文章编号：1000-5773(2011)01-0001-07

PBX 材料宏细观断裂行为的数字散斑相关法实验研究*

周忠彬，陈鹏万，黄风雷

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081）

摘要：采用半圆盘弯曲实验和数字散斑相关方法，对高聚物粘结炸药(PBX)的宏、细观断裂行为进行了实验研究。宏观上，带有预制裂纹的半圆盘试样发生拉伸破坏，利用数字散斑相关技术得到了试样的应变场和位移矢量场分布，定量分析了试样全场的变形特征，并测得了PBX 材料的平面应变断裂韧性；细观上，用配有加载装置的扫描电子显微镜对含预制裂纹的半圆盘试样间接拉伸下的损伤演化和破坏过程进行了实时原位观察，借助于数字散斑相关方法，定量分析了试样损伤局部化特征。结果表明，将数字散斑相关方法用于研究 PBX 材料宏、细观尺度上的变形破坏问题是有效的。

关键词：高聚物粘结炸药(PBX)；数字散斑相关方法；半圆盘弯曲实验；断裂韧性；损伤局部化

中图分类号：TQ560.71；O348.1 **文献标识码**：A

1 引 言

PBX(高聚物粘结炸药)是一种由硬脆性的炸药颗粒和粘弹性的粘结剂构成的聚合物基复合材料，通常是由造型粉经过冷、热压工艺压制而成，材料内部存有大量的细观界面和微观缺陷。且在加工成型过程中，又不可避免地进一步产生微裂纹及其它缺陷。因此，可以认为炸药装药带有大量的微缺陷。在运输、存储及使用过程中，炸药装药将经受热应力、预紧力等力的作用，微缺陷有可能逐渐发展成为裂纹，裂纹的扩展则导致炸药部件的失效。在线弹性断裂力学理论中，平面应变断裂韧性 K_{IC} 是反映材料阻止裂纹扩展能力最重要的定量指标之一，因此，建立炸药平面应变断裂韧性的测试方法并开展相关实验研究，具有现实而重要的意义。

为了更好地认识 PBX 材料的力学行为，研究其在外载荷作用下的变形破坏过程及损伤演化规律，需要对材料的全场变形进行测量。数字散斑相关方法是发展最为迅猛的光力学测量技术之一，主要用于对材料或结构表面在外载荷或其它因素作用下的变形场进行测量。与其它光力学测量方法相比，该方法具有全场测量、非接触和无损性、测量视场大小可调节且精度不受视场大小影响、光路简单及对测量环境无特殊要求等一些独到的优点，对全场变形及非均匀变形场的测量十分有效[1]。国内已有学者利用云纹干涉法和数字散斑相关技术对 PBX 材料的损伤性能进行了研究，从宏观和细观层次对 PBX 材料的变形破坏过程及其损伤机理的研究已有了初步的进展[2-5]。本工作将数字散斑相关方法与半圆盘弯曲实验相结合，探索结合配有加载装置的扫描电镜实时观测的数字散斑相关技术，实现了对半圆盘

* **收稿日期**：2009-11-16；**修回日期**：2010-01-26

基金项目：国家自然科学基金重点项目(10832003)；973 计划项目(613830202)；新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0159)

作者简介：周忠彬(1984—)，男，博士研究生，主要从事高聚物粘结炸药力学性能研究. E-mail：zhoubit@126.com

通讯作者：陈鹏万(1971—)，男，博士生导师，教授，主要从事含能材料相关研究. E-mail：pwchen@bit.edu.cn

状 PBX 材料拉伸破坏过程中的全场变形及微区域变形场的测量。实验结果表明:数字散斑相关技术用于研究 PBX 材料的变形破坏规律是可行性的。

2 实验原理及方法

2.1 半圆盘弯曲实验原理

实验中采用直接拉伸时,由于脆性材料的强度很低,使得制备标准哑铃状试样比较困难,因此,需要建立新的实验加载方式,以实现材料在压缩加载条件下发生拉伸断裂。半圆盘弯曲实验(Semi-Circular Bend Test),也可称间接拉伸实验,由 Chong 和 Kuruppu 首次提出[6-7]。最初用于脆性材料,如陶瓷、岩石等,用半圆盘弯曲实验研究岩石材料的力学性能始于 20 世纪 80 年代,测定岩石在平面拉伸应变条件下的断裂韧性。

图 1 是平面加载时半圆盘弯曲实验的原理图。类似于三点弯曲实验,将半圆盘状试样放置于两支撑座上,在试样的侧表面沿径向施加一集中载荷,它沿试样长度均匀分布。为了研究材料在拉伸应力场中的裂纹扩展规律,在试样直边的中间位置采用薄刀片预制微裂纹,半圆盘状试样发生拉伸劈裂破坏。

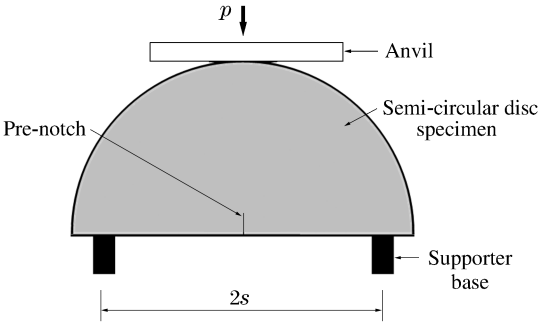


图 1 半圆盘弯曲实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of semi-circular bend test

在断裂力学中,材料内部的裂纹扩展方式分为“张开型”、“滑开型”和“撕裂型”。任何裂纹的扩展均是以上 3 种形式之一或叠加,其中“张开型”是裂纹扩展最主要的形式。根据 Chong 等人[7-8]提出的半圆盘弯曲实验,裂纹尖端的平面应力强度因子计算公式为

$$K_I = pY_K \sqrt{\pi\alpha}/DB \tag{1}$$

$$Y_K = 4.47 + 7.4(\alpha/D) - 106(\alpha/D)^2 + 433.3(\alpha/D)^3 \tag{2}$$

式中:p 为外部压缩载荷,MPa;D 为试样直径,mm;B 为试样厚度,mm;α 为预置裂纹长度,mm;Y_K 为关于 α/D 的函数,无量纲量。图 1 中 $2s$ 表示弯曲实验跨度,mm,在满足 $0.25 \leqslant \alpha/D \leqslant 0.35$ 和 $s/D = 0.4$ 的条件时,(1)式和(2)式才成立。

由断裂力学基本理论可知,当应力强度因子 K_I 增加到某一临界值时,在裂纹顶端区域内足够大的体积内均达到使材料分离的应力而导致材料失稳,当裂纹快速扩展时,此时的应力强度因子 K_I 即为材料的断裂韧性 K_{IC}。根据公式(1)和断裂韧性的物理含义,则 K_{IC} 可由公式(3)求出

$$K_{IC} = p_Q Y_K \sqrt{\pi\alpha}/DB \tag{3}$$

式中:p_Q 为临界破坏载荷。

2.2 数字散斑相关方法

数字散斑相关法(Digital Speckle Correlation Method,简称 DSCM)是利用数学相关方法分析载荷作用下的试样表面数字图像数据,即利用数字图像的灰度值精确测定材料的变形[9]。其基本原理是匹配物体表面在不同状态下的数字化散斑图像上的几何点,跟踪点的运动,从而获得材料表面的变形信息。它的基本过程是:利用带有光学镜头的 CCD 摄像机采集到放大的反映物体表面信息的散斑图,再由数字化记录仪器记录成数字图像格式,对样本图像和目标图像进行相关匹配处理,得到物体表面的变形信息。该方法的核心是,变形前参考散斑场和变形后散斑场的相关运算算法。实际应用中位移值一般不恰好为整像素,作为提高测量精度的亚像素位移定位算法被认为是 DSCM 方法的关键技术之一[10-11]。此外,此方法在硬件上的配置相比于其它方法(如云纹干涉法)较为简单。随着算法精度和硬件设备性能的提高,该方法将会获得更广泛的应用。

3　实验材料及散斑场的制备

半圆盘弯曲实验采用的是一种高聚物粘结炸药的模拟材料。通过热压的方法将模拟材料造型粉在钢制模具内压制成型。压制压力为 200 MPa、压制温度为 100 ℃,保温保压 90 min,降温降压后退模,得到圆盘状试样。本实验圆盘状 PBX 材料的厚度为 9 mm,直径为 20 mm,然后将圆盘状试样机加工成半圆盘状。

DSCM 对材料力学性能的测试过程就是匹配材料表面在变形前后的数字化图像上的散斑点,跟踪点的运动,从而获得物体表面的变形信息。我们所用的 PBX 材料表面无特殊的自然纹理,对其宏观测试,通常采用人工喷漆标记斑点的方法制作散斑场。首先将 PBX 观测表面磨制平整,然后均匀喷一层雾化的白漆作为背景,最后均匀喷雾化的黑漆,使其在白漆上形成斑点,如图 2 所示。

在将人工散斑的制作应用于 PBX 细观研究方面做了一些探索,试图利用 PBX 细观结构形貌作为散斑图进行研究。由于 PBX 炸药颗粒属于半透明材料,而且颗粒含量很高,在光学显微镜下材料的形貌图在观测时将出现严重的透光现象,因而在进行 DSCM 分析处理时相关匹配性很差。对 PBX 材料进行磨制、抛光、喷金处理后,其显微结构形貌如图 3 所示。从图 3 可看到,PBX 材料主要含有炸药模拟颗粒和粘结剂组分,而且两者灰度对比较好,因此,材料的显微结构形貌图可作为散斑场应用到 DSCM 分析中。本研究在 PBX 材料半圆盘弯曲实验中,采用了具有加载装置的扫描电镜,在加载的同时,实时记录当前载荷下材料的表面形貌,再借助于数字散斑相关技术,可以对微区应变场进行测量,以揭示材料的细观变形破坏机理。

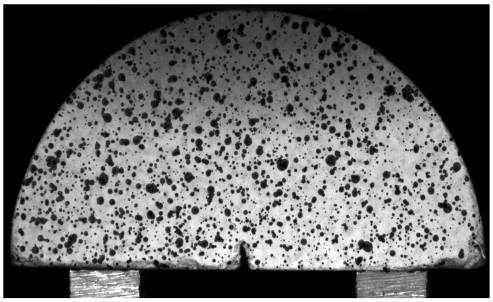


图 2　人工制作散斑场

Fig. 2　Speckle pattern on sample surface

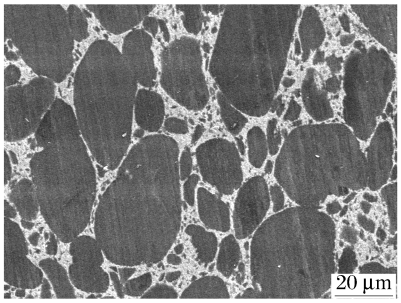


图 3　PBX 材料显微结构形貌

Fig. 3　Microstructure of PBX

4　讨论分析

4.1　断裂韧性测试结果

计算材料断裂韧性 K_{IC} 的关键在于确定临界破坏载荷 p_Q。图 4 给出了实验得到的典型载荷-裂纹张开位移(p-V)曲线。一般参照 GB　4161－84 中采用的方法,以载荷-裂纹张开位移(p-V)曲线中线性段斜率的 95%为斜率作过原点的割线,该直线与 p-V 曲线的交点所对应的载荷即为临界破坏载荷[12-13],进而由公式(3)求得 K_{IC}。使用这种方法确定临界破坏载荷具有一定的局限性,对于 PBX 及其模拟材料都属于粘弹性材料,载荷-裂纹张开位移曲线基本上是非线性的,因此套用 GB　4161－84 中所用的方法来确定 p_Q 时带有较大的主观色彩,会引入较大的误差。对由 p-V 曲线确定的大量临界破

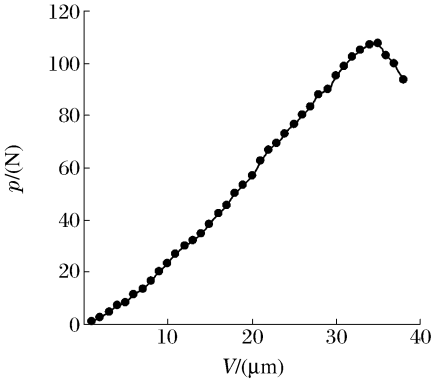


图 4　载荷-裂纹张开位移曲线

Fig. 4　Load-crack opening displacement curve

坏载荷值进行分析，发现 p_{max}/p_Q 的值满足 $p_{max}/p_Q \approx 1.05$，最大值不超过 1.1[6]。因此，选用关系式 $p_{max}/p_Q = 1.05$ 确定临界破坏载荷。对 PBX 模拟材料平面应变断裂韧性的测试采用半圆盘弯曲实验，在材料试验机上以 0.1 mm/min 恒速率进行位移加载。室温条件下对同一 PBX 模拟材料进行了 4 组实验，表 1给出了实验记录的最大失效载荷和根据 $p_{max}/p_Q = 1.05$ 确定的临界载荷，从结果可以看出，所用的 PBX 模拟材料的断裂韧性值基本一致((0.50±0.02)MPa·$m^{1/2}$)，测试结果反映出了模拟材料抵抗裂纹扩展的能力，同时也为定量评价 PBX 材料的断裂性能提供了可靠的依据。

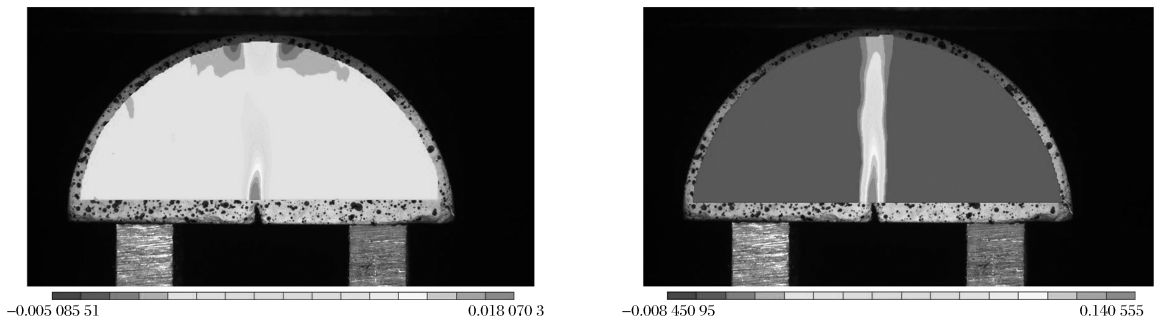
表 1 4 种 PBX 材料平面应变断裂韧性 K_{IC}

Table 1 Plane strain fracture toughness of four kinds of PBX

Notch length a/(mm)	Diameter D/(mm)	Thickness B/(mm)	Fracture load p_{max}/(N)	Critical failure load p_Q/(N)	Fracture toughness K_{IC}/(MPa·$m^{1/2}$)
4.9	20	9	119.58	113.89	0.49
5.0	20	9	116.27	110.73	0.50
5.0	20	9	122.18	116.36	0.52
5.1	20	9	107.55	102.43	0.48

4.2 PBX 材料宏、细观应变场分析

将含有预置裂纹的半圆盘试样放置于试验机加载装置中，施加准静态压缩载荷。同时利用一光学 CCD 摄像机(图像采集速度为 3 幅/秒)对试样表面全场区域进行拍摄，计算机同步记录载荷和图像，包括从初始受压直到裂纹扩展、破坏的全部过程均被自动记录下来。选取受载荷初期及后期破坏的典型阶段进行研究，与压缩前的初始图像一起利用数字散斑相关分析进行计算，图 5 是两个载荷条件下含预置裂纹的半圆盘试样全场区域内水平方向上的应变场分布。从图 5 中可看出，在 $p=145$ N 时，预置裂纹尖端区域已出现较为明显的应变集中现象，在此载荷条件下，试样表面内最大拉应变约为 0.018。随着载荷的增加，应变集中带有沿着预置裂纹方向演化的趋势。外载荷 $p=410$ N 时，沿预置裂纹方向出现十分明显的拉伸应变集中带，预置裂纹顶端应变集中现象最为显著，最大拉伸应变值约为 0.14。从图 5 所示的应变场分布可以看出，在初期阶段裂纹没有扩展，损伤还未发展，裂纹尖端应变值较小；随着载荷的不断增加，裂纹尖端区域逐渐出现应变集中现象，且应变集中带不断扩展，应变值也在逐渐增加。此外，为了更好地揭示在压缩过程中材料的变形破坏，利用位移场分量数据计算了破坏后某时刻的合成位移，并与试样破坏形貌相叠加绘制成位移矢量场分布图，如图 6 所示。位移矢量箭头的大小和方向分别表示了试样表面各个质点发生的位移大小和流动方向，特别是从矢量箭头的分布可清晰地揭示试样发生破坏的机理。在水平方向上试样受拉应力作用，沿预置裂纹方向发生劈裂破坏，最大运动位移约为 0.17 mm。



(a) $p=145$ N (b) $p=410$ N

图 5 不同载荷下的水平应变场分布

Fig. 5 Strain field distribution in horizontal direction at two load steps

为了理解 PBX 材料的细观力学行为和定量研究材料的破坏模式,进行了扫描电子显微镜下的准静态半圆盘弯曲破坏实验。为了研究其破坏模式和局部化损伤,在试样直边采用特制的薄刀片预制裂纹。裂纹长度为 0.9 mm,宽约为 0.2 mm,与加载方向垂直。由于 PBX 材料不导电,需要在其表面喷金,以形成导电层。采用配有加载装置的扫描电镜,选取预置裂纹尖端的微区域,如图 7 所示。将喷金后的试样放置在扫描电镜加载平台上,首先记录加载前试样微区域的形貌,然后以 $\Delta p=50$ N 手动加载,在加载的同时实时记录当前载荷下的试样显微结构形貌,再利用数字散斑相关方法分析该区域的变形场,根据计算得到的应变场来分析试样的破坏模式。

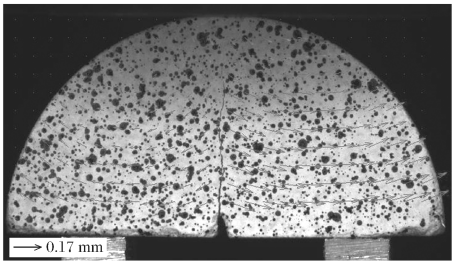


图 6　破坏后的位移矢量场分布

Fig. 6　Displacement vector field of PBX for post-failure

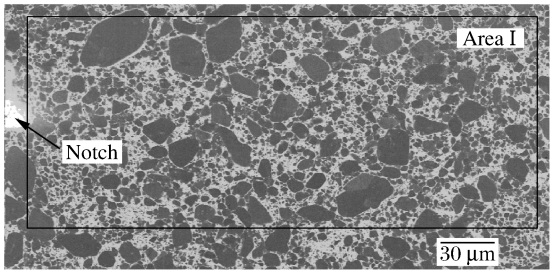
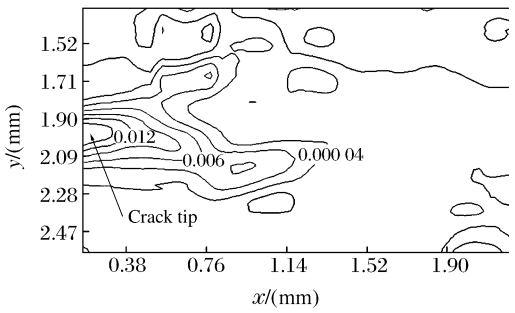


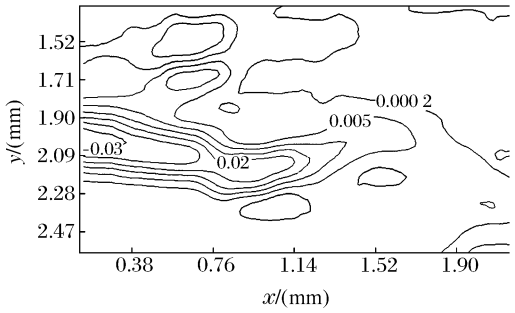
图 7　预置裂纹尖端区域显微结构图

Fig. 7　Microstructure of tip-front region of preset notch in PBX

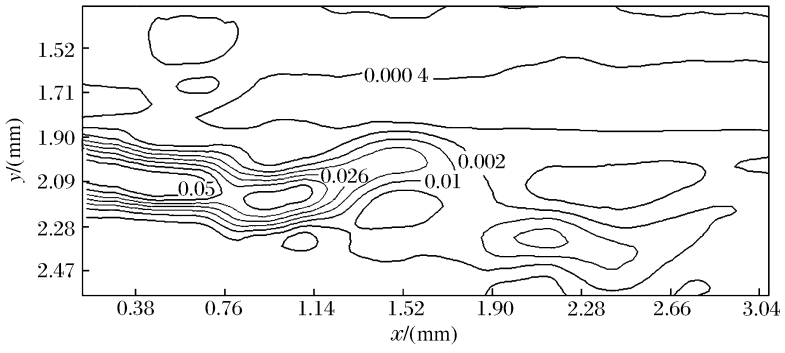
通过扫描电镜获得的数字图像基本上包含了半圆盘弯曲破坏的整个过程(初始形貌、裂纹演化过程以及最终破坏形貌)。选取加载过程中 $p=150$ N,250 N,400 N 3 个时刻的数字图像,与初始形貌一起借助数字散斑相关技术进行分析,计算区域如图 7 所示"Area Ⅰ"。计算得到了每一步载荷相对于加载前的位移增量和应变增量,图8所示的是该计算区域在3个加载步时的竖直方向上的应变场分布。从



(a) $p=150$ N



(b) $p=250$ N



(c) $p=400$ N

图 8　不同载荷下 y 方向上的应变场分布

Fig. 8　Strain field distribution in vertical direction at different load steps

图 8 可看出，外部载荷 $p=150$ N 时，在预制裂纹尖端附近应变等值线分布较为密集，且最大应变值约为 0.015，而远离尖端的区域等值线分布较为稀疏，说明尖端附近的应变梯度较大。随着载荷的增加（$p=250$ N 和 $p=400$ N 时），裂纹尖端区域的应变值不断增大，应变集中带沿着预置裂纹的方向逐渐演化，裂纹尖端微区域的损伤局部化特征十分明显。从等值线分布图还可预测含预置裂纹的试样在拉应力场中最终沿着预置裂纹的方向发生劈裂破坏。

研究表明，界面裂纹开始扩展的应力强度因子临界值小于相应的两种单材料的临界值，在相同的临界值作用下，界面处的裂纹扩展速率高于相应的两种单材料的扩展速率[14]。此外，与界面处存在的杂质、孔洞等缺陷一致，这些缺陷影响界面的力学性能，使得微裂纹容易沿界面扩展。对试样进行压缩实验，通过实时显微观察发现，在初始损伤分布的位置同时产生多条微裂纹，而且微裂纹沿着颗粒边界逐渐生长并贯通，裂纹进一步扩展直至材料破坏。图 9 是典型的裂纹扩展路径图。从图 9 中可看出，裂纹 1 和裂纹 2 是支裂纹，在拉应力场中裂纹生长到一定程度时释放出材料内部应力而停止演化。裂纹 3 是主裂纹，贯穿试样整体，造成试样完全破坏。从图 9 中还可以看到，裂纹是沿着颗粒的边界逐渐扩展的，在裂纹路径上可观察到大颗粒发生穿晶断裂（如图中颗粒“A”和颗粒“B”所示），但这种现象较少发生。

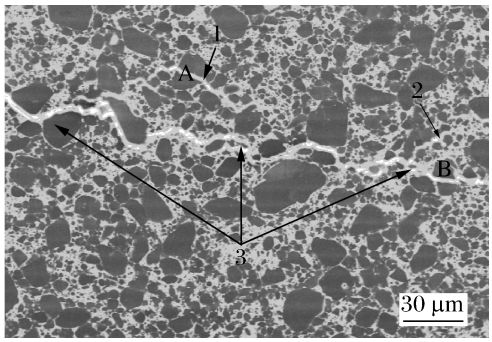


图 9 典型的断裂路径形貌

Fig. 9 Microstructure of typical post failure route in PBX

5 结 论

在设计半圆盘弯曲实验的基础上，建立了高聚物粘结炸药平面应变断裂韧性的测试方法，并对 PBX 材料的力学性能进行了评价，测量了 PBX 的断裂韧性。本工作还将半圆盘弯曲实验与数字散斑相关方法相结合，在宏观尺度上对半圆盘状 PBX 材料拉伸破坏过程中的表面应变场进行了分析；并且探索将数字散斑相关方法和扫描电镜相结合，实现了对 PBX 材料微区域应变场的测量，在细观尺度上揭示了 PBX 材料损伤演化的规律。实验结果表明，数字散斑相关方法用于研究 PBX 材料宏、细观变形破坏问题是有效的。

感谢北京理工大学马少鹏副教授对实验工作所提供的帮助。

References:

[1] Wang H W, Kang Y L, Xie H P. Advance in Digital Speckle Correlation Method and Its Application [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 195-203. (in Chinese)
王怀文，亢一澜，谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展 [J]. 力学进展，2005，35(2)：195-203.

[2] Xie H M, Shi H, Chen P W, et al. An Experimental Study on Creep Behavior of PBX Using Moiré Interferometry [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3): 375-380. (in Chinese)
谢惠民，史 航，陈鹏万，等. PBX 材料蠕变性能的云纹干涉法实验研究 [J]. 实验力学，2005，20(3)：375-380.

[3] Liu Z W, Xie H M, Li K X, et al. Fracture Behavior of PBX Simulant Subject to Combined Thermal and Mechanical Loads [J]. Polymer Testing, 2009, 28: 627-635.

[4] Chen P W, Xie H M, Huang F L, et al. Deformation and Failure of Polymer Bonded Explosives under Diametric Compression Test [J]. Polymer Testing, 2006, 25: 333-341.

[5] Li M, Zhang Y, Li J M, et al. Experimental Investigation to the Damage Localization of PBX Mechanical Failure at Mesoscale [J]. Energetic Materials, 2005, 13(2): 79-83. (in Chinese)
李 明，张 钰，李敬明，等. 高聚物粘结炸药压缩破坏的细观力学实验研究 [J]. 含能材料，2005，13(2)：79-83.

[6] Chong K P, Kuruppu M D. New Specimen for Fracture Toughness Determination for Rock and Other Materials [J]. Int J Fract, 1984, 26: 59-62.

[7] Chong K P, Kuruppu M D. Fracture Toughness Determination of Layered Materials [J]. Eng Fract Mech, 1987, 28 (1): 43-54.

[8] Chang S H, Lee C I, Jeon S. Measurement of Rock Fracture Toughness under Model Ⅰ and Ⅱ and Mixed Mode Conditions by Using Disc-Type Specimens [J]. Eng Geology, 2002, 66: 79-97.

[9] Li M, Zhang Y, Wen M P, et al. Digital Speckle Correlation and Its Applications [J]. Information and Electronic Engineering, 2005, 3(1): 36-39. (in Chinese)
李　明, 张　钰, 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.

[10] Pan B, Xie H M, Xu B Q, et al. Development of Sub-Pixel Displacements Registration Algorithms in Digital Image Correlation [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(3): 345-352. (in Chinese)
潘　兵, 谢惠民, 续伯钦, 等. 数字图像相关中的亚像素位移定位算法进展 [J]. 力学进展, 2005, 35(3): 345-352.

[11] Pan B, Xie H M, Guo ZQ, et al. Full-Field Strain Measurement Using a Two-Dimensional Savitzky-Golay Digital Differentiator in Digital Image Correlation [J]. Optical Eng, 2007, 46(3): 1-10.

[12] Zhao F F. Study on Damage and Fracture Mechanism of PBX by Acoustic Emission [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2001: 31-36. (in Chinese)
赵方芳. 利用声发射技术研究高聚物粘结炸药的损伤与断裂特性 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2001: 31-36.

[13] Wen M P, Ma L L, Tian Y, et al. Experimental Study on the Plane Strain in Fracture Toughness of High Polymer Bonded Explosive [J]. Chinese Journal of Explosive and Propellants, 2001, 2: 16-19. (in Chinese)
温茂萍, 马丽莲, 田　勇, 等. 高聚物粘结炸药平面应变断裂韧度实验研究 [J]. 火炸药学报, 2001, 2: 16-19.

[14] Li C, Tie Y, Zheng Y P. Influence of Material Characters on Biomaterial Interfacial Crack Energy Release Rates and Stress Intensity Factors [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 1-6. (in Chinese)
李　成, 铁　瑛, 郑艳萍. 两种材料的性质对双材料界面裂纹能量释放率及应力强度因子的影响 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 1-6.

An Experimental Study on the Micro/Macro Fracture Behavior of PBX Using Digital Speckle Correlation Method

ZHOU Zhong-Bin, CHEN Peng-Wan, HUANG Feng-Lei

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The micro/macro fracture behavior of a polymer bonded explosive (PBX) material was experimentally studied using a semi-circular bend test and digital speckle correlation method (DSCM). Brittle fracture occurred when a semi-circular disc sample of PBX with a preset crack was compressed. The whole strain field and displacement vector plot were obtained using the DSCM, and the plane strain fracture toughness of PBX material was acquired. In addition, real time microscopic examination was conducted to observe the process of deformation and failure of PBX material under semi-circular bend test using a scanning electron microscope (SEM) equipped with a loading stage. The localized damage and its evolution in PBX were obtained by the DSCM, demonstrating possible fracture route of microcracks. The results indicate that DSCM technique is a valid and effective tool to study the deformation and fracture mechanisms of PBX.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); digital speckle correlation method; semi-circular bend test; fracture toughness; localization of damage