

文章编号: 1006-9941(2015)04-0356-06

## 压缩剪切作用下 PBX 的响应特性

代晓淦<sup>1,2</sup>, 王娟<sup>1</sup>, 黄谦<sup>1</sup>, 申春迎<sup>1</sup>, 黄风雷<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究高聚物粘结炸药(PBX)在压缩剪切作用下的响应特性,采用设计的压缩剪切试验装置,对  $\Phi 20\text{ mm}\times 40\text{ mm}$  的 PBX-932 和 PBX-C43 在  $22\sim 57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  撞击速度范围内进行了响应试验。试验中采用压力计测试了压力变化过程,通过高速录像照片分析了撞击过程,采用冲击波超压传感器测量了炸药的反应超压,分析了两种炸药的响应特性。结果表明,随着撞击速度增加,两种 PBX 炸药的损伤度增加。在压力  $160\sim 400\text{ MPa}$ ,脉宽  $1.5\text{ ms}$  的压缩剪切作用下,PBX-C43 和 PBX-932 的撞击速度阈值分别为  $25.5\sim 27.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $22.7\sim 24.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。两种炸药的反应程度基本一致。

**关键词:** 压缩剪切试验; 响应特性; 高聚物粘结炸药(PBX)

**中图分类号:** TQ560; O389

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.009

### 1 引言

目前,侵彻弹药是打击加固和地下深埋目标的有效手段之一。近年来,对攻击地面加固目标、地下设施等硬目标的侵彻装药要求日益提高,其安全性模拟研究显得尤为重要。在武器侵彻过程中,炸药的作用环境十分复杂,受到压缩、剪切、摩擦等综合作用,长脉冲载荷是显著特征,其经受的冲击过载持续时间达到毫秒量级以上、炸药内部的应力波峰值可达几百兆帕<sup>[1]</sup>,已建立的如撞击、摩擦、静电、热等标准试验方法<sup>[2-4]</sup>,均难以有效地模拟表征武器侵彻过程中炸药受到的复合作用特点。

针对撞击(即压缩作用)、剪切等刺激作用的不同特点,国内先后建立了模拟撞击药片的落锤撞击试验<sup>[5]</sup>、剪切试验<sup>[6]</sup>,以及针对炸药柱撞击的 Steven 试验<sup>[7]</sup>、模拟跌落试验<sup>[8]</sup>。陈鹏万等<sup>[9]</sup>采用低速气炮进行撞击加载,以模拟撞击压缩状态下低强度长脉冲载荷的作用,压力峰值约  $600\text{ MPa}$ ,脉宽约  $1.5\text{ ms}$ 。针对二者的复合作用,国外 Chabin 等人<sup>[1,10]</sup>研究了炸药受到压剪程度与炸药对应的反应程度间的关系,对几种炸药(B2211D, PBXN109, B2238)进行了不同程度

的试验,结果表明大部分样品受到压缩剪切作用,持续时间  $1\sim 2\text{ ms}$ ,压力峰值约  $500\text{ MPa}$ ,部分样品可观测到局部的化学反应。国内主要采用 Hopkinson 压杆<sup>[11]</sup>加载实现压缩剪切的复合作用,以获得炸药材料的力学性能,但难以观测炸药点火以及后续的反应程度。为分析侵彻过程中炸药的安定性问题,掌握炸药的压缩剪切作用响应特性就非常必要。

本研究主要通过压缩剪切作用试验,研究了两种 PBX(PBX-932 和 PBX-C43)在压缩剪切作用下的响应特性,分析了炸药压剪变形程度与受力以及反应程度的关系。

### 2 试验

#### 2.1 材料

PBX-932 和 PBX-C43 药柱(两种炸药配方基本相近),尺寸均为  $\Phi 20\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ ,密度分别约  $1.76\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  和  $1.80\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,样品质量分别为  $22.1\text{ g}$  和  $22.6\text{ g}$ ,中国工程物理研究院化工材料研究所提供。

**主要测试:** 采用 MEMRECAM GX-1 高速录像机,拍摄撞击过程,测试撞击速度,观测炸药点火反应情况;用冲击波超压测试系统(冲击波超压传感器、YE6600 电荷放大器以及泰克示波器)测量炸药反应超压;通过压电式压力传感器,测试压缩剪切试验过程中压力变化情况。

#### 2.2 压缩剪切试验装置与试验原理

参考 Chabin 等<sup>[10]</sup>建立的试验方法,设计了压缩

收稿日期: 2013-11-20; 修回日期: 2014-08-11

作者简介: 代晓淦(1978-),男,副研究员,主要从事炸药安全性研究。  
e-mail: saftyicm@163.com

通信联系人: 黄谦(1973-),男,副研究员,主要从事炸药安全性研究。  
e-mail: HQ2000@163.com

剪切试验,其装置示意图如图 1 所示。压缩剪切试验装置主要由活塞、钢制外壳、聚四氟乙烯套、底座等组成。利用文献[12]建立的发射装置(火药加速方式,通过调节火药的药量来控制射弹撞击速度)对射弹进行加载,其实物装配如图 2 所示。

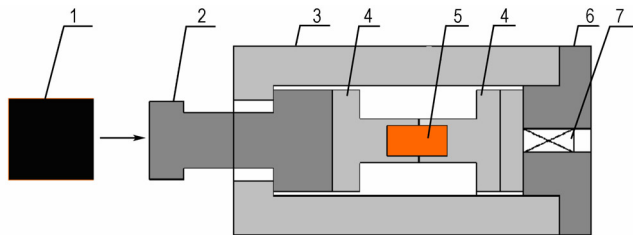


图 1 压缩剪切试验示意图

1—射弹, 2—活塞, 3—钢制外壳, 4—聚四氟乙烯套, 5—炸药, 6—底座, 7—压力传感器

Fig.1 Configuration of compression and shear test

1—projectile, 2—piston, 3—steel shell, 4—teflon cover, 5—explosive, 6—pedestal, 7—pressure gauge

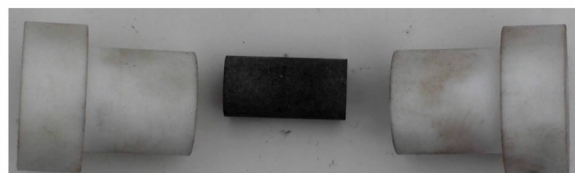


图 2 压缩剪切试验实物装配照片

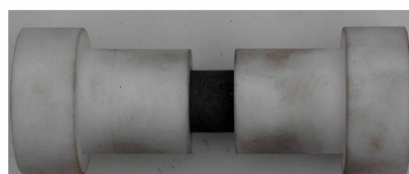
Fig.2 Assembly photograph of compression/shear test apparatus

将  $\Phi 20\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  炸药柱放进 7 mm 壁厚的聚四氟乙烯 (PTFE) “哑铃”状圆筒中(如图 3 所示),聚四氟乙烯套能传递射弹撞击的压力,还可以消除与炸药的摩擦,其外侧留有空隙。活塞受到射弹撞击,压缩

含有炸药柱的聚四氟乙烯套,在空隙存在前主要体现压缩过程,随后聚四氟乙烯套外侧接触钢制外壳,径向变形受到限制,炸药内产生压缩剪切综合作用,用底部的压力传感器可以测试压力变化过程,研究变形与压力的关系。观察回收样品的变形程度、反应状况,分析不同撞击速度等压缩剪切作用下炸药的反应情况。



a. before assembling



b. assembling

图 3 压缩剪切试验中样品装配照片

Fig.3 Assembly photograph for explosive sample in compression and shear test

### 3 结果与讨论

#### 3.1 撞击点火反应结果

参照 GJB772A-1997 中苏珊撞击试验方法<sup>[2]</sup>,研究不同撞击速度下炸药的响应,获得炸药的撞击速度阈值。压缩剪切试验主要在  $22 \sim 57\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  撞击速度范围内研究了 PBX 的点火响应特性。图 4 为 PBX-932 的典型高速录象照片(速度为  $28.7\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。由图 4 可见,在压缩剪切试验中,对于  $\Phi 20\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  的 PBX-932,在  $28.7\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  压缩速度下, PBX-932 炸药未发生点火反应,活塞被反弹。

图 5 为压缩剪切试验中回收的炸药样品照片。从图 5 中可以看出,在  $22.7\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时 PBX-932 炸药未



图 4 PBX-932 炸药压缩剪切试验典型高速录象照片 ( $28.7\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.4 Photographs of PBX-932 explosive in compression and shear test at  $28.7\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

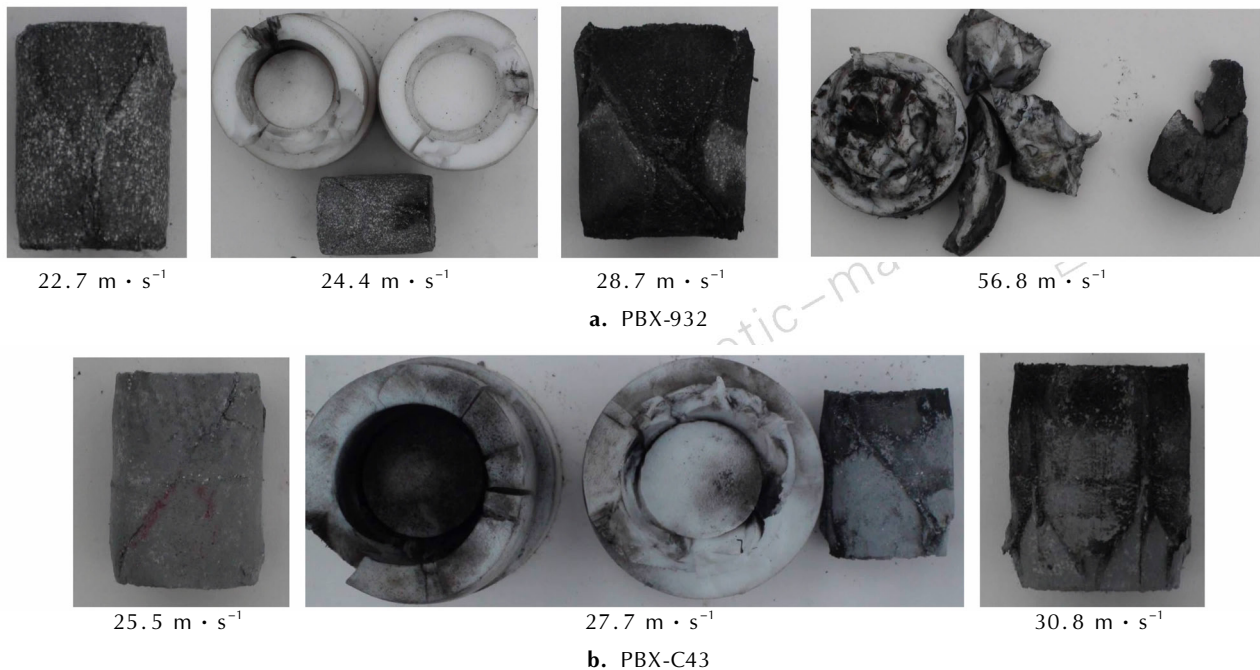


图5 压缩剪切试验中回收的炸药样品

Fig.5 Recovery sample after compression and shear test

有反应迹象,有明显的压缩、剪切现象;在 24.4, 28.7  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, PBX-932 炸药完整, 表面有发黑的反应痕迹, 表明炸药发生了分解, 但反应并未增长; 在 56.8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 聚四氟乙烯套裂成几块, 剩余有大块的 PBX-932 炸药, 表明此时炸药发生了分解以上等级的反应。对于 PBX-C43 炸药, 在 25.5  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 炸药外形完好, 有明显的压缩、剪切现象; 在 27.7, 30.8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 长径比明显变化, 炸药表面发黑, 即仅发生分解反应。结果表明, 设计的压缩剪切试验装置使炸药受到了明显的压缩剪切作用。

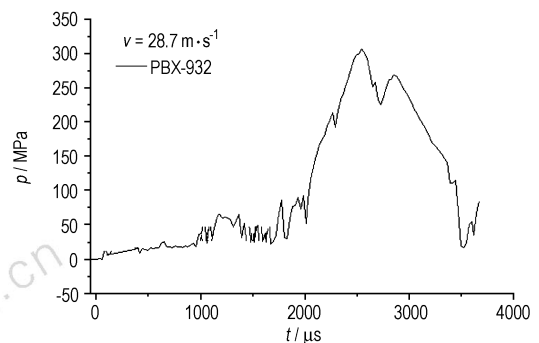
### 3.2 受力过程

依据压电式压力传感器测试技术, 获得了完整的撞击压力变化过程信息, 图 6 给出了 PBX-932 典型的压力-时间变化曲线, 表 1 详细地给出了两种炸药压缩剪切试验结果, 主要包括不同速度撞击下对应的压力数据、作用时间以及反应程度等。

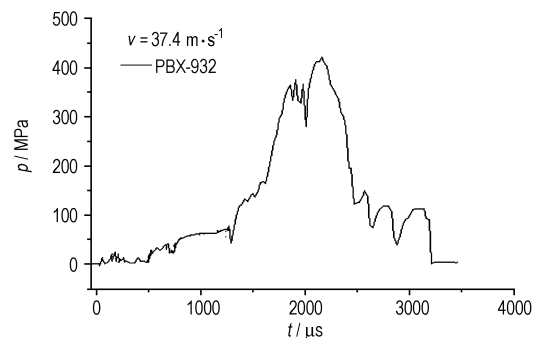
由图 6 可见, 在速度 28.7  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 测试的最大压力约 300 MPa, 随后压力逐渐降低, 压力持续作用时间约 1.5 ms; 在速度 37.4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 测试的最大压力约 400 MPa, 随后压力逐渐降低, 压力持续作用时间约 1.5 ms, 压力信号表明在速度 28.7  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  和 37.4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  下 PBX-932 炸药未发生剧烈反应。

从表 1 可以看出, 在压缩剪切试验中, PBX-932 炸药在撞击速度为 22.7  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时未发生反应; 在撞击

速度分别为 24.4, 28.7, 37.4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 未测出超压, 结合试验回收的样品照片, 表明此时 PBX-932 炸



a.  $v = 28.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



b.  $v = 37.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

图6 压缩剪切试验中测试的 PBX-932 典型压力-时间变化曲线  
Fig.6 Typical curves of pressure vs time in compression and shear test for PBX-932

表 1 两种炸药在不同撞击速度下的压缩剪切试验结果

Table 1 Results of compression and shear test for two explosive under different impacting velocity

sample	velocity /m · s <sup>-1</sup>	pressure peak value /MPa	pulse extent /ms	test phenomenon	overpressure /kPa	reaction degree
PBX-932	22.7	-	-	no ignition	no overpressure	no reaction
	24.4	180	1.5	no ignition		decomposition
	28.7	300	1.5	no ignition		decomposition
	37.4	400	1.5	no ignition		decomposition
	56.8	-	-	ignition	6.9	deflagration
PBX-C43	21.7	160	1.5	no ignition	no overpressure	no reaction
	25.5	190	1.5			no reaction
	27.7	-	-			decomposition
	30.8	300	1.5			decomposition

药均发生了分解反应;而在撞击速度 56.8 m · s<sup>-1</sup>时,测得超压值为 6.9 kPa,结合试验回收的样品照片,表明 PBX-932 炸药发生了爆燃反应,因此在压缩剪切试验中 PBX-932 炸药发生反应的撞击速度阈值为 22.7 ~ 24.4 m · s<sup>-1</sup>。PBX-C43 炸药在撞击速度分别为 21.7, 25.5 m · s<sup>-1</sup>时均未发生反应,在撞击速度分别为 27.7, 30.8 m · s<sup>-1</sup>时,未测有超压,结合试验回收的样品照片,表明均发生了分解反应,因此在压缩剪切试验中 PBX-C43 炸药发生反应的撞击速度阈值为 25.5 ~ 27.7 m · s<sup>-1</sup>。因而,PBX-C43 炸药发生反应的撞击速度阈值略高于 PBX-932 炸药,两种炸药的反应程度基本一致。

3.3 压缩变形量

回收撞击试验后的 PBX-932 和 PBX-C43 炸药,测量每一发回收样品的厚度变化,确定不同撞击速度下两种炸药对应的压缩变形量(ΔL/L,L 为炸药初始厚度,mm)。图 7 为两种炸药压缩变形量-速度测试结果,对于 PBX-932 和 PBX-C43 炸药,随着速度增加,压缩变形量也随之增加,在约 37 m · s<sup>-1</sup>速度压缩下,PBX-C43 炸药的压缩量约 20%。在速度 22 ~ 26 m · s<sup>-1</sup>,两种炸药的压缩变形量基本一致;当速度高于 26 m · s<sup>-1</sup>

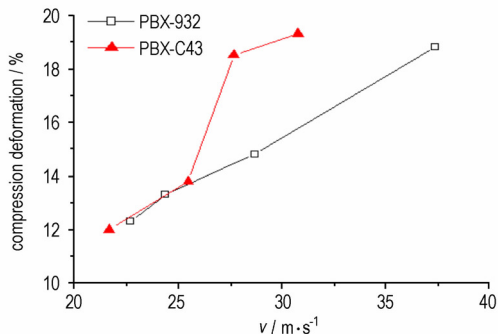


图 7 两种炸药的压缩变形量-速度曲线

Fig.7 Curves of compression deformation vs velocity for two explosive

时,相同速度下 PBX-C43 炸药压缩变形量高于 PBX-932 炸药。

图 8 为压缩剪切试验中测试的压力-压缩变形量结果,相同压缩变形量下,PBX-C43 炸药对应的压力低于 PBX-932 炸药,因此,PBX-932 比 PBX-C43 更易于反应。

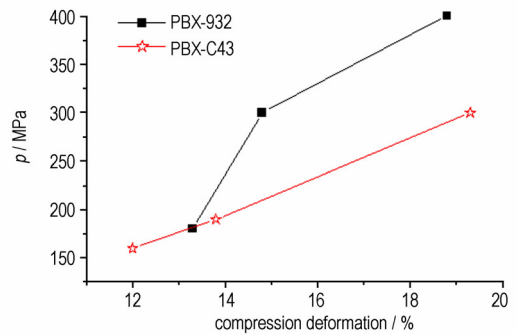


图 8 压缩剪切试验中测试的压力-压缩变形量曲线

Fig.8 Curves of pressure vs compression deformation obtained in compression and shear test

3.4 损伤结果

对于含能材料在刺激作用下的损伤破坏,从力学的观点看,是材料结构组织发生的力学性能劣化并导致体积单元破坏的现象;从细观的、物理的观点来看,是材料组分晶粒的位错、滑移、(微)孔洞、微裂隙等微缺陷形成和发展的结果;从宏观的、连续介质力学的观点来看,又可认为是材料内部微细结构状态的一种不可逆的耗能的演变过程<sup>[8]</sup>。因此,认识损伤过程对含能材料力-热-化学反应过程至关重要。目前,通常使用损伤度来表征材料的损伤程度,以此分析材料的损伤演化过程。本研究采用排水法,对每一发撞击试验回收的 PBX-932 样品进行密度测量,以密度变化来表征炸药的损伤度,关系见式(1)<sup>[13]</sup>:

$$D = 1 - \rho/\rho_0 \quad (1)$$

式中,  $D$  表示材料的损伤度;  $\rho$  为材料损伤后的密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\rho_0$  为材料初始密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

图 9 是压缩剪切试验中 PBX-932 炸药损伤度-速度关系。对于  $\phi 20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  的 PBX-932, 随着速度增加, 损伤度随之增加, 在  $22.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度下, PBX-932 炸药的损伤度达到了约 22%, 此时炸药无反应; 在  $37.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度下, 损伤度达到了约 25%, PBX-932 炸药仅发生分解反应; 在  $56.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度下, PBX-932 炸药的损伤度达到了约 32%, 炸药发生了爆燃反应。这一结果与图 5 反映的结果一致。

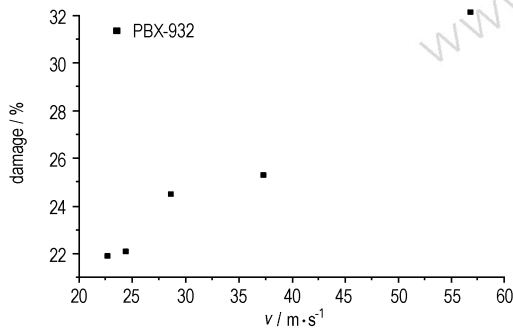


图 9 压缩剪切试验中 PBX-932 炸药损伤度-速度曲线

Fig. 9 Curves of damage vs velocity for PBX-932 in compression and shear test

#### 4 小 结

采用设计的压缩剪切试验装置研究了 PBX-932 和 PBX-C43 两种炸药的响应特性, PBX-932 发生反应的撞击速度阈值为  $22.7 \sim 24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , PBX-C43 的撞击速度阈值为  $25.5 \sim 27.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 略高于 PBX-932 炸药, 两种炸药的反应程度基本一致。

在压缩剪切试验中, 在  $30.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时 PBX-C43 压缩变形量约 19%。在速度  $22.7 \sim 56.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , PBX-932 损伤度在 22% ~ 32% 间变化, 随着速度增加, 压缩变形量也随之增加, 损伤度增加, 在约  $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度压缩下, 炸药的压缩量约 19%, 损伤度达到 25%, 发生了分解反应。

设计的压缩剪切试验装置实现了压缩剪切作用下压力  $160 \sim 400 \text{ MPa}$ , 脉宽  $1.5 \text{ ms}$  的载荷特点, 能用于炸药压缩剪切安全性研究。

#### 参考文献:

[1] Chabin P, Brunet P, Lecume S. A combined experimental/numerical methodology to assess the sensitivity of PBX's[C]//12th International Symposium on Detonation. San Diego, California, 2002.

- [2] GJB772A-1997. Explosive test method[S]. National Defense Technology and Industry Committee, 1997.  
GJB772A-1997. 炸药试验方法[S]. 国防科学技术工业委员会, 1997.
- [3] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 104-116.  
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Handbook of properties of explosive and simulates[M]. Beijing: Science Press, 1989: 104-116.
- [4] 代晓淦, 韩敦信, 向永. 苏珊试验中弹体形变的测量和模拟计算[J]. 含能材料, 2004(增刊): 235-238.  
DAI Xiao-gan, HAN Dun-xin, XIANG Yong. The measurement and numerical simulation of projectile derormation in Susan test[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2004(Suppl.): 235-238.
- [5] 代晓淦, 向永, 申春迎, 等. 大药片落锤撞击感度研究和数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 34-36.  
DAI Xiao-gan, XIANG Yong, SHEN Chun-ying, et al. Study of drop hammer impact sensitivity for big-bill explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 34-36.
- [6] 代晓淦, 王娟, 黄谦, 等. 药片剪切试验中 PBX-2 炸药的响应特性[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 791-794.  
DAI Xiao-gan, WANG Juan, HUANG Qian, et al. Response character for PBX-2 explosive in shear test. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 791-794.
- [7] 代晓淦, 向永. 两种塑料粘结炸药的 Steven 试验及撞击感度研究[J]. 含能材料, 2006, 14(1): 10-13.  
DAI Xiao-gan, XIANG Yong. Study of Steven test and impact sensitivity for two explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(1): 10-13.
- [8] 代晓淦, 申春迎, 文玉史. 模拟跌落撞击下 PBX-2 炸药响应规律研究[J]. 含能材料, 2011, 19(2): 209-212.  
DAI Xiao-gan, SHEN Chun-ying, WEN Yu-shi. Reaction of PBX-2 explosive under simulated drop impact[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 209-212.
- [9] 陈鹏万, 黄风雷. 含能材料损伤理论及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 44-46.  
CHEN Peng-wan, HUANG Feng-lei. Damage theory and application of energetic materials [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 44-46.
- [10] Luceme S, Lefrancois A, Chabin P. Structural and chemical changes in PBX induced by rapid shear followed by compression [C]//12th International Symposium on Detonation, San Diego, California, 2002.
- [11] 胡时胜. Hopkinson 压杆实验技术的应用进展[J]. 实验力学, 2005, 20(4): 589-593.  
HU Shi-sheng. The application development of experimental technique of Hopkinson pressure bar[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(4): 589-593.
- [12] 申春迎, 向永, 代晓淦. 高聚物黏结炸药的冲塞试验研究[J]. 火炸药学报, 2010, 33(2): 29-32  
SHEN Chun-ying, XIANG Yong, DAI Xiao-gan. Study on the spigot tests of polymer bonded explosives [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2010, 33(2): 29-32.
- [13] 罗景润, 李大红, 张寿齐, 等. 简单拉伸下高聚物粘结炸药的损伤测量及损伤演化研究[J]. 高压物理学报, 2000, 14(3): 203-208.  
LUO Jing-run, LI Da-hong, ZHANG Shou-qi, et al. Damage evolution of PBX under simple tension[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 14(3): 203-208.

## Response Characteristics of Polymer Bonded Explosive in Compression and Shear Test

DAI Xiao-gan<sup>1,2</sup>, WANG Juan<sup>2</sup>, HUANG Qian<sup>2</sup>, SHEN Chun-ying<sup>2</sup>, HUANG Feng-lei<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. School of Mechano-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To study the response characteristics of polymer bonded explosive (PBX) under the effect of compression and shear, the response test for PBX-932 and PBX-C43 with same dimension of  $\phi 20$  mm $\times$ 40 mm in the impact velocity of 22–57 m $\cdot$ s<sup>-1</sup> were performed by a designed compression / shear test device. The pressure change process in the experiments was measured by pressure gauges. The impact process was analyzed by high-speed motion pictures. The reaction overpressure of explosive was measured by shock wave overpressure sensor. The response characteristics for two explosive were analyzed. Results show that the damage of PBX increases with impact velocity rising. The impact velocity threshold of PBX-C43 and PBX-932 under the action of pressure range of 160–400 MPa and pulse width of 1.5 ms is 25.5–27.7 m $\cdot$ s<sup>-1</sup> and 22.7–24.4 m $\cdot$ s<sup>-1</sup>, respectively. The reaction degree for two explosive is basically identical.

**Key words:** compression and shear; reaction response; polymer bonded explosive (PBX)

**CLC number:** TJ55; TQ560; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.009



### 《含能材料》高品质炸药晶体研究专栏征稿

高品质炸药晶体的出现为钝感弹药的研究与应用开辟了一条重要途径,高品质炸药晶体因而也成为目前国内外含能材料研究领域的热点之一。为促进高品质炸药晶体的研究和应用,《含能材料》将于2015年开设高品质炸药晶体研究专栏,专题报道高品质炸药晶体的制备、表征、性能、应用等领域的最新研究成果,促进学者间的交流。欢迎相关研究学者投稿。来稿建议为英文。来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部