

文章编号: 1006-9941(2004)04-0227-04

三种含能材料力学行为应变率效应的实验研究

吴会民^{1,2}, 卢芳云^{1,2}, 卢力², 宋先邨²

(1. 冲击波物理与爆炸物理国防重点实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 国防科技大学理学院应用物理系, 湖南 长沙 410073)

摘要: 利用分离式霍普金森杆和万能材料试验机对复合固体推进剂(CSP)、高聚物粘接炸药(PBX)和B炸药(Comp. B)三种材料进行了高应变率和准静态压缩实验, 得到了常温常压下, 不同应变率的材料应力-应变曲线, 对这三种材料本构行为的应变率效应进行了研究。

关键词: 固体力学; 含能材料; 高应变率; 准静态压缩; 本构行为

中图分类号: O338

文献标识码: A

1 引言

含能材料包括炸药、推进剂和发射药等, 是武器杀伤、破坏和动力能源的关键材料。在实际应用当中, 含能材料在装配、运输、和正常服役条件下要经受振动、冲击; 在穿甲、钻地等武器正常使用时, 要承受较高的动态载荷作用; 在事故条件下, 要经受跌落、撞击、弹丸或碎片的冲击载荷作用。在这些过程当中, 含能材料的响应首先表现为材料的力学响应。含能材料的力学响应可能进而影响其起爆性质和爆轰性能。

随着现代高性能武器系统的发展, 对提高含能材料装药在各种条件下安全性的要求日益迫切, 含能材料的本构关系的研究也越来越受到重视^[1-3]。为此, 本文对几种含能材料在不同应变率情况下的本构行为进行了实验研究。

2 实验装置和原理

2.1 SHPB 实验

采用国防科技大学自行研制的分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)进行高应变率的动态加载实验, 得到了三种含能材料高应变率条件下应力-应变曲线。

SHPB 由撞击杆、输入杆和输出杆组成, 被测试样夹在输入杆和输出杆之间, 如图 1 所示。实验中所有

的杆均采用 LC4 铝杆, 直径 20 mm, 材料密度 $2.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 杨氏模量 71 GPa。入射杆长 1 800 mm, 透射杆长 1 000 mm, 子弹长 200 mm。应变测试采用自行研制的 KD205-1A 超动态应变仪, TDS3014B 数字存储示波器被用于采集实验信号。

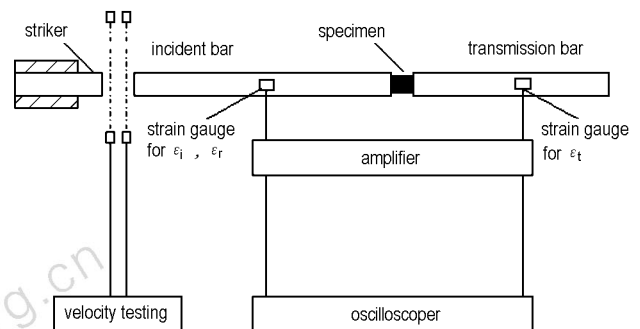


图 1 SHPB 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of SHPB setup

实验中撞击杆以一定的速度沿轴向撞击输入杆, 引起压缩应力波在杆中传播。要求输入杆和输出杆只发生弹性变形, 杆中应力波作一维传播。当应力波到达试样时, 一部分波反射回输入杆中, 一部分波作用于试样, 之后进入输出杆中。当应力波的宽度远大于波通过试样所需的时间时, 则认为试样在受载期间处于一种均匀变形和应力平衡的状态, 这时有 $p_1 = p_2$, p_1 、 p_2 是试样前后表面所受的力。对于输入杆和输出杆为相同材料, 且有相同截面积时, 导出 $\epsilon_t = \epsilon_i + \epsilon_r$, 式中 ϵ_i 、 ϵ_r 和 ϵ_t 分别表示由入射波、反射波和透射波在杆中传播引起的实时应变。这些应变由贴在杆表面的应变片测得。

收稿日期: 2003-12-11; 修回日期: 2004-03-12

基金项目: 冲击波物理与爆炸物理国家重点实验室基金(51478030201-KJ0103); 国家自然科学基金项目(10276038)

作者简介: 吴会民(1974-), 男, 硕士研究生, 研究方向为含能材料本构关系。e-mail: wuhuimin 93@163.com

试样中的应力和应变由下列公式求出:

$$\sigma(t) = \frac{A_0}{A_s} E \varepsilon_t(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \int -\frac{2c_0}{L} \varepsilon_r(t) dt \quad (2)$$

式中 E, A_0 为杆的杨氏模量和横截面积, c_0 是杆中的弹性波速度。 L 和 A_s 为试样的厚度和截面积。试样材料的本构关系 (σ - ε 曲线) 由公式(1)和(2)联合给出。

真实应力应变通过下列公式转换得到,

$$\varepsilon_T(t) = -\ln(1 - \varepsilon(t)) \quad (3)$$

$$\sigma_T(t) = (1 - \varepsilon(t)) \sigma(t)$$

实验中采用入射波整形技术^[4~5], 在入射杆的端面上, 用真空脂粘贴一铜质整形器, 通过调整该铜质整形器的尺寸和撞击杆的速度, 控制入射波的形状。对于复合固体推进剂, 通过整形技术增加入射波上升沿的时间, 使得试样中的应力达到平衡; 对于 B 炸药和 PBX 炸药采用整形器时的入射波近似为一斜波。

图 2 为 CSP 材料 SHPB 实验中的原始波形图。其中 1 通道为入射波(第一个梯形脉冲)和反射波(第二个梯形脉冲)信号, 2 通道为透射波信号, 3、4 通道为试样两端面应力平衡监测信号。从图中可以看出反射波基本为一平台, 这说明大部分加载时间上实现了常应变率加载; 同时, 3、4 两个通道的波形也基本重合, 这说明实现了应力平衡。

由于采用整形器后得到的 B 炸药与 PBX 炸药的波形相似, 所以本文以 B 炸药的三波分离典型曲线作比较(见图 3)。从图中可以看出在试样失效之前, 反射波为一平台; 同时反射波和入射波之和等于透射波。这就意味着实验中大部分加载时间内基本上实现了常应变率加载, 并在试样中达到了应力平衡。

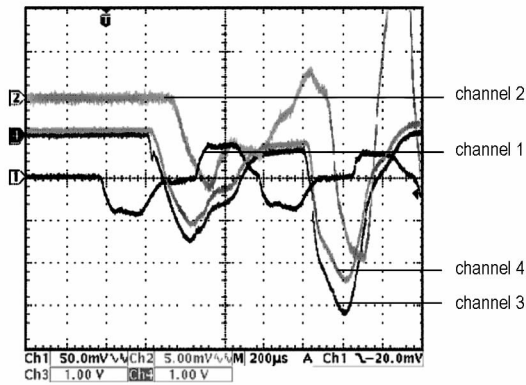


图 2 CSP 材料 SHPB 实验原始波形

Fig. 2 Oscilloscopic records from a CSP test

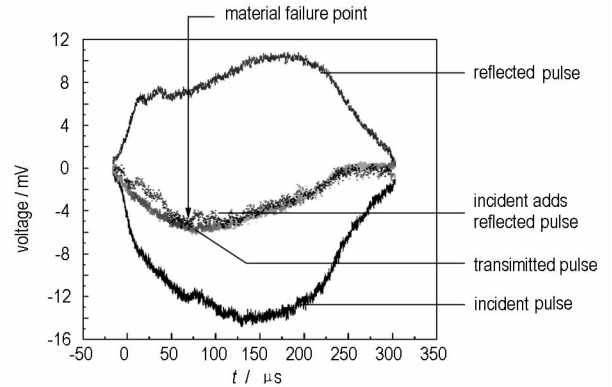


图 3 B 炸药 SHPB 实验波形分离图

Fig. 3 Splitted wave-forms from a Comp. B test

综上所述, 通过采用整形器控制入射波波形, 对于 CSP 软材料, 材料在加载过程中达到了应力平衡并基本上实现了大部分加载时间为常应变率加载; 对于 B 炸药和 PBX 炸药这样的脆性材料在试样破坏前也实现了应力平衡和常应变率加载。

2.2 准静态压缩实验

为了得到三种含能材料在低应变率条件下的应力应变曲线, 进行了准静态压缩实验。准静态压缩实验在青山牌 WDW-100B 微机控制万能材料试验机上进行, 辅助设备包括函数记录仪、YJS-D 数字应变仪、力传感器、位移传感器等。

3 实验结果与分析

利用 SHPB 实验装置和万能材料试验机, 对三种含能材料进行了不同应变率下的试验, 得到了在不同应变率下的压缩应力应变曲线。

3.1 PBX 炸药的压缩应力应变曲线

图 4 给出 PBX 炸药在不同应变率 ($10^{-4} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$) 下的压缩应力应变曲线。实验中最高应变率为 640 s^{-1} , 罗景润^[3]在对 PBX 类炸药材料进行动态实验研究时, 最高应变率为 220 s^{-1} 。由此可见, 采用整形器可以改善加载条件, 实现较高应变率的加载。

从 PBX 炸药的应力应变曲线中可以看出 PBX 炸药的力学性能具有明显的应变率相关性。其失效应力随着应变率的增加而增加; 其失效应变在准静态实验条件下基本不变; 但是, 在高应变率条件下其失效应变随着应变率的增加反而降低。表 1 给出了不同应变率应力应变曲线的几个特征参数。对回收试样的观察表明, 试样破坏是沿轴线方向开裂, 在失效应力状态下, 试样开始破坏。表 1 中数据表明, 在准静态实验条件

下,其失效应变为常数,大约为 0.033;在高应变率实验条件下,失效力与失效应变的乘积基本为一常数,其值约为 0.8。这表明,PBX 炸药在准静态实验条件下的破坏由最大应变准则控制;而在高应变率条件下其破坏由能量准则控制。这可能是由于 PBX 炸药在不同加载条件下,其破坏机理不同造成的。

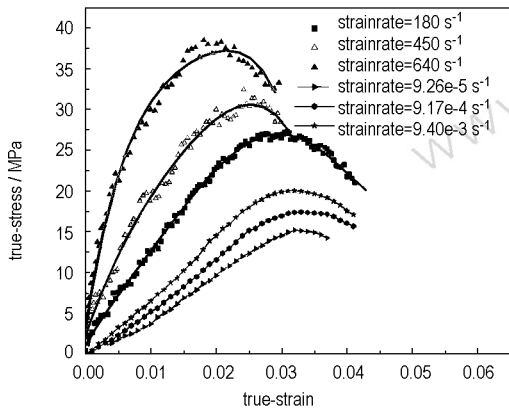


图4 不同应变率下 PBX 炸药的压缩应力应变曲线
Fig.4 Compressive stress-strain curves of the PBX

表 1 不同应变率条件下 PBX 炸药的失效力和失效应变
Table 1 Failure stress and failure strain of PBX at various strain-rates

strain-rate /s ⁻¹	failure stress/MPa	failure strain	product of failure stress and failure strain/MPa
180	26.97	0.030	0.81
450	30.60	0.025	0.77
640	37.50	0.021	0.79
9.26 × 10 ⁻⁵	15.20	0.033	
9.17 × 10 ⁻⁴	17.40	0.033	
9.4 × 10 ⁻³	20.00	0.034	

3.2 B 炸药的压缩应力应变曲线

从 B 炸药的实验过程可以看出,B 炸药为一种脆性材料,从图 5 所示 B 炸药在不同应变率下的压缩应力应变曲线,表明其力学性能具有应变率相关性。在准静态加载条件和高应变率条件下,失效力和失效应变随着应变率的增加而增加。在高应变率条件下的失效力大于准静态实验条件下的失效力,但是,高应变率条件下的失效应变小于准静态实验下的失效应变。在准静态压缩条件下应变率效应对 B 炸药的弹性模量没有明显的影响。

PBX 炸药和 B 炸药在生产过程中不可避免存在

初始损伤。PBX 炸药和 B 炸药的损伤破坏过程,在压缩实验中得到了典型的反映。按照材料力学的相关理论,将应力应变曲线分为三个阶段:弹性阶段、强化阶段和应变软化阶段。在弹性阶段中,损伤有所发展,但不能累积;当加载超过一定应力值后,进入强化阶段,损伤的演化将为不可逆过程;由于损伤带来的性能劣化,使试样承载力下降,应力也逐渐下降,在出现微裂纹甚至宏观裂缝的区段内,损伤在不断积累,微裂纹区和宏观裂缝在不断扩展,故应变将继续增长,全曲线出现了下降段,这就是材料的应变软化效应。从图 4、5 中的应力应变曲线可以看出,在损伤演化过程中,从弹性阶段到强化阶段所对应的应力应变的临界值随着应变率不同而不同。表明 PBX 炸药和 B 炸药的损伤具有应变率效应。

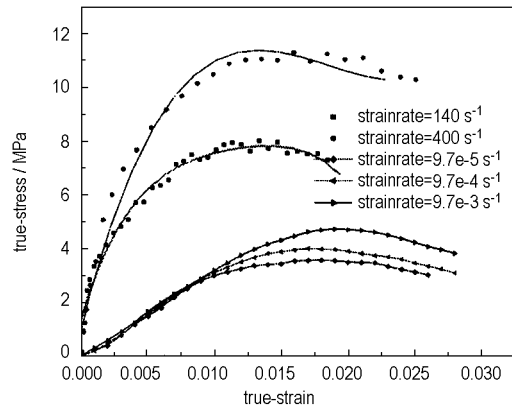


图 5 在不同应变率下 B 炸药压缩应力应变曲线
Fig.5 Compressive stress-strain curves of Comp. B

3.3 CSP 推进剂的压缩应力应变曲线

图 6 为 CSP 推进剂在不同应变率下的压缩应力应变曲线,由图看出该材料的弹性模量很低,由于该材料的密度比较小,所以该材料为一种软材料。其力学性能也具有明显的应变率相关性,失效力和失效应变随着应变率的增加都有不同程度的增加。对复合固体推进剂回收试样进行了显微观察,可见试样中颗粒添加剂从基体中分离。这表明,材料的主要损伤形式是脱粘。

4 结论

(1) 在含能材料力学性能动态实验研究中,SHPB 实验是一种有效的实验方法。通过采用整形器对入射波波进行控制,对于三种含能材料都实现了应力平衡和常应变率加载,获得了合理的实验数据。

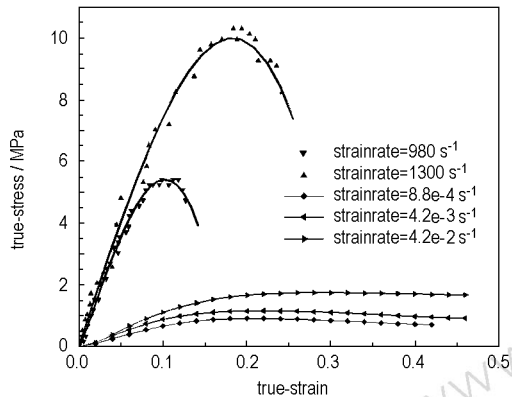


图6 推进剂 CSP 的压缩应力应变曲线

Fig. 6 Compressive stress-strain curves of the CSP

(2) 从实验结果我们可以发现,三种含能材料的力学性能对应变率都比较敏感,在不同的应变率条件下,其失效力随着应变率的增加而增加。

(3) 三种材料的本构曲线都表现出不同程度的非线性。这是由于三种材料都是以高聚物粘接剂为基体的颗粒增强复合材料,可能由于高聚物基体力学性能的非线性使得复合材料的力学性能表现为非线性。

(4) 三种含能材料在实验过程中表现出不同的破坏现象。B 炸药和 PBX 试样发生碎裂, CSP 试样发生软化。

参考文献:

- [1] Christopher F R, Foster J C. The use of impact techniques to characterize the high rate mechanical properties of plastic bonded explosives [A]. 11th Proceedings of Detonation Symposium [C], 1998: 286 - 292.
- [2] 李英雷, 李大红, 胡时胜, 等. TATB 钝感炸药本构的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 355 - 359.
LI Ying-lei, LI Da-hong, HU Shi-sheng, et al. An experimental study on constitutive relation of TATB explosive [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(4): 355 - 359.
- [3] 罗景润. PBX 损伤、断裂及本构关系研究[D]. 四川: 中国工程物理研究院, 2001.
LUO Jingrun. Study on damage, fracture and constitutive relation of PBX[D]. Sichuan: China Academy of Engineering Physics, 2001.
- [4] 卢芳云, Chen W. 软材料的 SHPB 实验设计 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(1): 15 - 19.
LU Fangyun, Chen. W. A design of SHPB experiments for soft materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(1): 15 - 19.
- [5] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. A split Hopkinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 41(1): 40 - 46.

Experimental Studies on Strain-rate Effects of Mechanical Behaviors of Energetic Materials

WU Hui-min^{1,2}, LU Fang-yun^{1,2}, LU Li², SONG Xian-cun²

(1. National Key Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Mianyang 621900, China;

2. Department of Applied Physics, Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Compressive behaviors of three energetic materials (CSP, PBX, Comp. B) are investigated experimentally by special designed split Hopkinson pressure bars (SHPB) and quasi-static behaviors by universal testing machine at different strain-rates (ranged from 10^{-4} s^{-1} to 10^2 s^{-1}) respectively. Nonlinear stress-strain curves at different strain rates are obtained and the results show that the mechanical behaviors of the three energetic materials bear obviously rate-dependent and the corresponding failure stress becomes higher with the strain rates rises but, the failure model of the three materials has its own character, i. e., for Comp. B and PBX it shows brittle splitting and soften for CSP.

Key words: solid mechanics; energetic material; high strain rate; quasi-static compression; constitutive behavior