

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0163

# 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 621999)

**摘要:** 为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, 采用激光测速技术和太赫兹波测速技术, 对不同间隙飞片起爆 TATB 基钝感炸药的起爆过程开展了实验研究, 获得了钛飞片在 0~20 mm 间隙内的速度发展历程、击靶速度及形貌, 给出了 TATB 基钝感炸药在不同起爆间隙下的到爆轰距离。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, 与飞片的速度及结构特性相关。飞片起爆炸药的 5 个速度阶段中, 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及层裂层与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: O381; TJ55 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## The effect of the flying gap of the metal flyer on the run distance to detonation of TATB-based explosives

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

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

**Abstract:** To discuss the flying gap effect of the metal flyer on 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 a 1 550 nm photon Doppler velocimetry. The running distance to detonation (RDTD) of explosive samples was gained by a Terahertz-wave Doppler interferometric velocimetry at the center point. The relationship between the experiment data captured above was analyzed. It reveals that the running distance to detonation of the TATB-based explosive changes non-monotonously with the increase of gap. With the gap increasing from zero to 20 mm, there are five stages. The initial stage is named S0, the flyer velocity declining stage is named S1, the free running stage of spallation is named S2, the remerging stage when the main flyer catches up and remerging with its spallation layer is named S3, and the stage when the main flyer and spallation are united as one is named S4. The RDTD for the TATB-based explosive is the smallest when the flyer velocity comes to stage S4, the RDTD at stage S0 is the next, and the RDTD 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 the gap layer results. The initiation mechanism of explosives by flyer under different gaps is probably related to the target velocity together with the structure of the 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, requiring much experiment data and numerical simulation for further discussion.

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

\* 收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-09-10

第一作者: 郭刘伟(1983—), 男, 博士, 副研究员, [guoliuwei1@163.com](mailto:guoliuwei1@163.com)

通信作者: 何雨(1987—), 男, 博士, 副研究员, [hexiaoyu@mail.ustc.edu.cn](mailto:hexiaoyu@mail.ustc.edu.cn)

飞片起爆炸药是一种高可靠的起爆方式,可以通过多级增压技术<sup>[1-2]</sup>获取比接触起爆更高的冲击压力,从而提升下级装药的起爆可靠性<sup>[3-5]</sup>,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、初始及击靶形貌等相关。受限于飞片起爆炸药的击靶波形的非平面性和现有实验技术<sup>[6]</sup>,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<sup>[7]</sup>和电磁粒子速度计实验技术<sup>[8]</sup>,相关的实验报道很少。研究人员常采用快响应速度测量系统或数值模拟方法对飞片起爆炸药的起爆过程开展研究。吕军军等<sup>[9]</sup>结合全光纤激光位移测速系统和金属验证板,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<sup>[10-11]</sup>通过实验和数值模拟方法研究了叠氮化铜驱动不同飞片材料撞击 HNS-IV 炸药的起爆性能,指出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<sup>[12-13]</sup>采用双灵敏度激光速度干涉仪测量了 2 种炸药平面驱动紫铜飞片的速度,对比了 2 种始发药驱动飞片的能力。姜洋等<sup>[14]</sup>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及击靶形貌进行了数值模拟,研究了飞片起爆下级装药的动力学过程。陈清畴等<sup>[15-16]</sup>对 HNS-IV 炸药驱动飞片的行为进行了数值模拟研究,探索了飞片厚度、直径及初始形貌对飞片速度和形貌的影响。鉴于爆炸序列结构的复杂性,目前,常通过在下级装药下方放置验证板<sup>[9]</sup>或者锰铜压力计<sup>[17]</sup>等方式研究待起爆炸药的爆轰状态,极大限制了对飞片起爆炸药的爆轰过程的深入理解。

作为爆炸序列设计中的重要因素,飞片起爆间隙直接影响飞片的击靶速度及形貌,并且,在 TATB 基钝感弹药的实战环境中,该间隙可能发生变化,改变预设的爆轰传递路径,从而影响爆炸序列的动作可靠性。因此,开展飞片起爆间隙对 TATB 基钝感炸药起爆过程的影响研究,有助于深入理解飞片起爆炸药的动力学过程、设计高可靠性的爆炸序列以及评估实战环境中弹药起爆的可靠性。

本文中,采用 1 550 nm 激光多普勒测速(1 550 nm photon Doppler velocimetry, 1 550 nm PDV)<sup>[18-19]</sup>及瞬态太赫兹波多普勒干涉测速(terahertz-wave doppler interferometric velocimetry, TDV)技术<sup>[20-21]</sup>对飞片在不同间隙下起爆 TATB 基钝感炸药的金属飞片动作过程及炸药的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。

## 1 实验装置

图 1 为炸药冲击转爆轰实验装置。雷管起爆传爆药,继而起爆主炸药,在主炸药的爆轰驱动下,惰性飞层变形运动,飞层的中心部位撞击待测炸药后,冲击波在待测炸药内传播并发展为爆轰波。采用 TDV 技术测量待测炸药的爆轰增长、到爆轰距离和稳态爆轰波速。实验中,传爆药为 JH-9005(RDX/binder 97/3),尺寸为 $\varnothing 32 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ ,密度为  $1.644 \text{ g/cm}^3$ 。主炸药为 PBX-6(TATB/RDX/binder 60/35/5),尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ,密度为  $1.816 \text{ g/cm}^3$ 。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),尺寸均为 $\varnothing 74.0 \text{ mm} \times 36.5 \text{ mm}$ 。 $L$ 为飞层的飞行长度,即起爆间隙的大小,设置 5 种不同的起爆间隙,分别为 0、0.35、1.00、4.00 和 20.00 mm。

图 2 为测量飞片速度的实验装置。采用 PDV 技术测量飞片径向位置处的飞行速度,分析飞片在飞行过程中的形貌和速度。自中心沿待测炸药半径方向,共布置 9 个 PDV 探头,相邻探头间距 3 mm,PDV 测速探头所用激光波长为 1 550 nm。

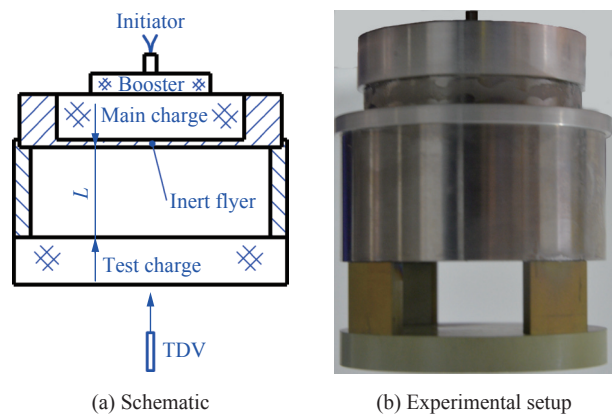


图 1 炸药冲击转爆轰的实验装置

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

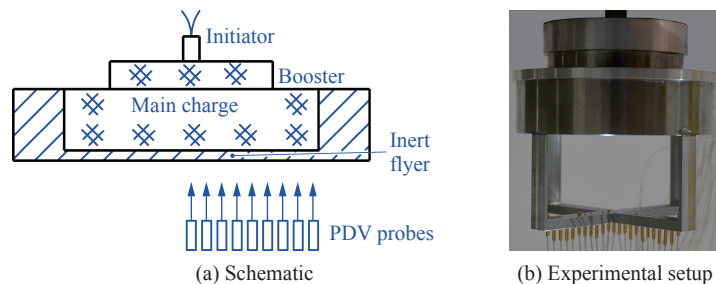


图 2 测量飞层速度的实验装置

Fig. 2 Experimental setup for the flyer velocity test

## 2 结果

对 TDV 测量的信号进行频率分析<sup>[20-21]</sup>, 计算待测炸药的到爆轰距离 (running distance to detonation, RDTD)<sup>[7]</sup> 和稳态爆轰传播速度。起爆间隙为 0~4.00 mm 时, 飞片起爆 PBX-6 炸药内的冲击/爆轰波的传播速度如图 3 所示。可见, 飞片起爆待测炸药后的稳态爆轰传播速度基本相同, 不受飞片起爆状态的影响。

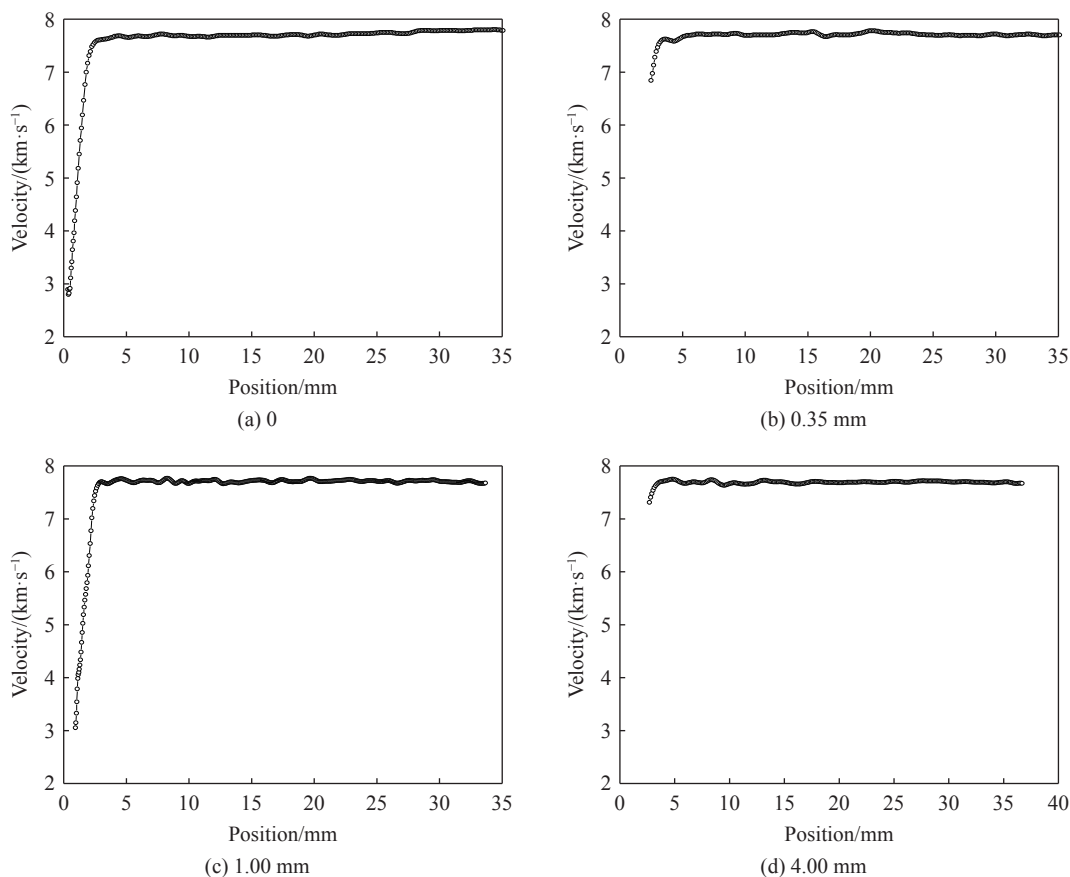


图 3 起爆间隙为 0~4 mm 时飞片起爆 PBX-6 炸药的冲击/爆轰波速度

Fig. 3 The shock or detonation front velocity of PBX-6 initiated by flyer with a gap of 0-4 mm

起爆间隙为 0~4.00 mm 时, 飞片起爆 PBX-6 炸药的到爆轰距离如图 4 所示。可见, 随着起爆间隙的增大, PBX-6 炸药的到爆轰距离呈非单调变化, 并且在 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。

图 5 为飞片在径向不同位置处的轴向飞行速度的典型曲线。可见, 飞片在飞行过程中呈现出明显的多阶段特性<sup>[21]</sup>, 即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。

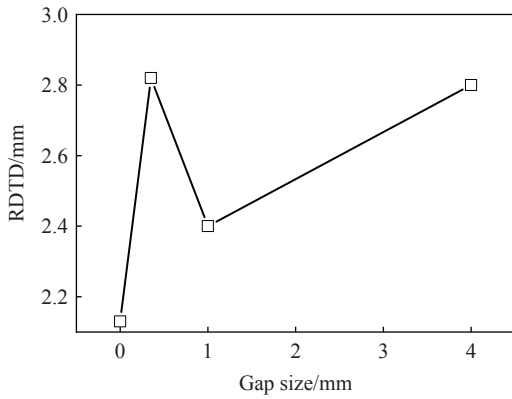


图 4 间隙对飞片起爆 PBX-6 炸药到爆轰距离的影响  
Fig. 4 Running distance to detonation of PBX-6 initiated by the flyer with different gap

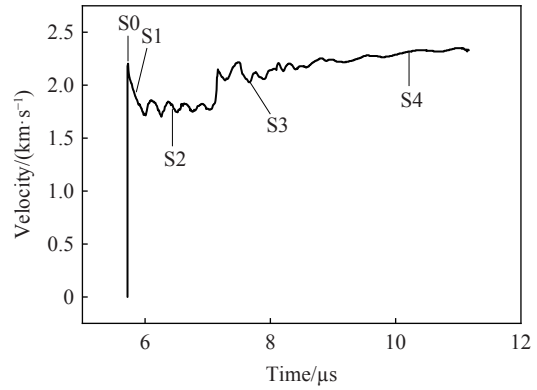


图 5 爆轰驱动飞片的典型速度曲线  
Fig. 5 Typical velocity of the explosive-driven flyer

图 6~7 为不同的起爆间隙工况下飞片中心撞击待测炸药时的飞片形貌及速度分布。随着起爆间隙的增大, 飞片在中心区域的动作范围变大, 起爆间隙为 4.00 mm 时, 半径 25 mm 内的飞片已完全动作并飞出。飞片中心撞击待测炸药时, 主要为点接触撞击。由图 7 可知: 起爆间隙较小时, 离中心较远处的飞片速度高于中心区域, 飞片的形貌得到整形; 起爆间隙为 4.00 mm 时, 离中心较远和较近处的飞片速度基本一致, 飞片的形貌基本成形。随着起爆间隙的增大, 飞片中心的速度呈非单调变化, 起爆间隙为 4.00 mm 时飞片中心速度最高, 0.35 mm 时次之, 1.00 mm 时最低。

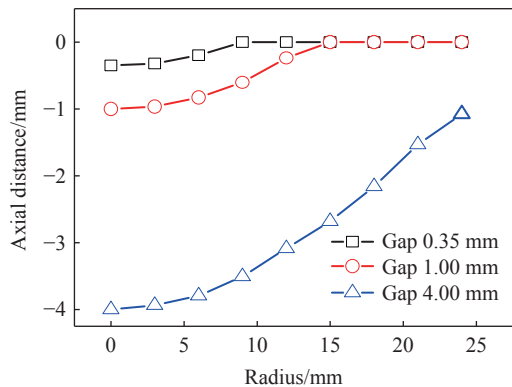


图 6 飞片中心撞击炸药时的飞片形貌  
Fig. 6 Shape of the flyer when impacting the center of explosive

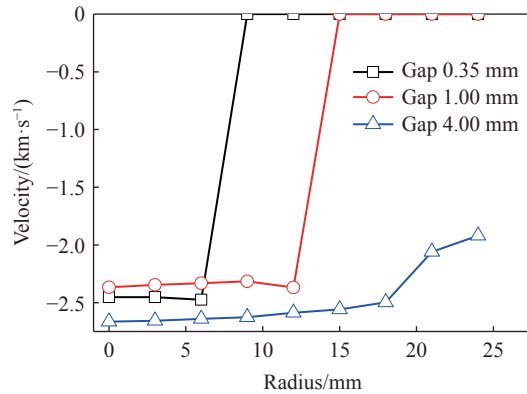


图 7 飞片中心撞击炸药时的飞片速度分布  
Fig. 7 Velocity of the flyer when impacting the center of explosive

图 8 为不同的起爆间隙工况下飞片撞击炸药时飞片速度所处的阶段。结合图 4 和图 8 可知: 起爆间隙为零时, 飞片处于隔层起爆阶段(S0), 此时的飞片速度最高; 起爆间隙小于 4.00 mm 时, 隔层起爆待测炸药的到爆轰距离最短。起爆间隙为 0.35~4.00 mm 时, 飞片为处于典型的速度下降、层裂和融合阶段。其中, 起爆间隙为 0.35 mm 工况下, 飞片撞靶时处于速度下降段(S1), 飞片保持完整, 相较于隔层起爆, 其飞片速度更低, 待测炸药的到爆轰距离更长。起爆间隙为 1.00 mm 工况下, 飞片撞靶时处于层裂层

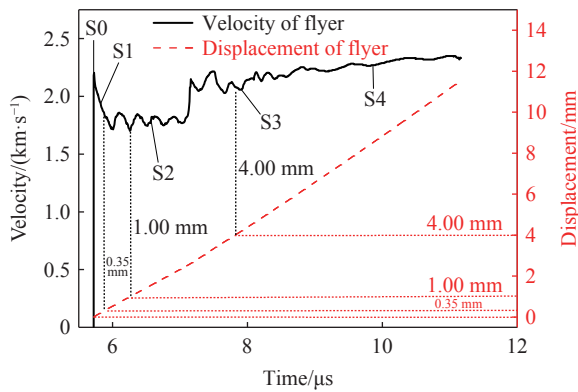


图 8 0~4 mm 间隙飞片撞击炸药时的飞片状态  
Fig. 8 Status of the flyer when impacting explosive with a gap of 0~4 mm

自主运动阶段(S2),其飞片速度值低于前2种工况。起爆间隙为4.00 mm的工况下,飞片撞击时处于飞片主体与层裂层的融合阶段(S3),其飞片速度高于起爆间隙为0.35和1.00 mm的工况,但低于隔层起爆工况。关于待测炸药的到爆轰距离,起爆间隙为0.35 mm时最长,4.00 mm时次之,1.00 mm时最低,但仍长于隔层起爆工况。在S2(起爆间隙为1.00 mm)阶段,飞片撞击炸药的冲击波为短脉冲,在一定的压力条件下,短脉冲加载的高频振荡能量使某些炸药颗粒的能量得到充分释放,爆轰增长更快。在S3阶段,飞片速度提升对起爆能力的增强效果有限,并且,层裂层的前期冲击可能存在减敏效应,导致后续主体飞片撞击待测炸药时的起爆状态不佳。因此,起爆间隙小于4.00 mm时,S0阶段的飞片起爆下级装药的能力最高,S2次之,S3与S1相当,均低于前两者。

随着飞片主体完成与层裂层的融合,飞片持续飞行至更高速度(S4阶段),其起爆能力更高。在炸药冲击转爆轰的实验中,采用PBX-6炸药驱动TC11飞片,经过起爆间隙(0~20 mm)后起爆PBXL-7炸药。PBXL-7炸药的到爆轰距离和飞片撞击PBXL-7炸药时的飞片状态如图9~10所示。与PBX-6的实验结果类似,PBXL-7的实验中,起爆间隙为20 mm(S4)时,起爆能力最强,隔层起爆(S0)次之,起爆间隙为1 mm(S2)时最弱。因此,在飞片的起爆能力方面,S4阶段最强,S0阶段次之,S2阶段再次之,S1和S3阶段相当,起爆能力不理想。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以及结构特性相关,其作用机制较为复杂。

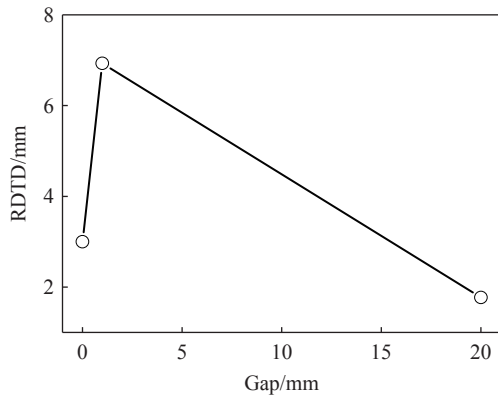


图 9 间隙对飞片起爆 PBXL-7 炸药的到爆轰距离的影响

Fig. 9 Running distance to detonation of PBXL-7 initiated by the flyer with different gap

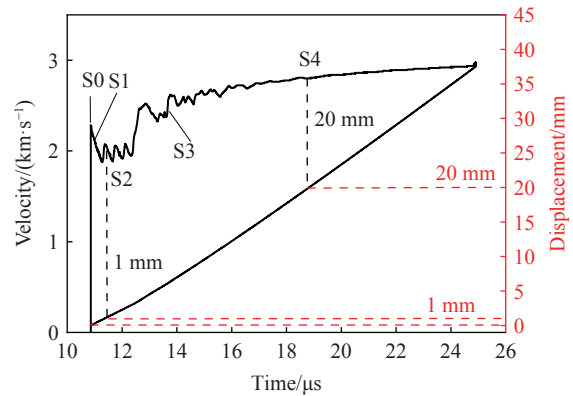


图 10 0~20 mm 间隙飞片撞击 PBXL-7 炸药的飞片状态

Fig. 10 Status of the flyer when impacting PBXL-7 explosive with a gap of 0-20 mm

### 3 结 论

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的冲击转爆轰状态进行了实验研究,探讨了起爆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。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。飞片起爆炸药的击靶速度可分为5个阶段,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阶段 S3 以及飞

片主体与层裂层融合完成后整体飞行阶段 S4。处在 S4 阶段的飞片起爆能力最强, S0 阶段次之, S2 阶段再次之, S1 及 S3 阶段最弱。飞片起爆下级装药的能力受飞片的击靶速度和结构特性的耦合影响。

## 参考文献:

- [1] 孙承纬, 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: 10.11883/1001-1455(2004)04-0299-6.  
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: 10.11883/1001-1455(2004)04-0299-6.
- [2] 经福谦, 陈俊详. 动高压原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 139–150.
- [3] BARBOUR R T. Pyrotechnics in industry [M]. New York: McGraw-Hill, 1981: 89.
- [4] SCHIMMEL M L. Quantitative understanding of explosive stimulus transfer: NASA-CR-2341 [R]. Washington: NASA, 1973: 5.
- [5] 翟志强, 王凯民, 蔡瑞娇, 等. 小型雷管输出能力增强技术研究 [J]. *火工品*, 2004(2): 12–15. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2004.02.004.  
ZHAI Z Z, WANG K M, CAI R J, et al. Experimental study of shock initiation by flyer plate impact in explosive train [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004(2): 12–15. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2004.02.004.
- [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. DOI: 10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.000406.  
REN Z W. Research on the numerical simulation of shock initiation HNS-IV by flyer [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. DOI: 10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.000406.
- [7] 孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 421–426.
- [8] GUSTAVSEN R L, GEHR R J, BUCHOLTZ S M, et al. Shock initiation of the tri-amino-tri-nitro-benzene based explosive PBX 9502 cooled to  $-55^{\circ}\text{C}$  [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(7): 074909. DOI: 10.1063/1.4757599.
- [9] 吕建军, 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: 10.11883/1001-1455(2014)01-0125-04.  
LÜ 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(1): 125–128. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)01-0125-04.
- [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.  
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.
- [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/gywlyxb.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/gywlyxb.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: 10.11883/1001-1455(2006)02-0140-05.  
YU D S, ZHAO F, TAN D W, et al. Experimental studies on detonation driving behavior of JOB-9003 and JB-9014 slab explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 12(2): 140–144. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0140-05.
- [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: 10.11858/gywlyxb.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: 10.11858/gywlyxb.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, 26(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, 26(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]. *弹箭与制导学报*, 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 [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 845(1): 1026–1029. DOI: 10.1063/1.2263497.
- [19] GUSTAVSEN R L, BARTRAM B D, SANCHEZ N J. Detonation wave profiles measured in plastic bonded explosives using 1550 nm photon Doppler velocimetry [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1195(1): 253–256. DOI: 10.1063/1.3295117.
- [20] ZHAI Z H, SUN C L, LIU Q, 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(1): 012301. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0192.
- 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(1): 012301. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0192.

(责任编辑 王晓双)