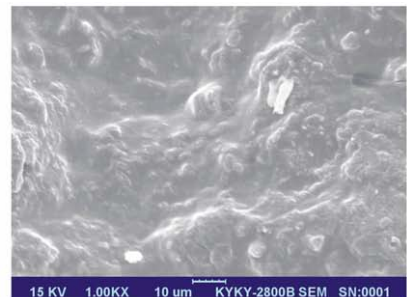
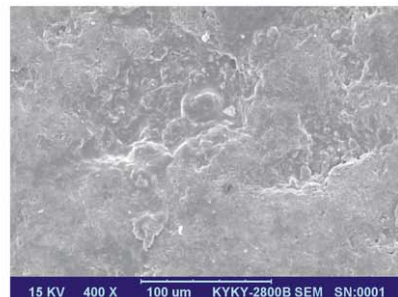
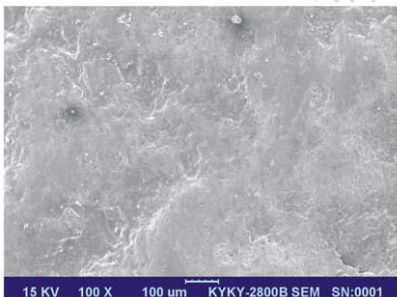


图 11 动态拉伸破坏样品断面形貌

Fig. 11 Diagram of destroyed photograph in the dynamic tension

图 10 和图 11 可见,在细观形貌上有很大区别,准静态下炸药晶粒有被拉出现象,以穿晶断裂和沿晶断裂为主;动态拉伸下则是明显的粘结剂脱粘,看不到明显炸药晶粒形状,以粘结剂脱粘破坏为主。说明 PBX 在动态加载下生成的热量使粘结剂软化,从而降低了粘结剂与单质炸药的界面强度,因此,细观上表现出脱粘破坏。

## 4 结 论

设计了 PBX 拉伸样品,选择合适的子弹、杆件长度,布置应变片,以及合理的应变处理方法,利用 PBX 拉压差别极大的性质,采用反射式 SHTB 实现了 PBX 的动态拉伸性能测试。实验结果表明,TATB 基 PBX 的动态破坏强度远大于静态破坏强度。准静态下的破坏模式和动态下的破坏模式有明显不同,动态下 PBX 属于粘结剂脱粘破坏。

### 参考文献:

- [1] 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,1998,19(4): 353-359.  
LI Ying-lei, LI Da-hong, HU Shi-sheng, et al. An experimental study on constitute relation of TATB explosive[J]. *Explosion and Shockwaves*,1998,19(4): 353-359.
- [2] 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.  
WU Hui-min, LU Fang-yun, LU Li, et al. Experimental studies on strain-rate effects of mechanical behavior of energetic materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004,12(4): 227-230.
- [3] Philip Rae, S Ma FHuang. The high temperature stress/strain and stress relaxation response of unconfined PBX 9501 between 21 °C and 210 °C [C] // Proceedings of 14th Symposium on Detonation.
- [4] 周栋,黄风雷,姚惠生. PBX 炸药细观损伤的实验研究[J]. 火炸药学报,2007,30(3): 16-18.  
ZHOU Dong, HUANG Feng-lei, YAO Hui-sheng. Meso-damage experimental studies on the PBX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2007,30(3): 16-18.
- [5] 赵锋,孙承纬,文尚刚,等. 飞片撞击下 JO-9159 炸药脆性损伤 [J]. 爆炸与冲击,2001,21(2): 121-125.  
ZHAO Feng, SUN Cheng-wei, WEN Shang-gang, et al. Brittle fracture of high explosive JO-9159 under plate impact loading [J]. *Explosion and Shockwaves*,2001,21(2): 121-125.
- [6] 张鹏,赵峰,百树林,等. PBX 代用材料动态力学行为和微观结构的实验研究[J]. 高压物理学报,2007,21(1): 20-28.  
ZHANG Peng, ZHAO Feng, BAI Shu-ling, et al. Experimental study on the microstructures and dynamic behavior of a PBX substitute material [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2007,21(1): 20-28.
- [7] 梁增友,黄风雷,段卓平,等. PBX 炸药及其模拟材料冲击损伤的试验研究[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(2): 131-134.  
LIANG Zeng-you, HUANG Fei-lei, DUAN Zhuo-ping, et al. Experiment study on impact damage of PBX [J]. *Journal of Projectiles, Rockets Missiles and Guidance*,2008,28(1): 131-134.
- [8] 胡时胜,邓德涛,任小彬. 材料冲击拉伸实验的若干问题探讨[J]. 实验力学,1998,13(1): 9-14.  
HU Shi-sheng, DENG De-tao, REN Xiao-bing. A study on impact tensile test of materials [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998,13(1): 9-14.
- [9] 赵玉刚,傅华,李俊玲,等. 三种 PBX 炸药的动态拉伸力学性能 [J]. 含能材料,2011,19(2): 194-199.  
ZHAO Yu-Gang, FU Hua, LI Jun-ling, et al. Dynamc tensile mechanical properties of three types of PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011,19(2):194-199.
- [10] 胡时胜,邓德涛,任小彬. 材料冲击拉伸实验的若干问题探讨[J]. 实验力学,1998,13(1): 9-14.  
HU Shi-sheng, DENG De-ao, REN Xiao-bing. A study on impact tensile test of materials [J]. *Journal of experimental mechanics*, 1998,13(1): 9-14.
- [11] 蓝林钢. 高聚物粘结炸药疲劳特性研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院,2004.  
LAN Lin-gang. Study on fatigue properties of PBX [D]. Mianyang: CAEP,2004.
- [12] 刘孝敏,胡时胜. 应力脉冲在变截面 SHPB 锥杆中的传播特性 [J]. 爆炸与冲击,2000,20(2): 110-114.  
LIU Xiao-min, HU Shi-sheng. Wave propagation characteristics in cone bars used for variable cross-section SHPB [J]. *Explosion and Shockwaves*,2000,20(2): 110-114.
- [13] 张方举,陶俊林,田常津. 变截面弹丸在分离式 Hopkinson 压杆中的应用 [J]. 实验力学,2003,18(1): 137-140.  
ZHANG Fang-ju, TAO Jun-lin, TIAN Chang-jin. Experimental investigation on the dynamic failure phenomena of PMMA under the loading of Hopkinson pressure bar [J]. *Journal of Applied Mechanics*,2003,18(1): 137-140.

## One-dimension Dynamic Tensile Properties of PBX

LAN Lin-gang, WEN Mao-ping, LI Ming, PANG Hai-yan, JING Shi-ming

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Through designing dynamic tensile sample of PBX, selecting length of input bar and output bar, placing strain gauge in proper position, improving experiment methods based on properties of PBX which compressive strength was greater than tensile strength, it was realized dynamic tensile strength in the reflected split Hopkinson press bar (SHTB). It showed dynamic tests beared high tensile strength. Dynamic tensile strength of PBX attained 13 MPa in 30 s<sup>-1</sup> strain rate while quasi-static tensile strength was only 7 MPa. Through observed by SEM, quasi-static tension failure was different with dynamic tension failure because crack had different expand methods and temperature rise induced binder soften. Destroyed model in quasi-static tension was transcrystalline fracture and intergranular fracture and it was binder debonded in dynamic tension.

**Key words:** solid mechanics; split Hopkinson press bar (SHTB); PBX; dynamic mechanical property; high strain rate

**CLC number:** TJ55; TQ021.5; O34

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.019