

文章编号: 1001-1455(2011)06-0624-06

PBX 炸药的拉伸断裂损伤分析*

李俊玲^{1,2}, 傅 华¹, 谭多望¹, 卢芳云²

(1. 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重点实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 国防科技大学理学院工程物理研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要: 采用巴西实验作为间接拉伸加载手段, 研究了某 PBX (polymer-bonded explosive) 炸药试样拉伸作用下的断裂损伤特性。发展了 PBX 炸药的光学制备技术, 获得了试样在光学显微镜下的细观表面形貌和断裂损伤形貌, 结合高速摄影和数字相关分析技术获得了试样的形变和破坏过程。实验结果表明该 PBX 炸药的静态拉伸强度低于 3 MPa, 破坏应变也非常小。根据观测结果, 运用晶体穿晶断裂和临界脱粘理论对 PBX 炸药的拉伸断裂模式进行了分析, 认为脱粘裂纹在加载早期即可成核; 当晶体开始发生断裂后试样发生宏观破坏。颗粒尺寸较大的晶体容易发生穿晶断裂, 颗粒尺寸很小的晶体则容易发生界面脱粘。

关键词: 固体力学; PBX 炸药; 巴西实验; 细观断裂损伤; 数字相关

中图分类号: O347

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

PBX 炸药是既具有高爆炸性能又具有低感度的含能材料, 在各类武器中使用广泛。由于 PBX 炸药在生产、运输和使用过程中会意外起爆, 因此其安全性研究广受关注。PBX 炸药的损伤破坏力学响应是发生意外爆炸的起因。损伤的存在使炸药力学性能劣化, 导致材料破坏甚至敏化形成“热点”。PBX 炸药在拉伸应力作用下更容易发生断裂破坏, 脆性裂纹尖端释放的机械能可能会导致局部加热升温, 或产生新的表面引起摩擦, 这些都可能引发点火反应, 造成意外起爆^[1]。因此, 研究 PBX 炸药的拉伸断裂损伤特性也是 PBX 炸药安全性研究的重要内容之一。

由于 PBX 炸药结构复杂, 加工成哑铃状试样进行直接拉伸实验的成功率不高, 也无法对哑铃状试样侧面进行光学制备, 以便在光学显微镜下观察损伤形貌。巴西实验是沿径向在圆柱形试样的侧面进行加载, 使试样受垂直于加载方向的拉伸应力作用直至破坏, 从而达到分析研究材料的强度以及拉伸断裂损伤特性的目的。自 20 世纪 70 年代以来, 该实验就由于试样制备要求简单, 节省材料及实验成本低等优点得到了广泛应用^[2]。S. J. P. Palmer^[3]等早在 1993 年就采用巴西实验对多种 PBX 炸药的损伤特性进行研究, 分析了材料组分对其整体力学性能及损伤特征的影响。陈鹏万^[4]也开展了 PBXN-5 和模拟材料的巴西实验, 证实了巴西实验用于炸药材料研究的有效性和实用性。

本文中, 开展准静态巴西实验, 结合高速摄影技术和数字相关分析技术, 获得巴西实验过程中的应变场分布。对回收试样的细观损伤形貌进行光学显微观测, 应用损伤断裂理论对某 PBX 炸药的断裂损伤特性进行相关分析。

1 实 验

1.1 PBX 炸药的光学制备

为获得试样的损伤形貌, 在巴西实验前还需要对试样进行光学制备。C. B. Skidmore 等^[5]和 P. J.

* 收稿日期: 2010-10-13; 修回日期: 2011-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672177, 10872215, 10902100);

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(61383);

中国工程物理研究院科学技术重大基金项目(2009A0201008);

国防科技重点实验室基金项目(9140C6709020907, 9140C6709021005)

作者简介: 李俊玲(1984—), 女, 博士研究生。

Jae 等^[6]通过特殊的试样生产和制备技术,用视频显微镜或偏光显微镜观察能获得较好的试样细观形貌。目前,国内对 PBX 炸药的细观形貌观察多采用扫描电镜或者 X-射线衍射技术等,这些方法虽然可以获得一定的细观结构信息,但尚未能得到压装成型后高清晰度的晶体形貌以及与粘结剂的包覆特征。

由于试样是多相材料,各相的结构和力学性能差异较大,且各相的强度都比较低,用常规磨抛方法不但很难获得清晰的表面形貌,而且材料表面容易受损,强度降低。为克服试样结构复杂性为磨抛工作带来的困难,采用不同颗粒度的抛光剂与粗绒布、细绒布和精抛绒逐次配合使用的方法对试样进行抛光,获得了比较清晰的炸药细观形貌。

图 1 为 PBX 炸药的细观形貌,从图中可以看出,PBX 炸药晶体颗粒大小不一,形状各异,多边形特征比较突出。图 1(a)中的大晶体边界非常清晰,但内有空洞损伤,周围分布着较小的颗粒。空洞至晶体左下角的一片区域形状规整,颜色和边界与主晶体不一致,可能是晶体生成过程中晶格方向发生了改变,或是压制过程中其他晶体的嵌入所致。图 1(b)中的右下角有 1 个典型的孪晶炸药晶体颗粒,旁边还有 2 个完全接触的晶体。说明压制过程中有些晶体并未被粘结剂完全包覆,存在直接接触。

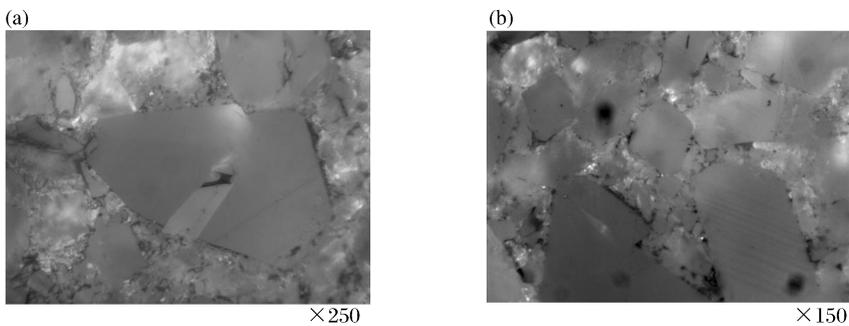


图 1 PBX 炸药的细观形貌

Fig. 1 Micro-structures of the PBX

1.2 巴西实验

根据弹性力学分析,巴西实验中的压缩载荷在垂直于加载轴的各面产生均匀的拉伸应力,当该拉伸应力超过材料的拉伸强度时,圆盘中心会产生一条竖直裂纹,试样被劈裂成两半(见图 2)。考虑接触的宽度,拉伸应力可写为^[7]

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi DL} \left[1 - k \left(\frac{2b}{D} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: P 为加载于试样上的力, L 和 D 分别是试样的厚度和直径。这里, $D=20$ mm, $L=4$ mm, $k \approx 1$, b 为接触面的半宽,可通过对回收试样的接触面进行测量获得, $b=2$ mm。

用 MTS 试验机对磨抛好的试样进行准静态巴西实验,为便于回收劈裂后的试样,利用材料静态试验机的加载位移速度(0.1 和 0.2 mm/min)来控制加载。采用高速摄影技术记录巴西实验过程,拍摄幅频为 $3\,000\text{ s}^{-1}$,图像大小为 256×640 像素。结合数字相关技术获得了各个时段的应变场分布。

在不同应力率条件下,试样破坏时的中心拉伸应力分别为 2.91 和 2.82 MPa(见图 3)。试样被加载到一定程度时,内部会产生损伤,材料强度会降低。对回收试样进行二次加载,应力仅为 2.50 MPa 时试样就出现了拉伸破坏(见图 3)。这说明初次加载试样虽未出现宏观损伤断裂,但内部存在微观结构的损伤,导致二次加载时强度降低。该 PBX 炸药拉伸强度(小于 3 MPa)很低,受到轻微的外界刺激即可能产生损伤,这就对它在生产运输中的保护提出了更高的要求。

宏观裂纹的演化发展过程如图 4 所示,表征加载中的 4 个特征时段:加载前、微损伤累积、圆盘中心宏观裂纹出现、裂纹扩张。外载荷 P 沿 y 方向从圆盘顶部进行加载。图 4(b)~(d)的时间间隔仅为 0.33 ms。在宏观裂纹可见之前,试样无明显的宏观变形迹象;裂纹在圆盘中心出现,表明试样确实是由中心拉伸导致破坏;一旦出现了宏观裂纹,试样会立即劈裂。

图 5 给出了各特征时段的应变场分布。为获得更多应变信息,增加图 5(a)的等应变曲线数目,图

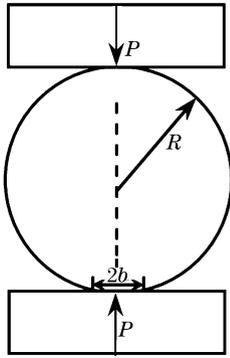


图 2 巴西实验原理示意图

Fig. 2 Brazilian test geometry

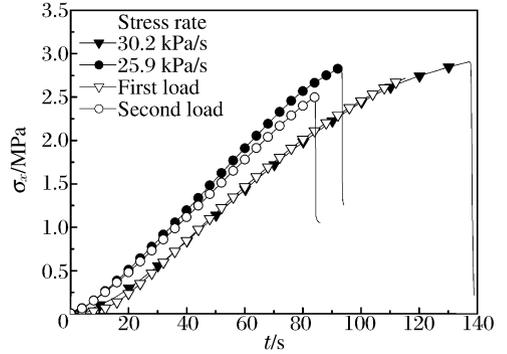


图 3 拉伸应力历史

Fig. 3 Tensile stress history

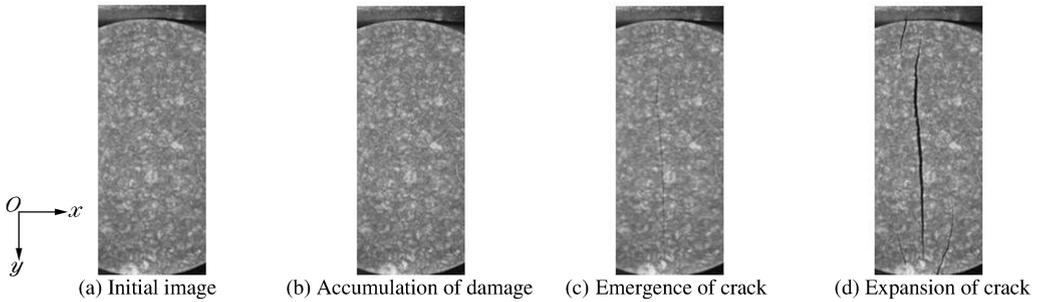


图 4 裂纹演化过程

Fig. 4 The process of the evolution of crack

中试样破坏前中心应变只有 3×10^{-4} ，其上下左右各方均有大于 1.2×10^{-3} 的区域，还有部分小区域呈压缩状态，尚未完全形成对径劈裂的应变分布。裂纹出现后，中心应变急剧增大到 3.9×10^{-2} ，裂纹附近的颗粒加速向两侧运动，形成一个相对的压缩区域。于是，在 x 方向形成了对称的“拉-压-拉-压-拉”分布(见图 5 (b))。随着裂纹继续扩张，端部也因应力集中效应出现小裂纹，拉伸和压缩区域的应变都进一步增大(见图 5(c))。

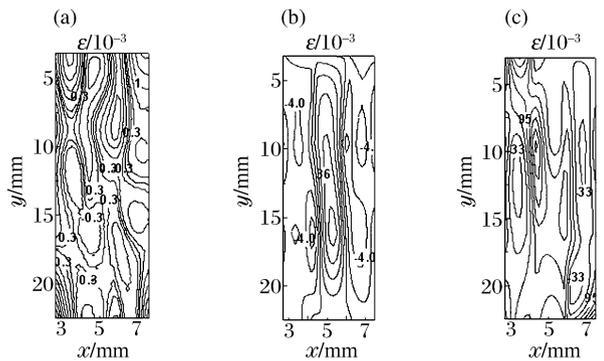


图 5 x 方向的应变场

Fig. 5 Strain fields along the x direction

裂纹瞬时出现并立即扩张，即使将拍摄频率提高到 10^5 s^{-1} 也很难观测裂纹的起裂和扩展过程。说明圆盘试样在沿加载的直径方向拉伸应力分布均匀，裂纹在拉伸时有很多地方同时成核并汇聚，导致试样最终劈裂，符合巴西实验原理的应力分布。应变场的不均匀性则体现了 PBX 炸药的离散介质特性。当试样受到加载时，内部的粘结剂小颗粒首先会通过自身的大量变形，甚至带动晶体颗粒的刚性运动以填补空隙等方式抵抗外界加载，形成内部不均匀的挪移运动状态；裂纹出现后不同区域的颗粒运动速度不均，形成了拉-压-拉的应变分布。

1.3 PBX 炸药的细观损伤观测

通过光学显微镜对回收试样进行观察，获得以下微/宏观裂纹的断裂形貌特征。

(1) 试样在应力强度较小时即出现微裂纹，沿晶断裂是主要的裂纹形式(见图 6(a))。图 6(b)中的裂纹左侧的高亮区域表明大多数晶体已经破碎，但微裂纹没有从碎晶区域中穿过，说明裂纹倾向于沿着大颗粒晶体的直界面扩展。

(2) HMX 在受压时可通过改变晶格方向,产生孪晶来防止形变过大而断裂。孪晶晶体的形成会降低晶体的强度,微裂纹能直接穿过晶体传播(见图 7(a))。试样卸载后产生的微裂纹有可能会闭合(图 7(b)中裂纹间距变小),并沿孪晶方向产生了次生裂纹(图 7(b)中箭头所示)。在外界应力的挤压下微裂纹面之间会产生摩擦,加上次生裂纹形成释放的能量,易导致局部温升。

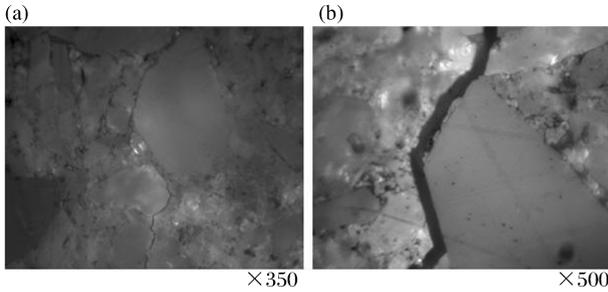


图 6 微裂纹的扩展路径

Fig. 6 Extension path of micro-cracks

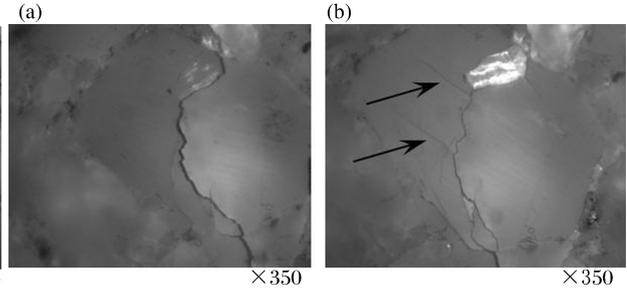


图 7 微裂纹闭合及次生裂纹产生

Fig. 7 Close of micro-cracks and emergence of sub-cracks

(3) 颗粒直径较大或具有初始损伤的晶体容易发生穿晶断裂(见图 8),颗粒较小的晶体则表现为界面间断裂。图 8(a)为宏观裂纹接近末端的部位。根据考虑了接触平台的巴西实验圆盘拉伸应力分布结果^[4],该位置的应力为中心处拉伸应力的 70%~90%,裂纹扩展的能量相对较低,穿过晶体传播相对困难,于是出现锯齿型的穿晶路径。而在裂纹中心附近,裂纹经过晶体的路径几乎为直线(见图 8(b))。

(4) 裂纹在传播过程中可能会产生分叉,出现断裂桥的模式(见图 9(a))。图 9(a)上方为粘结剂受到拉伸作用变形后产生脱粘的拉丝现象(放大图见图 9(b))。由于该 PBX 炸药的粘结剂含量较少,且模量较高,具有相对脆性,并未出现大量的粘结剂脱粘的现象^[8]。

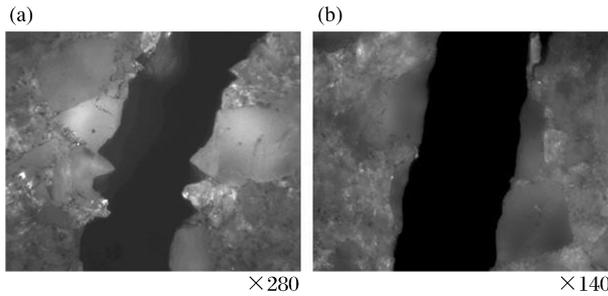


图 8 宏观裂纹形貌特征

Fig. 8 Micro-features of macro-cracks

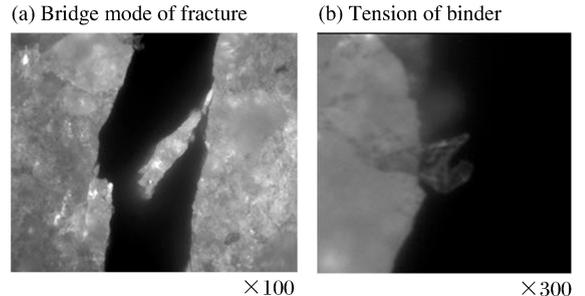


图 9 其他裂纹扩展现象

Fig. 9 Other phenomena of cracks

回收试样的光学显微观察结果表明:在应力较小试样未发生劈裂时微裂纹即会出现;穿晶断裂路径的曲直与外界拉伸应力的有关;宏观裂纹形貌可概括为大尺寸晶体颗粒容易发生穿晶断裂,小尺寸颗粒一般只发生界面脱粘。

2 PBX 炸药的拉伸断裂破坏模式分析

目前发现的拉伸断裂主要有晶体断裂、晶体与粘结剂之间的界面脱粘、孔洞的扩张甚至粘结剂断裂。通常粘结剂的断裂表面能约 10^2 J/m^2 ^[9],因此粘结剂断裂需要外界提供很大能量,一般情况下不会发生粘结剂断裂。孔洞形成所需的外界应力较低,约为基体模量的 1/4^[3],但孔洞扩张却需要较高的外界应力支持,最终还是以裂纹的形式扩展。下面主要分析 PBX 炸药的界面脱粘断裂和穿晶断裂模式。

(1) 晶体断裂

假设晶体为均匀弹性介质,则可利用 Griffith 断裂理论估算炸药晶体发生断裂的临界应力

$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi c}} \quad (2)$$

炸药晶体 β -HMX 的断裂韧性为 $62 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ ^[10], c 为裂纹长度的 $1/2$ 。考虑极端条件, 取 c 为最大的颗粒半径。该炸药的颗粒尺寸从几微米到几百微米不等, 成 β -分布, 最大颗粒晶体半径 $r \approx 200 \mu\text{m}$, 得到其临界应力强度为 2.47 MPa 。晶体穿晶断裂的临界应力值与实测的试样拉伸强度较为接近, 试样的宏观破坏可能是由晶体断裂造成的。

(2) 界面脱粘

晶体模量比基体模量大至少 3 个量级, 临界脱粘应力可简化为将弹性基体中的刚性球从基体脱离出来所需的外界应力。D. W. Nicholson^[11] 利用能量守恒, 预测了脱粘会在径向拉伸达到 σ_d 的地方发生

$$\sigma_d^2 = 4E\gamma(1+v)/[9r(1-v)^2] \quad (3)$$

式中: γ 为界面粘着力做功, T. Rivera 等^[12] 研究了 TATB 炸药晶体与粘结剂之间的粘着力做功在 $57.8 \sim 67.1 \text{ mJ/m}^2$ 。目前尚未发现对 HMX 的相关研究, 鉴于朱伟等^[13] 的分子动力学研究结果, TATB 晶体与该 PBX 炸药中粘结剂的结合能大于 HMX, 本文中暂取 $\gamma \approx 50 \text{ mJ/m}^2$, v 为基体的泊松比, $v \approx 0.5$, 基体拉伸模量 E 取 1.73 MPa ^[14], 对于最大颗粒半径 $r \approx 200 \mu\text{m}$ 的炸药晶体边界, σ_d 仅为 0.034 MPa 。

该 PBX 炸药的颗粒含量较高, 应采用 PBX 炸药复合材料的有效模量和泊松比来代替粘结剂的弹性参数。含能晶体的模量比基体的模量大 3 个量级, 可视晶体颗粒相的杨氏模量为无穷大, 临界脱粘应力则表示为^[3]

$$\sigma_d^2 = 4E_b\gamma(2+3\varphi)/[3r(1-\varphi)] \quad (4)$$

式中: E_b 为基体弹性模量, φ 为晶体颗粒体积分数。该 PBX 炸药颗粒相体积分数为 94.15% , 则得到颗粒半径 $r = 200 \mu\text{m}$, 炸药晶体临界边界脱粘为 0.218 MPa 。可见, 脱粘断裂可在很小应力条件下发生。

将理论分析结果与实验结果结合来看, 当该 PBX 炸药受到拉伸加载时, 界面脱粘所需的外界应力很小, 沿晶断裂是该 PBX 炸药的首要断裂方式; 随着外载荷的增加, 尺寸较大的晶体颗粒承受的拉伸应力达到其临界断裂应力, 晶体颗粒开始发生穿晶断裂; 穿晶断裂裂纹沿加载方向迅速传播, 试样瞬间发生宏观破坏。利用 Griffith 断裂理论能较好预测该 PBX 炸药的断裂行为。

3 结 论

(1) 对某 PBX 炸药进行了巴西实验, 获得其拉伸强度低于 3 MPa 。采用高速摄影技术和数字相关技术, 获得了试样的变形及裂纹的演化过程。

(2) 发展了试样的光学制备技术, 获得了清晰的某 PBX 炸药的细观形貌。将回收的试样进行光学显微观察, 得到了试样细观断裂损伤的形貌特征。结果表明粗大的晶体颗粒会断裂, 细小的晶体颗粒发生界面脱粘。

(3) 用晶体穿晶断裂和临界脱粘理论对某 PBX 炸药的断裂模式进行了相应分析, 能较好地预测晶体的断裂行为。微裂纹成核在加载早期即可能成核, 而穿晶断裂可能才是造成试样宏观破坏的主要原因。目前还只能对晶体颗粒尺寸的影响进行定性分析, 还需要对粘结剂与晶体颗粒间的相互作用进行更深入的研究, 定量地判断试样的断裂模式。

参考文献:

- [1] Siviour C R, Laity P R, Proud W G, et al. High strain rate properties of a polymer-bonded sugar: Their dependence on applied and internal constraints[J]. Proceedings of the Royal Society: A, 2008, 464(2093): 1229-1255.
- [2] Johnson H D. Mechanical properties of high explosives[R]. MHSMP-74-19, 1974.
- [3] Palmer S J P, Field J E, Huntley J M. Deformation, strength and strains to failure of polymer bonded explosives [J]. Proceedings of the Royal Society of London: A, 1993, 440(1909): 339-419.
- [4] 陈鹏万. 高聚物粘结炸药的细观结构及力学性能[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2001.
- [5] Skidmore C B, Phillips D S, Howe P M, et al. The evolution of microstructural changes in pressed HMX explosives[C]// Eleventh International Detonation Symposium. Colorado, 1998: 556-564.
- [6] Jae P J, Palmer S J P, Goldrein H T, et al. Quasi-static studies of the deformation and failure of PBX 9501[J].

Proceedings of the Royal Society of London: A, 2002,458(2025):2227-2242.

- [7] Awaji H, Sato S. Diametral compressive testing method[J]. Journal of Engineering Material Technology, 1979, 101(2):139-147.
- [8] CHEN Peng-wan, XIE Hui-min, HUANG Feng-lei, et al. Deformation and failure of polymer bonded explosives under diametric compression test[J]. Polymer Testing, 2006,25(3):333-341.
- [9] Tan H, Liu C, Huang Y, et al. The cohesive law for the particle/matrix interface in high explosives[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005,53(8):1892-1917.
- [10] Palmer S J P, Field J E. The deformation and fracture of β -HMX[J]. Proceeding of the Royal Society of London: A, 1982,383(1785):399-407.
- [11] Nicholson D W. On the detachment of a rigid inclusion from an elastic matrix[J]. Journal of Adhesion, 1979,10(3):255-260.
- [12] Rivera T, Matuszak M L. Surface properties of potential plastic-bonded explosives(PBX)[J]. Journal of Colloid Interface Science, 1983,39(1):105-108.
- [13] 朱伟. HMX、TATB基高聚物粘结炸药(PBX)力学性能的 MD 模拟研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.
- [14] 周红萍,庞海燕,温茂萍,等. 3种粘结剂材料的力学性能对比研究[J]. 材料导报,2009,23(12):34-36.
ZHOU Hong-pin, PANG Hai-yan, WEN Mao-ping, et al. Comparative studies on the mechanical properties of three kinds of binders[J]. Materials Review, 2009,23(12):34-36.

Fracture damage analysis of PBX*

LI Jun-ling^{1,2}, FU Hua¹, TAN duo-wang¹, LU Fang-yun²

(1. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;
2. Institute of Engineering and Physics, Science College, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: The quasi-static Brazilian test was performed on the MTS machine to investigate the tensile fracture modes of the PBX specimen. An optical preparation technique for the PBX specimen was developed to obtain more vivid microstructure features under optical microscopes. And the deformation and damage evolutions of the specimen were gained by adopting a high-speed camera and the digital image correlation method. Results show that the tensile strength of the PBX is less than 3 MPa and its failure strain is considerably small. Based on the observed results, the tensile fracture modes of the PBX explosive specimen were analyzed by applying the Griffith fracture criterion and the interface debonding theory. Analysis reveals that the interface debonding crack will initiate in the early stage of load and the transgranular fracture leads to the failure of the specimen. Larger crystals are prone to crack through themselves, and smaller ones can keep themselves from transgranular cleavage fracture but only debond from the binders.

Key words: solid mechanics; PBX; Brazilian test; micro-damage of fracture; digital correlation technique

* Received 13 October 2010; Revised 10 May 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10672177,10872215,10902100);
the National Basic Research Program of China (973 Program) (61383)

Corresponding author: LI Jun-ling, jl_lee@nudt.edu.cn