

文章编号:1006-9941(2009)01-0050-05

Steven 试验中不同形状弹头撞击下炸药响应规律研究

代晓淦, 申春迎, 文玉史, 向 永

(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 2 kg 小钝头弹丸、针状弹丸和平头弹丸分别对 PBX-2 炸药进行了 Steven 试验, 试验中采用锰铜压力计和聚偏二氟乙烯(PVDF)压电式压力传感器测试了样品中的压力变化过程, 通过高速录像照片分析了点火反应过程; 通过冲击波超压传感器测量了炸药的反应超压, 分析了 Steven 试验中不同形状弹头撞击的影响规律。结果初步表明, Steven 试验中由于平面撞击产生的强剪切带作用使得炸药反应更剧烈, 平头弹丸撞击时 PBX-2 炸药反应程度更高。

关键词:爆炸力学; Steven 试验; 炸药安全性; 撞击感度

中图分类号:TJ55; O389

文献标识码:A

1 引言

炸药的撞击感度是评价炸药安全性能的主要指标之一。为了获得撞击条件下更多的炸药反应历程信息, 使其测试结果便于数值模拟计算, 确定炸药的反应速率参数, 预估炸药在撞击情况下的安全性能, 1993 年 Chidester 等人^[1]初步研究了 Steven 试验方法, 并用于研究滞后爆轰转变(XDT)现象。随后 Chidester、Idar 等人^[2-4]采用 Steven 试验方法研究了 LX-04、PBX9404、PBX9501 等炸药样品的反应程度, 并进行了数值计算, 通过对比锰铜压力计、碳压力计和 PVDF 计等测得的压力曲线, 获得了炸药的反应速率方程参数。

国内采用钝头弹丸进行了 Steven 试验^[5-6], 采用锰铜压力计测试了炸药的受力变化过程, 初步研究了老化前后 PBX-2 炸药撞击感度变化。目前, 针对不同形状撞击刺激下炸药响应以及炸药在撞击作用下发生 XDT 现象的机制至今仍在研究之中^[7]。

为了研究低速撞击下炸药的响应以及评估不同形状弹丸撞击时的安全性能, 本工作研究了不同形状弹丸刺激下 PBX-2 炸药的响应规律。

2 Steven 试验装置及测试方法

Steven 试验样品盒试件结构示意图如图 1 所示, 由炸药试样、样品盒、盖板、聚四氟乙烯环、压力探针等组成, 在文献[5]的试验基础上增加了 PVDF 压力计测试。对 PBX-2 炸药进行试验, 炸药尺寸为

$\Phi 98 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$, 样品盒底厚度为 19 mm, 盖板厚度为 3.5 mm, 材料为 Q235 钢。

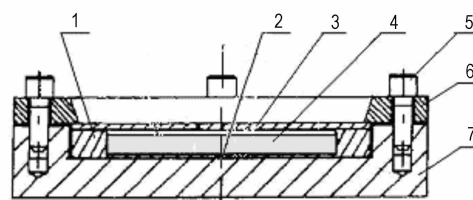


图 1 Steven 试验样品盒试件结构示意图

1—聚四氟乙烯环, 2—PVDF 计和锰铜压力计, 3—盖板, 4—炸药试样, 5—螺钉, 6—压环, 7—样品盒

Fig. 1 Diagram of Steven sample

1—Teflon ring, 2—PVDF and manganin pressure gauges, 3—cover plate, 4—sample, 5—bolts, 6—retaining ring, 7—steel backing plate

2 kg 试验弹结构示意图见图 2, 弹体材料为 2A12 铝, 弹头材料为 Q235 钢。图 3 为使用的几种不同形状弹头照片, 其中小钝头弹头直径为 $\Phi 30 \text{ mm}$, 小钝头部分长 40 mm; 针状弹头直径为 $\Phi 8 \text{ mm}$, 针状部分长 16 mm; 平头弹头直径为 $\Phi 62 \text{ mm}$ 。

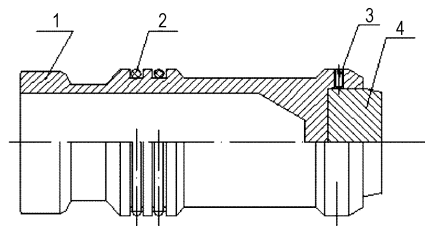


图 2 空气炮试验弹示意图

1—铝制弹体, 2—密封圈, 3—螺钉, 4—弹头

Fig. 2 Diagram of Steven test bomb

1—aluminum bomb body, 2—seal ring, 3—bolt, 4—warhead

收稿日期:2008-04-29; 修回日期:2008-11-03

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



图 3 Steven 试验用不同形状弹头照片

1—小钝头弹头, 2—针状弹头, 3—平头弹头

Fig. 3 Photographs of different shape warheads in Steven test

1—little blunt warhead, 2—pin shape warhead, 3—plane warhead

试验过程中通过高速摄影系统测量试验弹的撞靶速度、记录试验弹撞靶至点火爆炸的过程; 通过空气冲击波超压测试系统测量试样发生爆炸时产生的空气冲击波超压; 采用锰铜压力计和 PVDF 计测试试样受撞击过程中的压力变化过程, 其中锰铜压力计的感应面面积约为 0.2 cm^2 , PVDF 计感应面面积为 0.1 cm^2 , 其测量量程为 $0 \sim 30 \text{ GPa}$ 。

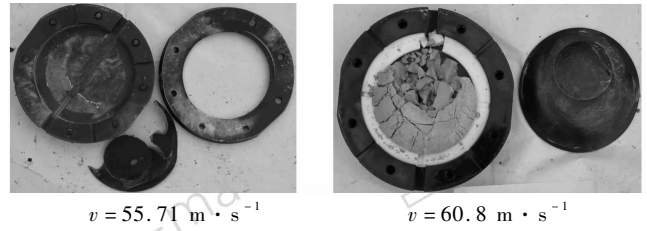
3 试验结果

3.1 试验照片

图 4 是 Steven 试验中不同形状弹头撞击 PBX-2 炸药试验结果部分照片。从图 4 可以看出, 当 PBX-2 炸药发生反应时, 几乎无剩余样品, 未发生反应时, 样品均留在样品盒内。当平头弹头撞击时均形成与弹头直径一致的圆片, 表明在此处受到较强的剪切作用, 在针状弹头以一定速度撞击时(如 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上)也有与平头弹头类似作用。在小钝头弹头以速度 $90 \sim 190 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 撞击时样品盒均完好, 其作用方式与钝头弹头(钝头弹头球面直径为 $\Phi 62 \text{ mm}$)类似^[5]。

3.2 高速录像测试

图 5 是平头弹头撞击 PBX-2 炸药过程高速录像照片, 从图 5 可以看出, 弹丸 ($v = 55.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 幅频 = $9000 \text{ 幅} \cdot \text{s}^{-1}$) 撞击到样品盒试件后继续运动, 在延迟一段时间后高速录像记录样品盒有发光现象, 表明 PBX-2 炸药已发生了反应。通过高速录像分析, 判断弹丸撞靶和观测到的炸药点火出光时间差值, 可以估算出炸药点火出光延迟时间, 图 6 为通过高速录像分析的平头弹头撞击时炸药点火出光延迟时间与弹速关系曲线。当平头弹头撞击 PBX-2 炸药时, 随着速度的增加, 其出光延迟时间缩短。



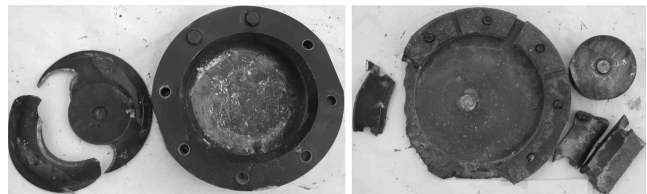
$v = 55.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$v = 60.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



$v = 188.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

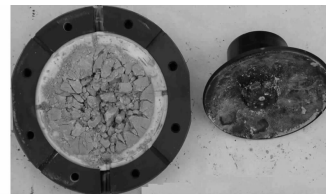
a. photographs under plane warhead impact



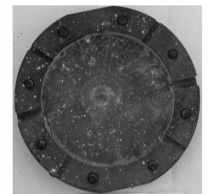
$v = 69.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$v = 161.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

b. photographs under pin shape warhead impact



$v = 85.99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



$v = 183.98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

c. photographs under little blunt warhead impact

图 4 不同形状弹头撞击 PBX-2 炸药试验结果照片

Fig. 4 Photographs of recover sample for PBX-2 under different shape warhead impact

3.3 冲击波超压测试

图 7 为不同形状弹头撞击 PBX-2 炸药速度与超压关系曲线。根据试验结果照片和超压测试结果综合分析: 当平头弹头撞击时, 速度 $61 \sim 80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 PBX-2 炸药发生了爆燃反应, 速度为 $141 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $188 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 PBX-2 炸药发生了爆炸反应; 当针状弹头撞击时, 速度 $49 \sim 106 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 PBX-2 炸药发生了爆燃反应, 速度为 $161.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 PBX-2 炸药发生了爆炸反应; 当小钝头弹头撞击时, $101 \sim 104 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 PBX-2 炸药仅发生了燃烧反应, $110 \sim 184 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 PBX-2 炸药发生了爆燃反应; 当钝头弹头撞击时^[5], 在速度 $50 \sim 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下 PBX-2 炸药均发生了爆燃反应。

因而,随着弹丸撞击速度的增加,弹头曲率半径愈大(平头弹头曲率半径为 ∞ ,而针状弹头撞击后期主要作用方式也是平面弹头作用),炸药反应程度也愈剧烈。

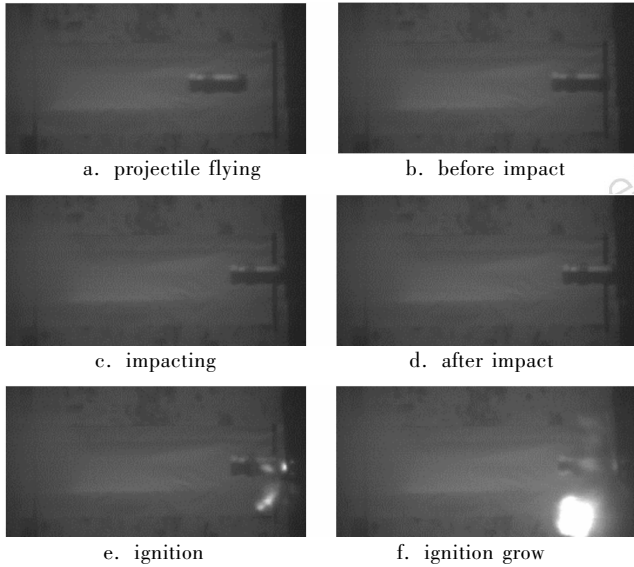


图5 平头弹头撞击 PBX-2 炸药高速录像照片

Fig. 5 Photographs of flat projectile impacting PBX-2 explosive

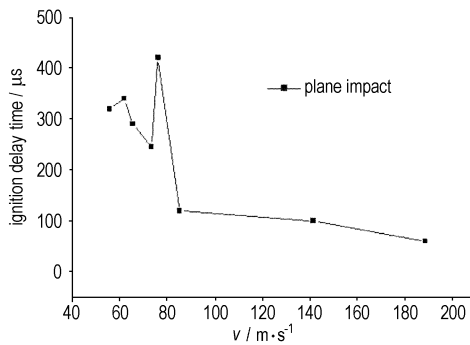


图6 平头弹头撞击时炸药点火出光时间与弹速关系曲线

Fig. 6 Curves of ignition delay time vs projectile velocity for explosive under plane impact

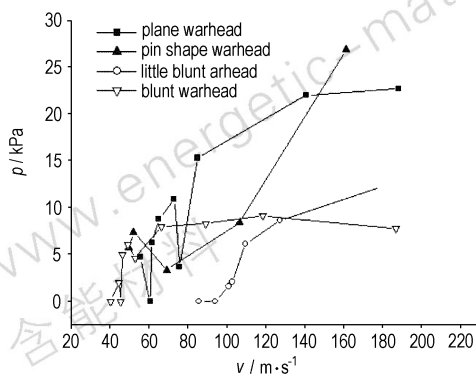


图7 不同形状弹头撞击 PBX-2 炸药超压与弹速关系曲线

Fig. 7 Curves of overpressure vs projectile velocity for PBX-2 under different shape warhead impact

3.4 压力测试

图8为Steven试验中钝头弹头撞击时PBX-2炸药没有反应时的典型受力历程曲线^[5],图9为平头弹头撞击速度分别为 $73.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $188.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 试验中PBX-2炸药底部的受力历程曲线。

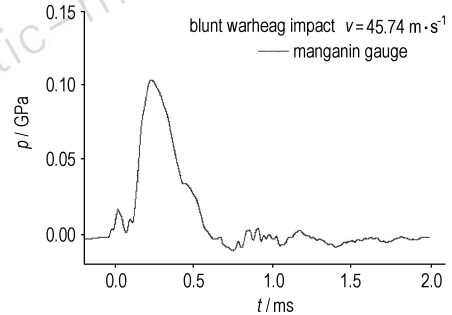
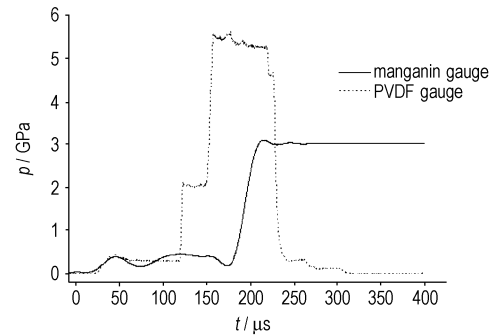
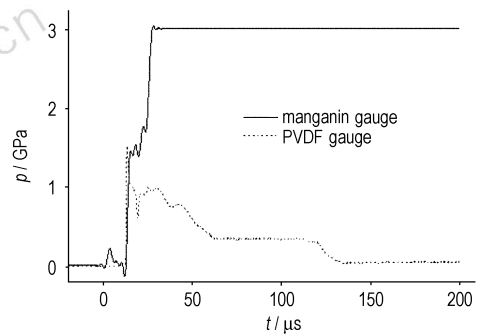


图8 Steven试验中PBX-2炸药典型压力-时间曲线(炸药无反应)

Fig. 8 Typical pressure vs time curve in the rear surface of PBX-2 in Steven test (no reaction)



a. $v = 73.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



b. $v = 188.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

图9 平头弹头撞击试验中PBX-2炸药底部受力历程曲线

Fig. 9 Curves of pressure vs time in the rear surface of PBX-2 under flat projectile impact

根据图9中压力测试结果,可以初步分析:当平头弹头撞击以 $73.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 撞击样品时(图9a),PBX-2炸药底部在撞击约 $45 \mu\text{s}$ 后撞击压力达到 0.45 GPa ,持续作用几十微秒后发生跳变达到 2 GPa ,随后达到

5.5 GPa, 在 230 μs 时突然下降, 结合此处的锰铜计测试曲线(在此时断开)以及高速录像出光时间分析表明此时炸药已发生了反应, 使 PVDF 计损坏; 在 $188.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 撞击时(图 9b), PBX-2 炸药底部在撞击约 15 μs 后撞击压力达到约 0.98 GPa, 随后压力逐渐降低, 在约 60 μs 时压力降至 0.4 GPa, 随后压力持续作用 50 μs 突降至零点附近, 结合高速录像结果分析表明撞击后 60 μs 炸药开始发生反应, 反应持续一段时间后, 样品盒破裂导致压力卸载。上述结果可用 Hugniot 关系^[8]解释, 在试验条件一致的情况下撞击瞬间作用于炸药的初始压力随弹丸撞击速度增加而增大。

4 分析讨论

众所周知在绝热剪切带区域和局部加热易发生撞击点火^[9], 根据试验结果, 进行以下初步的推测分析:

在平头弹头撞击样品时: 当弹头直径小于样品的直径, 弹丸撞击到样品后产生撞击作用力, 在弹头边缘与盖板接触处发生强烈的剪切作用, 形成剪切带, 最终形成与弹头直径一致的圆片, 速度越高, 剪切作用越强, 炸药发生的反应就越剧烈; 当弹头直径大于样品的直径^[4], 弹丸撞击样品时样品受到正压力作用, 受力均匀, 在盖板上难以形成强烈的剪切带作用。

在针状弹头撞击样品时: 撞击过程中针形部位穿入样品, 样品受到摩擦作用和应力波作用, 在低速时可能会发生反应; 由于针形部位较短, 导致弹头平面部位与盖板接触, 在弹头边缘与盖板接触处发生强烈的剪切作用, 形成剪切带, 最终形成与弹头直径一致的圆片; 在高速撞击时, 在针形部位穿入样品过程中样品内部可能会发生点火, 但由于速度较高, 剪切作用较强烈, 同时弹头平面区域内样品受到绝热压缩作用, 使得样品在发生点火后迅速增长, 从而发生更为剧烈的反应。

在小钝头弹丸/钝头弹丸撞击样品时, 样品开始受到冲击、挤压作用, 由于弹头呈圆弧形, 使得样品随后发生塑性流动, 在样品中不易形成强烈的剪切带作用, 因而样品发生的反应并不剧烈。

但是由于剪切带太薄, 试验中难以观测, 今后将在这方面开展更为深入的研究工作。

同时, 由于平头弹的作用直径较大, 侧向稀疏波比细杆和钝头弹的侧向稀疏要小, 并且有效作用时间长, 所以同样速度条件下, 最大压力虽然一样, 但平头弹的压力作用时间长, 使得反应较强, 这也是一个原因。

5 结 论

Steven 试验中 PVDF 计能很好用于压力测试。

2 kg 试验弹 Steven 试验中 $\Phi 98 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ PBX-2 炸药: 平头弹头撞击反应速度阈值约在 $50 \sim 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 针状弹头撞击反应速度阈值小于 $49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 小钝头弹头撞击反应速度阈值约在 $94 \sim 101 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 文献[5]中钝头弹头撞击反应速度阈值约在 $40 \sim 46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

不同形状弹头撞击 Steven 试验中, 由于平面弹头更易产生强剪切带作用, 使得在撞击过程中 PBX-2 炸药反应程度更高。

参考文献:

- [1] Chidester S K, Green L G. A frictional work predictive method for the initiation of solid high explosives from low-pressure impacts [C] // 10th International Detonation Symposium, 1993: 786 - 792.
- [2] Chidester S K, Tarver C M, Garza R G. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid high explosives [C] // 11th International Detonation Symposium, Snowmass Colorado, 1998: 93 - 100.
- [3] Idar D J, Lucht R A, Straight J W, et al. Low amplitude insult project: PBX9501 high explosive violent reaction experiments [C] // 11th International Detonation Symposium, Snowmass Colorado, 1998: 101 - 110.
- [4] Vandersall K S, Chidester S K, Forbes J W, et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the Steven test [C] // 12th International Detonation Symposium, San Diego, California, 2002.
- [5] 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.
- [6] 代晓淦, 向永, 申春迎. 用抛射弹撞击法 (Steven 试验) 研究 PBX-2 炸药加速老化前后反应能力 [J]. 含能材料, 2006, 14(6): 453 - 456.
DAI Xiao-gan, XIANG Yong, SHEN Chun-ying. Study of reaction ability for pristine and accelerated aged PBX-2 explosive by projectile impact (Steven Test) [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(6): 453 - 456.
- [7] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 441 - 442.
SUN Cheng-wei, WEI Yu-zhang, ZHOU Zhi-kui. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 441 - 442.
- [8] 张锦云. 冲击波与爆轰学基础 [M]. 北京: 北京理工大学, 1993: 20 - 24.
ZHANG Jin-yun. Base of Shock Wave and Detonation [M]. Beijing: Beijing Institute of technology, 1993: 20 - 24.
- [9] Yehuda Partom. A threshold criterion for impact ignition [C] // 12th International Detonation Symposium, San Diego, California, 2002.

Reaction Rule for Explosive under Different Shape Warhead Impact in Steven Test

DAI Xiao-gan, SHEN Chun-ying, WEN Yu-shi, XIANG Yong
(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Steven test for PBX-2 explosive was made by using little blunt warhead, pin shape warhead and plane projectiles of 2.0 kg. The pressure change was measured by manganin pressure gauges and poly vinylidene fluoride (PVDF) piezofilm stress gauge. Ignition process was analyzed by high-speed motion pictures. The reaction overpressure of explosive was obtained by blast pressure gauges. Reaction for explosive was analyzed under different shape warhead impacts in Steven test. The results show that explosive reaction is more intensive because of strong shear band under plane impact in Steven test, and reaction degree for PBX-2 explosive is higher under plane warhead.

Key words: explosion mechanics; Steven test; explosive safety; impact sensitivity

(上接 49 页)

Numerical Simulation of Cook-off for Explosive at Different Heating Rates

WANG Pei, CHEN Lang, FENG Chang-gen
(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A cook-off model of explosive was established to investigate the characteristics of explosive thermal reaction at different heating rates. The numerical simulation was employed to model the cook-off process for GHL explosive at different heating rates by computational fluid dynamics (CFD) software. The decomposition reaction of explosive was described by Arrhenius-equation. According to $T-t$ curves of cook-off test at heating rate of $1 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$, the activation energy and frequency factor were confirmed. The calculations were conducted to simulate the cook-off tests for GHL explosive at heating rates of $3.3 \text{ K} \cdot \text{h}^{-1}$, $1 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$, $3 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ and $10 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$, respectively. The results show that the external heating rate has much influence on the ignition time and ignition location. The ignition time of explosive decreases and ignition location removes from the interior to the edge of explosive cylinder with increasing of the heating rate. The ignition temperature is slightly affected by the heating rate. The environment temperature at igniting in slow cook-off test is lower than that in fast cook-off test.

Key words: physical chemistry; GHL explosive; cook-off; ignition; numerical simulation