

文章编号: 1006-9941 (2013)06-0791-04

## 药片剪切试验中 PBX-2 炸药的响应特性

代晓淦<sup>1,2</sup>, 王娟<sup>2</sup>, 黄谦<sup>2</sup>, 黄风雷<sup>1</sup>, 向永<sup>2</sup>, 郑雪<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元计算程序模拟设计了药片剪切试验装置, 研究了  $\Phi 20$  mm  $\times$  5 mm 和  $\Phi 20$  mm  $\times$  9 mm 两种厚度的 PBX-2 药片在剪切试验中的响应特性。采用锰铜压力计测试样品中压力的变化过程, 通过高速录像照片分析了撞击点火反应过程, 用冲击波超压传感器测量了炸药的反应超压, 综合分析了 PBX-2 炸药在药片剪切试验中的响应规律。结果初步表明, 药片剪切试验中 PBX-2 炸药厚度由 5 mm 变化至 9 mm, 其反应落高阈值由 3.5 ~ 3.7 m 降低为 3.0 ~ 3.1 m, 即随着该炸药厚度增加, 其反应落高阈值略有降低。

**关键词:** 爆炸力学; 剪切试验; 响应特性; 落高阈值; 数值计算; PBX-2 炸药

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.020

### 1 引言

炸药的安全性能是保证炸药研究、生产、运输、使用和储存安全的重要特性。针对不同的刺激作用方式, 如撞击、摩擦、静电、热等, 国内外分别建立了相应的试验表征方法, 包括撞击感度实验、苏珊试验、摩擦感度实验、静电感度实验、烤燃试验等<sup>[1-2]</sup>。

目前, 对剪切作用下炸药的安全性研究, 多在百克量级, 方法采用模拟破片撞击试验<sup>[3]</sup>、不同弹形的 Steven 试验<sup>[4]</sup> 以及模拟跌落试验<sup>[5]</sup>。模拟强剪切作用, 炸药质量分别为 180 g<sup>[3-4]</sup> 和 540 g<sup>[5]</sup>。Spigot 跌落试验<sup>[6]</sup>, 模拟撞击剪切作用, 炸药质量达到 3 kg。虽然这些试验方法均能从一定程度上表征炸药在剪切作用下的响应, 药量大, 成本高。因此, 研究能简单有效反映炸药剪切作用安全性的试验方法, 实现克量级炸药剪切作用安全性的模拟, 掌握炸药的剪切作用响应特性非常必要。

本课题组采用计算与试验结合的方式设计了药片剪切试验方法, 进行小药量炸药在剪切作用下的安全性评价, 测试了两种厚度 PBX-2 炸药在剪切作用下的反应落高阈值, 分析其响应特性。

### 2 试验部分

#### 2.1 试验原理

药片剪切试验示意图见图 1。采用落锤撞击加载

方式<sup>[7]</sup> 对药片剪切试验装置进行加载, 落锤质量 20 kg, 最大跌落落高为 12 m。试验过程中, 将药片安装在剪切试验装置内, 通过 M5 螺钉将剪切试验装置与落锤连接, 落锤用钢丝绳吊装在释放装置上, 将落锤及释放装置一同提升到预定高度, 然后释放落锤, 锤体下落与地面钢靶相撞, 药片受到剪切作用, 可能发生燃烧、爆燃、爆炸等不同程度的反应, 通过高速录像、冲击波超压测量以及回收的样品残骸, 综合判断药片是否发生反应, 分析其响应特性。

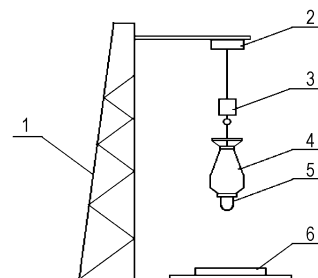


图 1 药片剪切试验示意图

1—支架, 2—电动葫芦, 3—释放装置, 4—落锤, 5—药片剪切试验装置, 6—钢靶

Fig. 1 Principle picture of shear test

1—bracket, 2—electrical hoist, 3—release device, 4—drop hammer, 5—shear set for explosive tablet, 6—steel target

#### 2.2 试验设计

药片剪切试验装置示意图见图 2, 主要由钢柱、惰性环、药片、击柱等组成, 图中 A 点为击柱与垫片接触面的中点 (即上底部), 研究中压力测试、计算与分析等结果主要位于该点。

收稿日期: 2013-03-26; 修回日期: 2013-09-01

作者简介: 代晓淦 (1978 -), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事炸药安全性研究。e-mail: zhangy2005767@sina.com

采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元计算程序,对落锤加载的药片剪切试验装置进行了数值计算,建立了二维轴对称的药片剪切作用计算模型(见图3)。为了计算获得不同厚度 PBX-2 炸药的撞击剪切响应特性,模型中采用的 PBX-2 药片尺寸分别为  $\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  和  $\Phi 20\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ ,通过弹塑性模型<sup>[8]</sup>计算分析了药片剪切试验装置中 A 点以及药片的受力特点。

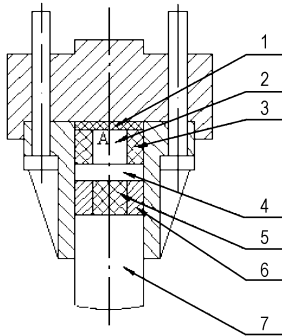


图2 药片剪切试验装置示意图

1—垫片, 2—钢柱, 3—惰性环, 4—药片, 5—惰性柱, 6—钢环, 7—击柱

Fig.2 Configuration of shear set for explosive bill

1—gasket, 2—steel pole, 3—inert ring, 4—explosive tablet, 5—inert pole, 6—steel ring, 7—hit pole

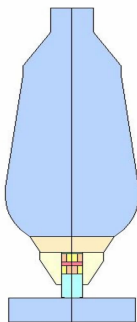


图3 药片剪切作用计算模型

Fig.3 Simulation model of shear set for explosive bill

装置中 A 点以及药片的受力时程曲线计算结果见图4。从图4中可以看出,在2 m 落高撞击下,装置中上底部的压力明显高于炸药处受力;在  $\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  样品中 PBX-2 药片受力峰值约为 0.55 GPa,压力脉宽约 1.2 ms;  $\Phi 20\text{ mm} \times 9\text{ mm}$  样品中药片受力峰值约为 0.58 GPa,压力脉宽约 1.4 ms。计算结果初步表明,在设计药片剪切试验装置中,相同直径下随着 PBX-2 药片厚度的增加,压力峰值与脉宽均略有增加。

装置中 5 mm 厚药片内部的剪切应力云图计算结果见图5,可见在药片内部形成了明显的剪切带,且药片有明显的剪切变形,表明药片在设计装置中受到了明显的剪切作用。

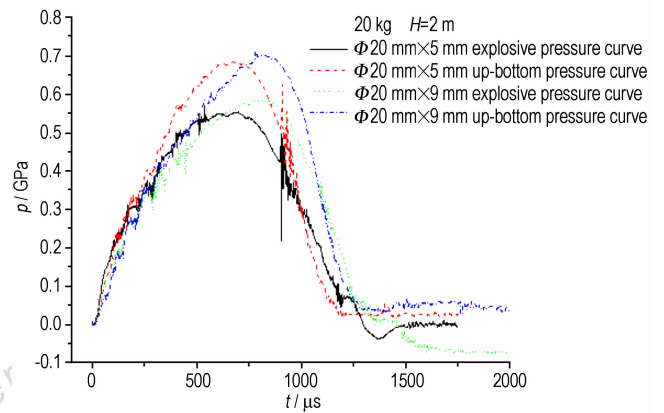


图4 药片剪切作用下受力时程曲线计算结果

Fig.4 Curves of pressure versus time simulated in shear test

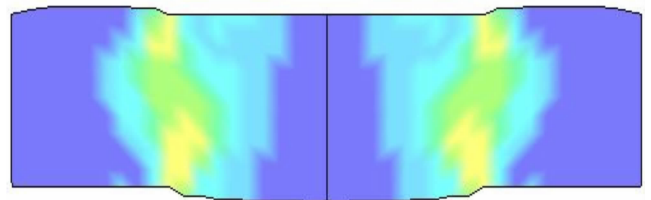


图5 5 mm 厚药片内部剪切应力云图计算结果

Fig.5 Shear stress for the thickness of 5 mm explosive simulated in shear test

## 2.3 试验测试

采用机加方式将 PBX-2 炸药加工为  $\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  和  $\Phi 20\text{ mm} \times 9\text{ mm}$  药片,样品质量分别为 2.9 g 和 5.3 g,密度约  $1.85\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

试验过程中采用 MEMRECAM GX-1 高速录像机,观测炸药点火反应情况;在距离撞击点 1 m 位置处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组成)测量炸药反应超压;采用  $50\Omega$  双螺旋型薄膜式锰铜压力计测量药片剪切试验装置中 A 点(即上底部)的受力过程。

## 3 结果与分析

### 3.1 撞击过程

图6是  $\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  PBX-2 药片于 2.5 m 和 5 m 落高撞靶的高速录像照片。从图6可见,2.5 m 落高跌落撞击后出现反弹,未发现点火出光现象;在 5 m 落高撞击下,药片出现明显点火现象,表明 PBX-2 药片发生了反应。

图7是药片剪切试验中回收的 PBX-2 样品照片,3.2 m 落高的剪切试验中 PBX-2 药片仅破裂成几块,药片表面形成了环形剪切带,与图5中的计算结果一致,说明药片剪切试验装置使炸药受到了剪切作用。

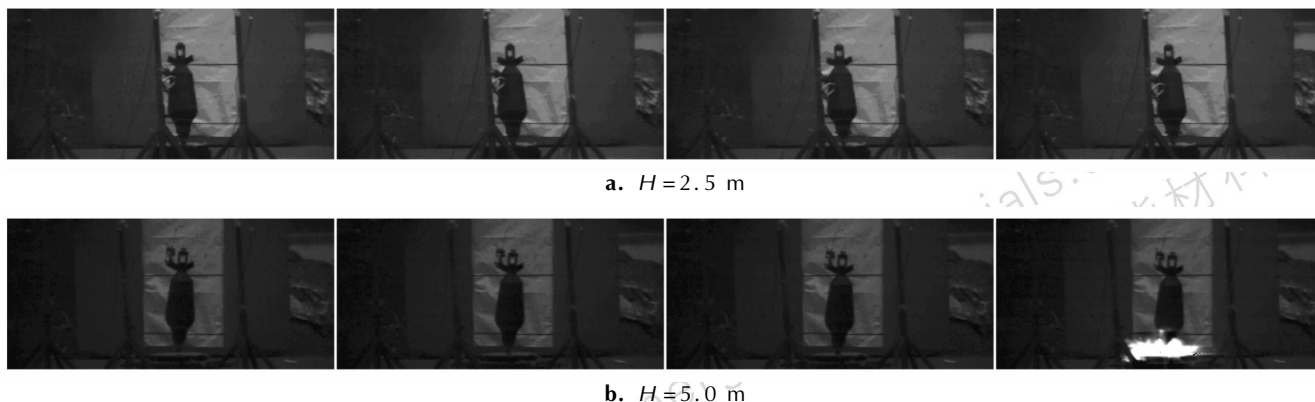


图 6  $\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  PBX-2 药片剪切试验高速录像照片  
Fig.6 Recording pictures of  $\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  PBX-2 explosive in shear test



图 7 药片剪切试验中回收的 PBX-2 样品照片  
Fig.7 Photographs of recovered sample for PBX-2 explosive in shear test

### 3.2 受力过程

图 8 是药片剪切试验中  $\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  PBX-2 样品的受力时程曲线。图 8a 为在 3.2 m 落高下 A 点 (上底部) 受力的计算与试验对比结果,从图 8a 中可以看出,计算结果与试验结果符合较好,压力峰值约 0.80 GPa,随后逐渐降低,压力作用时间达到约 1.4 ms,表明此时药片未发生反应;图 8b 为在 3.7 m 落高下 A 点受力的试验测试结果,压力峰值约 0.87 GPa,随后压力发生跳变,表明药片发生了反应。

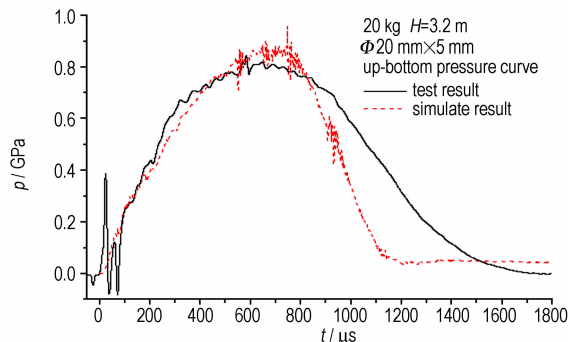
### 3.3 药片厚度对响应结果的影响

图 9 为药片剪切试验中两种厚度 PBX-2 药片超压与落高曲线。从图 9 可见,两种厚度下 PBX-2 药片反应超压未有明显差别;PBX-2 药片厚度对剪切作用下反应落高阈值略有影响,对于 5 mm 厚 PBX-2 药片,其剪切作用反应落高阈值为 3.5 ~ 3.7 m,对于 9 mm 厚 PBX-2 药片,其剪切作用反应落高阈值为 3.0 ~ 3.1 m。由此可初步推断,相同直径下,随着厚度的增加,PBX-2 炸药剪切反应落高阈值略有降低。

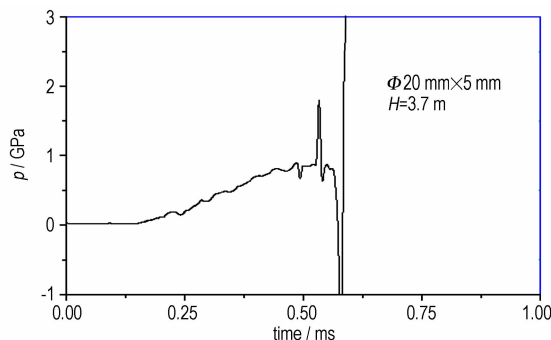
为了获得撞击作用下剪切力变化与药片厚度的关系,采用材料力学理论进行了分析。材料受到的撞击正压力可由式(1)进行估算<sup>[8]</sup>:

$$p \approx \frac{2\sigma_{\tau} r_2 l}{r_1^2} \approx \frac{\tau}{\pi r_1^2} \quad (1)$$

式中, $p$  为撞击过程药片受到的压力,Pa;  $\sigma_{\tau}$  为材料的剪切强度,Pa;  $r_2$  为受剪切面半径,m;  $l$  为药片厚度,mm;  $r_1$  为击柱接触面半径,m;  $\tau$  为剪切力,N。因此,由(1)式知撞击压力与剪切力  $\tau$  成正比。



a. 3.2 m



b. 3.7 m

图 8 药片剪切试验中  $\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  PBX-2 炸药受力时程曲线  
Fig.8 Curves of pressure versus time for  $\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  PBX-2 explosive in shear test

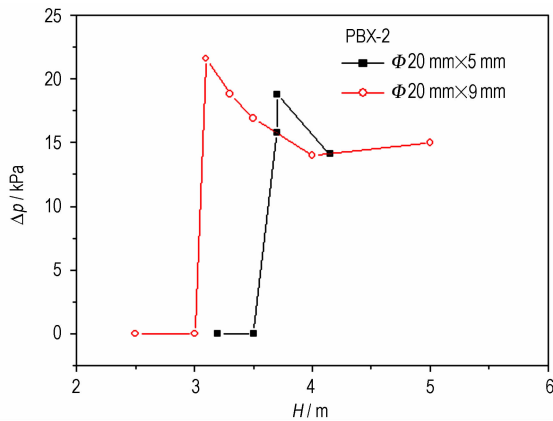


图9 两种厚度 PBX-2 药片超压-落高曲线

Fig.9 Curves of overpressure versus height for two thickness PBX-2

对于同一种材料,在单轴情况下,当材料直径不变,只考虑材料的厚度变化时,材料的剪切强度  $\sigma_{\tau}$  可认为近似不变,则材料受到的剪切力可由式(2)进行估算<sup>[8]</sup>:

$$\tau \approx \sigma_{\tau} \times 2\pi r_2 l \quad (2)$$

式中, $\tau$  为剪切力,N; $\sigma_{\tau}$  为材料的剪切强度,Pa; $r_2$  为受剪切面半径,m; $l$  为药片厚度,mm。

根据以上分析可知,当药片直径不变,厚度变化时,剪切力  $\tau$  随着药片厚度的增加而增加,即剪切力  $\tau$  与药片厚度  $l$  成正比,与图4的计算分析结果一致。

因此,对于  $\Phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  和  $\Phi 20 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$  的 PBX-2 药片,9 mm 厚样品受到的剪切力要大于 5 mm 厚样品。因此,在剪切作用下,相同直径条件,9 mm 厚样品剪切反应落高阈值要略低于 5 mm 厚样品。

## 4 结论

(1) 计算和试验结果均表明,设计的药片剪切试验装置中药片受到了明显的剪切作用,能有效地用于成型炸药剪切安全性研究。

(2) 理论分析表明,在设计的药片剪切作用装置中,相同直径下随着 PBX-2 药片厚度的增加,压力峰值略有增加。因此,通过落锤撞击加载方式,使炸药受剪切作用状态下,相同直径条件,随着厚度的增加,PBX-2 药片剪切反应落高阈值略有降低。

## 参考文献:

- [1] GJB772A-1997. Explosive test method[S]. National Defense Technology and Industry Committee,1997.
- [2] 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.
- [3] 代晓淦,文玉史,申春迎. 模拟破片撞击下 PBX-2 炸药响应规律研究[J]. 火炸药学报,2010,33(3):18-20. DAI Xiao-gan, WEN Yu-shi, SHEN Chun-ying. Response rule for PBX-2 explosive under simulated fragment impact[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*,2010,33(3):18-20.
- [4] 代晓淦,申春迎,文玉史,等. Steven 试验中不同形状弹头撞击下炸药响应规律研究[J]. 含能材料,2009,17(1):50-54. DAI Xiao-gan, SHEN Chun-ying, WEN Yu-shi, et al. Reaction rule for explosive under different shape warhead impact in steven test[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2009,17(1):50-54.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Hallquist J O. LS-DYNA Theoretical Manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation,1998.
- [9] 孙训方. 材料力学[M]. 北京:人民教育出版社,1983. SUN Xun-fang. Material Mechanics[M]. Beijing: People Education Press,1983.

## Response Character for PBX-2 Explosive in Shear Test

DAI Xai-gan<sup>1,2</sup>, WANG Juan<sup>2</sup>, HUANG Qian<sup>2</sup>, HUANG Feng-lei<sup>1</sup>, XIANG Yong<sup>2</sup>, ZHENG Xue<sup>2</sup>

(1. School of Mechano-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The shear device for explosive tablet was designed by ANSYS/LS-DYNA and the response character was studied using  $\Phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  and  $\Phi 20 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$  PBX-2. The pressure change was measured by Manganin pressure gauges. Ignition process was analyzed by high-speed motion pictures. The reaction overpressure of explosive was gained by blast pressure gauges. Results preliminary show that height threshold decreases from 3.5 ~ 3.7 m to 3.0 ~ 3.1 m with explosive thickness increasing. The height threshold decreases when increasing explosive thickness in shear test for explosive tablet.

**Key words:** explosion mechanics; shear test; character response; height threshold; numerical calculation; PBX-2 explosive

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.020