

文章编号:1006-9941(2005)02-0079-05

## 高聚物粘结炸药压缩破坏的细观力学实验研究

李明<sup>1</sup>, 张珏<sup>2</sup>, 李敬明<sup>1</sup>, 温茂萍<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 北京大学力学与工程科学系, 北京 100871)

**摘要:**研究了一种含 TATB 的高聚物粘结炸药的细观力学行为。带有预制裂纹的炸药试样在电子显微镜腔室的加载平台上进行压缩破坏原位试验,定量分析了其损伤变形局部化特征。利用数字图像相关技术得到了裂纹尖端附近的变形场和位移矢量场分布,表明预制裂纹的存在对位移场有强烈的扰动。数字相关运算结果发现试样破坏前在预制裂纹尖端有一个错动引起的漩涡矢量场,而裂纹的最终扩展方向有沿着外载荷的方向发展的趋势。

**关键词:** 固体力学; 高聚物粘结炸药; 损伤局部化; 数字相关技术; 轴向劈裂

**中图分类号:** TJ55; O626

**文献标识码:** A

### 1 引言

高聚物粘结炸药(PBX)是一类典型的非均质颗粒复合材料。从PBX的包覆到最后的成型过程中,都有可能带有损伤,例如微裂纹、微孔隙以及颗粒之间相互挤压造成的粘结剂的部分脱落等等。在温度和机械力作用下,这些缺陷会进一步发展,可能造成炸药部件的破坏。因而研究PBX的微(细)力学特性对于保障武器系统的可靠性和安全性具有重要意义。Baer<sup>[1]</sup>利用光学显微镜和电子扫描显微镜(SEM)分析了HMX, TATB, PETN等炸药晶体的形貌。Proud<sup>[2]</sup>等人利用原子力显微镜(AFM)分析了纯炸药晶体对粘结剂的增强作用。Renlund<sup>[3]</sup>等人测定了HMX和TATB受热膨胀产生的机械作用力以及变形并利用SEM观察了损伤样品。RAE<sup>[4]</sup>等人利用云纹干涉法研究了PBX的失效机理。不过,许多研究者的微(细)力学研究均局限于炸药样品在形貌上的定性研究,缺乏定量分析。

由Sutton<sup>[5]</sup>等人发展的数字图像相关技术(DIC - Digital Image Correlation)被广泛应用于实验力学领域。DIC具有全场、非接触性的特点,在测量中可以完全保留变形过程中的物体表面信息而不会被其他介质如条纹等掩盖。对于像PBX这类材料的破坏研究,其物体表面损伤图像与变形场的结合分析是非常重要的。通过DIC可以在指定的表面来测量变形,这对于损伤和

破坏研究非常有利,例如可通过计算应力高度集中区域附近的变形分布来研究材料的破坏模式。Rae<sup>[6]</sup>等人在PBX的巴西试验引入了数字相关技术。方竞<sup>[7]</sup>等人提出了基于小波分析原理的数字相关技术,提高了寻找相关峰值的精度。Gonzalez<sup>[8]</sup>等人利用DIC研究了固体火箭推进剂的裂纹扩展性能。李明<sup>[9,10]</sup>等人利用DIC研究了固体炸药替代材料的断裂力学问题。本文将探索用新的无接触、结合扫描电镜动态原位实验的数字图像相关技术,对一种含TATB的固体炸药的细观非均质特性和断裂破坏模式进行定量研究。

### 2 实验与结果分析

为了定量研究塑料粘结炸药的破坏模式,我们进行了扫描电子显微镜下的准静态破坏实验。通常的电子显微镜只能在静止的状态下来观察试样的表面形貌,而本实验在固体炸药压缩破坏研究中,采用了具有加载装置的电子显微镜。在加载的同时,实时记录当前载荷下的试样形貌,再借助于数字相关技术,可以计算出任意指定区域的变形场,根据计算获得的不同区域的变形场来分析PBX的压缩破坏模式。

#### 2.1 数字相关技术与实验装置

数字图像相关法是依据物体表面随机分布的散斑场(灰度)在变形前后的概率统计相关性来确定位移的一种测量方法<sup>[5]</sup>。它的基本过程是:经由光学放大的反映物体表面信息的散斑图由数字化记录仪器记录成数字图像格式,对参考图像与目标图像进行相关运算处理来得到变形。数字相关技术的核心是图像的相关运算算法,而在硬件上的配置相对于传统光学方法(例如光弹性,云纹法)更简洁紧凑。对于数字图像的

收稿日期:2004-06-25;修回日期:2004-09-02

基金项目:国家自然科学基金(NSFC No. 10125211),中物院化材所所长基金(No. 42105080106)

作者简介:李明(1971-),男,博士,从事实验固体力学研究。

e-mail: minli\_email@sina.com

获取,可以通过带光学镜头的 CCD 拍摄<sup>[9]</sup>,不过由于放大倍数和分辨率的限制,这里采用电子扫描显微镜的图片获得更高倍数的数字图像。图 1 是电子扫描显微镜腔室里的小型加载装置的示意图,样品被夹持在加载单元中,受力过程中的样品表面数字图像通过 SEM 的成像系统获得。

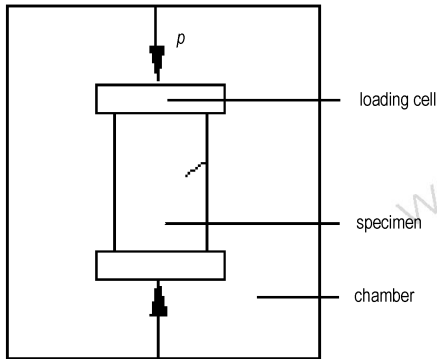


图 1 SEM 准静态压缩破坏实验  
Fig. 1 In situ quasistatic failure experiment

## 2.2 试样制备

实验所用材料为含 TATB 的某一压装固体炸药,它是从圆柱形压装坯料中切割出长条形块料,再切割成较小尺寸的试样,试样如图 2 所示。试样基本尺寸:长(高)为 18 mm,宽度为 9 mm,厚度  $d$  为 3.8 mm,是基本满足平面应力状态所要求的薄型试样。为了研究其压缩破坏模式和损伤局部化,在试样长边上通过一种特制的金属刀具切割出细小裂纹  $a$ (见图 2)来作为压缩破坏实验的预制诱导裂纹。裂纹  $a$  的长度为 3.5 mm,裂纹宽度约为 0.1 mm,与试样垂直方向夹角

为 45°,预制此角度是为了观察其是否按照剪切破坏的方向扩展(由于炸药属于非导体,需要在其表面覆盖一层导电的金属 Au)。

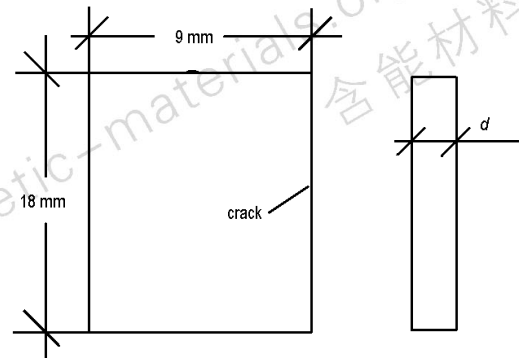


图 2 压缩破坏试样尺寸  
Fig. 2 Dimension of PBX specimen

## 2.3 压缩破坏实验与损伤局部化

将制备好的炸药试样放置在电子显微镜腔室里面的压缩平台上,施加初始的预紧力以便夹持炸药试样。启动加载装置,施加外加载荷,并记录相应数字化图像文件。在实验中按照表 1 所给出的加载步骤加载,通过 SEM 获得的数字图像基本上包含整个准静态压缩破坏的全部过程(初始、中间和最终破坏),这里只给出其中部分图片(图 3~5 中给出了外载荷分别为 196 N, 240 N, 287 N 下的扫描电镜图片)。

表 1 加载步骤

Table 1 Preset loading steps

loading step	1	2	3	4	5	6	7
loading	29.4	49	98	147	196	240	287



图 3 第 5 加载步(196N)  
Fig. 3 The 5th step(196N)

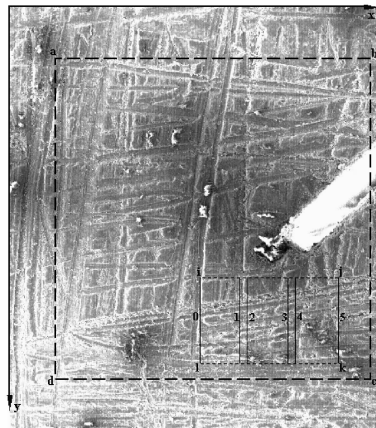


图 4 第 6 加载步(240N)  
Fig. 4 The 6th step(240N)

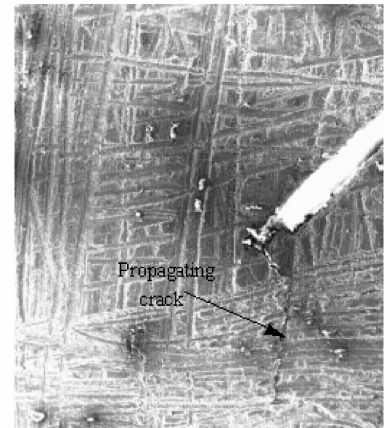


图 5 第 7 加载步(287N)  
Fig. 5 The 7th step(287N)

首先利用数字相关技术,计算了每一步相对前一步的位移增量(以上一加载步获得的数字图像为参考图像,后一步获得的为目标图像)。这里计算了一个较大区域的位移场分布,以便对全局的位移分布有一个概貌,计算区域如图 4 所示“abcd”,该区域包括了预制裂纹的位置。图中 X,Y 轴为像素坐标,每个像素单位代表 0.00434 mm,左上角顶点的坐标为(50,50),区域为边长为 1.736 mm 的正方形。裂纹尖端前较小区域“ijkl”为裂纹可能的扩展区域,“0~5”代表裂纹可能跨过的路径。图 6,7 是区域“abcd”计算出来的位移场分布等值线图(图 6 为水平方向 U 场,图 7 为竖直方向 V 场)。图中表明,在裂纹尖端附近,位移等值线分布较密而远离尖端的区域分布较为稀疏,说明尖端附近的位移梯度较大,损伤变形局部化(strain localization)特征比较明显。裂纹的存在对等值线的扰动非常明显。在无裂纹的情况下,位移等值线应该大致彼此平行,而图 7 的 V 场显示裂纹的存在使得其右边的等值线发生扰动并分岔,一部分向下偏转。

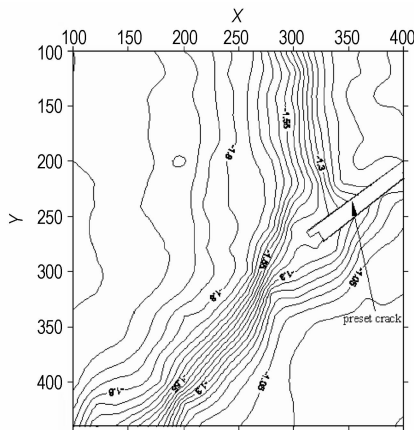


图 6 位移 U 场分布图(第 3 步对第 1 步)

Fig. 6 Deformation field U(step3 vs. step1)

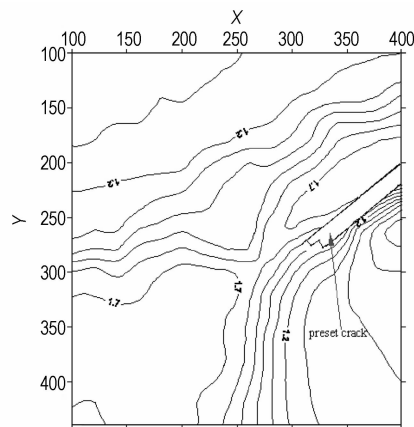


图 7 位移 V 场分布图(第 3 步对第 1 步)

Fig. 7 Deformation field V(step3 vs. step1)

为了更好地分析在压缩过程中位移基本流向,利用位移场分量场数据计算了部分载荷下的合成位移并绘制成合成位移矢量图,如图 8~11 所示。

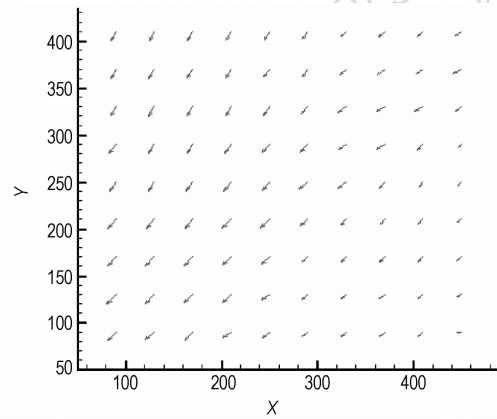


图 8 位移矢量场 a

Fig. 8 Vctor field of displacement(step3 vs. step 2)

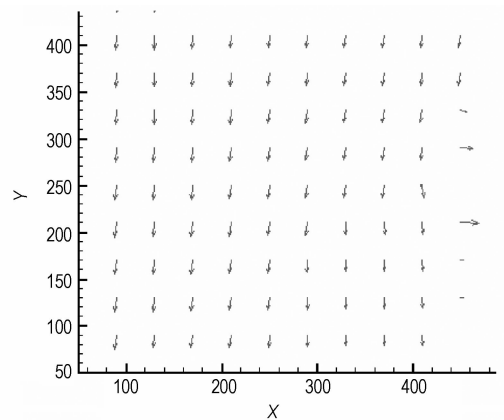


图 9 位移矢量场 b

Fig. 9 Vctor field of displacement(step4 vs. step3)

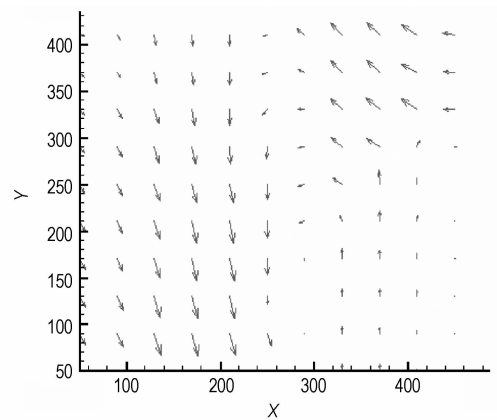


图 10 位移矢量场 c

Fig. 10 Vctor field of displacement(step5 vs. step4)

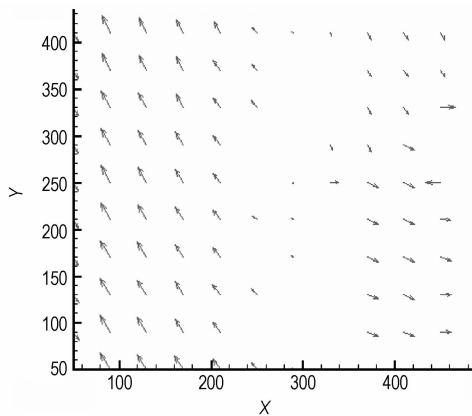


图 11 失效位移矢量场 d

Fig. 11 Failure field of displacement (step7 vs. step6)

图 8 所示是在加载初期裂纹附近的位移场矢量分布图,是利用第三加载步对应的图像比对第二加载步对应的图像经过相关运算获得的,同样图 9 是第四步比对第三步获得的。从图 8 中所示的位移场矢量图来看:初期,位移矢量分布比较规律,裂纹的影响不是很明显,从图 8 可以看到,位移的方向是沿着预制裂纹的方向,即与竖直方向成  $45^\circ$  进行,表明在加载初期,由于预制裂纹的存在,试样在受到压缩载荷作用下,有顺着预制裂纹方向变形的基本趋势,但这一过程在预制裂纹闭合后则停止。图 9 所示的情况则表明在第四加载步,即载荷为 147 N 时,位移整体向加载方向进行,说明试样预制裂纹暂时闭合,整体向下移动。

在图 10 的位移矢量图中(利用第五与第四步加载步获得),可以发现一个有趣的类似漩涡场的位移矢量场,这正是需要关注的现象。观察第四( $p = 147$  N)和第五加载步( $p = 196$  N)下对应的扫描图片(见图 3,这里没有给出  $p = 147$  N 的图片,不过其表面形貌与图 3 极其类似),并没有发现任何表面裂纹的发展,而在后续载荷下(例如  $p = 287$  N)的电镜图象中(图 5)所出现的微裂纹恰好在这个位移错动的区域里,这说明此时所得到位移矢量场可以清晰地表明在试样内部材料已经发生损伤,内部的破坏开始反映在材料的表面局部化变形上。它说明数字图像相关技术可以用于对损伤破坏的预先估计——即从所获得的错位位移矢量图上来推断材料的损伤积累可能已经接近形成裂纹扩展的局部变形临界条件。

在随后的加载作用下,试样仍然表现出一定的承载能力,直到在第七个加载步下,即外载荷为 287 N 下,试样出现整体贯穿裂纹,造成试样彻底破坏。在图 11 所示的矢量图中,可以看见在试样中间部位由于裂

纹错动,相关系数下降,在矢量图中出现空白(数字相关运算得到的相关系数显著低于某一阈值,视为分离,将样品的绝对变形置为零)。说明此时试样已经被裂纹的扩展所分离。需要注意的是,裂纹扩展的方向并非沿着预制裂纹的方向(与竖直方向成  $45^\circ$ ),而是在图 4 所示区域“ijkl”里的线“3”和“4”位置。进行了数发样品实验,其破坏模式均是如此,即预制裂纹倾向于沿着加载方向扩展,即发生“轴向劈裂”现象。试样在顺着预制裂纹方向的剪切滑移时伴随着轴向劈裂的破坏趋势,并非完全剪切破坏,关于这一破坏模式的分析在文献[13]中有进一步论述。

## 4 结论

数字相关技术作为一种全场、非接触的变形测量方式,对于研究固体炸药的损伤破坏非常有效,它能计算出全场的变形,给出位移分布趋势。

通过数字相关计算发现了在破坏之前的位移场错动,尽管此时材料表面图像没有观察到变化,但后续发展的裂纹图像证明可以以此推断试样内部发生了损伤朝向裂纹的发展演化,这说明数字相关技术可以通过观测和计算材料表面的信息,预估材料内部损伤变化。这是本实验得出的一个较为重要的结论。对于裂纹近场区域变形分布,实验和位移场计算表明在其受裂纹强烈影响。同时,实验表明在外载荷为压缩情形下,固体炸药预制裂纹扩展方向沿着加载方向发展,即破坏模式有沿着轴向劈裂的扩展趋势,而并非按照  $45^\circ$  方向的剪切破坏,局部的拉伸应力对其破坏模式具有重要影响<sup>[13]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Baer M R. Modeling heterogeneous energetic materials at the mesoscale[J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 351 - 367.
- [2] Proud W G, Palmer S J P, Field J E, et al. AFM studies of PBX systems[J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 245 - 251.
- [3] Renlund A M, Miller J C, Trott W M, et al. Characterization of thermally degraded energetic materials[R]. DE98003979, 1997
- [4] Rae P J, Goldrein H T, Palmer S J P, et al. Studies of the Failure Mechanisms of Polymer-Bonded Explosives by High Resolution Moiré Interferometry and Environmental Scanning Electron Microscopy[A]. Proceedings of 11th Symposium on Detonation [C], Snowmass, UT, 1998, 66 - 75.
- [5] Sutton M A, Bruck H A, McNeil S R. determination of deformation using digital correlation with newton raphason method and partial differential correlations [J]. *Experimental Mechanics*, 1989, 29: 261 - 267.
- [6] Rae P J, Goldrein H T, Palmer S J P, et al. The Use of Digital Image

- Cross-Correlation(DICC) to Study the Mechanical Properties of a Polymer Bonded Explosive(PBX)[A]. Proceedings of 12th Symposium on Detonation [C], San Diego, CA, 2002, 930 – 938.
- [7] Fang J, Xiong C Y, LI H J, et al. Wavelet transform based digital image processing of photomechanics[A], The 3rd Int. Conf. On Exp. Mech, Proceedings of SPIE [C], 2002, 4537:53 – 58
- [8] Javier Gonzalez, Knauss W G. Strain inhomogeneity and discontinuous crack growth in a particulate composite[J]. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1998, 46(10):1981 – 1995.
- [9] Li M, Zhang J, Xiong C Y, et al. Fracture Analysis of Plastic Bonded Explosive by Digital Image Correlation Technique [A]. The 3rd Int. Conf. On Exp. Mech, Proceedings of SPIE [C], 2002,4537:107 – 110.
- [10] Fang J, Wang J X, Li M, et al. Damage and Fracture Study of Non – homogeneous Materials by Image Correlation Computation [A]. IU-TAM Symposium on Analytical and Computational Fracture Mechanics of Non-Homogeneous Materials [C], Karihaloo BL(ed.), KLUWER, 2002, 323 – 332.
- [11] Namat-Nasser S, Horl M. Micromechanics: Overall properties of heterogeneous materials [M]. B. V. : Elsevier science publishers, 1993.
- [12] 李明. 固体炸药及其模拟物力学行为的实验研究[D]. 北京: 北京大学, 2003.  
LI Ming. Experimental Investigation to the Mechanical Behaviors of PBX and its Simulacrum [D], Beijing: Peking University, 2003.
- [13] Li M, Zhang J, Xiong C Y, et al. Damage and fracture prediction of plastic bonded explosive by digital image correlation processing[J]. *Optical and Laser Engineering* (in press).

## Experimental Investigation to the Damage Localization of PBX Mechanical Failure at Mesoscale

LI Ming<sup>1</sup>, ZHANG Jue<sup>2</sup>, LI Jing-ming<sup>1</sup>, WEN Mao-ping<sup>2</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China

2. Department of Mechanics and Engineering Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** A compressive experiment of in situ of SEM was employed to study the heterogeneous mechanical failure behaviors of plastic bonded explosive containing TATB at mesoscale. Digital pictures of Specimen subjected to quasistatic compressive load were captured for calculating deformation fields and displacement vector fields by the help of digital image correlation algorithm. The vortex field of vectors around the tip of preset crack is observed and the final failure model of specimen obeys the axial splitting which shows the difference from the traditionally accepted point of shearing failure. The localization of damage is visualized via distribution patterns of deformation field and displacement vector field which are affected strongly by the pre-exit crack.

**Key words:** solid mechanics; polymer-bonded explosive; localization of damage; digital image correlation; axial splitting

读者·作者·编者

## 更 正

本刊 2005 年第 1 期“宽频谱红外烟幕剂 CuCl<sub>2</sub>-NiCl<sub>2</sub>-GIC 的研究”一文, 收稿日期应为 2004-02-27, 修回日期为 2004-08-19。特此更正。

《含能材料》编辑部

二〇〇五年四月