

文章编号: 1006-9941(2015)06-0522-05

HMX 基和 TATB 基 PBX 爆轰波的拐角性能

郭向利, 韩勇, 卢校军, 李志鹏

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了研究 HMX 基和 TATB 基高聚物粘结炸药 (PBX) 爆轰波的拐角性能, 采用蘑菇 (Mushroom) 试验测试了 HMX 基炸药 (含 95% HMX 的 PBX-I, 含 85% HMX 和 7% TATB 的 PBX-II) 和 TATB 基炸药 (含 95% TATB 的 PBX-III) 在起爆直径 7 mm 和 10 mm 条件下的出射角、熄爆角及延迟时间。结果表明, 在起爆直径 7 mm 的情况下, PBX-I 的出射角 (75.5°) 略大于 PBX-II 的出射角 (74.4°), PBX-I 和 PBX-II 的熄爆角均为 90°, 都能够发展为类似球形, 显示 HMX 基 PBX 均有较好的拐角性能。在起爆直径 10 mm 的情况下, PBX-II 的出射角为 78.6°, 熄爆角为 90°, PBX-III 的出射角为 16.1°, 熄爆角为 60.4°。对于 HMX 基 PBX, 随着起爆直径的增大, 出射角增大。在 HMX 基 PBX 中加入 TATB, 出射角减小。当 HMX 全部用 TATB 代替, 出射角显著减小, 三种炸药的拐角性能优劣顺序为: PBX-I > PBX-II > PBX-III。

关键词: 爆轰波; 拐角性能; TATB 基 (HMX 基) 高聚物粘结炸药 (PBX)

中图分类号: TJ55; O381

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.003

1 引言

爆轰波的拐角性能是炸药爆轰的一个重要特性, 同时也是爆轰学研究的重要内容之一, 对于研究炸药性能、合理设计弹体、构型件以及设计爆炸逻辑网络等有着十分重要的意义。当爆轰波从较小的传爆药柱进入大的药柱时, 产生散心爆轰波, 其传播方向偏离惠更斯原理而出现波阵面滞后或局部不爆轰现象, 这种现象称为炸药爆轰波传播的拐角效应^[1-5]。爆轰波的拐角性能是武器设计时必须考虑的重要参数之一, 对该效应的研究也有利于加深对发散爆轰的认识, 完善爆轰理论。美国 Cox 和 Campbell^[1] 利用多狭缝扫描技术观察了高聚物粘结炸药 PBX-9502 中的爆轰波拐角现象, 得到了炸药中不爆轰区域的大小。Hill^[2] 等建立了“蘑菇 (Mushroom)”试验, 使用较少的药量获得较多的数据, 研究了钝感高能炸药的传爆性能, 其优点是: 形状比较接近于实际的传爆装置, 可以获得整个爆轰前沿的波形; 观察面与实际爆轰阵面接近。

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-08-07

基金项目: 国家自然科学基金资助 (11372291), 中国工程物理研究院化工材料研究所创新基金 (KJCX-201202)

作者简介: 郭向利 (1987-), 女, 助理研究员, 主要从事炸药爆轰性能性能研究。e-mail: g-x_l@163.com

通信联系人: 韩勇 (1976-), 男, 副研, 主要从事炸药爆轰性能研究。e-mail: y_han@126.com

黄毅民^[6]对 TATB 基炸药开展了 Mushroom 试验研究, 获得了颗粒度及炸药半球直径对爆轰波输出断面波形的影响。李晓刚^[7]研究了超细钝感 HMX 在小尺寸拐角装药条件下的爆轰延迟现象, 对影响爆轰延迟时间的因素进行了分析, 采用量纲分析法给出了拐角延迟时间的理论表达式。韩勇^[8]利用有限元动力学软件 LS-DYNA, 从理论上研究了 HMX 基的 PBX-9404 和 TATB 基的 PBX-9502 爆轰波的拐角性能, 但相应的拐角效应试验工作并未开展。

为深入研究 HMX 基、TATB 基 PBX 爆轰波的拐角性能, 获得 HMX、TATB 含量对 PBX 炸药爆轰波拐角性能的影响, 本研究选择三种不同 HMX/TATB 含量的 PBX, 采用 Mushroom 试验, 开展了相应的拐角效应研究, 评价了三种 PBX 炸药爆轰波的拐角性能。

2 实验装置及原理

2.1 样品及仪器

实验用传爆药柱为 PBX-01 炸药, 尺寸为 $\Phi 10$ mm × 50 mm 和 $\Phi 7$ mm × 50 mm, 密度为 $1.860 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 主炸药为 HMX 基炸药和 TATB 基炸药, 其尺寸都为 SR25 mm。三种炸药的配方组成分别为: 95% HMX 基的 PBX (PBX-I), 85% HMX 和 7% TATB 的 PBX (PBX-II), 95% TATB 基的 PBX (PBX-III)。传爆药柱和主炸药均由中国工程物理研究院化工材料研究所提供。

实验雷管采用瞬发雷管。使用高速扫描相机测试爆轰波出半球界面的发光图形,相机型号为 SJZ-15,其扫描速度为 $7.5 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ (15 万转/min)。判读爆轰波输出波形的大型万能工具显微镜的型号: JXBB。

2.2 实验装置

Mushroom 试验^[2]装置如图 1 所示,基座两个斜面与水平方向成 45° ,然后分别固定左右反射镜,使被起爆药柱边部的图像经过镜面反射后,平行进入相机。装配过程中,在两面反射镜的边沿分别粘贴一小块医用胶布,并在被起爆药柱底部表面与反射镜平面的交线处画上细实线。采用高精度游标卡尺测量出被起爆药柱中心到细实线之间的距离 L ,得到底片成像的放大比 β ,在被起爆药柱的顶部粘贴一层宽 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 粘有颗粒度为 $0.12 \sim 0.18 \text{ mm}$ 硝酸钡的透明胶带,以增强被起爆药柱爆炸时测试位置处的发光。

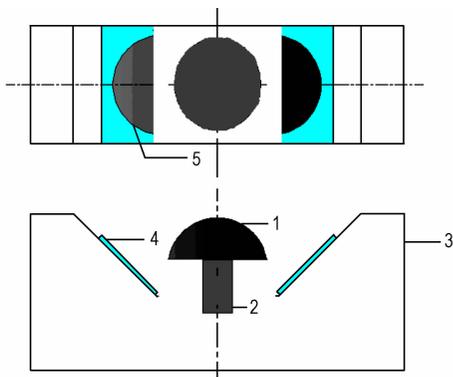


图 1 实验装置示意图

1—试样, 2—传爆药柱, 3—钢支撑架, 4—镀银反射镜, 5—反射成像

Fig.1 Schematic diagram of experiment setup

1—sample, 2—primary explosive, 3—steel frame, 4—silvered mirror, 5—reflection imaging

2.3 实验原理

图 2 所示为 Mushroom 试验波形测试原理示意图。若没有反射镜,假设半球形炸药的输出波形在底片上完全成像,其测试波形应为图 2a 中所示的 AB 段,但实际测试时,由于受装配结构以及两侧发光较弱等影响,实际仅能有效获得图 2a 中所示的 CD 段波形,测试范围约在 70° 左右。且越往半球的两侧,波形叠加越严重,即使获得完整波形,两侧 20° 左右的输出波形完全重叠在 AB 和 CD 段之外,会给数据处理带来很大的误差。若采用反射镜,两侧 20° 左右的测试输出波形被有效放大到 DEF 段图 2d,放大了约 $5 \sim 6$ 倍,波形叠加现象大大降低,数据处理更准确,可以获

得更大范围内半球形炸药件的输出波形时间差,从而全面评价半球形炸药件的作用性能。

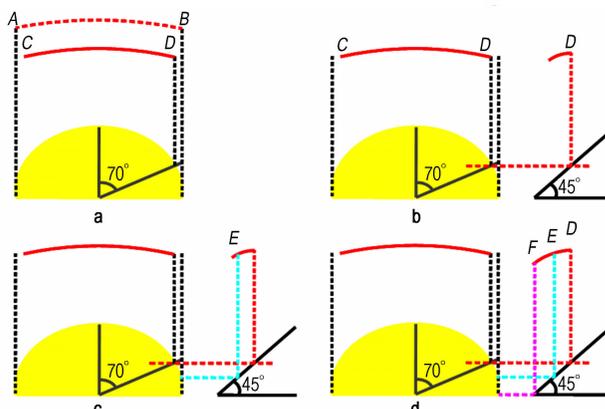


图 2 Mushroom 试验波形测试原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of principle of Mushroom test

2.4 数据处理方法

被测试炸药在小直径传爆药的驱动下起爆,由于传爆药的平面冲击波从半球的端面传入,压缩主炸药发生化学反应,并逐渐发展为散心球面爆轰波,通过高速扫描相机获得三个特征参数以表征炸药的拐角性能:爆轰波的出射角 θ_{ib} 、熄爆角 θ_{in} 及延迟时间(爆轰波透出炸药半球的波形时间差),测试结果原理如图 3 所示。半球炸药被起爆后,爆轰波在半球炸药中传播,通过爆轰波最先透出半球表面位置处的波形得出 θ_{ib} 。在距爆轰波传播方向较大的角度处,炸药半球内爆轰波将逐渐衰减为应力波,与爆轰波相比,应力波强度较弱,当应力波透出球面时,无法使硝酸钡发光或发光很弱,本研究以底片中硝酸钡无明显感光位置作为熄爆点位置,通过数学处理方法可获得相应的 θ_{in} 。爆轰波透出炸药半球各表面处的波形时间差为延迟时间。

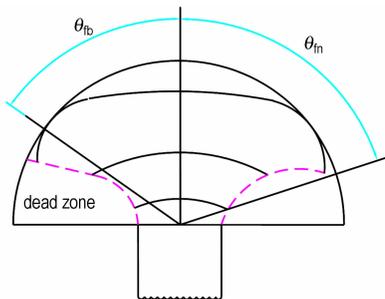


图 3 测试结果处理示意图

Fig.3 Schematic diagram of processing test result

通过大型万能工具显微镜及 Origin 数据处理软件对三种炸药半球爆轰波输出波形底片进行处理,在用显微镜读数时,取底片上炸药圆弧面为横坐标 x' ,

波形长度差为纵坐标 y , 读数时, 对纵坐标取一定的步长, 读出相应的横坐标值 x' , 再根据放大比, 得到

$$x = x' \beta \quad (1)$$

由于扫描速度为 $7.5 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 将纵坐标值换算成输出波形时间

$$t = \frac{y}{7.5} \quad (2)$$

3 结果与讨论

3.1 实验结果

实验获得三种炸药的爆轰波输出波形如图 4 所示。

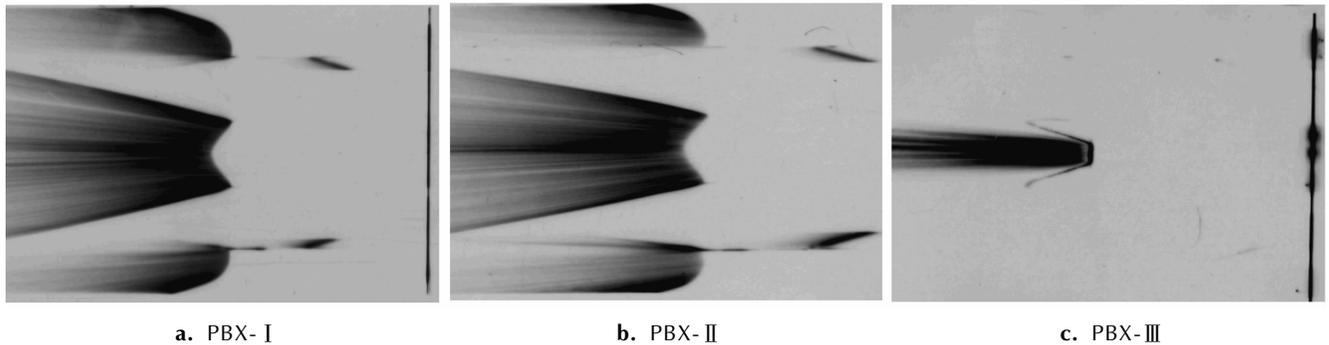


图 4 三种 PBX 爆轰波输出波形

Fig. 4 Detonation waveform of PBX-I, PBX-II and PBX-III

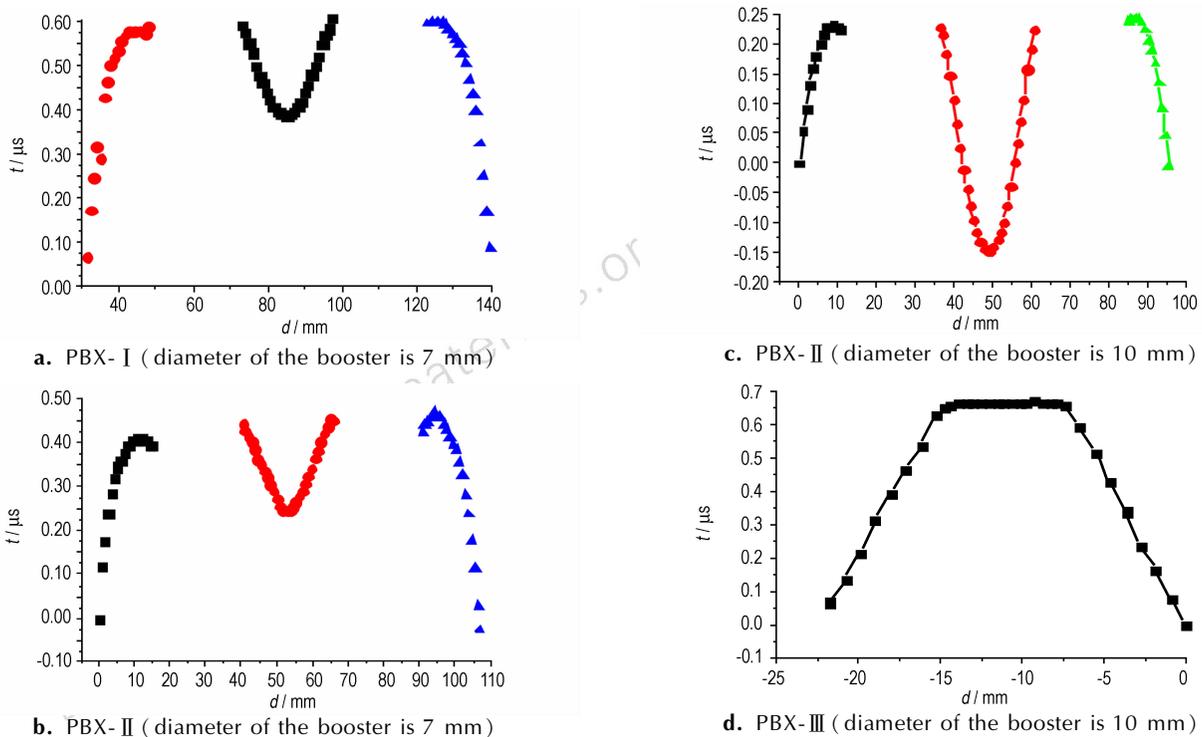


图 5 图 5 三种 PBX 在不同起爆直径下的爆轰波输出波形

Fig. 5 Waveform of the three PBXs with different initiating diameter

从图 4a 和图 4b 可见, 半球两侧的输出波形使硝酸钡发光很强, PBX-I 炸药和 PBX-II 炸药的熄爆角为 90° 。从图 4c 可以看出, PBX-III 半球炸药被起爆后, 在距爆轰波传播方向较大的角度炸药半球内爆轰波将逐渐衰减为应力波, 与爆轰波相比, 应力波强度较弱, 当应力波透出球面时, 无法使硝酸钡发光, 熄爆角较小。

结合实验测试结果和 2.4 节所述方法, 对三种炸药半球爆轰波输出波形底片进行处理, 结果如图 5 所示。

运用 2.4 节的方法对图 5a 和 5b 进行数据处理, 说明在起爆直径 7 mm 条件下, PBX-I 和 PBX-II 半球爆轰时, 其熄爆角均为 90° , 中间波形的延迟时间短,

左右两侧的波形延迟时间长。由图 5b 和图 5c 可见,随着起爆直径的增大,PBX-II 爆轰后的中间波形延迟时间变长,PBX-II 的熄爆角不变。同理对图 5d 分析,在起爆直径 10 mm 条件下,PBX-III 半球在爆轰时,左右两侧波形没有,因此,PBX-III 半球的出射角明显小,熄爆角也较小。

分析并计算获得三种炸药爆轰时的爆轰波透出炸药半球时的出射角、熄爆角和延迟时间,具体数值见表 1。

表 1 三种 PBX 的 Mushroom 试验结果

Table 1 Mushroom test results of three kinds of PBX

explosive	ρ /g · cm ⁻³	d /mm	θ_{ib} /(°)	θ_{in} /(°)	t /ns
PBX-I	1.865	7	75.5°	90°	200
PBX-II	1.848	7	74.4°	90°	225
PBX-III	1.850	10	78.6°	90°	371
PBX-III	1.899	10	16.1°	60.4°	632

Note: ρ is density, d is initiating diameter, θ_{ib} is breakout angle, θ_{in} is failure angle, t is delay time.

3.2 分析讨论

从表 1 中可得到,在起爆直径 7 mm 条件下,PBX-I 的出射角为 75.5°,熄爆角为 90°,延迟时间为 200 ns,PBX-II 的出射角 74.4°,熄爆角为 90°,延迟时间为 225 ns,PBX-I 半球爆轰波出射角大于 PBX-II 半球的出射角,并且 PBX-II 炸药的爆轰波波形延迟时间比 PBX-I 的爆轰波波形延迟时间长,说明在相同试验条件下,PBX-I 的拐角性能优于 PBX-II,这是由于 PBX-II 中添加了 7% 的钝感 TATB,所以降低了炸药的能量。

在起爆直径 10 mm 条件下,PBX-II 的出射角为 78.6°,熄爆角为 90°,延迟时间为 371 ns,PBX-III 炸药的出射角为 16.1°,熄爆角为 60.4°,说明 TATB 基 PBX 比 HMX 基炸药的拐角性能差,结合图 5 可以得到,HMX 基炸药的爆轰波均能够发展为类似球形,此类炸药均具有较好的传爆特性,PBX-III 炸药拐角能力有限,传爆特性较差。由图 5d 中的两侧没有输出波形更能体现出 PBX-III 的拐角能力差,所以 HMX 为基的 PBX-II 的拐角性能优于 TATB 为基的 PBX-III。由表 1 可得,PBX-II 在起爆药直径 7 mm 下的出射角比起爆药 10 mm 直径下的出射角小,在起爆药直径 7 mm 下的延迟时间比起爆药 10 mm 直径下的延迟时间短,说明 HMX 为基的 PBX-II 随着起爆直径的增大,出射角增大。因此从 Mushroom 试验结果分析所得结

论:三种炸药的拐角性能优劣顺序为 PBX-I>PBX-II>PBX-III。这是由于 HMX 基炸药作为理想高能炸药的代,其能量高,感度高。TATB 为基的炸药耐高温、感度低,是具有极佳安全性能的钝感高能炸药,同时也带来一系列爆轰上的特殊性:难于起爆,起爆阈值较高,达到稳定爆轰的时间较长,所以爆轰传播的拐角能力有限。

4 结论

(1)采用 Mushroom 试验,对 HMX 基和 TATB 基的三种 PBX 的拐角性能进行了研究,获得了在起爆直径 7 mm 下的 PBX-I 和 PBX-II 的拐角性能参数及起爆直径 10 mm 下的 PBX-II 和 PBX-III 的拐角性能参数。在相同起爆直径 7 mm 条件下,在 HMX 基 PBX (PBX-I) 中加入 7% 的 TATB (PBX-II),其出射角变小,延迟时间变长,说明 PBX-I 的拐角性能优于 PBX-II。在相同起爆直径 10 mm 条件下,炸药中含有的 85% HMX 全部被 TATB 取代时,其出射角大幅度减小,延迟时间变长,说明 PBX-II 的拐角性能优于 PBX-III。

(2)与 HMX 基 PBX 相比,纯 TATB 基 PBX 炸药出射角和熄爆角都明显降低,表明 HMX 基 PBX 的拐角性能优于 TATB 基 PBX。三种炸药的拐角性能优劣顺序为 PBX-I > PBX-II > PBX-III,冲击波感度由高到低的顺序为 PBX-I > PBX-II > PBX-III,拐角性能与冲击波感度规律一致。

参考文献:

- [1] Cox M, Campbell A W. Corner-turning in TATB [C] // Seventh Symposium (International) on Detonation. Dahlgren: Office of Naval Research, 1981: 624-633.
- [2] Hill L G, Seitz W L, Forest C A, et al. High explosive corner turning performance and LANL mushroom test [C] // Tenth American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Melville: American Institute of Physics, 1998: 751-754.
- [3] ZHAO Feng, WEI Yu-zhang. The divergence detonation Propagation in dlastic-bonded TATB [C] // In: ZHANG Guan-ren, HUANG Shi-hui, eds. The Proceedings of the 2nd International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effect. Chengdu, China: Sichuan University Press, 1992: 133-137.
- [4] 何洋扬, 龙源. B 炸药爆轰波拐角传播的三维数值模拟 [J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 63-66.
HE Yang-yang, LONG Yuan. Three dimensional numerical simulation of detonation wave propagation on corner-turning of composition B [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(2): 63-66.
- [5] Tarver C M. Corner turning and shock desensitization experi-

- ments plus numerical modeling of detonation waves in the triminitrobenzene based explosive LX-17 [J]. *J Phys Chem A*, 2010, 114(8): 2727–2736.
- [6] 黄毅民, 鲁斌, 韩勇. TATB 基 PBX 炸药拐角实验与数值模拟 [C] // 第八届全国爆炸力学学术会论文集, 2007: 55–57.
- HUANG Yi-min, LU Bin, HAN Yong. Corner test and numerical simulation of TATB-based PBX explosive [C] // Proceedings of the 10th National Conference on Explosion Mechanics, 2007: 55–57.
- [7] 李晓刚, 焦清介, 温玉全. 超细钝感 HMX 小尺寸拐角装药爆轰延迟时间研究 [J]. 含能材料, 2008, 16(5): 621–624.
- LI Xiao-gang, JIAO Qing-jie, WEN Yu-quan. Delay time of detonation wave of superfine insensitive HMX charged in limited corner channel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2008, 16(5): 621–624.
- [8] 韩勇, 蒋治海, 黄毅民, 等. PBX-9404 和 PBX-9502 炸药拐角性能的数值模拟 [J]. 火炸药学报, 2011, 34(6): 30–66.
- HAN Yong, JIANG Zhi-hai, HUANG Yi-min, et al. Numerical simulation of corner turning of PBX-9404 and PBX-9502 explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(6): 30–66.
- [9] 李生才, 冯长根, 赵同虎. 拐角角度对爆轰波拐角效应的影响 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 289–294.
- LI Sheng-cai, FENG Chang-gen, ZHAO Tong-hu. The Influence of the angle of convex corner on the effect of detonation waves [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(4): 289–294.
- [10] Manfred Held. Corner-turning distance and detonation radius [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1989, 14: 157–161.
- [11] 王树山, 焦清介, 冯长根. 爆轰波转弯传播的延迟现象 [J]. 北京理工大学学报, 1994, 14(4): 337–340.
- WANG Shu-shan, JIAO Qing-jie, FENG Chang-gen. The time delay of detonation propagating in turning charge [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 1994, 14(4): 337–340.
- [12] 刘玉存, 王建华, 陆春荣, 等. HMX 粒度与爆轰波传播性能的关系研究 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(6): 562–566.
- LIU Yu-cun, WANG Jian-hua, LU Chun-rong, et al. Influences of particle size of HMX on detonation waves propagation of HMX [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(6): 562–566.
- [13] 李生才, 赵同虎, 冯长根. 约束条件对注装 TNT 中拐角效应的影响 [J]. 高压物理学报, 1998, 12(2): 156–159.
- LI Sheng-cai, ZHAO Tong-hu, FENG Chang-gen. The effect of the confinement condition upon the corner effect in cast TNT [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1998, 12(2): 156–159.
- [14] Clark Souers P, Andrew Hernandez, Chris Cabacungan, et al. Air gaps, size effect, and corner-turning in ambient LX-17 [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2009, 34: 32–40.
- [15] Frank Roeske, Clark Souers P. Corner turning of detonation waves in an HMX-based paste explosive [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2009, 25: 172–178.
- [16] Clark Souers P, Andreski Henry G, Jan Batteux, et al. Dead zones in LX-17 and PBX 9502 [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, 2: 89–97.
- [17] Clark Souers P, Andreski Henry G, et al. LX-17 Corner-Turning [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2004, 6: 359–367.
- [18] WEI Yu-zhang, ZHENG Pei-sen. The divergence and transmission of detonation wave in the TATB/HMX boosters [C] // OU Yu-xiang, FENG Chang-gen, ZHANG Bao-ping, eds. The Proceedings of the 17th International Pyrotechnics Seminar Combined with the 2nd International Symposium on Pyrotechnics and Explosive. Beijing, China: Beijing Institute of Technology Press, 1992: 864–870.
- [19] 王晓丽, 焦清介. 微/纳米含能薄膜材料的制备与应用研究 [J]. 含能材料, 2006, 14(2): 129–141.
- WANG Xiao-li, JIAO Qing-jie. Preparation and application of micron/nanometer energetic film materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2006, 14(2): 129–141.
- [20] 孙杰, 黄辉, 张勇, 等. TATB 原位包覆 HMX 的研究 [J]. 含能材料, 2006, 14(5): 330–332.
- SUN Jie, HUANG Hui, ZHANG Yong, et al. In-situ coating of TATB on HMX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2006, 14(5): 330–332.

Corner Performance of Detonation Waves in HMX-based and TATB-based PBX Explosives

GUO Xiang-li, HAN Yong, LU Xiao-jun, LI Zhi-peng

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: To study the corner performance of detonation waves for HMX-based and TATB-based polymer bonded explosive (PBX), the breakout angles, failure angles and delay time for PBX-I containing 95% HMX, PBX-II containing 85% HMX and 7% TATB, and PBX-III containing 95% TATB with initiating diameter of 7 mm and 10 mm were studied by Mushroom test. Results show that with initiating diameter of 7 mm, the breakout angle of PBX-I (75.5°) is slightly greater than that of PBX-II (74.4°), and the failure angles of PBX-I and PBX-II are 90° , and they are able to develop for similar spherical. It reveals that HMX-based PBX explosive has better corner performance. With initiating diameter of 10 mm, the breakout angles and failure angles are 78.6° and 90° for PBX-II and 16.1° and 60.4° for PBX-III, respectively. The breakout angles for HMX-based PBX increase with increasing the initiating diameter, and decreases when TATB is added in HMX-based explosive. The breakout angle decreases significantly as substituting all of HMX with TATB. The corner performance of detonation waves for the three kinds of explosive decreases in the order: PBX-I > PBX-II > PBX-III.

Key words: detonation wave; corner performance; TATB-based and HMX-based polymer bonded explosive (PBX)

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.003