

金属飞片起爆间隙对 TATB 基炸药到爆轰距离的影响

郭刘伟 刘宇思 王伟 何雨 桂毓林

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了获得间隙尺寸对金属飞片起爆 TATB 基钝感炸药到爆轰距离的影响特性, 采用激光测速技术及太赫兹波测速技术对不同间隙飞片起爆 TATB 基钝感炸药的动作过程开展实验研究, 获取了钛飞片在 0~20 mm 间隙内的速度发展历时、击靶速度及形貌, 给出了 TATB 基钝感炸药在不同间隙起爆下的到爆轰距离。结果表明: 随着起爆间隙的增大, TATB 基钝感炸药的到爆轰距离呈非单调变化特征, 与飞片速度所处阶段相关。飞片起爆炸药的五个速度阶段中, 处在飞片主体与层裂层融合完成阶段的飞片起爆能力最强, 隔层起爆次之, 层裂层发生前的速度衰减阶段与层裂层-飞片主体融合过程中的飞片起爆能力最弱。

关键词: TATB 钝感炸药; 到爆轰距离; 间隙尺寸; 飞片速度;

中图分类号: 0381:TJ55 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

引言

飞片起爆炸药作为一种高可靠性的起爆方式, 可以通过多级增压技术^[1-2]获取比接触起爆更高的冲击压力, 从而提高了下级装药的起爆可靠性^[3-5], 在武器装药爆炸序列中有着较为广泛的应用。

飞片起爆下级装药的能力与飞片的材料、尺寸、击靶速度、初始及击靶形貌等有关。由于飞片起爆炸药击靶波形的非平面性及以往实验技术的局限性^[6], 飞片起爆下级装药的冲击转爆轰过程不宜采用楔形药实验技术^[7]及电磁粒子速度计实验技术^[8], 相关的实验报道很少。研究人员常采用数值模拟方法对飞片起爆炸药的动作过程开展研究或者采用快响应速度测量系统对飞片的动作过程单独研究。吕军军等^[9]采用全光纤激光位移测速系统结合金属验证板的方式初步确定了钛飞片起爆 TATB 基钝感炸药的起爆速度阈值。郭俊峰等^[10-11]对叠氮化铜驱动不同飞片材料起爆 HNS-IV 炸药的起爆性能开展了实验及数值模拟研究, 指出了飞片尺寸及材料的力学性能(有效塑性失效应变、杨氏模量等)在起爆下级装药中的重要性。虞德水等^[12-13]采用双灵敏度激光速度干涉仪对两种炸药平面驱动紫铜飞片的速度历史进行了测量, 获取了不同飞行距离处的飞片速度值, 对比了两种始发药驱动飞片的能力。姜洋等^[14]采用自研的二维流体动力学程序对点起爆炸药驱动飞片的速度历史及击靶形貌进行了数值模拟研究, 较为深入地研究了飞片起爆下级装药的动力学过程。陈清畴等^[15-16]采用数值模拟方法对 HNS-IV 炸药驱动飞片的行为进行了多因素分析, 给出了飞片速度及形貌受飞片厚度、直径及初始形貌的影响规律。受限于爆炸序列结构的复杂性, 目前常采用下级装药下方放置验证板^[9]或者锰铜压力计^[17]等方式来研究待起爆炸药的爆轰状态, 这限制了对飞片起爆炸药爆轰过程的深入解读。

飞片起爆间隙作为爆炸序列设计中的重要因素, 直接影响着飞片的击靶速度及形貌, 且在 TATB 基钝感弹药的实战环境中, 该间隙可能发生改变, 从而影响预设的爆轰传递路径, 继而可能会影响爆炸序列的动作可靠性。故开展飞片起爆间隙对 TATB 基钝感炸药起爆过程的影响, 对飞片起爆炸药动力学过程的深入研究、高可靠性爆炸序列的设计及实战环境弹药起爆可靠性的评估, 均有着重要意义。

本文采用 1550 nm PDV (1550 nm Photon Doppler velocimetry, 1550 nm 激光多普勒测速) 技术^[18-19]及 TDV (Terahertz-wave Doppler interferometric velocimetry, 瞬态太赫兹波多普勒干涉测速) 技术

收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-09-10

第一作者: 郭刘伟 (1983-), 男, 理学博士, 副研究员, guoliuwei1@163.com

通讯作者: 何雨 (1987-), 男, 理学博士, 副研究员, hexiaoyu@mail.ustc.edu.cn

[20-21]对飞片在不同起爆间隙下起爆 TATB 基钝感炸药的金属飞片动作过程及炸药冲击转爆轰状态进行实验研究。探讨间隙对飞片的飞行速度、击靶形貌及速度分布、炸药的到爆轰距离的影响特性。

1 实验

1.1 实验装置

本研究包含两类实验装置及测试技术，分别见图 1~图 2。图 1 为炸药冲击转爆轰测量实验。雷管起爆传爆药，继而起爆主炸药，主炸药爆轰驱动下方惰性飞层变形运动，待飞层中心部位撞击待测炸药，冲击波在待测炸药内传播并发展为爆轰波。采用 TDV 测试技术对待测炸药的爆轰增长及传播行为进行测量，用以测量待测炸药的到爆轰距离及稳态爆轰波速。实验采用的传爆药为 JH-9005 (RDX/binder 97/3)，尺寸为 $\Phi 32 \times 11$ mm，密度为 1.644 g/cm^3 。主炸药 PBX-6 (TATB/RDX/binder 60/35/5) 的尺寸为 $\Phi 50 \times 12$ mm，密度为 1.816 g/cm^3 。主炸药下方的飞层材料为钛合金 TC11，厚度为 2 mm。待测炸药包括 PBX-6 和 PBXL-7 (TATB/AL/binder 70/25/5)，尺寸为 $\Phi 74 \times 36.5$ mm。L 为飞层飞行空间的长度即起爆间隙的大小。实验中设置五种尺寸，分别为 0 mm、0.35 mm、1 mm、4 mm 及 20 mm。

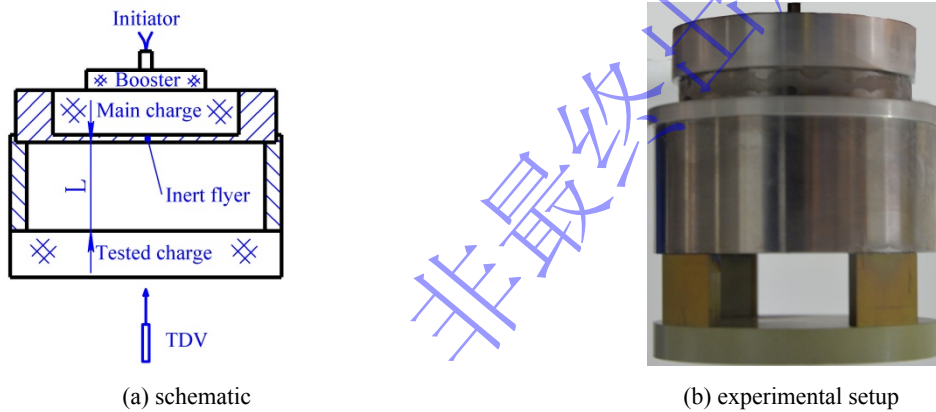


图 1 炸药冲击转爆轰测量实验

Fig.1 Experimental setup for the shock to detonation transition test

图 2 为炸药驱动飞片速度测量实验装置。采用 PDV 测试技术对飞片径向多位置处的飞行速度进行测量，用以研究飞片飞行过程中的形貌及速度分布。沿待测炸药半径方向，自中心等间距 3 mm 布置 9 个 PDV 探头。PDV 测速探头所用激光波长为 1550 nm。

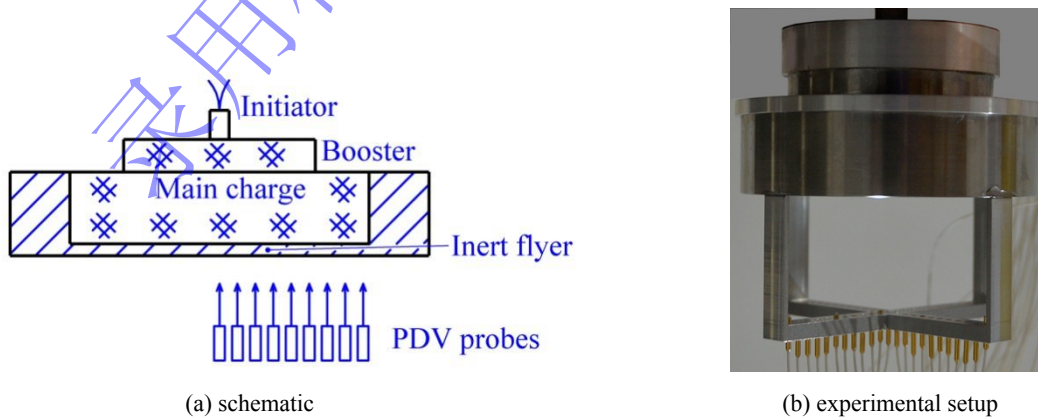


图 2 飞层速度测量实验

Fig.2 Experimental setup for the flyer velocity test

2 结果及分析

对 TDV 测量的信号进行频率分析^[20-21], 可以给出待测炸药内冲击转爆轰距离 RDTD (Run Distance To Detonation)^[7]及稳态爆轰传播速度。0~4 mm 间隙飞片起爆 PBX-6 炸药内冲击波/爆轰波的传播速度见图 3。可见, 待测炸药在飞片起爆转为稳态爆轰后的爆轰传播速度基本相同, 不受飞片起爆状态的影响。

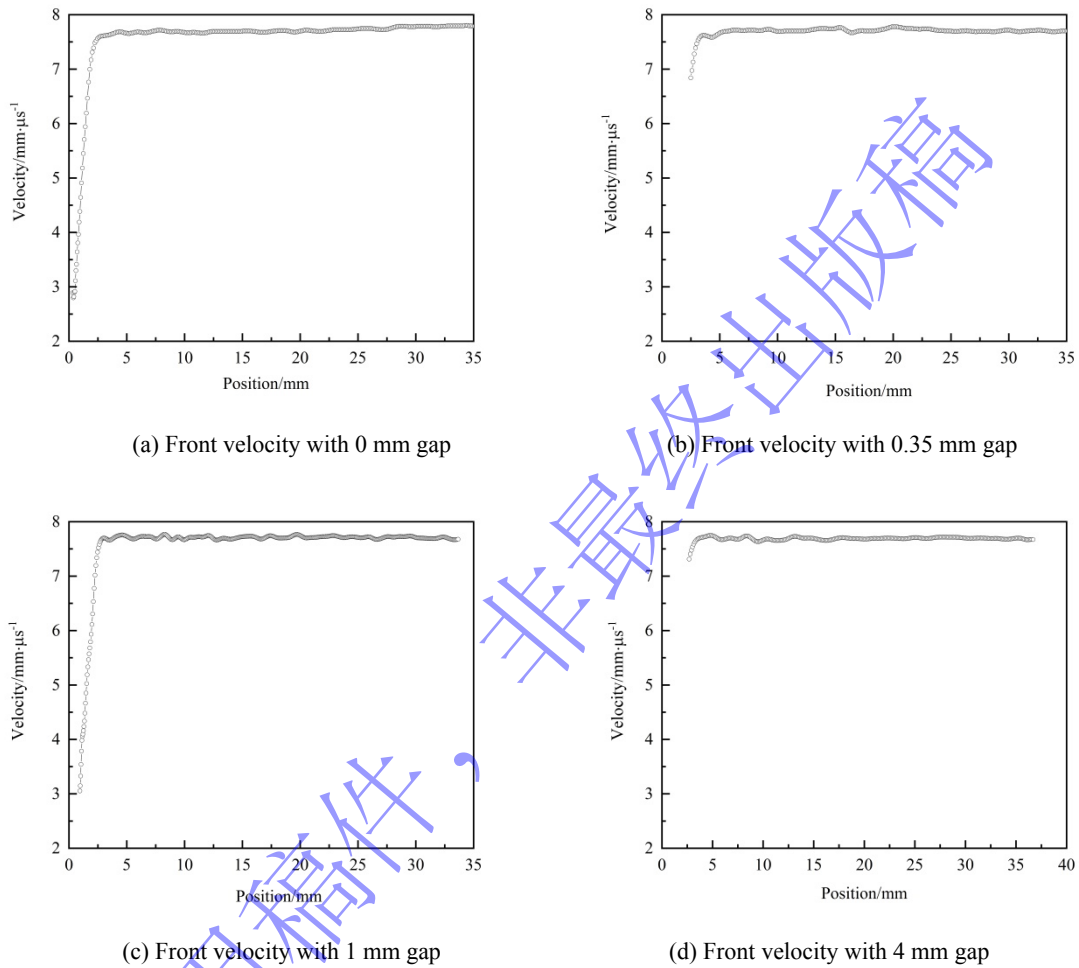


图 3 0~4 mm 间隙飞片起爆 PBX-6 炸药的冲击/爆轰波速度

Fig.3 The front velocity of PBX-6 initiated by flyer within 4 mm gap

0~4 mm 间隙飞片起爆 PBX-6 炸药的到爆轰距离对比见图 4。随着起爆间隙的增大, PBX-6 炸药的到爆轰距离并非单调变化, 且在 4 mm 间隙内, 飞片起爆炸药的到爆轰距离均大于隔层 (0 mm) 起爆结果, 这可能与撞击炸药时的飞片状态相关。

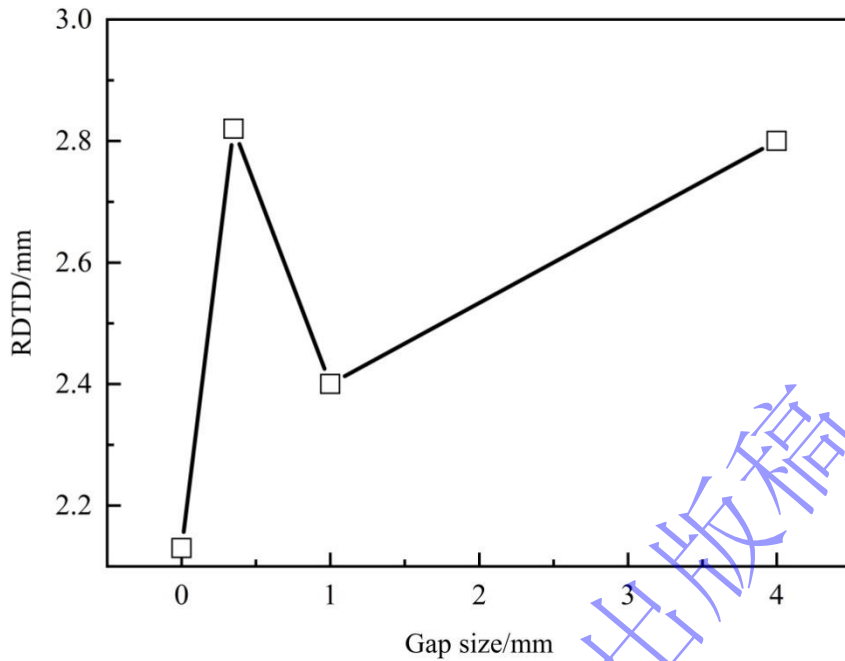


图4 间隙对飞片起爆 PBX-6 炸药到爆轰距离的影响

Fig.4 Run distance to detonation of PBX-6 initiated by flyer within different gap

在飞片速度测量实验中(图2),采用多点PDV探头对飞片径向不同位置处的轴向飞行速度进行了测量,典型的速度曲线见图5,可见,飞片在飞行过程中呈现出明显的多阶段特性^[21],分别为无间隙隔层起爆阶段S0,飞片开始变形的速度下降段S1,飞片外表面层裂层的自主飞行阶段S2;飞片主体追上层裂层并逐渐融合的阶段S3以及飞片主体与层裂层融合完成后整体飞行的阶段S4。

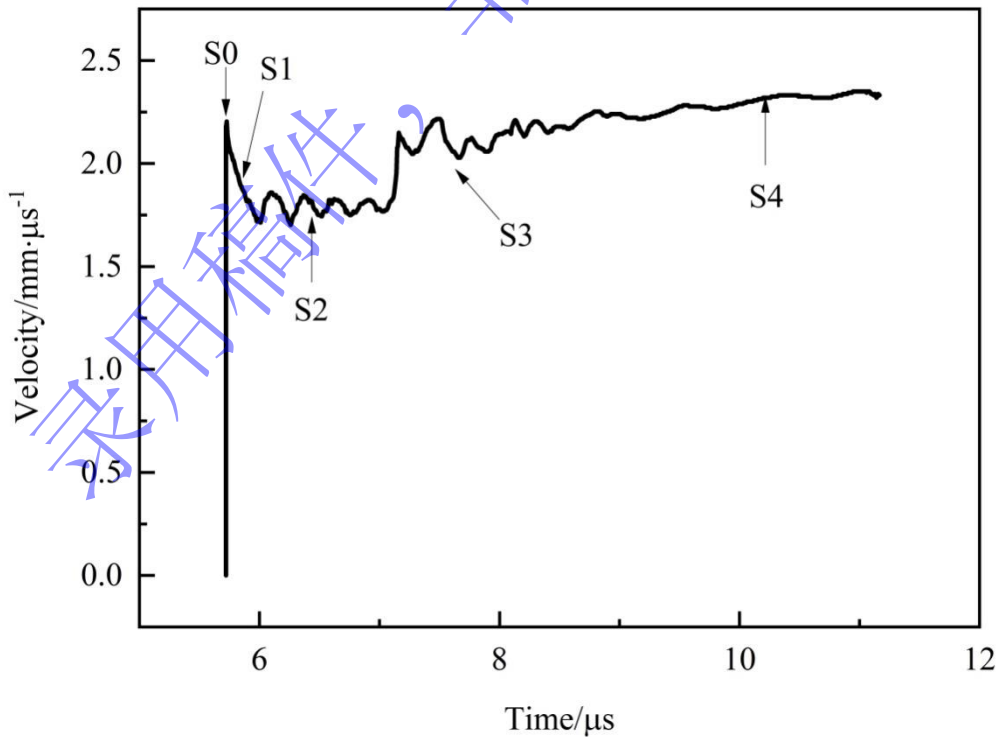


图5 爆轰驱动飞片的典型速度曲线

Fig.5 Typical velocity of flyer driven by explosives

对速度曲线进行处理,飞片经过不同起爆间隙,中心撞击待测炸药时的飞片形貌及速度分布见

图 6~图 7。随着起爆间隙的增大，飞片在中心区域的动作范围变大，在 4 mm 间隙时，半径 25 mm 范围内的飞片已完全动作并飞出。飞片中心撞击待测炸药时，仍主要为点接触撞击。从飞片的速度分布来看，在小间隙时，飞片较大半径处的速度可能高于中心区域，致使飞片的形貌得到整形，在 4 mm 间隙时，飞片中心区域的速度基本一致，飞片的形貌基本成型。随着间隙的增大，飞片中心的速度也非单调变化，4 mm 间隙飞片速度最高，0.35 mm 次之，1 mm 最低，这可能与飞片速度在图 5 中所处的阶段不同有关。

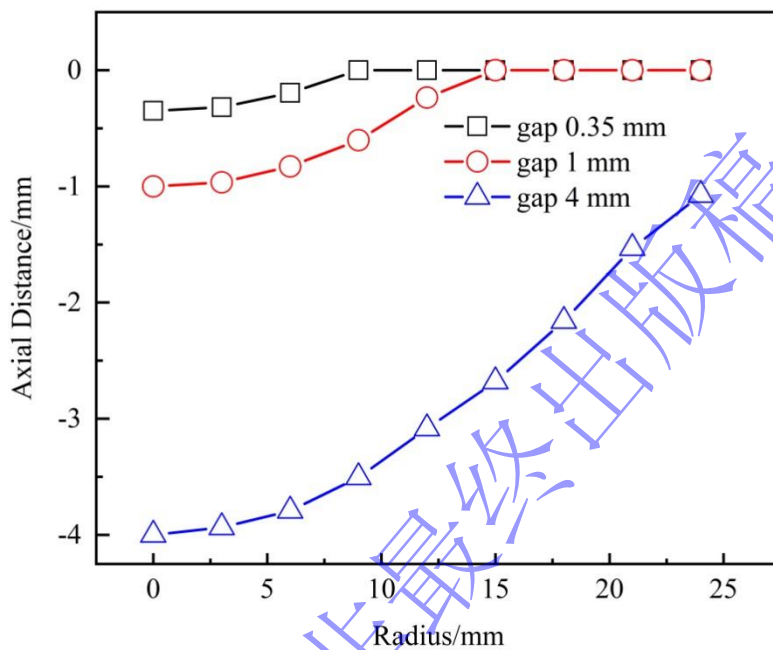


图 6 撞击炸药时的飞片形状

Fig.6 Shape of flyer impacted to the explosive

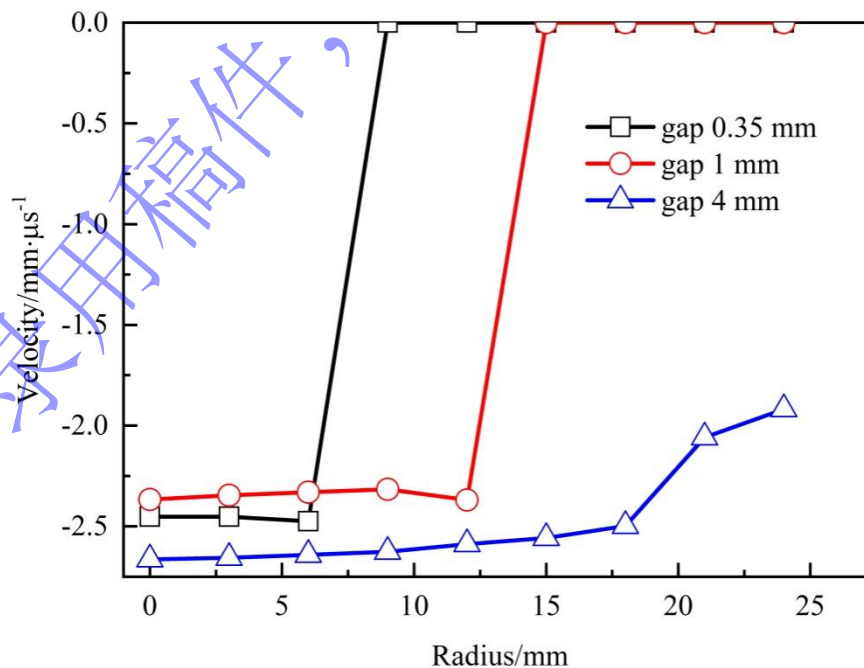


图 7 撞击炸药时的飞片速度分布

Fig.7 Velocity of flyer impacted to the explosive

将 4 mm 间隙内飞片的速度曲线进行处理，不同间隙处飞片撞击炸药时飞片速度所处的阶段见图

8. 结合图 4 分析可知, 0 mm 间隙即为隔层起爆方式, 即 S0 阶段, 此时的速度最高, 在 0~4 mm 的间隙范围内, 隔层起爆待测炸药的到爆轰距离最短。0.35 mm~4 mm 为典型的飞片起爆方式, 其中, 0.35 mm 间隙飞片撞靶时的速度处于 S1 阶段, 飞片仍为完整体, 但其速度低于 0 mm 隔层起爆结果, 故 0.35 mm 间隙飞片起爆待测炸药的到爆轰距离长于 0 mm 隔层起爆结果。1 mm 间隙飞片撞靶时的速度处于层裂层自主运动阶段 S2, 速度值均低于前两者结果, 但此状态下飞片撞击待测炸药的到爆轰距离反而短于 0.35 mm 间隙结果, 但仍长于 0 mm 隔层起爆结果, 这可能与层裂层自主飞 S2 阶段中飞片撞击炸药的短脉冲状态相关。在一定的压力幅值条件下, 短脉冲加载中的高频震荡能量更易使某些炸药颗粒的能量得到释放, 爆轰成长更快。不同脉宽冲击波加载下, 炸药的冲击起爆机制跨尺度耦合, 行为较为复杂, 需进一步的探讨。4 mm 间隙飞片撞靶时的速度处于飞片主体与层裂层的融合阶段 S3, 此时的速度高于上述飞片结果, 但低于 0 mm 隔层方式, 此时待测炸药的到爆轰距离长于 1 mm 间隙撞靶结果, 略短于 0.35 mm 间隙结果, 这可能是因为融合过程是介于自主飞层裂层与一体化飞片的中间态, 单纯的速度提升对起爆能力的增强效果有限。且在融合过程中, 可能存在层裂层的前期冲击减敏效应, 导致后续主体飞片撞击待测炸药时起爆状态不佳的情况。0~4 mm 间隙飞片起爆 PBX-6 的到爆轰距离结果表明, 在 0~4 mm 间隙飞片起爆下级装药的能力方面, 0 mm 隔层方式 (S0) 最高, 飞片的层裂层自主飞阶段 S2 次之, 飞片主体与层裂层的融合阶段 S3 与小间隙的 S1 阶段相当。

随着飞片主体与层裂层融合完成, 飞片持续飞行至更高速度的 S4 阶段, 其起爆能力会更高, 这点也被实验结果所验证。在炸药冲击转爆轰测量实验中, 采用 PBX-6 炸药驱动 TC11 飞片经过 0 mm~20 mm 间隙起爆 PBXL-7 炸药, PBXL-7 炸药的到爆轰距离见图 9。与 PBX-6 结果类似, 在 PBXL-7 炸药的冲击转爆轰测量实验中, 1 mm 间隙的飞片 S2 阶段起爆能力弱于 0 mm 隔层起爆能力, 但 20 mm 间隙的飞片 S4 阶段起爆能力强于隔层起爆能力。故在飞片的起爆能力方面, 大间隙的飞片 S4 阶段起爆能力最强, 隔层 S0 次之, 飞片层裂层 S2 阶段再次之, 飞片 S1 与 S3 阶段相当, 起爆能力不理想。据此分析, 飞片起爆下级装药的能力不仅与飞片的击靶速度相关, 同时也与飞片的击靶形貌及结构特性相关, 其作用机制可能较为复杂。

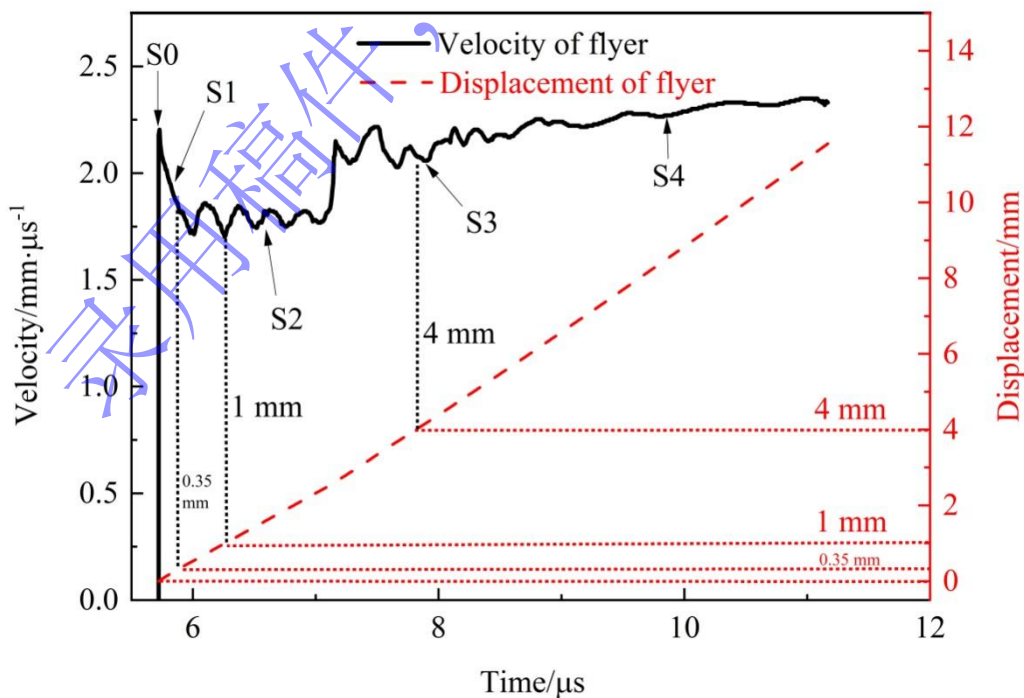


图 8 0~4 mm 间隙撞击炸药时的飞片状态

Fig.8 Status of the flyer impacted to the explosive within 4 mm gap

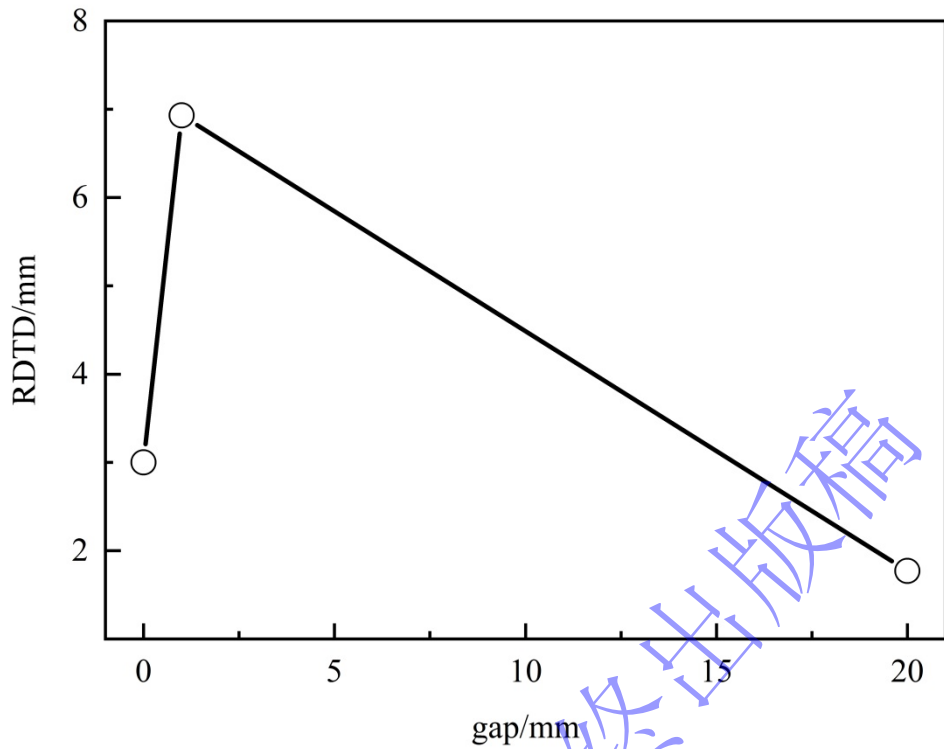


图9 间隙对飞片起爆 PBXL-7 炸药到爆轰距离的影响

Fig.9 Run distance to detonation of PBXL-7 initiated by flyer within different gap

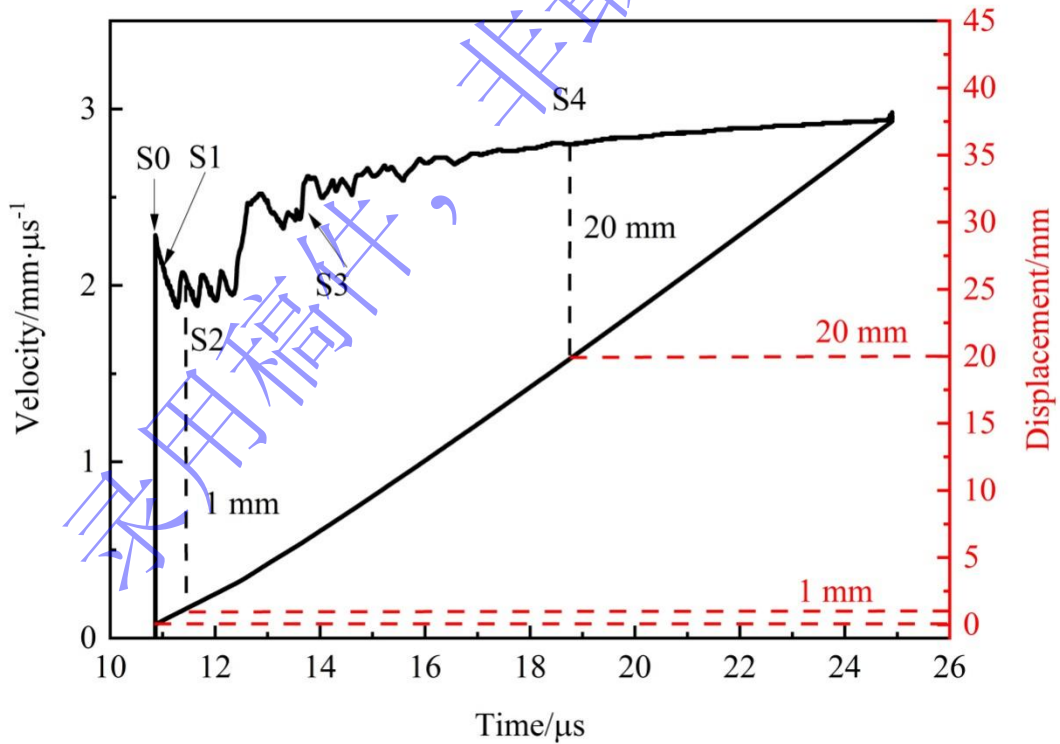


图10 0~20 mm 间隙撞击 PBXL-7 炸药时的飞片状态

Fig.10 Status of the flyer impacted to the explosive PBXL-7 within 20 mm gap

结论

随着间隙尺寸的增大, 飞片起爆 TATB 基钝感炸药的到爆轰距离呈非单调变化特征, 与飞片速度所处的阶段相关。在目前的实验范围内, 飞片起爆炸药的击靶速度分为五个阶段, 分别为隔层起爆 S0 阶段、层裂层前的速度衰减段 S1、层裂层自主飞 S2、层裂层与飞片主体融合阶段 S3 及融合完成的 S4 阶段, 其中处在 S4 阶段的飞片起爆能力最强, 隔层起爆 S0 次之, 层裂层自主飞 S2 再次之, S1 及 S3 阶段最弱。飞片的击靶速度及结构特性相互耦合, 共同影响着飞片起爆下级装药的能力。

参考文献:

- [1] 孙承伟, 文尚刚, 赵峰. 多级炸药爆轰高速驱动技术的Gurney模型优化分析 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(4): 299-304. DOI:CNKI:SUN:BZCJ.0.2004-04-002.
- SUN C W, WEN S G, ZHAO F. An optimal analysis of multi-stage explosive accelerated high velocity flyers with the improved Gurney model [J]. Explosion and shock waves, 2004, 24(4):299-304. DOI:CNKI:SUN:BZCJ.0.2004-04-002.
- [2] 经福谦, 陈俊详. 动高压原理与技术 [M]. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社, 2005 年: 139-150.
- [3] Barbour R T. Pyrotechnics in industry [M]. USA: The King sport Press, 1981: 89.
- [4] Schimmel M L. Quantitative Understanding of Explosive Stimulus Transfer [M]. USA: NASA, 1973: 5.
- [5] Austing J L. The shock initiation of covered explosive and pyro-technic charge by flyer plate impact across an air gap II : results for composition A4 [C] // 15th Proceeding International Pyrotechnics Seminar, Boulder, Colorado USA, 1990.
- [6] 任志伟. 飞片冲击起爆炸药的数值模拟研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [7] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社, 2000 年: 421-426.
- [8] Richard L G, Russell J G, Scott M B, et al. Shock initiation of the tri-amino-nitro-benzene based explosive PBX 9502 cooled to -55°C [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112:074909-1-16. DOI: 10.1063/1.4757599.
- [9] 吕军军, 曾庆轩, 李明愉, 等. 起爆高密度 TATB 炸药的飞片速度阈值 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(1):125-128. DOI: CNKI:SUN:BZCJ.0.2014-01-023.
- LU J J, ZENG Q X, LI M Y, et al. Threshold impact velocity for detonation initiation in high-density TATB explosive by flyer [J]. Explosion and shock waves, 2014, 34(4):125-128. CNKI:SUN:BZCJ.0.2014-01-023.
- [10] 郭俊峰, 曾庆轩, 李明愉, 等. 叠氮化铜驱动飞片起爆 HNS-IV 的研究 [J]. 火工品, 2015, 6: 1-4. DOI: CDSTIC.MJQK.02169873.
- GUO J F, ZENG Q X, LI M Y, et al. Study on HNS-IV initiated by flyer driven by cupric azide [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2015, 6:1-4. DOI: CDSTIC.MJQK.02169873.
- [11] 郭俊峰, 曾庆轩, 李明愉, 等. 飞片材料对微装药驱动飞片形貌的影响 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(3): 315-320. DOI: 10.11858/gywlxb.2017.03.014.
- GUO J F, ZENG Q X, LI M Y, et al. Influence of Flyer Material on Morphology of Flyer Driven by Micro Charge [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(3): 315-320. DOI: 10.11858/gywlxb.2017.03.014.
- [12] 虞德水, 赵锋, 谭多望, 等. JOB-9003和JB-9014炸药平面爆轰驱动飞片的对比研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 12(2): 140-144. DOI: CNKI:SUN:BZCJ.0.2006-02-007.
- YU D S, ZHAO F, TAN D W, et al. Experiment-tal studies on detonation driving behavior of JOB-9003 and JB-9014 slab explosives [J]. Explosion and Shock Waves. 2006, 12(2): 140-144. DOI: CNKI:SUN:BZCJ.0.2006-02-007.
- [13] 虞德水, 赵锋, 彭其先, 等. 激光速度干涉仪在大板实验中的应用研究 [J]. 含能材料, 2011, 19(5):532-535. DOI:10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.011.
- YU D S, ZHAO F, PENG Q X, et al. Application of VISAR in Bigplate Experiment [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(5):532-535. DOI:10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.011.

- [14] 姜洋, 孙承纬, 李平, 等. 点起爆炸药驱动平板飞片运动的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(4): 261-265. DOI: CNKI:SUN:GYWL.0.2009-04-004.
- JIANG Y, SUN C W, LI P, et al. Numerical simulation of the motion of flyer driven by slab explosive initiated at centered point [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics. 2009, 23(4): 261-265. DOI: CNKI:SUN:GYWL.0.2009-04-004.
- [15] 陈清畴, 刘刚, 马骏. 飞片初始形状对雷管起爆能力的影响 [J]. 火工品, 2020, 1: 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.01.002.
- CHEN Q C, LIU G, MA T. Effects of the Flyer Shape on Detonator Output [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020, 1:6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.01.002.
- [16] 陈清畴, 马骏, 李勇. HNS-IV炸药驱动飞片速度及形态的数值模拟 [J]. 含能材料, 2018, 10: 814-819. DOI: 10.11943/CJEM2018054.
- CHEN Q C, MA T, LI Y. Numerical Simulation of Velocity and Shape of the Flyer Driven by HNS-IV Explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 10:814-819. DOI: 10.11943/CJEM2018054.
- [17] 贺翔, 杨立欣, 董海平, 等. 叠氮化铅驱动飞片起爆下级装药的试验研究 [J]. 火箭与制导学报, 2023, 43(1): 63-69. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2023.01.009.
- HE X, YANG L X, DONG H P, et al. Experimental study on flyer driven by lead azide to cetonate booster charge [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2023, 43(1): 63-69. DOI:10.15892/j.cnki.djzdx.2023.01.009.
- [18] TARVER C M. Detonation reaction zones in condensed explosives[C] // Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, NY, AIP, 2006, 845(1):1026-1029.
- [19] GUSTAVSEN R L, BARTRAM B D, SANCHEZ N J. Detonation wave profiles measured in plastic bonded explosives using 1550 nm Photon Doppler Velocimetry [C] // Proceedings of the 16th Conference of the American-Physical-Society-Topical-Group on Shock Compression of Condensed Matter, NY, AIP, 2009,1195: 253-256.
- [20] ZHAI Z H, LIU Q, GUO L W, et al. Design of terahertz-wave Doppler interferometric velocimetry for detonation physics[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(16):161102. DOI:10.1063/1.5142415.
- [21] 郭刘伟, 翟召辉, 韩秀凤, 等. 环境温度对TATB/RDX传爆药起爆及驱动性能的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(01): 012301-1-10.
- GUO L W, ZHAI Z H, HAN X F, et al. Temperature effect on the shock initiation and metal accelerating behavior for TATB/RDX-based explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(01): 012301-1-10.

The gap size effect of metal flyer on the run distance to detonation for TATB based explosives

GUO Liuwei, LIU Yusi, WANG Wei, HE Yu, GUI Yulin

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: In order to discuss the gap size effect of metal flyer to the initiating behavior for TATB based explosives, initiation experiments for PBX-6 and PBXL-7 were performed. The target velocity and shape of the flyer to explosives were obtained using by 1550nm Photon Doppler velocimetry. The running distance to detonation of explosive samples were gained by Terahertz-wave Doppler interferometric velocimetry at the center point. The relationship between the experiment data captured above were analyzed. It reveals that the running distance to detonation of the TATB based explosive change non-monotonously with the increase of the gap size. With the increase of gap size from zero to 20 mm, the target velocity of the flyer stay at the gap layer initiation stage named S0, the velocity declining stage named

S1 for the flyer, the free running stage of spallation named S2, the remerging stage of the flyer with its spallation named S3 and united as one flyer stage named S4 respectively. The running distance to detonation for the TATB based explosive is the smallest when the flyer velocity comes to the stage S4, the result at the stage S0 which means the gap layer initiating status is the next, the results at the velocity declining stage S1 and remerging stage S3 are the worst together. These experiment results suggest that the initiating performance of TATB based explosives impacted by the flyer is not always better than gap layer results. The initiation mechanism of flyer to explosives with different gap sizes is probably related to the target velocity together with the structure of flyer. The simplex target velocity rising of flyer can't always make the running distance to detonation of TATB based explosives shorter. The initiation mechanism of TATB based explosives impacted by flyer is more complex than the gap layer, which needs much experiment data and numerical simulation to be discussed further.

Keywords: TATB based explosive; running distance to detonation; gap size; flyer velocity

非最终出版稿

录用稿件，