

文章编号: 1006-9941(2015)11-1067-06

# 聚能射流对带壳浇注 PBX 装药的撞击响应

王利侠, 谷鸿平, 丁刚, 刘丰旺, 孙兴昀

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为研究聚能射流对带壳浇注高聚物粘结炸药(PBX)的引爆特性,利用弹径  $\Phi 82$  mm 的聚能装药形成了一种直径细、速度大于  $7000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的高速射流,以及一直径较粗、速度约  $5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  长杆状射流,分别对覆盖有 210,255 mm 和 165,210 mm 两组不同厚度钢板的 PBX 进行了撞击试验。采用高速摄影观测分析了射流撞击下带壳 PBX 点火引爆的反应过程。用 LS-DYNA 软件验证了试验结果,得到了不同射流对 PBX 的引爆能量值。结果表明:弹径  $\Phi 82$  mm 的聚能装药形成的射流能够可靠引爆覆盖小于 255 mm 厚钢板的浇注 PBX,能满足反导弹战斗部毁伤厚壳体目标的需求。

**关键词:** 聚能射流撞击; 引爆; 浇注高聚物粘结炸药(PBX); 响应特性

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.006

## 1 引言

反导战斗部一般采用破片毁伤元对来袭导弹壳体侵彻使结构失效或使战斗部引爆解体,相关文献大多为破片对覆盖薄钢板或铝板的 B 炸药冲击起爆研究<sup>[1-5]</sup>。随着来袭深钻地弹的钢壳厚度增加和钝感浇注高聚物粘结炸药(PBX)的广泛使用<sup>[6-8]</sup>,利用破片引爆来袭战斗部难度增加,探索新型反导战斗部毁伤元已经越来越受重视,聚能射流以更高侵彻能力和更强打击动能逐步被认为是反导战斗部最具潜力的毁伤元之一。另外,从弹药安全性考虑,研究聚能射流对浇注 PBX 的冲击起爆及响应问题,对于可靠起爆和避免弹药在射流意外刺激下的爆炸具有重要参考价值。

关于聚能射流对炸药冲击起爆国内外已进行了大量研究<sup>[9-11]</sup>,得出了炸药起爆机理等规律性结论。现有课题大多是针对 B 炸药的射流冲击问题研究<sup>[12-13]</sup>,相比较 PBX 尤其是带壳 PBX 的射流撞击响应研究少一些。本研究采用了两种形态和速度的聚能射流作为带壳 PBX 的刺激源,一种是直径稍细、速度为  $7000 \sim 8000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的高速射流,另一种为直径较粗、速度为  $4000 \sim 5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  长杆状射流,用以撞击厚壳壁装有 PBX 模拟来袭战斗部装药结构,采用高速摄影即时

观察射流起爆炸药的引爆过程,分析了钢板厚度、射流速度和射流强度参数等对浇注 PBX 的起爆临界性和不同强度射流对带壳 PBX 的冲击响应特性;然后采用 LS-DYNA 软件<sup>[14]</sup>对高速射流形成及其引爆 PBX 的过程进行数值模拟验证,获得了高速射流穿过不同厚度覆盖板对 PBX 的引爆能量值。研究结果可为未来反导战斗部设计、弹药易损性等研究提供相关基础。

## 2 实验部分

### 2.1 聚能装药

采用西安近代化学研究所研制的弹药直径  $\Phi 82$  mm 的标准聚能装药,该聚能装药的主装药为 JO-8 炸药、密度  $1.81 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、爆速约  $8700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;其中聚能装药  $X_1$  的药型罩直径 75 mm、锥角为  $60^\circ$ ,所形成的射流速度高达  $7036 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;聚能装药  $X_{II}$  的药型罩直径为 75 mm、罩顶与罩口部连线锥角为  $75^\circ$ ,其形成的杆状射流(JPC, jetting projectile charge)速度约  $5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 2.2 模拟带壳装药

为模拟来袭导弹战斗部,设计了图 1 所示的覆盖 45<sup>#</sup>钢板的模拟带壳装药(简称试验样品),装药为 PBX,其配方(质量比)RDX:Al:高氯酸铵(AP):惰性黏结剂=25:33:30:12,采用真空振动浇注工艺成型;药柱密度约  $1.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,尺寸  $\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ,药柱放置在 10 mm 厚有端盖的 45<sup>#</sup>钢壳体内。

收稿日期: 2015-02-04; 修回日期: 2015-03-29

基金项目: 国防支撑基金项目(62201040312)

作者简介: 王利侠(1966-),女,高级工程师,主要从事聚能战斗部技术及毁伤效应研究。e-mail: wlx201311tgy@163.com

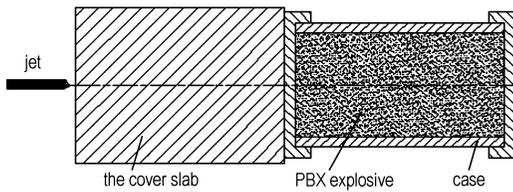


图1 试验样品示意图  
Fig.1 Diagram of test sample

### 2.3 射流撞击试验

图2为射流撞击试验装置示意图,包括聚能装药、炸高筒、覆盖板、模拟装药样品、验证板等。设置炸高为400 mm,覆盖钢板厚度采用“升降”法进行调整,其中高速射流穿过覆盖钢板厚度为210,255 mm;杆式射流穿过覆盖钢板厚度165,210 mm后与样品炸药相撞,PBX相继受到前驱冲击波及射流双重作用而被引爆(或引燃),通过高速摄像图像及样品下方验证板上凹痕判断炸药是否被引爆而发生反应,分析PBX在射流撞击下的起爆反应程度及响应情况。

采用美国Phantom公司生产的V7高速相机拍摄聚能装药的射流产生、穿透覆盖板及引爆(或引燃)PBX过程,拍摄频率约5000幅/s,相机架设距离爆心大于50 m。起始拍摄信号与雷管引爆聚能装置信号同步。

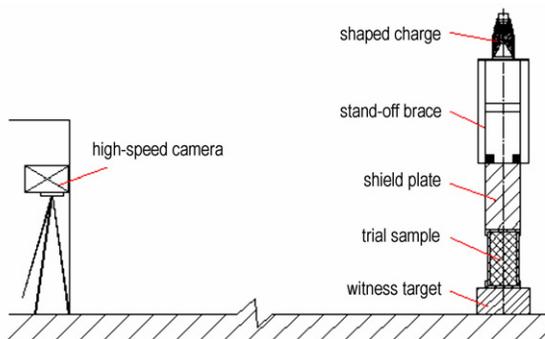


图2 射流撞击试验装置示意图  
Fig.2 Configuration of jet impact test set

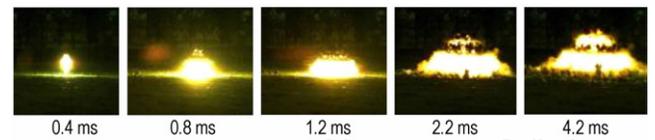
## 3 结果与分析

### 3.1 射流撞击炸药点火响应过程

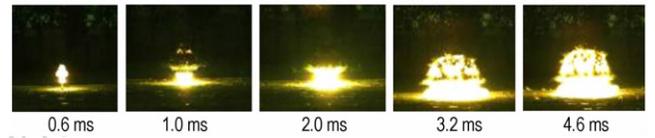
图3为高速射流垂直撞击穿透覆盖PBX样品的210,255 mm厚45#钢板,不同时刻引爆PBX的高速摄影照片。

图4为杆式射流垂直撞击穿透覆盖PBX样品的165,210 mm厚45#钢板后,不同时刻引燃PBX的高

速摄影照片。



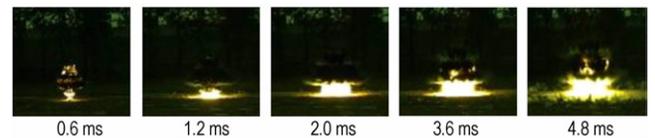
a. 210 mm



b. 255 mm

图3 高速射流穿过不同厚度盖板撞击PBX不同时刻高速摄影图像

Fig.3 High-speed photography of PBX explosive impacted by high speed jet through different thickness shield plate at different moments



a. 165 mm



b. 210 mm

图4 杆式射流穿过不同盖板撞击PBX不同时刻高速摄影图像  
Fig.4 High-speed photography of PBX explosive impacted by JPC through different thickness shield plate at different moments

从图3和图4高速摄影结果可以看出,聚能装药 $X_I$ 起爆后约在0.4,0.6 ms高速射流穿过厚度分别为210,255 mm的覆盖板;聚能装药 $X_{II}$ 起爆后约0.6,0.8 ms杆式射流穿透厚度分别为165,210 mm的覆盖板,剩余射流瞬间触及靶内炸药并出现明亮火光,表明PBX装药此刻发生点火引爆反应;且高速射流穿过厚210 mm覆盖板后使PBX爆炸的火球燃烧扩展范围或半径、反应速度及激烈程度比射流穿透厚255 mm盖板时的大得多、剧烈得多。根据拍摄结果可知聚能装药 $X_I$ 相应于210,255 mm厚的覆盖板,从聚能装药起爆至高速射流形成、穿靶到PBX完全爆炸(或燃烧)耗时约1.2,2.0 ms;而聚能装药 $X_{II}$ 的对应165,210 mm厚度覆盖板从聚能装药起爆到杆式射流形成、穿靶至炸药充分引燃至少耗时3.0 ms,超

过高速射流的 50%。过后火球的爆炸或燃烧均趋于稳定,火球覆盖空间虽还在扩大,此时扩张空间变化小,且杆状射流引燃火球扩展范围或半径比射流的减小约 2/3。

由高速摄像过程观察到由于射流的撞击引爆 PBX 爆炸产物的扩散和燃烧开始最快,随着其拓延范围或半径的不断增大、压力逐步释放及能量衰减,扩散的速度会越来越小,随后经过短暂稳定后爆炸火球开始变暗、收缩至熄灭;而且不同射流引爆炸药的火球光亮程度差异明显,高速射流引爆炸药的火球亮度强于杆状射流。

### 3.2 不同速度射流对炸药撞击响应影响分析

非均质炸药的射流冲击起爆通常采用 Held 的修正判据<sup>[15-16]</sup>,即:

$$I_{cr} = u^2 d \quad (1)$$

由于射流侵彻过程满足伯努利理想流体理论<sup>[17]</sup>,则射流侵彻炸药速度为:

$$u = v / (1 + \sqrt{\rho_e / \rho_j}) \quad (2)$$

式中, $d$ 为射流直径,mm; $v$ 为射流速度, $m \cdot s^{-1}$ ; $\rho_e$ 为炸药密度, $g \cdot cm^{-3}$ ; $\rho_j$ 为射流密度, $g \cdot cm^{-3}$ ; $I_{cr}$ 为炸药相应的临界判据值, $mm^3 \cdot \mu s^{-2}$ 。

由式(1)、(2)可见,射流对炸药的临界判据值  $I_{cr}$  主要与射流速度、射流直径等参数相关。

高速射流着靶前速度大于  $7000 m \cdot s^{-1}$ ,图 5 为射流穿过厚度 210,255 mm 覆盖板冲击 PBX 产生响应试验后验证板凹痕及装药端盖被剪切开裂结果,图 6a 和图 6b 显示了对应试验样品壳体破裂破片地面打击凹坑及变形后的情况。

杆状射流着靶前速度大于  $5000 m \cdot s^{-1}$ ,图 7 为其穿过 165,210 mm 覆盖板撞击 PBX 试验后验证板炸痕和及剪切掉落的端盖结果,图 8a 和图 8b 显示了相对应的试验样品壳体变形后状态。

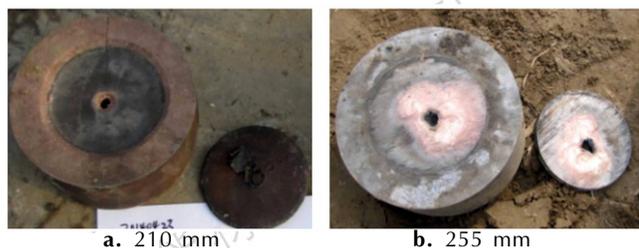


图 5 高速射流穿过不同厚度盖板引爆 PBX 后验证板和冲落端盖

Fig. 5 Witness plates and end-cover of charge after PBX explosive impacted by high speed jet through different thickness shield plate



图 6 高速射流穿过不同厚度盖板引爆 PBX 后样品壳体

Fig. 6 Shell after PBX explosive impacted by high speed jet through different thickness shield plate



图 7 杆状射流穿过不同厚度盖板引爆 PBX 后验证板和冲落端盖

Fig. 7 Witness plates and end-cover after PBX explosive impacted by JPC through different thickness shield plate

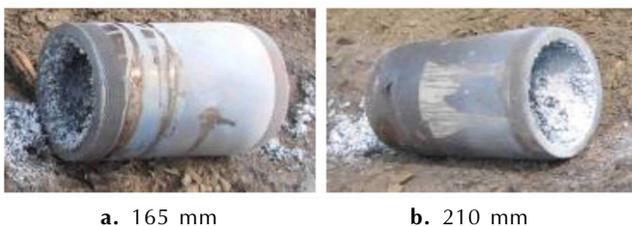


图 8 杆状射流穿过不同厚度盖板引爆 PBX 后样品壳体

Fig. 8 Shell after PBX explosive impacted by JPC through different thickness shield plate

参考 2105C<sup>[18]</sup>对遇到射流强刺激后的弹药反应程度的划分标准及类型,判断试验结果认为,对图 5a 验证板炸痕推断高速射流穿过 210 mm 厚钢靶引爆 PBX 的响应为第 II 类猛烈类型的爆炸响应,炸药反应产生强冲击波,炸药快速燃烧产生局部高压,导致样品壳体结构破裂成小碎片及大块破片,破片对混凝土地面毁坏严重(见图 6a),且验证板上 15 mm 深的凹坑和背面 4 条裂纹也能推断反应的猛烈程度;图 5b 验证板上凹痕深仅为 4.6 mm,即随覆盖板增厚至 255 mm,射流对炸药引爆为 IV 等猛烈爆炸响应,PBX 爆燃导致的压力释放通过壳体壁端盖紧固螺纹脱落而发生了剪切破坏;图 6b 试验样品壳体结构未破裂成破片,只发生了变形呈鼓状,前、后端盖被冲出,部分燃

烧着或未完全燃烧的炸药撒向爆心四周,并传播火焰。杆状射流穿过覆盖板作用炸药后,图7鉴证板上凹痕仅浅至2~3 mm,应属于第V类爆炸响应事件,炸药点火并燃烧,图8两发样品壳体完整仅发生变形,燃烧气体缓慢释放,壳体端盖裂开被抛出10 m多远距离,壳体内壁和爆心有炸药残留物和火焰传播,壳体发生塑性变形形成倒锥的口杯状而非射流引爆时的鼓状,径向最大位移减35%。

综上所述,高速射流具有足够剩余能量引爆覆盖210~255 mm厚钢板的带壳PBX样品,而杆状射流穿过165~210 mm覆盖板后能量衰减较多,无法使带壳PBX爆炸而仅能发生燃烧反应。

### 3.3 不同厚度盖板对高速射流引爆炸药影响

经典射流引爆炸药理论<sup>[19]</sup>认为,射流与覆盖钢板高速碰撞时,将在侵入钢板中产生很强的前驱冲击波,该冲击波先于射流到达炸药界面并进入炸药中,压实密闭炸药间隙使炸药明显变得钝感,因而阻碍了后续射流的引爆或使起爆延迟。射流对屏蔽炸药的起爆主要形式<sup>[20]</sup>:一是被冲击炸药覆盖壳体较薄,遵循射流着靶产生的前驱波起爆机制;二是被冲击炸药覆盖壳体厚度大,射流击穿靶板后,依靠剩余射流及壳体崩落物起爆炸药。研究表明,剩余射流的最大起爆能力相比前驱波最大起爆能力高出一个数量级<sup>[21]</sup>,因此厚盖板时射流冲击起爆炸药主要应是第二种起爆形式。

而且射流对带厚盖板炸药引爆时,前驱波和剩余射流的强度应随覆盖板的加厚而衰减,间接体现在对样品PBX的冲击引爆效应上,通过试验观察样品壳体破裂或变形程度,辅助于验证板炸痕深浅、穿孔深度及炸心有否炸药残留等特征定性判断。

由3.2试验结果,高速射流穿过210 mm厚的覆盖板时射流能使浇注PBX爆炸;而射流穿过255 mm厚的覆盖板时,剩余射流使浇注PBX爆燃。可见,盖板厚度不同时,前驱波和剩余射流对PBX的引爆响应差别较大。

为验证以上分析,采用LS-DYNA软件对不同厚度覆盖板的高速射流撞击PBX的响应进行数值模拟。采用文献[12]多物质ALE算法来模拟射流形成、侵入、引爆炸药及反应过程;计算网格单元选用Solid164八节点六面体单元;采用cm-g-us单位制,TureGrid软件<sup>[22]</sup>建模,图9为计算模型。

聚能射流装药JO8炸药采用关键字\* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN材料模型,炸药爆轰产物压力的计算采用JWL状态方程,表1为装药爆轰性能参

数和JWL状态方程参数,数据由圆筒试验测试获得,方程形式及参数物理意义见文献[23]。

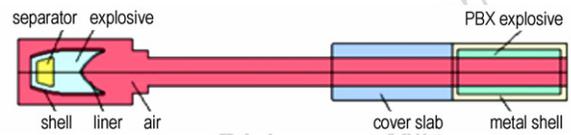


图9 射流撞击数值模拟模型

Fig. 9 Numerical simulation model of jet impact test

表1 JO8炸药爆轰性能参数及JWL状态方程参数

Table 1 Detonation property parameters of JO8 explosive and JWL state equation

$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>	$P_{CJ}$ /GPa	$D_{CJ}$ /m · s <sup>-1</sup>	$A$ /GPa	$B$ /GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$
1.81	35.81	8689	795.3	7.07	4.11	1.0	0.35

Note:  $R_1$ ,  $R_2$  and  $\omega$  of JWL equation of state mean the undetermined fitting parameters;  $\rho$  is density;  $P_{CJ}$  is detonation pressure;  $D_{CJ}$  is detonation velocity.

被冲击试验样品PBX采用弹塑性材料模型,炸药所用状态方程采用高能炸药反应的点火与成长模型来描述<sup>[12,24-25]</sup>,此模型用于计算炸药冲击引爆以及爆轰波在炸药中的传播规律。数值计算所用相关性能参数来自参考文献[26]。

药型罩、样品壳体和覆盖板均采用弹塑性材料模型和Gruneisen状态方程描述,金属材料所用参数取自参考文献[12]及[25]。空气介质用NULL材料模型和LINEAR\_POLYNOMIAL状态方程,空气密度取 $1.293 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

数值模拟计算表明,覆盖210 mm厚钢板时,射流着靶前速度约 $7036 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、直径2.26 mm,穿靶后其速度降为 $4548 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、直径1.92 mm,射流起爆炸药能量为 $39.71 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ ,大于参考文献[11]中PBX起爆阈值 $38.4 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ 。图10为样品内炸药单元压力时间曲线,可以看出射流引爆PBX的爆炸压力峰值约29 GPa。当穿过厚255 mm覆盖板后射流速度降为 $4275 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、直径1.56 mm,计算得射流引爆能量为 $28.51 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ ,图11为样品内炸药单元压力时间曲线,图11中炸药爆炸峰值压力约26 GPa。

数值模拟得到射流对PBX的临界起爆能量与文献[11]试验值基本吻合,计算显示高速射流穿过210 mm厚覆盖板撞击PBX使其发生猛烈爆炸反应,装药内爆炸压力高达29 GPa,而穿过255 mm覆盖板使PBX爆炸峰值压力约26 GPa。计算获得高速射流

穿过两种厚度覆盖板后,均使带壳 PBX 发生相应的爆炸响应,与上述试验结果相一致。

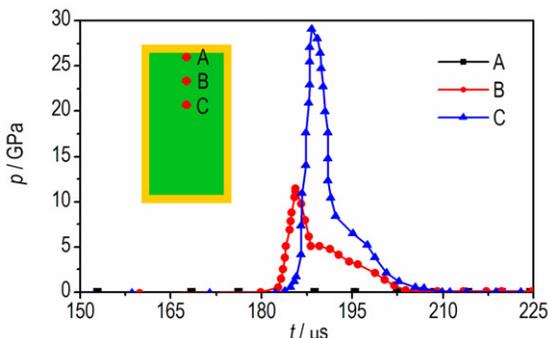


图 10 覆盖板厚 210 mm 时炸药单元压力时间曲线

Fig. 10 Pressure curves of explosive unit with 210 mm cover slab vs time

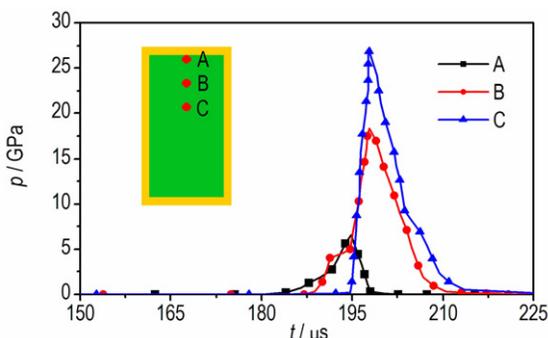


图 11 覆盖板厚 255 mm 时炸药单元压力时间曲线

Fig. 11 Pressure curves of explosive unit with 255 mm cover slab vs time

## 4 结 论

(1) 弹径  $\Phi 82$  mm 聚能装药形成的两种形态和速度的高速射流及杆状射流,对带壳浇注 PBX 撞击时高速射流所造成响应的剧烈程度高于低速的杆式射流。高速射流穿过小于 255 mm 厚的覆盖钢板,撞击带壳 PBX 能产生爆炸或爆燃反应;杆状射流穿过不高于 210 mm 厚度覆盖板,只能够引起 PBX 燃烧反应。因此,高速聚能射流可作为反厚壁或厚壳体目标的反导战斗部的毁伤元,使来袭战斗部装药引爆解体而失效。

(2) 数值模拟表明聚能射流穿过一定厚度覆盖钢板,必须使其剩余撞击能量大于 PBX 的临界引爆判据值  $38.4 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ ,才能使带壳浇注 PBX 被引爆。

致谢: 参加本课题研究及讨论的还有周涛、南海、冯晓军、贺海民、席鹏等同志,在此表示衷心感谢!

## 参考文献:

- [1] 王树山, 李朝君, 马晓飞, 等. 钨合金破片对屏蔽装药撞击起爆的实验[J]. 兵工学报, 2001, 22(2): 189-191.  
WANG Shu-shan, LI Chao-jun, MA Xiao-fei, et al. An experimental study on the initiation of covered charge impacted by tungsten alloy fragments[J]. *Acta Armamentarii*, 2001, 22(2): 189-191.
- [2] 陈卫东, 张忠, 刘家良. 破片对屏蔽炸药冲击起爆的数值模拟和分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(9): 1187-1191.  
CHEN Wei-dong, ZHANG Zhong, LIU Jia-liang. Numerical simulation and analysis of shock initiation of shielded explosive impacted by fragments [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9): 1187-1191.
- [3] 马晓飞, 李园, 徐豫新, 等. 破片对薄盖板装药的冲击起爆研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(5): 133-138.  
MA Xiao-fei, LI Yuan, XU Yu-xin, et al. Research on fragment impact initiation of the charge covered with a thin plate[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(5): 133-138.
- [4] 叶小军, 李向东. 含能破片撞击引燃屏蔽炸药的实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(6): 131-134.  
YE Xiao-jun, LI Xiang-dong. Experimental study on reactive fragments ignited charge covered with a metal plate after the impact [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(6): 131-134.
- [5] 李旭峰, 李向东, 顾文彬, 等. 含能破片引爆带壳炸药过程的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 202-208.  
LI Xu-feng, LI Xiang-dong, GU Wen-bin, et al. Numerical simulation on detonating shelled explosives by energetic fragments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(2): 202-208.
- [6] 唐明峰, 李明, 蓝林钢. 浇注 PBX 力学性能的研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 812-817.  
TANG Ming-feng, LI Ming, LAN Lin-gang. Review on the mechanical properties of cast PBXs[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 812-817.
- [7] 唐桂芳, 王晓峰, 李巍, 等. 浇注 PBX 的低易损性能研究[J]. 含能材料, 2003, 11(3): 163-165.  
TANG Gui-fang, WANG Xiao-feng, LI Wei, et al. Study on low vulnerability of cast PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(3): 163-165.
- [8] 高立龙, 王晓峰, 南海, 等. PMX-1 炸药易损性试验研究[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 669-701.  
GAO Li-long, WANG Xiao-feng, NAN Hai, et al. Experimental study on vulnerability of the explosive PMX-1 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(6): 669-701.
- [9] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 248-259.
- [10] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆炸物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 415-420.
- [11] 周涛, 袁宝慧, 梁争峰. 聚能射流引爆屏蔽 PBX 的实验研究[J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 10-13.  
ZHOU Tao, YUAN Bao-hui, LIANG Zheng-feng. Experimental study of jet initiation of shield PBX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(4): 10-13.
- [12] 张先锋, 赵有守, 陈惠武. 聚能射流引爆带壳炸药数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 165-167.

- ZHANG Xian-feng, ZHAO You-shou, CHEN Hui-wu. Numerical simulation investigation of shaped charge jet initiation the shelled explosive[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 165-167.
- [13] 汪明星, 廖竹良, 李裕春, 等. 聚能射流引爆炸药的数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(12): 2872-2878.
- WANG Ming-xing, LIAO Zhu-liang, LI Yu-chun, et al. Numerical simulation of high explosive ignited by shaped charge jet[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(12): 2872-2878.
- [14] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual[M]. Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [15] Chick M C, Hatt D J. The initiation of covered composition B by a metal jet[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1983(8): 121-126.
- [16] Held M. Initiation criteria of high explosives at different projectile or jet densities[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996(21): 235-237.
- [17] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 244-245.
- [18] MIL-SID-2105C. Hazard assessment tests for non-nuclear munition[S]. 2003.
- [19] 姜春兰, 张宝钲. 射流引爆炸药的机制及临界判据[J]. *含能材料*, 1993, 1(2): 23-27.
- JIANG Chun-lan, ZHANG Bao-ping. Mechanism and critical criterion of jet initiation explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 1993, 1(2): 23-27.
- [20] 吴园园. 大炸高下射流引爆炸药的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- WU Yuan-yuan. The study on jet initiation the shelled explosive on the high range[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [21] 张俊坤, 高欣宝, 熊冉, 等. 射流对间隙靶板屏蔽炸药的冲击起爆[J]. *含能材料*, 2014, 22(5): 607-611.
- ZHANG Jun-kun, GAO Xin-bao, XIONG Ran, et al. Jet impact initiation of the charge covered with spaced target[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5): 607-611.
- [22] Robert Rainsberger. TrueGrid user's Manual[CP]. XYZ Scientific Applications, Inc, 2006.
- [23] 赵铮, 陶钢, 杜长星. 爆轰产物JWL状态方程应用研究[J]. *高压物理学报*, 2009, 23(4): 277-282.
- ZHAO Zheng, TAO Gang, DU Chang-xing. Application research on JWL equation of state of detonation products[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(4): 277-282.
- [24] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives[C]// Proceedings of the 8th International Symposium on Detonation Albuquerque, NM, 1985: 951-961.
- [25] 张先锋, 丁建宝, 赵晓宁. 夹层聚能装药作用过程的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(6): 617-624.
- ZHANG Xian-feng, DING Jian-bao, ZHAO Xiao-ning. Numerical simulation of double layer shaped charge [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(6): 617-624.
- [26] 计冬奎, 高修柱, 肖川, 等. 含铝炸药作功能力和JWL状态方程尺寸效应研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(5): 552-555.
- Ji Dong-kui, GAO Xiu-zhu, XIAO Chuan, et al. Study on dimension effect of accelerating ability and JWL equation of state for aluminized explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(5): 552-555.

## Reaction Characteristics for Shelled Cast-cured PBX Explosive Impacted by Shaped Charge Jet

WANG Li-xia, GU Hong-ping, DING Gang, LIU Feng-wang, SUN Xing-yun

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To study the initiation/detonation characteristics of the shelled cast-cured polymer bonded explosive (PBX) caused by shaped charge jet, the impact test of the PBX explosive, overlaid by two groups of steel plates with thickness of 210, 255 mm and 165, 210 mm, was performed respectively by shaped charge with different forms and jet velocities, produced by the shaped charges with diameter of 82 mm, that is a small diameter and velocity is greater than  $7000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  high-speed jet, another thicker diameter and about  $5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  jetting projectile charge. The shock initiation and detonation processes of the PBX explosive were observed and analyzed by high-speed photography. The experiment results were verified by LS-DYNA software. The values of initiation/detonation energy of the PBX explosive caused by different jets were obtained. Results show that jets formed by shaped charges with diameter of 82 mm can reliably cause the shock initiation and detonation of the PBX explosive overlaid by steel plates with thickness of less than 255 mm, can meet the needs of anti-missile warhead to damage the thick shell target.

**Key words:** shaped charge jet impact; initiation and detonation; cast-cured polymer bonded explosive (PBX); reaction characteristic

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.006