

文章编号: 1001-1455(2009)06-0579-05

# JOB-9003 的动态性能实验\*

李克武, 赵 锋, 李英雷, 张祖根, 文尚刚, 张光升, 龚晏青

(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:** 对 JOB-9003 进行了 SHPB 压杆实验和逆向 Taylor 柱实验, 研究其在冲击载荷下的动态特性, 为进行 JOB-9003 的本构模型研究提供实验数据基础。通过对 SHPB 实验获得的应力应变曲线分析得出: 在中低应变率范围, JOB-9003 应变率对应力的影响成线性关系。通过对逆向 Taylor 柱实验获得的变形照片分析, 发现破坏损伤对材料的力学性能影响显著, 不可忽略。利用 Taylor 实验的结果对 SHPB 实验中获得的本构模型进行校核, 发现该本构模型并不能准确描述处于高应变率下的材料压缩变形。

**关键词:** 固体力学; 动态本构特性; SHPB 实验; JOB-9003; 逆向 Taylor 柱实验

**中图分类号:** O347.3      **国标学科代码:** 130·15      **文献标志码:** A

## 1 引言

塑料粘结炸药 JOB-9003 在工程上有着重要应用。在实际使用过程中, 炸药要受到各种外界作用刺激, 如温升和振动, 在灾难性事故条件下还要经受跌落、撞击、火烧等刺激。因此其化爆安全性非常重要。在实验中经常观察到塑料粘结炸药在较低冲击能作用下爆炸, 理论分析认为炸药在低压长脉冲条件下的爆炸主要与材料在卸载过程中的塑性功与剪切生热有关<sup>[1]</sup>, 这就需要对塑料粘结炸药 JOB-9003 的本构特性进行研究。

塑料粘结炸药(PBX)由于其组分和微细观结构的复杂性、产品加工的分散性, 加上外载荷作用下的化学反应释能, 它的动态响应特性和本构关系研究一直充满挑战性。1985 年, 利弗莫尔实验室的 G. Goudreau 等<sup>[2]</sup>对 PBX-113 进行了 SHPB 实验, 给出了应变率约  $5\ 350\ \text{s}^{-1}$  的拉伸实验和应变率约  $1\ 500 \sim 4\ 000\ \text{s}^{-1}$  的压缩实验的应力应变曲线, 并用线性和简单非线性粘弹性本构模型拟合了实验结果。G. T. Gray III 等<sup>[3]</sup>对 3 种 PBX 炸药(PBX9501、X0242 和 PBXN-9)在应变率为  $10^3$  量级, 温度为  $-55$ 、 $-40$ 、 $-20$ 、 $0$ 、 $17$ 、 $40$ 、 $55\ ^\circ\text{C}$  环境下, 进行 SHPB 实验, 探讨了不同外界条件下的力学性能。Q. Michel 等<sup>[4]</sup>采用 SHPB 实验和逆向 Taylor 柱碰撞实验研究了一种铸装 PBX 炸药的动力学行为。根据实验结果拟合了 Maxwell 粘弹性本构模型, 计算结果表明, 根据 SHPB 压杆数据得到了动态模型比静态实验给出的模型更接近逆向 Taylor 实验的速度历程数据结果, 但是随着时间的推移, 动态模型计算结果与实验结果偏离越来越大。周培基曾采用了逆向 Taylor 柱碰撞试验结合静态压缩试验研究了多种塑料粘结炸药的本构关系。有学者采用该方法开展含能材料方面的研究工作, 如 E. M. Olsen 和 J. T. Rosenberg 等<sup>[5]</sup>采用粘弹塑性模型发现了泰勒杆实验中的 lift-off 现象; E. R. Matheson 和 J. T. Rosenberg 等<sup>[6]</sup>发现了泰勒杆实验推进剂存在 2 种不同的破坏模式: 外突膨胀、环形裂纹。到目前为止, 虽然获得了许多 PBX 炸药的动态相应数据和本构模型参数, 但是由于实验结果的分散性和研究对象的复杂性, 尚未得到一致公认的统一模型。

为研究在动态载荷下 JOB-9003 的力学特性, 同时也为 JOB-9003 本构模型的数值模拟提供数据, 本文中拟对 JOB-9003 炸药进行 SHPB 压杆实验和逆向 Taylor 柱实验。

## 2 SHPB 实验

### 2.1 实验装置及原理

实验所用 SHPB 杆直径为  $14.5\ \text{mm}$ , JOB-9003 试样密度  $\rho = 1.84\ \text{g/cm}^3$ , 尺寸为  $\varnothing 10\ \text{mm} \times 4.5\ \text{mm}$ 。材料的准静态破坏应力为  $50 \sim 60\ \text{MPa}$ 。对于材料应变率在  $30 \sim 50\ \text{s}^{-1}$  的实验, 采用铝质材料的压杆。输入杆和输出杆长度  $L$  均为  $800\ \text{mm}$ , 入射杆的打击端加上波形整形器。波形整形器能够有效减缓加载波形的上升沿, 改善试样中的应力状态。

\* 收稿日期: 2008-06-14; 修回日期: 2009-03-19

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(9140C6709020907)

作者简介: 李克武(1983—), 男, 博士研究生。

入射杆粘贴电阻应变片。透射杆粘贴高灵敏度的半导体应变片,这样能够有效提高信号的信噪比。波形信号用 HP54540 示波器进行采集。另外,为避免应变测量中的不确定因素(如试样与压杆端面的不平度、压杆波形的弥散等)给试样应变测试精度带来影响,在试样中部对称粘贴 1 对应变片来直接测量试样的应变  $\epsilon_s$ 。

与应变对应的试样应力由透射波通过时间平移直接计算得出,平移时间由透射杆应变片到试样中部应变片的距离结合压杆和试样的声速确定。这样,试样的应力、应变和应变率的计算公式为

$$\sigma = (A/A_0)E\epsilon_t(t), \quad \epsilon = \epsilon_s(t), \quad \dot{\epsilon} = d\epsilon_s(t)/dt \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为试样应力, $\epsilon$ 为应变, $A_0$ 为试样的初始横截面面积, $A$ 为压杆的横截面面积, $E$ 为压杆的杨氏模量, $\epsilon_t$ 为透射杆中记录到的透射应变。

## 2.2 实验结果与分析

实验获得的应力应变曲线如图 1 所示。其中作为参考的应变率为 0.002 的应力应变曲线,由罗景润<sup>[7]</sup>采用 MTS 机进行准静态压缩实验获得。

为了关联实验数据,根据最小二乘法,首先拟合改进的 J-C 本构方程<sup>[7]</sup>

$$\sigma = E_0(\epsilon - b\epsilon^n)[1 + c \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为应力, $\epsilon$ 为应变, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, $\dot{\epsilon}_0 = 0.002$ 为参考应变率。结果表明,当应变率较高时便与实验结果不太相符,原因在于曲线斜率随应变率变化的趋势与  $1 + c \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)$  所表达的趋势差异太大。

张鹏<sup>[8]</sup>曾提出使用线性关系来描述高应变率下斜率的高分离度,但在目前的低应变率范围也同样出现了较高分离度。因此借鉴文献<sup>[8]</sup>的处理方法,将半对数关系修改为线性关系,本构方程如下

$$\sigma = E_0(\epsilon - b\epsilon^n)[1 + c(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_0)] \quad (3)$$

由式(3)确定的本构参数为  $E_0 = 15.353$  GPa,  $c = 0.01855$ ,  $b = 5.30$ ,  $n = 1.41$ , 计算结果与实验符合较好,如图 2 所示。从图 2 可知,在中低应变率范围内,JOB-9003 应变率对应力的影响成线性关系,比半对数关系更接近实验现象。在中低应变率范围内,采用式(3)描述应力应变关系更加合适。

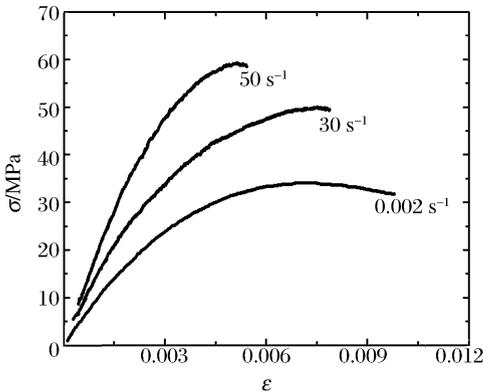


图 1 3 种应变率下的应力应变曲线  
Fig. 1 Stress-strain curves under three strain-rate conditions

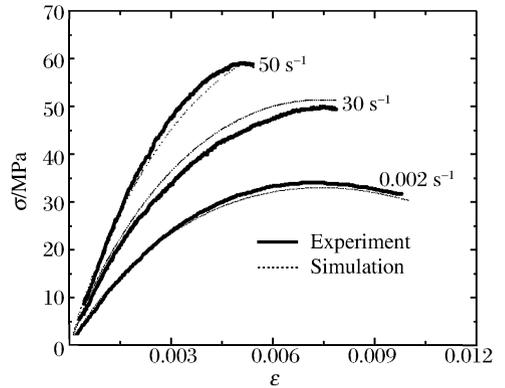


图 2 修正后的计算结果与实验对比图  
Fig. 2 Comparison between computational results and experimental results

## 3 逆向 Talor 柱实验

### 3.1 实验装置介绍

本实验使用火药炮作为驱动飞片的装置,炮口直径为 30 mm。在火炮后膛放入飞片后,再将底火推入。击发底火,利用火药爆炸的推力推动飞片飞行。飞片加弹托的结构如图 3 所示。飞片直径 27 mm、厚 10 mm。弹托前部的外径为 31 mm。与前部配合,弹托后部的直径为 31 mm,但在尾部扩大到 32 mm,以保证与膛腔内径的良好配合。飞片离开炮口后,首先进入的是激光测速区,由光电系统记录下飞片穿过区域所用的时间以计算飞片速度。然后,飞片撞击安置在砧板上的实验样品。样品为  $\varnothing 20$  mm  $\times$  20 mm 的 JOB-9003 药柱。在样品底部的中心点上少许 502 胶,固定在大块钢制砧板上,确保样品仅在纵向上受到约束。实验装置布置如图 4 所示。

使用数字化高速相机拍摄样品受到碰撞的过程,记录样品的变形。相机是日本 PHOTRON 公司生产的 Ultima APX-RS 高速数字化相机。实验拍摄幅频为  $9 \times 10^4$  s<sup>-1</sup>。相机 CCD 分辨率取为  $128 \times 96$ ,因此判读的相对误差为 1.5%。

拍摄的照明光由 1 kW 石英金属卤化物灯提供。

实验具体参数为:样品密度  $1.798 \text{ g/cm}^3$ , 样品高度  $19.96 \text{ mm}$ , 飞片撞击速度  $105.3 \text{ m/s}$ , 照片幅间间隔时间  $11.11 \mu\text{s}$ , 相机幅频  $9 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。

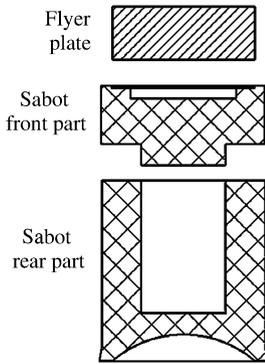


图 3 飞片加弹托结构图

Fig. 3 Structure diagram of flyer plate and sabot

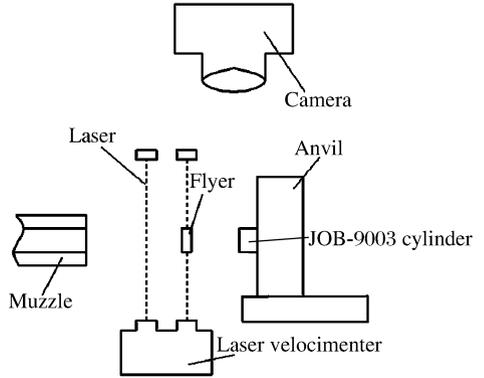


图 4 实验装置布置图

Fig. 4 Sketch of the experimental apparatus

### 3.2 实验结果与分析

图 5 为拍摄到的一系列 JOB-9003 药柱变形图片,其轮廓外形如图 6 所示。

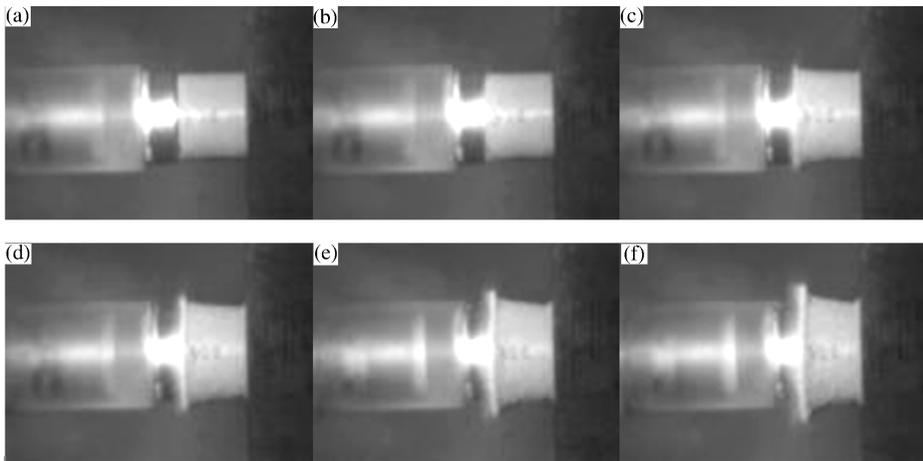


图 5 实验 20080311-13 实验照片

Fig. 5 Photos of the deformed JOB-9003 cylinder in experiment 20080311-13

从图 6(d)~(f)可以看出,在砧板附近,样品边界向外明显膨胀,速度高于正常变形的部分,说明在冲击作用下该部分炸药发生脆性破碎,记录下的是细小碎片向外飞散的图像。

将  $h(t)$  记为撞击过程中飞片段的变形段长度,  $h'(t)$  为砧板端的变形段长度,  $l(t)$  为药柱长度。对图 5(c)~(f) 进行读取, 所得结果如表 1 所示。从表 1 可以发现, 在判读误差内, 图 5(c)~(d) 的  $l(t)$ 、 $h'(t)$ 、 $h(t)$  的变化都不很剧烈。而在图 5(d)~(e) 上可以看到砧板端变形段长度迅速增加, 之后, 在图 5(e)~(f) 上药柱长度迅速变短、飞片端变形段长度迅速增加。这意味着, 在图 5(e)~(f) 的这段时间间隔内, 飞片以较之前更快的速度前进, 表明药柱发生变形的速度更快。其原因是不断发生的损伤和破坏, 大大改变了材料本身的力学性能, 显著降低了材料的抗压强度, 同时也相应导致应力波在其中传播时发生了变化。并且, 破碎与变形使药柱的外形产生了变化, 边界条件的变化更加促使应力波传播发生改变, 使样品局部应力变化幅度更加剧烈。

也就是说, 损伤破碎将同时显著影响材料本身与材料结构的力学性能, 对药柱变化有不可忽视的影响, 在本构关系的研究中必须予以考虑。

表 1 药柱各段长度变化表

Table 1 Length of every deformed section

图片	$l(t)/\text{mm}$	$h'(t)/\text{mm}$	$h(t)/\text{mm}$
图 5(c)	18.17	1.41	1.33
图 5(d)	17.48	1.84	1.26
图 5(e)	16.66	2.31	1.36
图 5(f)	14.81	2.57	1.83

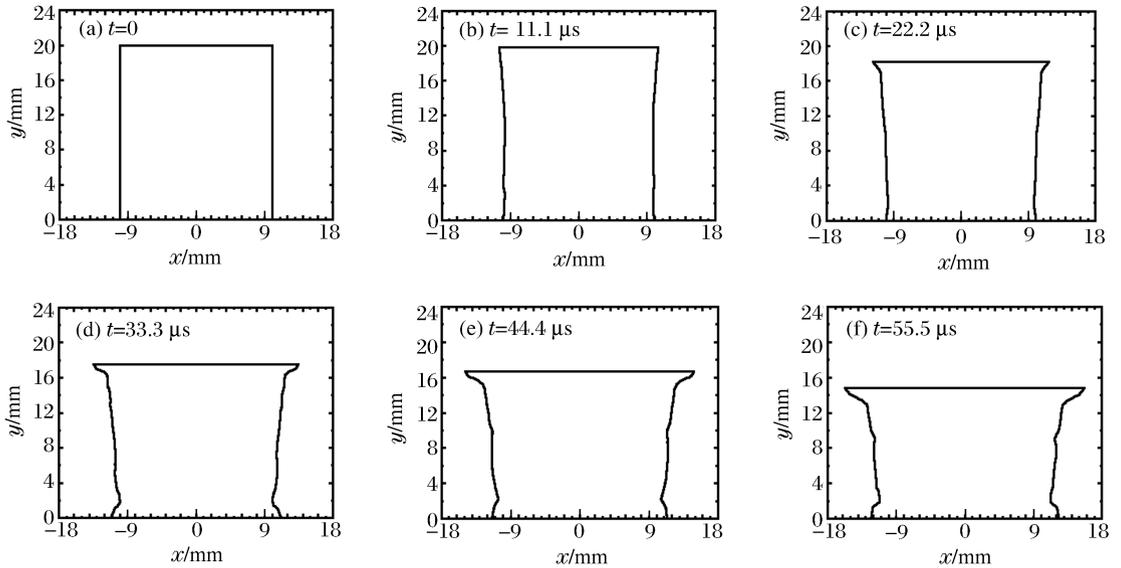


图 6 药柱外形轮廓图

Fig. 6 Shape evolution of the JOB-9003 cylinder in experiment 20080311-13

## 4 讨论

利用逆向 Taylor 撞击实验的实验结果对在 SHPB 实验部分建立的本构模型式(3)进行校核。发现采用本构模型式(3)进行数值模拟,所获得的药柱外形轮廓与实验获得的明显不相符。数值模拟的结果显示,在整个变形过程中药柱只发生了微小的变形,与砧板或飞片接触部分也未发生膨胀鼓起,甚至药柱有部分侵入到飞片中。这说明药柱的杨氏模量大大高出了真实值,使得药柱抵抗变形的能力虚高到了比飞片还要大的程度,因此才会发生药柱钻入飞片中的情况。导致这种虚高的原因就是本构模型式(3)采用了线性关系来描述应变率对杨氏模量的影响。在 SHPB 实验中,应变率没有超过  $10^2$  量级,因此带来的杨氏模量增幅不超过 1.8 倍;但在 Taylor 柱碰撞实验中,应变率普遍在  $10^6$  量级上,若按照本构模型式(3)计算,其杨氏模量要比初始状态下杨氏模量的  $10^4$  倍还要高,这明显与事实不符。因此,本构模型式(3)并不适于描述处于高应变率下的变形过程。

实际上,SHPB 实验表明,JOB-9003 的杨氏模量随着应变率的上升反而会下降,其临界应变率推测在  $65 \sim 100 \text{ s}^{-1}$  之间。李英雷<sup>[9]</sup>也曾观测到 TATB 在应变率为  $4 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  时发生软化。这些迹象证明应变率的增长对材料的影响十分复杂,并非单纯的强化或软化,而是多种机制共同作用的结果。例如,在 Taylor 碰撞实验的分析表明损伤对力学性能影响巨大,软化效应明显。而对于损伤的演化,应变率在其中扮演着重要的角色。同时,应变率增加带来的材料温升,将引起热软化效应,也是不可忽视的。

## 5 结论

采用 SHPB 压杆实验装置对 JOB-9003 材料进行了冲击加载实验,对其动态本构特性进行研究,发现在中低应变率范围内,相较用半对数关系描述应变率影响的 Johnson-Cook 本构关系,采用线性关系描述应变率影响的本构关系式(3)能够更好解释实验现象。

同时,对 JOB-9003 材料还进行了逆向 Taylor 柱实验,通过对照片的分析,可以发现损伤破坏对药柱的变形有不可忽视的作用,影响到材料的动力学性能,这一点在本构关系的研究中特别是考虑大变形问题时是不可忽视的。

通过逆向 Taylor 柱实验结果对线性关系描述应变率影响的本构模型进行校核,发现在高应变率范围内应变率的影响不再是线性关系,线性关系仅对中低应变率范围成立,不适用于高应变率大变形问题。

## 参考文献:

- [1] Menikoff R. Initiation of high explosives[R]. LA-UR-01-1847, 1994.
- [2] Goudreau G, Moen W, Breithaupt D. Evaluation of mechanical properties of PBXW-113 explosive[R]. UCID-20358, 1985.

- [3] Gray III G T, Idar D J, Blumenthal W R, et al. High-and low-strain rate compression properties of several energetic material composites as a function of strain and temperamre[C]//11th International Detonation Symposium. Colorado, Snowmass, 1998:76-84.
- [4] Quidot M, Racimor P, Chabin P. Constitutive models for PBX at high strain rate[C]//Shock Compression of Condensed Matter-1999. AIP 1999:687-690.
- [5] Olsen E M, Rosenberg J T, Kawamoto J D, et al. XDT investigations by computational simulations of mechanical response using a new viscous internal damaged model[C]//11th International Detonation Symposium. Colorado, Snowmass, 1998:170-178.
- [6] Matheson E R, Rosenberg J T, Ngo T A, et al. Programmed XDT: A new technique to investigate impact-induced delayed detonation to investigate impact-induced delayed detonation[C]//11th International Detonation Symposium. Colorado, Snowmass, 1998:163-169.
- [7] 罗景润. PBX 的损伤、断裂及本构关系研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2001.
- [8] 张鹏. PBX 及其代用材料的实验及本构关系研究[D]. 北京:北京大学, 2005.
- [9] 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 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):353-359.

## Experimental investigation of dynamic properties of JOB-9003

LI Ke-wu, ZHAO Feng\*, LI Ying-lei, ZHANG Zu-gen, WEN Shang-gang,  
ZHANG Guang-sheng, GONG Yan-qing

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** The SHPB compression and the reversed Taylor tests were accomplished for JOB-9003 to explore its dynamic properties under impact load and to provide the experiment data for its constitutive model. The stress-strain curves of JOB-9003 obtained in the SHPB experiment were analyzed. The analysis shows that there is a good linear relationship between strain rate and stress at low and middle strain rates. The photos of the deformed JOB-9003 cylinder in the reversed Taylor test display that damage and fracture can markedly affect the mechanical properties of JOB-9003. The constitutive model deduced from the SHPB experiment was checked by the experimental results of the Taylor test. It is indicated that this constitutive model cannot be used to describe the compressive deformation of JOB-9003 at high strain rates.

**Key words:** solid mechanics; dynamic constitutive characteristic; SHPB test; JOB-9003; reversed Taylor test

\* Corresponding author; ZHAO Feng  
Telephone: 86-816-2494211

E-mail address: ifpzi@163.com