

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0165

# 装药结构中纵向气隙对炸药爆轰输出性能的影响\*

郭文灿, 张志强, 邓顺益, 黄文斌, 裴红波

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为阐明装药结构中纵向气隙对炸药爆轰输出性能的影响, 基于激光照明结合超高速分幅成像技术研究了 HMX 基炸药爆轰正向驱动及滑移驱动下钢板的变形及损伤情况, 并通过密排光纤测速技术测量了钢板的运动速度, 实现了气隙影响下钢板附带损失的量化表征。结果表明, 纵向气隙宽度为 0.05、0.10 和 0.20 mm 时, 爆轰正向驱动下, 钢板的运动模式发生了显著变化, 中心点的运动趋势由阶跃式上升转变为斜波式上升, 且爆轰波的超前时间大幅度增加, 钢板有明显的变形和破坏击穿现象; 爆轰滑移驱动下, 钢板的运动模式和爆轰波的超前时间基本不变, 钢板没有出现明显的变形和击穿现象。爆轰正向驱动下, 前驱冲击波和两侧爆轰波构成的楔形波系是造成底部钢板破坏击穿的关键; 爆轰滑移驱动下, 前驱冲击波和爆轰波作用于侧面钢板的动量分量较小, 不会造成明显的变形和损伤。

**关键词:** 气隙; 爆轰; 炸药; 裂纹

中图分类号: O381

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Influence of longitudinal air gaps within charge structure on the detonation performance of explosives

GUO Wencan, ZHANG Zhiqiang, DENG Shunyi, HUANG Wenbin, PEI Hongbo

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

**Abstract:** To investigate the effect of the longitudinal air gap on the detonation performance of HMX-based explosive, direct observation of steel plate deformation and damage under forward and slipping detonation of HMX based explosive was conducted based on the laser illumination combined with the ultra-high speed framing imaging technology. The multi-position optical speed measurement technology was also introduced to continuously measure the speed of steel plate, which enables a multidimensional characterization and quantitative research on steel plate damage under the influence of air gaps. It is found that when the air gap width is 0.05, 0.10 and 0.20 mm, the motion mode of the steel plate changes obviously under the forward detonation. The trend of the center point movement changes from step rising to oblique wave rising, indicating a notable elongation of the lead time of detonation wave. And the steel plate also has an obvious deformation and breakdown. Driven by slipping detonation, the motion patterns across various points of the steel plate are largely uniform, with only marginal variations in the lead time of detonation wave. No significant deformation or rupture of the steel plate is observed. It is considered that the wedge-shaped wave formed by the precursor shock wave and detonation waves is the key to the breakdown of the bottom of steel plate in the case of forward detonation. However, the momentum component of the precursor shock wave and detonation wave acting on the side of steel plate in the case of slipping detonation is small, so that no obvious damage occurs. This article also provides a lot of quantitative data on the deformation of steel plates subjected to longitudinal air gaps, which can provide high-precision experimental data for the related numerical simulations and theoretical analysis work.

**Keywords:** air gap; detonation; explosives; crack

\* 收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-09-28

第一作者: 郭文灿(1984—), 男, 博士, 副研究员, [guowencan1984@163.com](mailto:guowencan1984@163.com)

通信作者: 裴红波(1987—), 男, 博士, 副研究员, [hongbo2751@sina.com](mailto:hongbo2751@sina.com)

在武器装药结构或爆炸装置中,受制造工艺、装配及环境因素的影响,用于做功的炸药与壳体之间往往存在气隙。由多块炸药组装而成的炸药部件,在接缝位置也容易脱开并形成气隙间断面。常用的塑性黏结炸药由于有限的力学强度和固有的多孔特征,受温变、振动等环境因素影响,也会导致炸药内部出现气隙和裂纹。气隙或裂纹会对炸药的爆轰输出性能和做功能力产生影响,是学者们关注的重点,也是武器设计、使用及贮存必须考虑的关键问题之一。已有研究<sup>[1-3]</sup>表明,带气隙或裂纹的炸药会改变爆轰波在输出端面的压力分布,炸药产生的气体在气隙中以 1~1.9 倍的爆轰波速度向前运动,形成前驱冲击波。Davis 等<sup>[4]</sup>的研究表明,前驱冲击波会严重损伤接触的金属材料,并对武器装备造成非预期的破坏,导致其功能失效。

目前,关于气隙及裂纹对炸药爆轰输出性能影响的研究还少见报道。其中,实验研究以回收类实验为主,主要通过观测带气隙装药结构对金属板的最终损伤情况来评估其爆轰输出性能。理论研究中,较成体系的是通道效应(channel effect)<sup>[5-7]</sup>,该理论主要用于描述炸药与固壁边界之间存在气隙时炸药内部波系结构的演化过程。纵向气隙是一类与爆轰波运动方向平行的间断面,由于爆轰波可以无障碍地沿气隙延伸方向向前运动,纵向气隙对装药结构爆轰输出性能的影响十分显著,同时,相关的理论模型与通道效应理论紧密相关,因此,对纵向气隙的研究在理论和应用方面都十分重要。

本文中,采用矩形炸药块拼缝的方式构造 0、0.05、0.10 和 0.20 mm 等 4 种规格的纵向气隙,研究爆轰正向驱动(爆轰传播方向垂直于钢板)和爆轰滑移驱动(爆轰传播方向平行于钢板)下钢板的变形和损伤情况,采用超高速分幅成像和密排多普勒测速(photon doppler velocimetry, PDV)2 种测试方法测量爆轰驱动下钢板的运动速度,以期实现气隙影响下钢板附带损失的量化表征。

## 1 实验方法

实验用炸药为 HMX 基高聚物黏结炸药,炸药密度约为  $1.85 \text{ g/cm}^3$ ,其 HMX 基质量占比接近 95%。炸药形状为矩形块,尺寸为  $70 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,炸药表面的平面度和粗糙度分别优于 0.03 和 Ra3.2,其中 Ra 代表粗糙度高度参数轮廓算术平均偏差。炸药样品装配关系的示意图和实验装置如图 1 所示。实验中,2 个矩形炸药块在水平方向进行拼装,依靠间隙调整其水平间距,形成多种宽度的纵向气隙。矩形炸药块的底部为 2 mm 厚的不锈钢板,侧面分别为有机

玻璃板(厚 10 mm)和不锈钢板(厚 1 mm)。通过观察底部钢板和侧面钢板的变形及破坏情况,了解不同宽度气隙影响下爆轰正向驱动和爆轰滑移驱动的输出性能。钢板和有机玻璃板均宽于矩形药块,在一定程度上阻碍了爆轰产物的向下涌动,避免其对观测视场的干扰。采用  $\varnothing 100 \text{ mm}$  平面波炸药透镜从上部引爆矩形药块,透镜与药块之间配置有带孔金属板,金属板的主要作用也是防止爆轰产物的外泄和发光对实验的影响。

采用激光照明结合超高速分幅成像技术观测钢板外轮廓的运动演化过程,并结合密排 PDV 技术监测钢板的速度。图 2 给出了分幅成像的布局。单次实验中,超高速分幅成像设备能记录 8 个不同时刻的实验图像,观测时刻可自由设定,时间分辨率可达 10 ns。区别于常用的单点 PDV 探针,实验中使用的密排 PDV 探针可对一条直线上连续排列的 15 个测点进行测量,测点间距约为 0.5 mm,工作焦距约为 40 mm,光斑尺寸约为  $220 \sim 240 \mu\text{m}$ 。如图 3 所示,底部钢板和侧面钢板均安装有密排 PDV 探针,探针的中心测点正对气隙在钢板上的投影位置,其余测点沿气隙对称分布,对气隙两侧  $-3.5 \sim 3.5 \text{ mm}$  范围内的钢板运动进行连续观测。

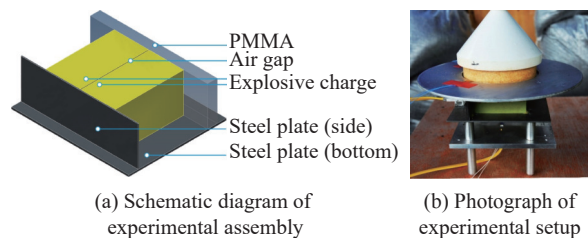


图 1 炸药样品装配关系示意图和实验装置实拍图  
Fig. 1 Schematic diagram of the explosive sample assembly and photograph of the experimental setup

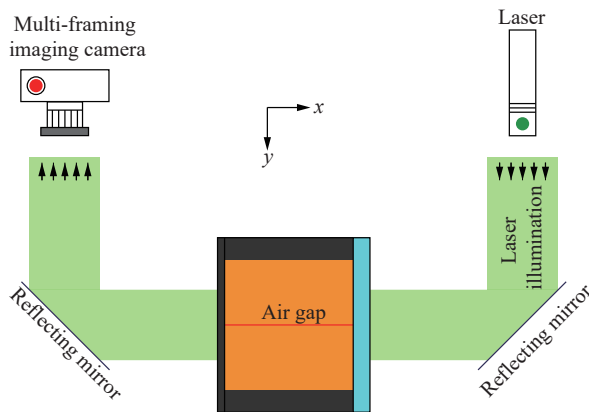


图 2 分幅成像的布局

Fig. 2 Schematic layout of the framing imaging setup

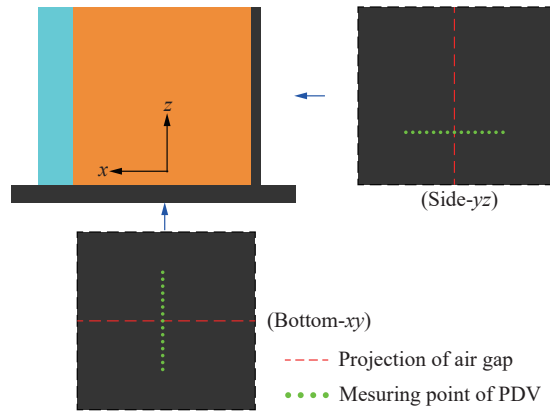


图 3 密排 PDV 测试的示意图

Fig. 3 Schematic of multi-point PDV array measurement

## 2 实验结果与分析

### 2.1 分幅成像结果

图 4 为 4 种气隙宽度(0、0.05、0.10、0.20 mm)工况下 HMX 基炸药对钢板加载及破坏的图像。画面上部正对侧面钢板, 底部钢板则位于画面中央附近, 拍摄时, 以安装在平面波透镜底部的薄膜探针的触发信号作为拍摄零时。由图可知, 当气隙宽度为 0 时, 爆轰正向驱动下, 由于采用了平面波透镜作为加载手段, 底部钢板在向下运动过程中保持了极好的平整度, 未出现断裂迹象。当气隙宽度为 0.05、0.10 和 0.20 mm 时, 底部钢板被破坏击穿, 爆轰产物从破坏位置涌出, 并伴随有明显的亮光, 破坏位置正对纵向气隙的投影位置, 远离气隙位置处的底部钢板在整体向下运动过程中仍然保持了较好的平整度。随着气隙宽度的增加, 钢板破坏击穿出现的时间越来越早, 其在同时刻的变形幅度也更明显。所有工况中, 画面上部侧面钢板位置处仅观测到从顶部炸药透镜位置处溢出的爆轰产物及发光现象, 而未观测到钢板被破坏后爆轰产物涌出时伴随的发光现象, 因此, 爆轰滑移驱动下, 侧面钢板没有产生破坏击穿。

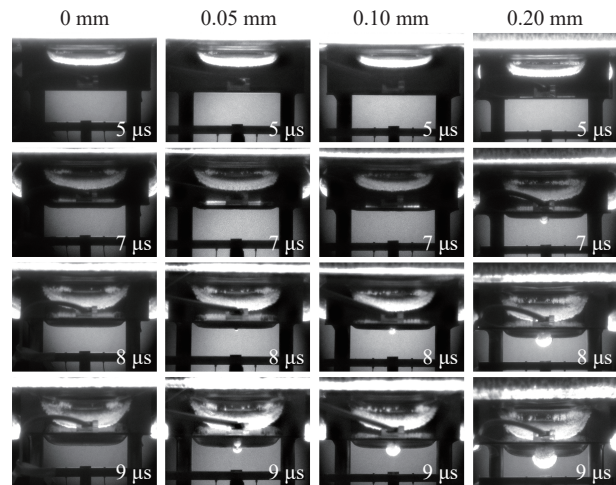


图 4 不同气隙宽度下钢板的变形损伤情况

Fig. 4 Deformation and damage characteristics of steel plates under different air gap widths

### 2.2 PDV 测试结果

#### 2.2.1 速度-时间曲线

几种不同气隙宽度工况下底部钢板的速度-时间曲线如图 5 所示, 可以看出: 气隙宽度为 0 时, 正对气隙和远离气隙的底部钢板的速度变化趋势基本一致, 均表现为爆轰波正向驱动下的阶跃式上升; 气隙宽度为 0.05、0.10 和 0.20 mm 时, 正对气隙的底部钢板的速度变化趋势由阶跃式上升转变为斜波式上升, 且与气隙越近, 变化越明显, 而远离气隙时, 速度变化趋势几乎不受气隙宽度的影响。气隙宽度越大, 趋势变化越明显, 正对气隙处速度的起点位置比远离气隙处的明显超前。

几种不同气隙宽度工况下侧面钢板的速度-时间曲线如图 6 所示, 可以看出: 爆轰滑移驱动下, 侧面

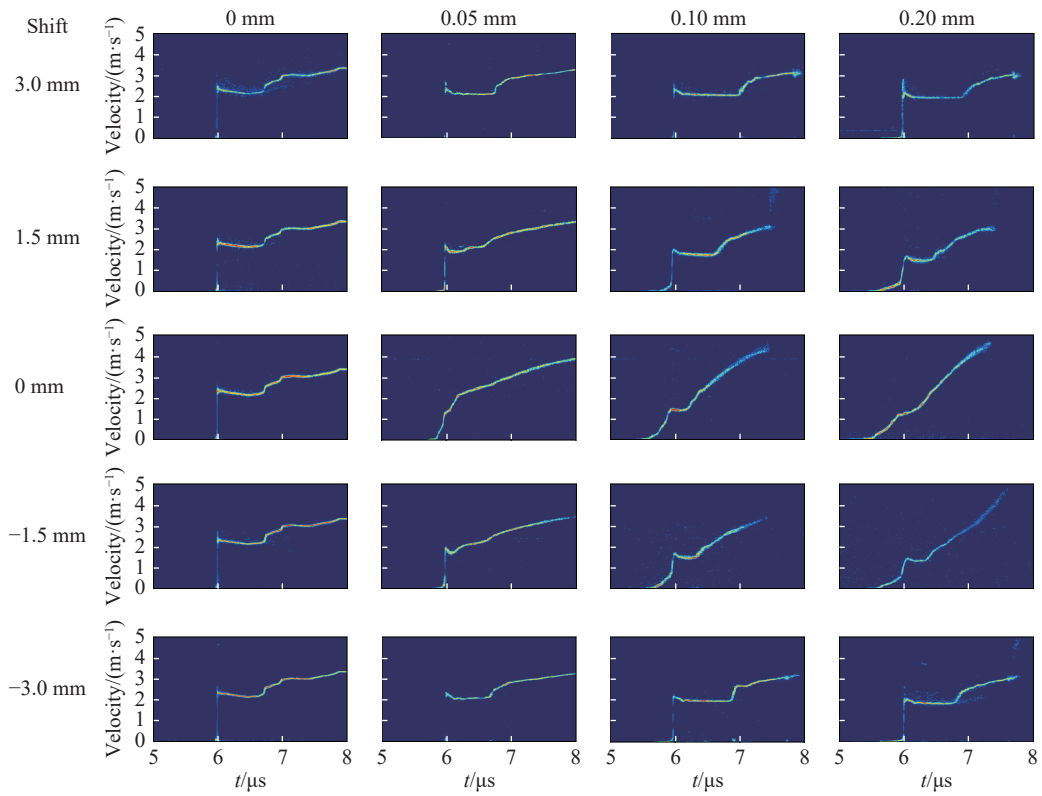


图 5 不同气隙宽度下底部钢板的速度-时间曲线

Fig. 5 Velocity-time characteristics of the bottom steel plate for various air gap widths

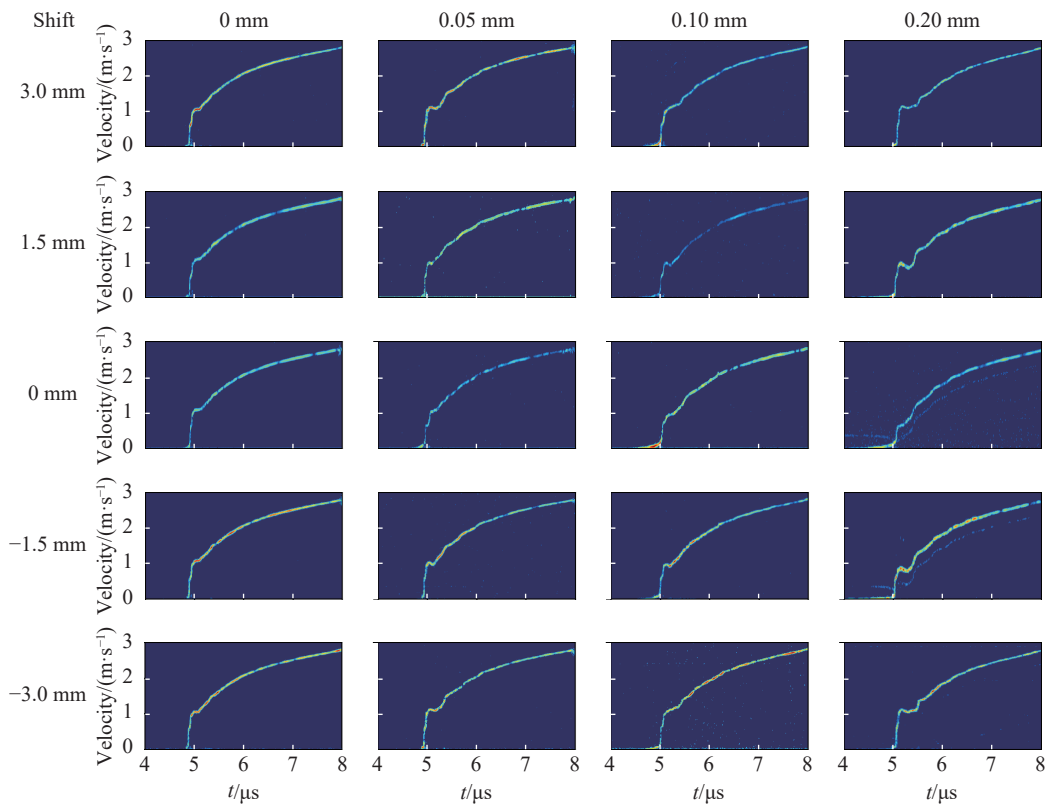


图 6 不同气隙宽度下侧面钢板的速度-时间曲线

Fig. 6 Velocity-time characteristics of the side steel plate for various air gap widths

钢板的速度呈现缓慢爬升的趋势;随着气隙宽度的增加,靠近气隙处侧面钢板的速度起点位置超前,远离气隙处侧面钢板的速度变化基本相同。

### 2.2.2 爆轰波超前时间

为表征气隙宽度对炸药内爆轰波传播的影响,定义爆轰波超前时间,即靠近和远离气隙处的钢板外表面开始运动的时间差。靠近和远离气隙处的钢板外表面开始运动的时刻统一取为运动速度首次达到 50 m/s 的时刻以及距离气隙约 17.5 mm 处钢板开始运动的时刻。

图 7 和图 8 分别为不同气隙宽度工况下气隙附近底部钢板和侧面钢板的爆轰波超前时间。可以看出,气隙宽度为 0 时,中心点及其附近底部钢板和侧面钢板的爆轰波超前时间相差不大。随着气隙宽度的增大,中心点及其附近的爆轰波超前时间逐渐增大,但侧面钢板的最大超前量比底部钢板小,爆轰波对底部钢板运动的影响更剧烈。

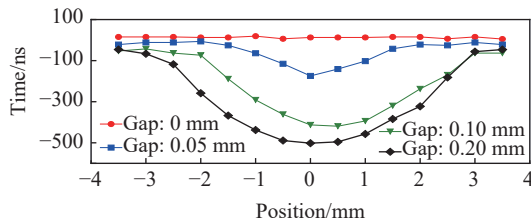


图 7 不同气隙宽度下底部钢板的爆轰波超前时间

Fig. 7 Detonation wave lead time in the bottom steel plate for various air gap widths.

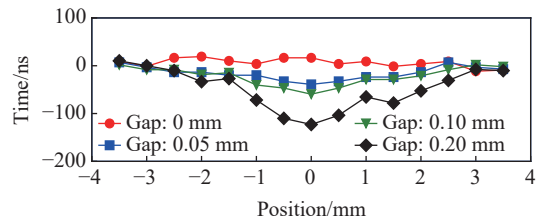


图 8 不同气隙宽度下侧面钢板的爆轰波超前时间

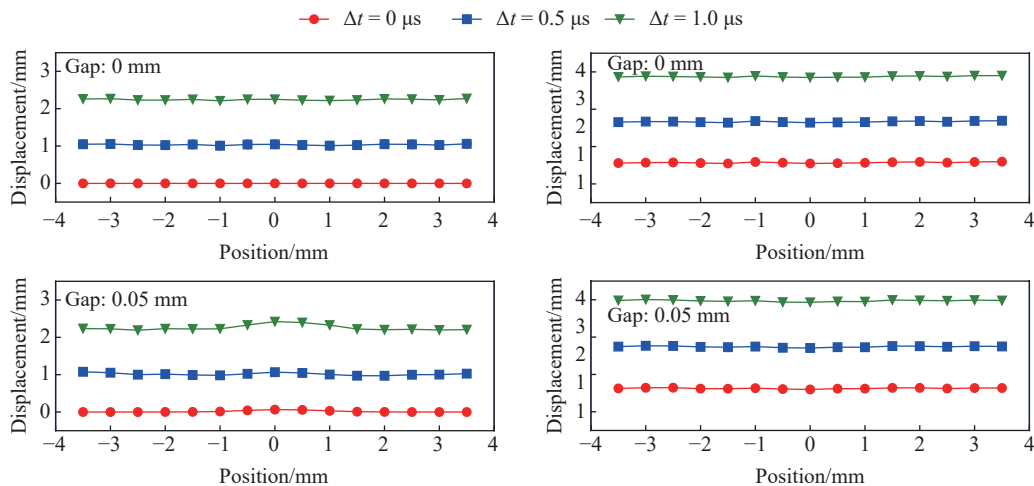
Fig. 8 Detonation wave lead time in the side steel plate for various air gap widths

### 2.2.3 位移变形

为表征底部钢板和侧面钢板的变形情况,以距离气隙约 17.5 mm 处底部钢板开始运动的时刻为零点,测量 0、0.5、1.0  $\mu\text{s}$ (时间间隔  $\Delta t$  取 0、0.5、1.0  $\mu\text{s}$ )后钢板的相对位移。

图 9(a) 为不同气隙宽度工况下底部钢板的位移变形。由图可知,气隙宽度为 0 时,各测点对应的位移量基本一致,未出现明显变形,与分幅成像的结果一致。气隙宽度为 0.05 mm 工况下,  $\Delta t$  取 0 和 0.5  $\mu\text{s}$  时,中心区域出现微小变形,  $\Delta t$  取 1.0  $\mu\text{s}$  时,中心区域明显变形。气隙宽度为 0.10、0.20 mm 工况下,  $\Delta t=0$  时中心区域变形较明显,且随着  $\Delta t$  的增大,变形越来越严重,其变形程度均大于气隙宽度为 0.05 mm 的工况。变形区域与气隙宽度高度相关,气隙宽度为 0.05 mm 时,变形区域位于  $-0.5\sim 0.5$  mm;气隙宽度为 0.10 mm 时,变形区域位于  $-1.5\sim 1.5$  mm;气隙宽度为 0.20 mm 时,变形区域位于  $-2.0\sim 2.0$  mm。

图 9(b) 为不同气隙宽度工况下侧面钢板的位移变形。由图可知,气隙宽度为 0、0.05、0.10、0.20 mm 时,各测点对应的位移量基本一致,未观测到明显的钢板变形。



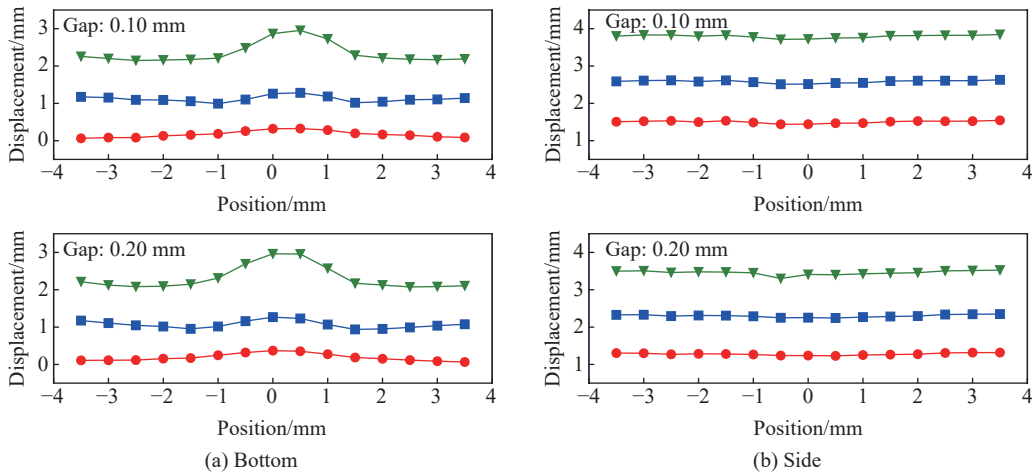


图 9 不同气隙宽度下钢板的位移变形情况

Fig. 9 Displacement and deformation characteristics of steel plates under different air gap widths

### 2.3 讨论

气隙宽度为 0 时(炸药块紧密贴合), 爆轰正向驱动及滑移驱动下钢板各点的运动模式基本一致, 起跳时间也基本相同, 钢板表面未观察到明显的变形及破坏击穿, 与整药块的爆轰输出没有差别。气隙宽度为 0.05、0.10、0.20 mm 时, 爆轰正向驱动下底部钢板中心点的运动趋势由阶梯式上升转变为斜波式上升, 钢板发生明显变形及破坏击穿, 其爆轰波超前时间、位移变形与气隙宽度正相关; 爆轰滑移驱动下, 侧面钢板各点的运动模式基本相同, 中心点起跳时间轻微超前, 钢板未出现明显的变形或破坏击穿现象。

带气隙炸药对接触钢板的破坏损伤主要出现在爆轰正向驱动方向。爆轰正向驱动可类比于凝聚态炸药爆轰中的通道效应, 气隙两边的爆轰波及爆轰产物如同活塞一样挤压气隙中的空气形成前驱冲击波, 当前驱冲击波压力超过炸药起爆阈值时, 在炸药中诱导并引发斜向爆轰波, 斜向爆轰波进一步挤压前驱冲击波并引爆附近的炸药, 这种正反馈机制产生极高的冲击波速度和压力。本实验中, HMX 炸药的稳定爆速约为 8.7 km/s, 炸药块高 40 mm, 根据气隙宽度为 0.20 mm 时底部钢板的爆轰波超前时间(507 ns)估算, 前驱冲击波的平均速度约为 10 km/s, 考虑其为加速过程, 速度峰值将高于 10 km/s。高速前驱冲击波及两翼的斜向爆轰波形成一个超前的楔形波系(图 10), 其与钢板接触后, 将率先在楔形波系尖端的正对位置处造成侵蚀, 在随后爆轰波的作用下侵蚀位置被进一步破坏, 最终钢板完全断裂。

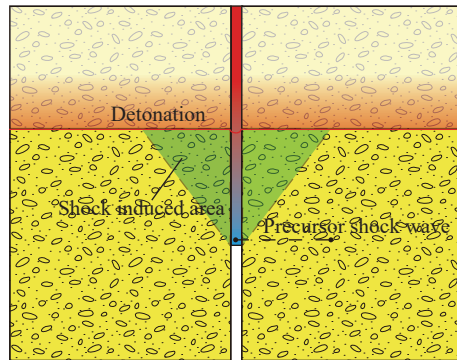


图 10 爆轰波与气隙相互作用示意图

Fig. 10 Illustration of the interaction mechanism between detonation waves and air gaps

与爆轰正向驱动不同, 爆轰滑移驱动下, 爆轰波和前驱冲击波的运动方向与侧面钢板平行, 其在垂直于侧面钢板方向的速度分量和动量分量相对较小, 未造成侧面钢板的变形及破坏; 且气隙两侧爆轰产物会不受限制地涌入气隙空间内而导致驱动压力下降, 这也是侧面钢板中心点的运动速度在局部时刻随气隙宽度的增大而下降的原因。图 11 和图 12 分别为爆轰正向驱动和爆轰滑移驱动下钢板中心点的速度及加速度。在爆轰正向驱动且气隙宽度为 0 时, 钢板运动只受到爆轰波及其波后流动的影响, 所以加速度的急剧变化出现在速度发生阶跃变化(爆轰波加载导致速度阶跃变化)时。气隙宽度为 0.05、0.10 和 0.20 mm 时, 钢板运动同时受气隙中前驱冲击波及两侧爆轰波形成的楔形波系的影响, 所以钢板

的运动加速过程是分阶段的, 早期较缓的加速过程主要来自前驱冲击波, 随后更快的加速过程则来自于楔形波系的综合作用。随着气隙宽度的增大, 加速度的幅值下降, 而脉宽增大, 所以钢板的速度随之增大, 相应的损伤效应逐渐加剧。爆轰滑移驱动下, 由于前驱冲击波的作用较弱, 钢板运动主要受爆轰波及其波后流动的侧向加载驱动, 所以加速作用在爆轰波掠过后的瞬间最为强烈, 在其他时刻都较弱, 且这一现象与气隙宽度无关。

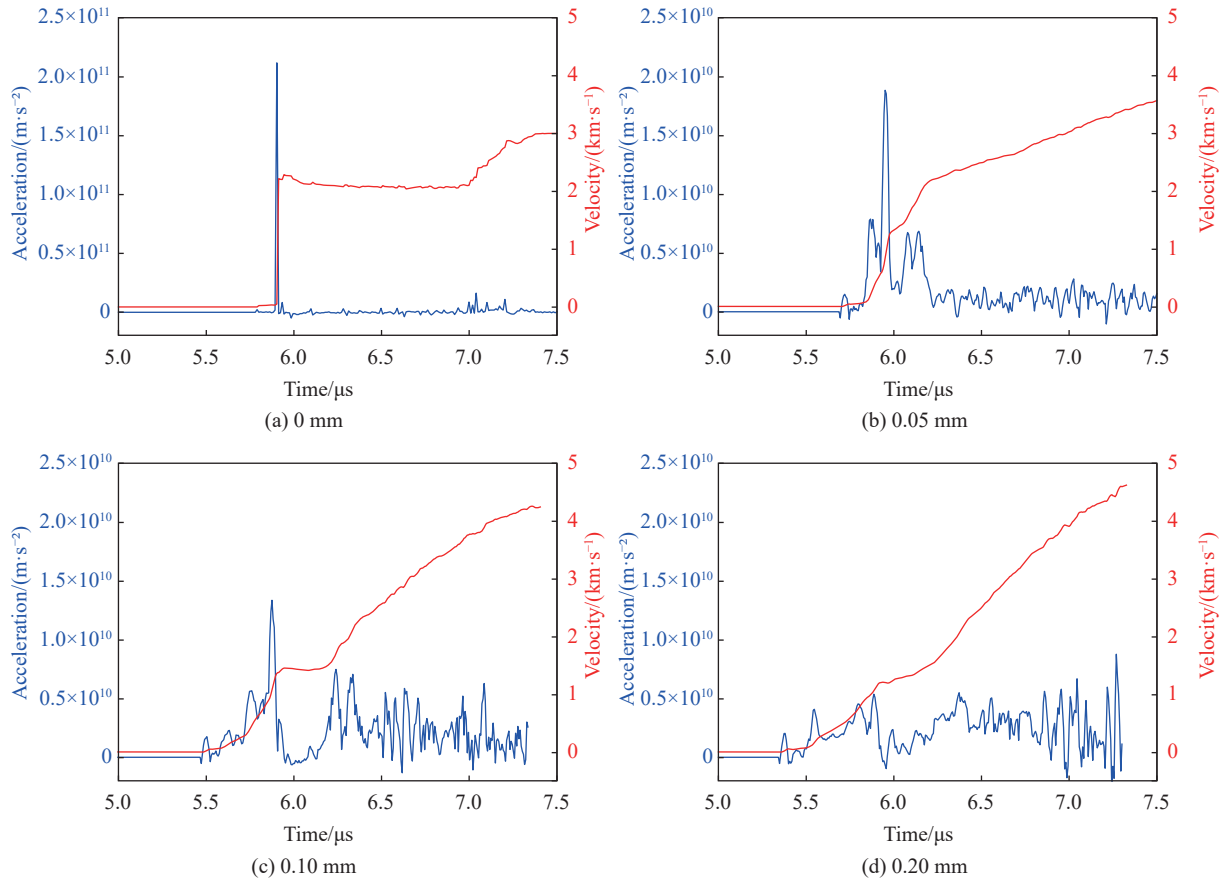
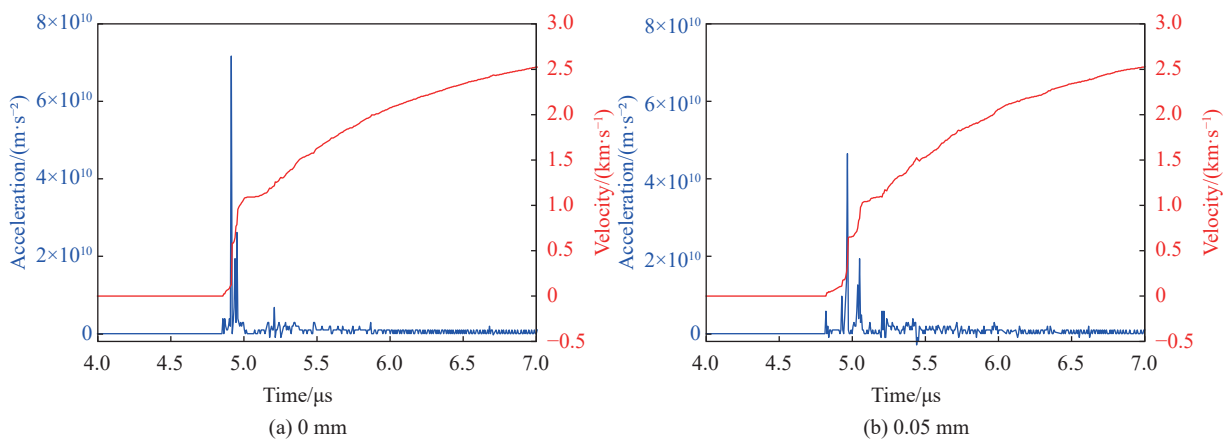


图 11 不同气隙宽度下底部钢板的速度及加速度

Fig. 11 Velocity and acceleration characteristics of the bottom steel plate for various air gap widths



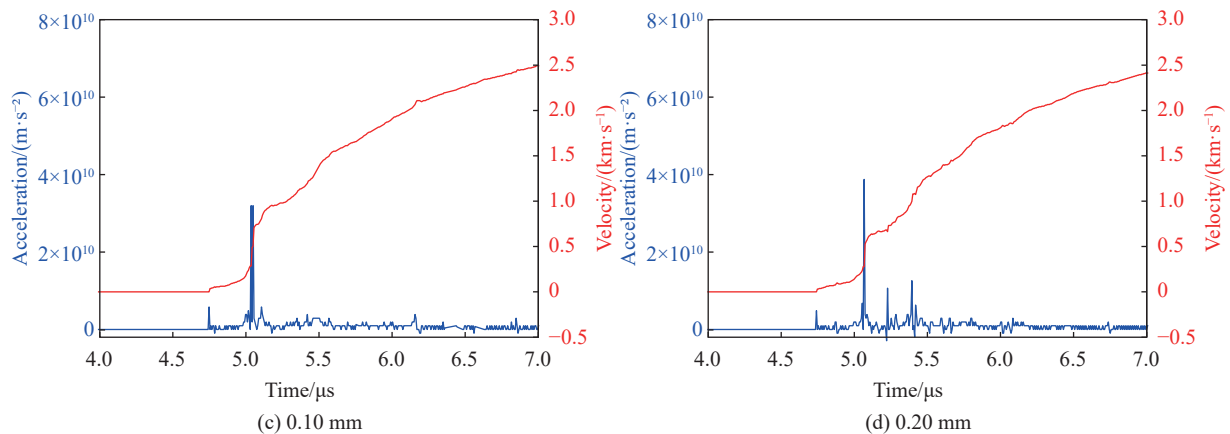


图 12 不同气隙宽度下侧面钢板的速度及加速度

Fig. 12 Velocity and acceleration characteristics of the side steel plate for various air gap widths

### 3 结 论

为研究装药结构中纵向气隙对炸药爆轰性能的影响,采用矩形炸药块拼缝的方式构造了 4 种宽度的纵向气隙,结合分幅成像和密排 PDV 测速等方法监测了钢板的外轮廓和速度变化趋势。结果表明,气隙宽度为 0 时(炸药块紧密贴合),爆轰正向驱动及滑移驱动下钢板各点的运动模式基本一致,起跳时间也基本相同,钢板表面未观察到明显变形及破坏击穿,与整药块的爆轰输出没有差别。气隙宽度为 0.05、0.10、0.20 mm 时,爆轰正向驱动下底部钢板中心点的运动趋势由阶跃式上升转变为斜波式上升,钢板发生明显变形及破坏击穿,其爆轰波超前时间、位移变形与气隙宽度正相关;爆轰滑移驱动下,侧面钢板各点的运动模式基本相同,中心点起跳时间轻微超前,钢板未出现明显的变形或破坏击穿现象。爆轰正向驱动时,前驱冲击波及两侧爆轰波构成的楔形波系是造成底部钢板破坏击穿的关键原因;爆轰滑移驱动时,前驱冲击波和爆轰波作用于侧面钢板的动量分量较小,未造成明显的破坏。

本研究可为武器装药结构中的拼缝、裂纹对壳体的附带损伤提供参考,为相关武器设计提供技术支撑。

### 参考文献:

- [1] DUBNOV L V, KHOTINA L D. Channel effect mechanism in the detonation of condensed explosives [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1966, 2(4): 59–63. DOI: 10.1007/BF01261518.
- [2] BJARNHOLT G, SMEDBERG U. On detonation driven air shocks in the air gap between a charge and its confinement [C]// *Proceedings of the 8th Symposium (International) on Detonation*. Albuquerque, NM, 1985: 1069.
- [3] SOUERS P C, AULT S, AVARA R, et al. Air gap effects in LX-17 [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, 31(4): 294–298. DOI: 10.1002/prop.200600040.
- [4] DAVIS W C, HILL L G. Joints, cracks, holes and gaps in detonating explosives [C]// *Proceedings of the 12th Symposium (International) on Detonation*. San Diego, CA, 2002: 220.
- [5] TANGUAY V, HIGGINS A J. The channel effect: coupling of the detonation and the precursor shock wave by precompression of the explosive [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(9): 4894–4902. DOI: 10.1063/1.1787913.
- [6] BRAILOVSKY I, SIVASHINSKY G. Precursors in two-phase detonation: an elementary model for the channel effect [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2014, 18(1): 117–147. DOI: 10.1080/13647830.2013.870354.
- [7] BRAILOVSKY I, SIVASHINSKY G. Precursors in two-phase detonation: occurrence of a contact discontinuity [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2015, 19(6): 833–855. DOI: 10.1080/13647830.2015.1105385.

(责任编辑 王影)