

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.03.007

# 一种 RDX 基 PBX 炸药力学性能和本构关系研究\*

屈可朋 沈 飞 肖 玮 王世英

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 利用分离式霍普金森压杆(SHPB)对一种 RDX 基 PBX 炸药进行了高应变率加载试验,得到了其在不同应变率( $300 \sim 1\,200\text{ s}^{-1}$ )范围内的力学性能,并用扫描电子显微镜(SEM)对回收样品进行了微观分析。结果表明:材料的力学性能和损伤均具有明显的应变率效应。采用含损伤的 ZWT 非线性黏弹性本构模型,对试验数据进行了拟合,拟合曲线和试验曲线吻合良好。

[关键词] 含能材料;RDX 基 PBX 炸药;分离式霍普金森压杆(SHPB);力学性能;本构关系

[分类号] TQ564;O347.3

## 引言

炸药在不同的外界刺激下的力学性能决定了炸药装药的易损性,而炸药装药的安全性影响着武器装备的安全性和生存能力<sup>[1]</sup>。在实际应用中,炸药装药在发射、侵彻等服役过程中,要承受高速率的动态载荷。为确保武器装备在服役时的安全性,就必须开展炸药在高速加载条件下的力学性能和本构关系研究。国内外众多学者围绕含能材料在动态加载条件下的力学性能、损伤模式及本构关系开展了广泛研究。Williamson 等<sup>[2]</sup>研究了应变率和温度对 EDC37 炸药力学性能的影响规律。Tasker 等<sup>[3]</sup>研究了 PBXW-128 炸药在  $10^3 \sim 10^4\text{ s}^{-1}$  应变率范围内的动态拉伸力学性能。国内,卢芳云<sup>[4-5]</sup>、傅华<sup>[6]</sup>、罗景润<sup>[7]</sup>、李英雷<sup>[8]</sup>等分别针对不同含能材料的动态力学性能开展了研究,并分别建立了适用于特定炸药的本构关系。

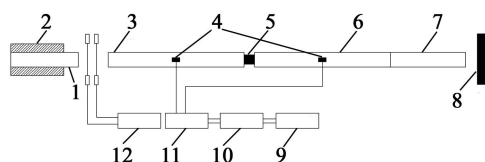
本文以一种新型抗过载 PBX 炸药为对象,测量了其在  $10^2 \sim 10^3\text{ s}^{-1}$  应变率范围内的力学性能,分析了冲击前后样品的微观形貌变化,并利用含损伤的朱-王-唐(ZWT)非线性黏弹性本构模型,拟合得出了其在高应变率下的本构关系,以期为其可靠应用提供参考。

## 1 试验部分

### 1.1 试验装置

本试验所用的装置为分离式霍普金森压杆(SHPB)装置(图1)。该装置由发射系统、子弹、入射杆、透射杆、吸收杆、阻尼器及相关测试系统组成。SHPB 试验方法是在均匀性假设和一维应力波假定

的基础上,通过记录试验中入射杆和透射杆中的脉冲信号,从而计算获取试样动态应力-应变曲线。



1-子弹;2-发射管;3-入射杆;4-应变片;5-试样;  
6-透射杆;7-吸收杆;8-阻尼器;9-数据处理系统;  
10-数字示波器;11-动态应变仪;12-激光测速系统

图1 分离式霍普金森压杆试验装置示意图

Fig.1 Test device of split Hopkinson pressure bar

### 1.2 试样的制备及装配

该PBX炸药的主要成分(质量分数)为55% RDX、40%铝粉和5%高分子黏结剂和钝感剂。试样由西安近代化学研究所提供,采用模具压制成型,试样直径为12 mm,厚度分别为5 mm和7 mm,密度约为  $1.90\text{ g/cm}^3$ 。试验用子弹、入射杆和透射杆均采用直径为16 mm的LY12铝杆,长度分别为400、1 200 mm和1 200 mm。通过改变子弹的撞击速度和试样厚度,实现不同的应变率加载,分别采用超动态应变仪和示波器记录导杆中的脉冲波形。

为实现样品的常应变率加载,在入射杆靠近发射管一端粘贴 $\varnothing 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的铜片作为整形器,用于延长脉冲波形上升时间,增大脉冲宽度<sup>[9]</sup>。

## 2 试验结果

### 2.1 力学性能

图2为该PBX炸药在  $300\text{ s}^{-1}$  和  $1\,200\text{ s}^{-1}$

\* 收稿日期:2014-08-28

作者简介:屈可朋(1983~),男,工程师,主要从事弹药材料动力学响应研究。E-mail:qukepeng@gmail.com

应变率下的力学性能曲线。由图 2 可知,该 PBX 炸药的动态弹性模量和峰值应力与加载应变率有关。随应变率的增大,动态弹性模量和峰值应力均增加,峰值应力由 26.2 MPa 增加到 38.0 MPa,但峰值应力点处的应变则基本保持不变,约为 0.033。

一般来说,材料表现出的力学性能的变化必然伴随着其内部损伤的演化。材料力学的相关理论将应力应变曲线分为弹性变形、应力强化和应变软化 3 个阶段,分别对应于可逆损伤、不可逆损伤和损伤的积累过程。由该 PBX 炸药的应力应变曲线可知,不同应变率下材料由弹性阶段过渡到强化阶段时的应力应变值不同,这可能是因为不同应变率下该 PBX 炸药的损伤形式不同。

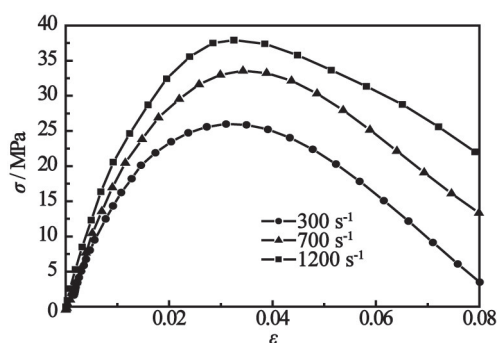


图 2 PBX 炸药的动态  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线

Fig. 2 Dynamic  $\sigma$ - $\varepsilon$  curves of the PBX explosive

## 2.2 样品的破坏过程

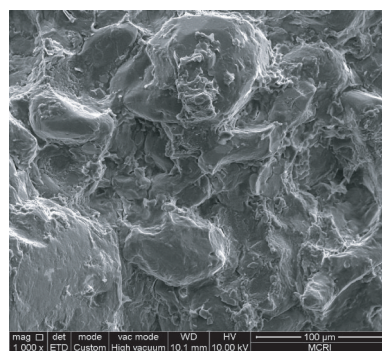
压装炸药在成型过程中,由于颗粒间相互挤压,不可避免地存在初始损伤。当试样受到外界刺激时,初始裂纹在外界刺激的作用下会发生扩展,不同位置的裂纹在扩展过程中发生汇集及贯通,最终导致样品破坏,且随冲击速度的增大,裂纹还会向颗粒内部扩展,导致试样出现了明显的穿晶断裂,破碎成细小的颗粒<sup>[10]</sup>。

图 3 为该 PBX 原始试样和高应变率加载后试样的微观结构照片。由图 3 可以看出,该 PBX 炸药原始试样中存在明显的初始裂纹和局部黏结剂脱粘现象,如图 3(a);这些初始缺陷在低应变率加载时,颗粒无明显破碎,破坏形式主要为界面的脱粘,如图 3(b);而随着应变率的增大,颗粒发生明显的破碎,说明初始裂纹发生了扩展、汇集及贯通,如图 3(c)。

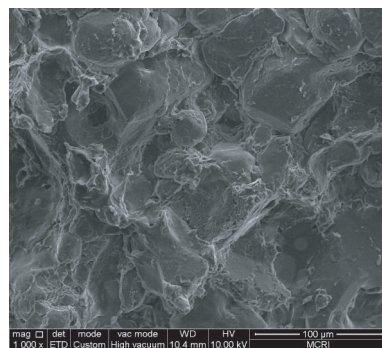
可见,该 PBX 炸药原始样品存在初始缺陷,在不同的加载条件下,初始缺陷引发的材料最终损伤形式有所不同,即该 PBX 炸药的损伤亦具有明显的应变率效应。

## 3 PBX 炸药的本构关系

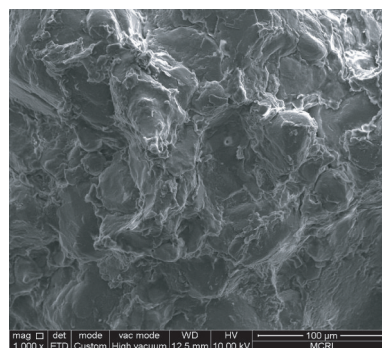
从以上试验结果可知,该 PBX 炸药是一种颗粒



(a) 原始样品



(b) 应变率  $300 \text{ s}^{-1}$



(c) 应变率  $1200 \text{ s}^{-1}$

图 3 PBX 炸药的微观结构照片 ( $\times 1000$ )

Fig. 3 Misconstruction photos of the PBX explosive ( $\times 1000$ )

高度填充的聚合物,原始样品中存在初始裂纹,在高应变率下其力学性能表现出较强的非线性特征。可以认为,该 PBX 炸药是一种含预损伤的非线性黏弹性体。因此,本研究采用含损伤的朱-王-唐 (ZWT) 非线性黏弹性本构模型<sup>[11]</sup>,描述该 PBX 炸药在不同应变率下的力学行为。

含损伤的 ZWT 本构模型的方程形式为:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= (1-D) \left[ E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp \left( -\frac{t-\tau}{\theta_1} \right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp \left( -\frac{t-\tau}{\theta_2} \right) d\tau \right]; \\ D &= D_0 \dot{\varepsilon}^{\delta-1} (\varepsilon - \varepsilon_{th}), \quad 0 \leq D \leq 1. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中:  $E_0$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $E_1$ 、 $\theta_1$ 、 $E_2$ 、 $\theta_2$  是材料常数;  $D$  表示材料的损伤因子;两个积分项分别表示材料在低应变率

和高应变率下的 Maxwell 响应; $\delta$  为与损伤及应变率有关材料参量; $\varepsilon_{th}$  为应变阈值, $\varepsilon < \varepsilon_{th}$  时,  $D = 0$ 。

对于该 PBX 炸药,原始样品中已有初始损伤存在,在高应变率加载条件下,初始裂纹发生扩展、汇集及贯通,最终造成材料的破坏,因此,可取  $\varepsilon_{th} = 0$ ,并忽略低应变率积分项,故式(1)可变为:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= (1 - D) \left[ E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp \left( -\frac{t - \tau}{\theta_2} \right) d\tau \right]; \\ D &= \varepsilon D_0 \dot{\varepsilon}^{\delta-1}, \quad 0 \leq D \leq 1. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

用式(2)进行数据拟合后,得到的材料本构参数如表 1 所示。图 4 给出了该 PBX 炸药本构关系的拟合情况,由图 4 可见,所建立的本构方程能够较好地描述该 PBX 炸药在高应变率条件下的力学行为(材料弱化之前)。

表 1 本构关系参数

Tab. 1 Parameters of constitutive model

$D_0$	$\delta$	$E_0 / \text{MPa}$	$\alpha$	$\beta$	$E_2 / \text{MPa}$	$\theta_2 / \text{s}$
0.8	0.8	1 350	$-2.21 \times 10^4$	$1.7 \times 10^4$	1 300	$1.35 \times 10^{-5}$

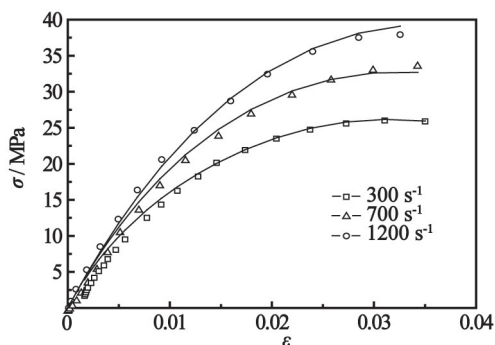


图 4 本构关系拟合结果

Fig. 4 Fitting results of the constitutive relation

该 PBX 炸药在高应变率下的应力软化现象尚不能由上述本构关系进行描述,可能有 2 个原因:

1) 软化阶段的内部损伤规律与强化阶段有所不同;

2) 在上述本构方程中,未能描述由于塑性变形引起的应力热软化效应。

因此,对于该 PBX 炸药冲击弱化之后力学行为的描述,还需要进行进一步的研究。

#### 4 结论

1) 随应变率的增加,该 PBX 炸药的动态弹性模量和峰值应力增大,而峰值应力处的应变则基本保持在 0.033。

2) 该 PBX 炸药中存在初始裂纹,在冲击载荷作用下,初始裂纹发生扩展、汇集及贯通,最终导致材料破坏。采用含损伤的 ZWT 非线性黏弹性本构模型对试验数据进行了拟合,结果表明该本构方程能较好地描述了该 PBX 炸药弱化前的力学行为。

#### 参考文献

- [1] 梁增友. 炸药冲击损伤与起爆特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] Williamson D M, Siviour C R, Proud W G, et al. Temperature-time response of a polymer bonded explosive in compression (EDC37) [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(8): 1-10.
- [3] Tasker D G, Dick R D, Wilson W H. Mechanical properties of explosives under high deformation loading conditions [C]//10th American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Massachusetts: American Institute of Physics, 1998, 429(1): 591-594.
- [4] 卢芳云, 吴会民, 王晓燕, 等. 两种炸药材料本构行为的应变率效应分析[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊): 280-285.  
Lu Fangyun, Wu Huimin, Wang Xiaoyan, et al. Analysis of strain-rate effects on constitutive behaviors of two explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(Suppl.): 280-285.
- [5] 吴会民, 卢芳云. 一种高聚物粘结炸药和 B 炸药的本构关系研究[J]. 高压物理学报, 2005, 19(2): 139-144.  
Wu Huimin, Lu Fangyun. Research on constitutive relation of a polymer bonded explosive and pressed Comp. B [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(2): 139-144.
- [6] 傅华, 李俊玲, 谭多望. PBX 炸药本构关系的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(3): 231-236.  
Fu Hua, Li Junling, Tan Duowang. Experimental study on constitutive relations for plastic-bonded explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(3): 231-236.
- [7] 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.
- [8] 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): 353-359.  
Li Yinglei, Li Dahong, Hu Shisheng, et al. An experimental study on constitutive relation of TATB explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4): 353-359.
- [9] 卢芳云, Frew D J, Chen W. 软材料的 SHPB 实验设计[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(1): 15-19.



- sives[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1993, 440(1909): 399-419.
- [13] 王彩玲, 陈松, 赵省向, 等. Al 粉对 RDX 机械感度的

- 影响[J]. 火工品, 2010(1): 32-34.
- Wang Cailing, Chen Song, Zhao Shengxiang, et al. Influence of Al powder on mechanical sensitivity of RDX [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(1): 32-34.

## Effect of Aging on Detonation Velocity and Mechanical Property of Aluminized Thermobaric Explosive

WU Dejun<sup>①</sup>, CHEN Yuan<sup>①</sup>, XU Sen<sup>①②</sup>, LIU Dabin<sup>①</sup>

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To study the effects of aging test at high-low temperatures on the properties of aluminized thermobaric explosive, the research of mass-change and compressive strength were conducted, and the detonation velocity of aluminized thermobaric explosive was also measured by electric probe method before and after the aging test. The results show that the quality of the samples decreases with the increase of aging time. The detonation velocity of the samples is 6 685 m/s before aging test, and is 6 590 m/s and 6 799 m/s respectively after aging 14 days and 28 days. The detonation velocity has not changed significantly. The compressive strength of the samples is 5.694 MPa before aging test. The compressive strength of the untreated sample is 9.110 MPa and 9.615 MPa after aging 14 days and 28 days, and that of treated sample is 6.523 MPa and 6.717 MPa. The compressive strength of the treated sample is lower than that of the untreated sample. The treatment of the samples could significantly slow down the increase of the compressive strength.

[KEY WORDS] aging test; detonation velocity; compressive strength; mechanical property

(上接第 33 页)

- Lu Fangyun, Frew D J, Chen W. A design of SHPB experiments for soft materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22 (1): 15-19.
- [10] 屈可朋, 肖玮, 韩天一, 等. RDX 基 PBX 炸药的力学行为和损伤模式[J]. 火炸药学报, 2012, 35 (5): 38-44.
- Qu Kepeng, Xiao Wei, Han Tianyi, et al. Mechanical behavior and damage model of RDX-based PBX explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,

2012, 35(5): 38-44.

- [11] 周风华, 王礼立, 胡时胜. 有机玻璃在高应变率下的损伤型非线性粘弹性本构关系及破坏准则[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(4): 333-342.
- Zhou Fenghua, Wang Lili, Hu Shisheng. A damage-modified nonlinear visco-elastic constitutive relation and failure criterion of PMMA at high strain-rates[J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(4): 333-342.

## Mechanical Behavior and Constitutive Model of one RDX-based PBX Explosive

QU Kepeng, SHEN Fei, XIAO Wei, WANG Shiyang

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Mechanical behaviors of one RDX-based PBX explosive were investigated experimentally by split Hopkinson pressure bars (SHPB) at different strain-rates (ranged from 300 to 1200 s<sup>-1</sup>) respectively. The recovered specimens were analyzed by scanning electron microscope (SEM). The results show that the mechanical behaviors and the damage of the RDX-based PBX explosive are obviously rate-dependent. The constitutive model of damage-modified ZWT nonlinear visco-elastic was fitted by using the stress and strain data, which is in accord with the experiment curves well.

[KEY WORDS] energetic material; RDX-based PBX explosive; split Hopkinson pressure bars (SHPB); mechanical behavior; constitutive model