

文章编号: 1006-9941(2011)02-0194-06

三种 PBX 炸药的动态拉伸力学性能

赵玉刚¹, 傅华¹, 李俊玲^{1,2}, 陈荣², 文尚刚¹

(1. 冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621000; 2. 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了获得几种 PBX 炸药的动态拉伸力学性能, 结合平台巴西盘实验和霍普金森加载技术建立了动态拉伸实验测试系统, 分别通过石英晶体片和数字图像相关方法来测量应力和应变信号, 得到了 PBX 炸药在应变率 10^2 s^{-1} 附近间接拉伸条件下的应力应变曲线, 并建立了对应的动态拉伸本构关系模型。结果表明, PBX 炸药的拉伸强度、失效应变和拉伸弹性模量都表现出一定的应变率相关性, 本构关系拟合曲线与实验数据吻合良好。

关键词: 固体力学; 巴西实验; 高聚物黏结炸药 (PBX); 分离式霍普金森压杆 (SHPB); 数字图像相关方法 (DIC)

中图分类号: TJ55; O34

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.016

1 引言

高聚物黏结炸药 (PBX) 是一种由主体单质炸药和高聚物黏结剂等组成的高能炸药, 在常规武器及导弹战斗部中使用非常广泛。由于炸药的使用环境比较复杂, 在生产、加工、运输、发射和意外碰撞时, 均会受到不同类型载荷的加载, 这种情况下首先反映出来的就是炸药的力学响应。而炸药的力学性能不仅与武器的生存能力及使用寿命密切相关, 还会进一步影响其爆轰性能。因此, 通过实验手段研究炸药在复杂动载条件下的力学性能, 得到其各种力学响应随载荷变化的规律对于指导武器战斗部设计和安全性能研究都具有重要意义。

一般来说, 材料的拉伸强度远小于压缩强度, 在拉伸应力条件下更容易发生变形和破坏, 研究炸药的拉伸力学性能是炸药安全性能评估中的一项重要工作。巴西实验 (Brazilian Test) 是 1959 年 Berenbaum 和 Brodie^[1] 发明的一种间接测量岩石、混凝土等脆性材料的拉伸应力应变的方法, 经过将近几十年的发展, 巴西实验已经成为一种比较成熟的实验方法。国内外学者很多采用该方法测量 PBX 炸药的拉伸力学性能,

John 等^[2-3] 采用巴西实验对几种 PBX 炸药的拉伸强度、断裂应变和蠕变进行了研究, 并且分析了温度、颗粒度等因素对拉伸力学性能的影响。陈鹏万等^[4] 测量了一种 PBX 炸药在准静态拉伸条件下的力学响应, 并对其进行了粘弹性近似分析。Awaji H^[5] 等还开展了一系列相关实验表明巴西实验与直接拉伸实验有很好的相关性, 可以根据巴西实验结果对材料的拉伸性能进行评估。

本实验则用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 作为动态巴西实验的加载装置, 对三种不同类型的 PBX 炸药进行了间接拉伸实验, 并结合石英晶体片应力测试技术和数字图像相关方法完成了动态拉伸力学性能的测量。

2 巴西实验原理

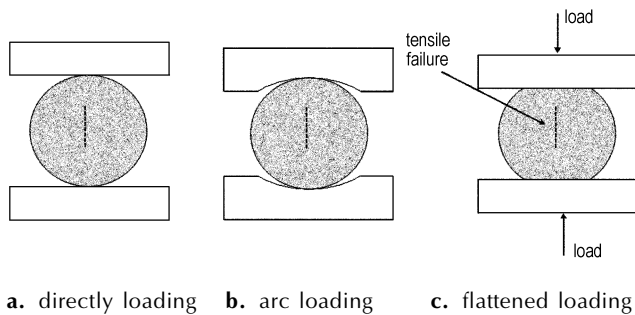
巴西实验一般采用圆盘状样品, 通过在截面上沿某一径向施加平衡、对称的载荷, 则垂直加载方向产生拉应力, 使样品中心区域产生拉伸形变直至断裂。

最初的巴西实验采用直接加载方式, 如图 1a 所示, 此方法应力计算简单, 但经常由于加载端压力集中, 容易产生局部塌陷, 导致实验失效。为了解决实验的有效性问题, Mellor 和 Hawkes 等人^[6] 发明了一种加载夹具, 采用弧面加载方式, 如图 1b 所示, 可以很好地保证实验的有效性, 但这样依然存在一些问题, 加载过程中圆弧曲率随试样变形发生变化, 实际的接触面积难以准确测量。同时夹具的制备也随样品的大小和形状而变化, 无法重复使用。

收稿日期: 2010-04-21; 修回日期: 2010-05-28

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目 (9140C670902090), 中国工程物理研究院重点科学基金项目 (2009A0201008), 国家自然科学基金青年科学基金项目 (10902100)

作者简介: 赵玉刚 (1983 -), 男, 硕士研究生, 主要从事炸药力学性能研究。e-mail: ygangzhao@163.com



a. directly loading b. arc loading c. flattened loading

图 1 巴西实验加载方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of loading ways of Brazilian test

Wang 等^[7]对实验加载方式做了进一步改进,将加载区域由曲面改成了平面,本文即采用这种平台加载方式,如图 1c 所示,只要保证加工平面时平面的平整度和两个平面的平行度足够高,就可以满足加载力平衡、对称的要求。同时,为了保证试样从中心断裂,Wang 还认为加载区所对应的圆心角最好在 20° ~ 30° 之间。中心点处的应力计算公式为:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi BD} Y(\theta) \quad (1)$$

式中, P 为作用在试样上的载荷, B 为圆盘的长度, D 圆盘截面直径, 2θ 是加载平面所对应的圆心角, Y 是与 θ 密切相关的系数,当 $2\theta = 0^\circ$ 时, $Y = 1$, 即最初的巴西实验的结论。当 2θ 的值确定之后, Y 的值可以由有限元分析法确定^[8](如 $2\theta = 20^\circ$ 时, $Y = 0.964$)。

3 实验

整个实验装置如图 2 所示,包括 SHPB, 高速数码相机和 DIC 图像处理系统等。SHPB 作为加载设备,杆材料为 LC4 铝,直径 20 mm,子弹长 200 mm,入射杆长 2000 mm,透射杆长 1000 mm。高速相机的拍摄幅频为 86400 fps, 触发信号由入射杆前端的激光位移传感器提供,整个加载过程被拍摄为数字图像传输至计算机保存。数字图像经由数字散斑相关方法处理得到应变信号。透射杆上的石英压电晶体受压产生的极化电荷由电荷放大器将信号放大并转换成电压信号存储到示波器中,最后经过处理后得到应力信号。由于实验中分别采用两套系统测量应力和应变信号,为了保证两组信号的对应,通过在示波器中读取激光位移传感器和透射晶体片的信号起始点时间间隔,从而确定应力加载零时刻对应的初始图像。

实验中的采用的试样为三种类型的 PBX 炸药,具体参数如表 1 所示。PBX-1 为 RDX 基含铝炸药,由于

铝粉的燃烧焓较高,可以有效提高混合炸药的爆温和爆温,采用添加铝粉来增强爆炸效应的混合炸药在矿山爆破和水中兵器上都有广泛应用。PBX-2 和 PBX-3 均为 HMX 高聚物黏结炸药,不同之处在于 PBX-2 含有定量的钝感炸药 TATB,因此感度较低,这两种炸药是武器战斗部比较常用的高能炸药。

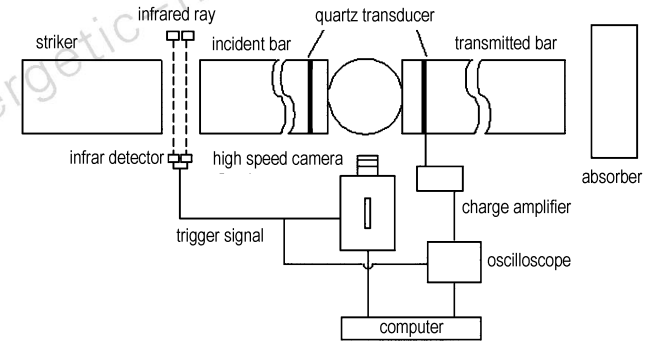


图 2 动态巴西实验装置图

Fig. 2 Schematic of dynamic Brazilian test

表 1 实验试样参数

Table 1 Parameters of specimens

materials	density/g · cm ⁻³	size/mm	platform width/mm
PBX-1	1.7	Φ20 × 12	4
PBX-2	1.845	Φ20 × 12	3
PBX-3	1.86	Φ20 × 12	3

3.1 应力测量

由于采用 SHPB 测量波阻抗较低的材料时,一般入射信号和反射信号十分接近,采用两波相加的方法计算入射杆端的端面应力误差很大,因此应力测量一般只用透射杆上的信号,而常规的电应变片测量得到的透射信号微弱,若采用半导体应变片,虽然可以一定程度上提高透射信号的幅值,但半导体应变片信号不稳定,受温度、湿度和电磁等环境因素影响较大,严重影响实验测试精度。石英晶体作为一种广泛使用的压电晶体,不仅可以有效提高透射信号幅值,且压电系数和介电常数稳定性很好,通过在入射杆和透射杆试样端同时嵌入晶体片还能方便的监测试样两端的应力平衡情况,可直观地判断试样中应力分布是否均匀。图 3 所示为一次巴西实验中得到的示波器原始波形,channel 1 和 channel 2 分别为入射杆和透射杆上的半导体应变片信号,channel 3 为透射杆上的晶体片信号,由于实验中应用了强光源照明(高速摄影需要),半导体应变片受电磁波影响比较明显,channel 1 和

channel 2 的干扰信号很大, channel 3 则基本没有干扰信号, 而且信号幅值远大于 channel 2 的信号。图 4 为滤波后的半导体应变片与晶体片得到的应力信号比较, 可以看出, 两者符合的很好。

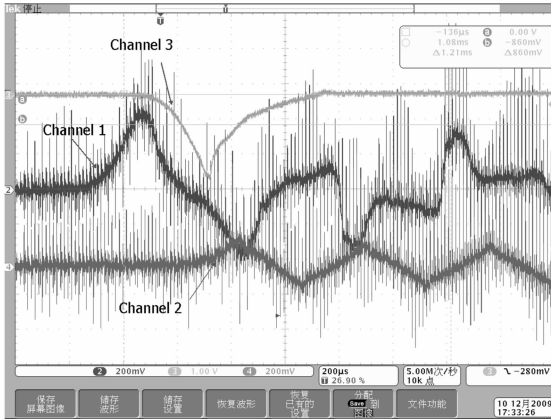


图 3 示波器原始图像

Fig. 3 Original image of oscilloscope

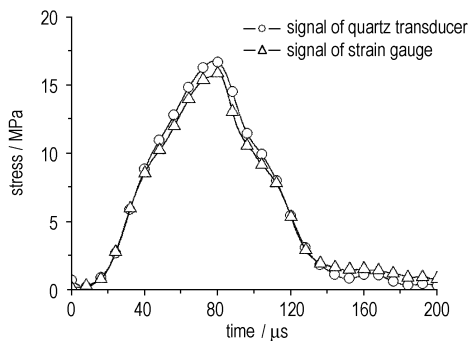


图 4 滤波后应变片与晶体片应力信号比较

Fig. 4 Stress signals of quartz transducers and strain gauges

3.2 应变测量

传统的应变测量方法是通过基于应变片的电测法, 该方法应用应变敏感元件——电阻应变片来测量构件的表面应变, 可以方便地将应变信号转化为电信号, 从而实现数字化和自动化控制, 在实验力学领域有广泛应用。但是这种测量方法存在以下几种缺点: 应变片测量只能测量构件表面某一点沿某一方向的应变, 无法完成全域性测量; 测量信号为电阻应变片栅长范围的平均值, 因此对于梯度大的应变场难以测量; 应变片的介入方式会对测量区域有增强作用, 对于小试样带来的误差尤其明显。

DIC 或者称为 DSCM (digital speckle correlation method), 由于其非接触、全场测量和可以采用白光照明显优点, 在实验力学领域已经得到了广泛的应用, 目

前 DIC 在测量 PBX 炸药的变形破坏方面的研究已有了一些进展^[9-11]。DIC 是一种通过图像序列来估计物体运动的方法, 其基本原理是匹配不同状态下数字化图像上的同一个点, 为了评价匹配程度, 需设置一相关函数 C , 通常选取:

$$C = \frac{\sum \sum [I_s(x, y) - \bar{I}_s][I_t(x+u, y+v) - \bar{I}_t]}{\sqrt{\sum \sum [I_s(x, y) - \bar{I}_s]^2} \sqrt{\sum \sum [I_t(x+u, y+v) - \bar{I}_t]^2}} \quad (2)$$

其中, I_s 为变形前图像上点 $P(x, y)$ 的灰度, I_t 为对应的变形后点 $Q(x+u, y+v)$ 的灰度, \bar{I}_s 和 \bar{I}_t 分别为变形前和变形后对应子区域背景的平均灰度值。相关函数设定以后, 通过相关搜索得到其极值点, 极值点即表示最佳匹配。搜索方法目前采用较多的是粗细搜索法或牛顿-拉斐逊微分修正方法, 一般这样的匹配搜索只能达到整像素级精度, 为了进一步提高测量精度, 在完成相关搜索后, 需采用一些数学手段(基于散斑场的像素灰度插值方法、基于相关系数分布的插值或拟合方法等), 获得亚像素尺度范围的最佳匹配点的位置。综合这些点的位移信息, 则可以绘制整个相关运算区域的位移场。而对位移信号进行去噪处理后微分, 就可以得到该区域的应变场信息^[12]。

本实验中的数字图像采用高速相机拍摄得到, 如图 5 所示, 数字图像经由 DIC 程序处理并获得变形信息, 图中所示选取框内范围为实验中的相关运算区域。图 6 为实验中某时刻拉伸方向的应变场, 图中尺寸 1 pixel ≈ 0.095 mm, 可以看出, 应变基本沿中轴线呈对称分布(由于样品平台与杆端面不可能完全平行, 所以轴线可能出现倾斜), 在试样中心附近出现拉伸应变最大值, 并沿 Y 方向逐渐减小。入射端(右端)由于应力集中效应也可能会出现应变集中区, 而反射端面则由于加载方向反射拉伸波, 压缩应力相对弱小, 因此出现拉伸应变极小值。



图 5 数字图像相关方法应变运算示意图

Fig. 5 Diagram of strain calculation with DIC

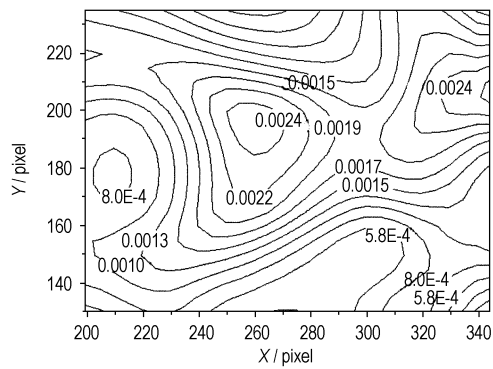


图 6 加载过程中某一时刻拉伸方向的应变场
Fig. 6 Strain field of tensile direction in loading process

4 实验结果和讨论

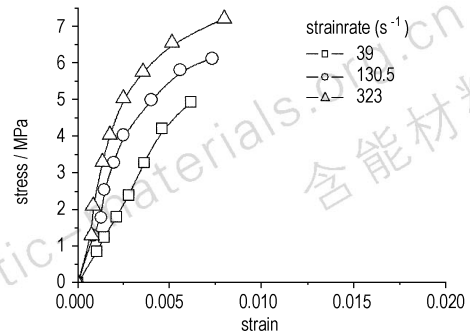
图 7 为实验测量得到的应力应变曲线, 三种 PBX 炸药的应力应变曲线总体呈现出近似的变化规律, 在加载初期主要表现为弹性形变, 应力沿应变线性增长, 然后进入塑性变形阶段, 曲线坡度下降, 应力上升渐缓, 塑性段的存在表明虽然材料中粘结剂的含量很少, 仍能对其力学性能有较大影响。部分试样在初始加载时可能会出现一窄段坡度较缓的区域, 这可能是由于巴西平台与杆端面可能存在的间隙造成的。

表 2 列出了三种 PBX 炸药的一些动态力学参数随应变率变化, 可以看出, 其力学性能表现出明显的应变率相关性。在加载应变率范围附近, 炸药的拉伸强度和动态弹性模量均随着应变率的增加而增大, 破坏应变虽然随应变率增加略有增加, 但增幅小于 $2 m\epsilon$, 因此可以近似认为破坏模式为应变控制。

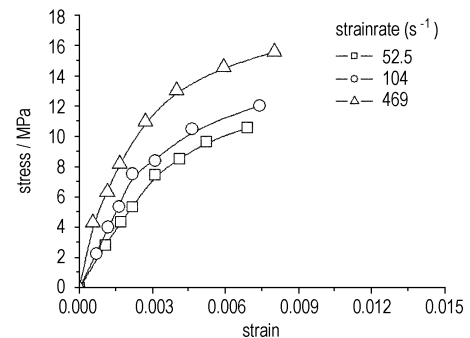
由于 PBX 的成型工艺及材料结构特征, 它的力学性能不仅与与单质炸药和黏结剂有关, 还受到各组分含量以及制作过程的影响, 其力学特性就显得比较复杂, 一般主要表现为高能颗粒的弹脆性和黏结剂的粘弹塑性, 其力学特性具有明显的非线性, 基于实验曲线的特性, 本构关系拟合采用修正的 Johnson & Cook 模型:

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

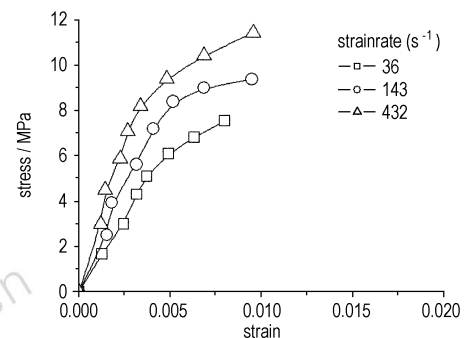
该模型中, 第一部分为应变相关, 式中两项分别表征材料的弹性和粘塑性特征, 第二部分表征应变率对材料的影响, 式中, 参数 A, B, n 和 C 为材料常数, 由材料组分及制备工艺决定。四个参数中 A, B 具有应力量纲, n 和 C 为无量纲常数。表 3 为拟合得到的三种 PBX 炸药的材料常数。



a. PBX-1



b. PBX-2



c. PBX-3

图 7 三种 PBX 炸药的应力应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curves of three PBXs

表 2 三种 PBX 的动态力学参数

Table 2 Dynamic mechanical parameters of three PBXs

materials	strain rate /s ⁻¹	tensile strength /MPa	dynamic modulus /GPa	failure strain /10 ⁻³
PBX-1	39	4.94	0.92	6.16
PBX-1	130.5	6.13	1.63	7.3
PBX-1	323	7.22	2.34	7.97
PBX-2	52.5	10.58	2.27	6.89
PBX-2	104	12.05	3.49	7.40
PBX-2	469	15.60	5.01	8.00
PBX-3	36	7.54	1.37	8.03
PBX-3	143	9.38	1.78	9.47
PBX-3	432	11.43	2.67	9.54

表 3 三种 PBX 炸药的材料常数

Table 3 Material constants of three PBXs

materials type	A/GPa	B/GPa	n	C
PBX-1	0.5	0.883	1.153	1.861
PBX-2	6.47	6.993	1.021	1.829
PBX-3	11.37	11.64	1.007	1.813

图 8 给出了拟合得到的本构关系曲线,由拟合效果来看,拟合曲线和实验数据吻合较好,表明该模型可以用来描述动态拉伸条件下 PBX 炸药的力学行为。

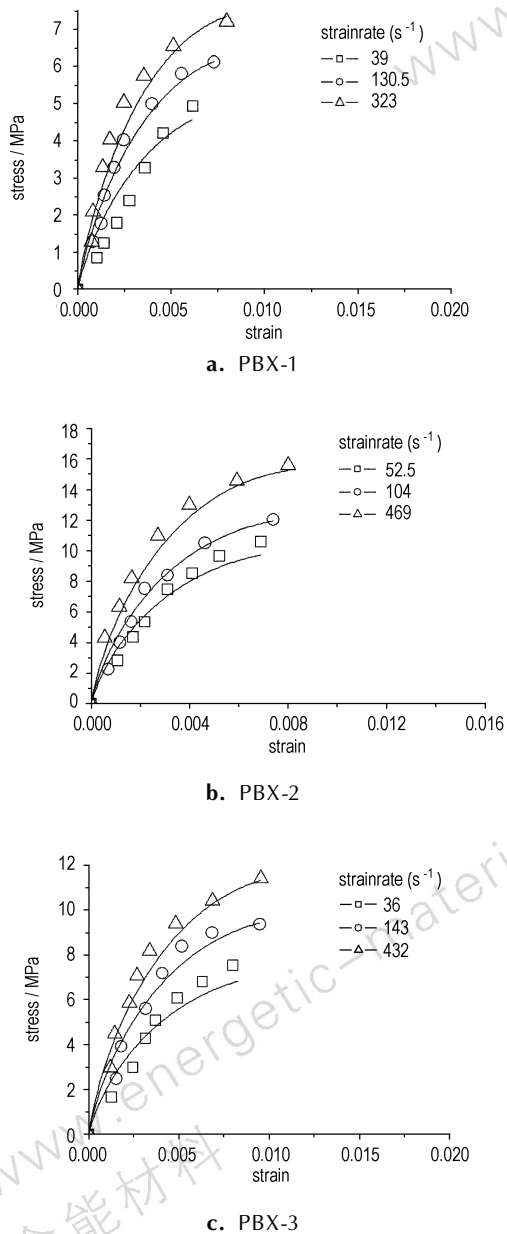


图 8 三种炸药的本构关系拟合曲线

Fig. 8 Fitted constitutive curves of three PBXs

5 结论

(1) 石英晶体片测试技术和数字图像相关方法的引入为动态拉伸加载中应力和应变测量提供了新的途径。

(2) PBX 炸药的力学性能参数表现出明显的应变率相关性,拉伸强度和动态弹性模量均随着加载应变率的增加而增大,虽然破坏应变随应变率增加亦略有增大,仍可以近似认为破坏模式为应变控制。

(3) 修正的 Johnson & Cook 模型可以较好描述 PBX 炸药的动态拉伸力学行为,拟合曲线和实验数据吻合良好。

参考文献:

- [1] Berenbaum R, Brodie I. Measurement of the tensile strength of brittle materials[J]. *Br J Appl Phys*, 1959, 10: 281-286.
- [2] Johnson H D. Mechanical properties of high explosives. MH-SMP-74-19[R], 1974.
- [3] Johnson H D. Mechanical properties of LX-10-1 evaluated with diametric disc test[R]. MHSMP-79-08, 1979.
- [4] 陈鹏万, 黄风雷, 张瑜, 等. 用巴西试验评价炸药的力学性能[J]. *兵工学报*, 2001, 22(4): 533-537.
CHEN Peng-wan, HUANG Feng-lei, ZHANG Yu, et al. Brazilian test and its application in the study of the mechanical properties of explosives[J]. *Journal of China Ordnance*, 2001, 22(4): 533-537.
- [5] Awaji H, Sata S. Diametral compressive testing method[J]. *J Eng Mater and Tech*, 1979, 101: 140-147.
- [6] Mellor M, Hawkes I. Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli[J]. *Eng Geol*, 1971, 5: 173-225.
- [7] Wang Q Z, Xing L. Determination of fracture toughness KIC by using the flattened Brazilian disk specimen for rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999, 64(2): 193-201.
- [8] Wang Q Z, Jia X M, Kou S Q, et al. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 245-253.
- [9] Rae P J, Palmer S J P, Goldrein H T, et al. White-light digital image cross-correlation (DIC) analysis of the deformation of composite materials with random microstructure[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41: 635-648.
- [10] Rae P J, Goldrein H T, Palmer S J P, et al. The use of digital image cross-correlation (DIC) to study the mechanical properties of a polymer bonded explosive (PBX) [C] // Proceedings 12th International Detonation Symposium. San Diego, California, 2002.
- [11] 李明, 张珺, 温茂萍, 等. 数字散斑相关技术及其应用[J]. *信息与电子工程*, 2005, 3(1): 36-39.
LI Ming, ZHANG Jue, WEN Mao-ping, et al. Digital speckle correlation and its applications[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2005, 3(1): 36-39.
- [12] 金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

Dynamic Tensile Mechanical Properties of Three Types of PBX

ZHAO Yu-gang¹, FU Hua¹, LI Jun-ling^{1,2}, CHEN Rong², WEN Shang-gang¹

(1. National Key Laboratory of Shockwave and Detonation Physics, Mianyang 621000, Sichuan; 2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Tensile mechanical properties of some PBXs were evaluated by Flattened Brazilian Disc (FBD) and Split Hopkinson Press Bar (SHPB). Quartz transducers and digital image correlation (DIC) technology were used to measure stress and strain information. Stress-strain curves of three types of PBXs under strain rate of 10^2 s^{-1} were obtained. Results show that all of the tensile strength, failure strain and dynamic modulus have relationship with the loading strain rate. A constitutive model had been established based on the experimental data.

Key words: solid mechanics; Brazilian test; PBX (polymer bonded explosive); split Hopkinson press bar (SHPB); digital image correlation (DIC)

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.016



广西金建华民爆器材有限公司

“GTX 起爆药及其系列雷管生产线”通过验收

2010年12月24日,广西壮族自治区工业和信息化委员会在广西百色主持召开了广西金建华民爆器材有限公司“GTX起爆药及其系列雷管生产线”验收会。国家民用爆破器材产品质量监督检验中心蒋荣光研究员任鉴定委员会主任,兵器工业安全技术研究所魏新熙研高工任副主任委员,来自全国民用爆破器材科研、检测、安全评价和生产领域的11位专家和60余名代表听取了项目研究总结报告,产品检测报告,用户使用情况报告,现场考核了生产线和运行状况,通过认真审查和评议,一致同意广西金建华民爆器材有限公司“GTX起爆药及其系列雷管生产线”通过验收,并转入正常生产。验收专家认为:通过使用 GTX 起爆药,实现了起爆药生产和使用过程的安全环保,使用性能可靠,能够很好地满足生产和雷管使用要求,具有显著的社会效益和经济效益,具有良好的推广应用前景。

(广西金建华民用爆破器材有限公司 李丕和供稿)