

高压物理学报

金属隔层和空气间隙对钝感炸药冲击起爆的影响

彭文杨 钟斌 谷岩 张旭 杨舒棋 舒俊翔 覃双

Effects of Metal Interlayer and Air Gap on the Shock Initiation of Insensitive Explosives

PENG Wenyang, ZHONG Bin, GU Yan, ZHANG Xu, YANG Shuqi, SHU Junxiang, QIN Shuang

引用本文:

彭文杨, 钟斌, 谷岩, 等. 金属隔层和空气间隙对钝感炸药冲击起爆的影响[J]. 高压物理学报, 2020, 34(2):023401. DOI: 10.11858/gywlb.20190816

PENG Wenyang, ZHONG Bin, GU Yan, et al. Effects of Metal Interlayer and Air Gap on the Shock Initiation of Insensitive Explosives[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(2):023401. DOI: 10.11858/gywlb.20190816

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190816>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

装配垫层与间隙对爆轰加载下金属飞片运动特征的影响

Effects of Explosive Device with Foam Cushion and Air Clearance on Kinetic Characteristic of Steel Flyer under Detonation Loading
高压物理学报. 2018, 32(4): 044202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170576>

金属隔层对同轴双元装药爆轰波形及驱动性能的影响

Influence of Metal Interlayer on Detonation Wave-Shape and Driving Characteristics of Designated Inner/Outer Composite Charge
高压物理学报. 2019, 33(1): 015102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180541>

HNS-IV炸药的短脉冲冲击起爆判据

Short Pulse Shock Initiation Criteria for HNS-IV Explosive
高压物理学报. 2018, 32(2): 025101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170582>

JB-9014钝感炸药冲击Hugoniot关系测量

Measurement of Hugoniot Relation for JB-9014 Insensitive Explosive
高压物理学报. 2018, 32(3): 033202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170669>

组合装药的撞击安全性与内爆威力试验研究

Experimental Study on Impact Safety and Implosion Energy Release Characteristics of Composed Charge
高压物理学报. 2019, 33(4): 045201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190735>

金属隔层对同轴双元装药爆轰波形及驱动性能的影响

Influence of Metal Interlayer on Detonation Wave-Shape and Driving Characteristics of Designated Inner/Outer Composite Charge
高压物理学报. 2019, 33(1): 015102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180541>

金属隔层和空气间隙对钝感炸药冲击起爆的影响

彭文杨^{1,2}, 钟 斌¹, 谷 岩¹, 张 旭¹, 杨舒棋^{1,2}, 舒俊翔¹, 覃 双^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院研究生院, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了确定空气间隙和金属隔层对冲击起爆的影响, 采用火炮加载蓝宝石飞片冲击起爆 $\varnothing 50\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的A型炸药, 产生的冲击波通过空气间隙和金属隔层起爆 $\varnothing 50\text{ mm}$ 的台阶型B型炸药。在B型炸药的后界面粘贴镀膜氟化锂(LiF)窗口, 使用光子多普勒测速仪(PDV)测量金属和B型炸药的后界面速度, 进而计算得到金属和B型炸药的冲击波透射压力, 再利用阻抗匹配计算得到金属和B型炸药的入射压力。结果表明: 传爆药和金属隔层间的空气间隙使冲击压缩过程转变为准等熵压缩和冲击压缩两个过程, 同时使冲击波的幅值减小; 确定了金属隔层厚度为5 mm时冲击波压力的衰减范围; 当使用A型炸药作为传爆药, 空气间隙为0.3 mm, 金属隔层厚度为5 mm时, B型炸药在7~10 mm之间开始反应。

关键词: 金属隔层; 空气间隙; 冲击起爆; 光子多普勒测速仪(PDV); 台阶型炸药

中图分类号: O383

文献标识码: A

钝感高能炸药(Insensitive high explosive, IHE)具有突出的安全性能^[1], 是目前最具影响力的高能材料, 在国防工业和工程爆破中有着广泛应用, 其冲击起爆特征受到广泛关注。深入了解炸药冲击起爆过程, 对研究可靠起爆炸药、避免炸药在意外冲击下发生爆炸具有重要意义。

隔层对冲击波具有明显的衰减效果, 隔板起爆实验是研究炸药冲击起爆特性的有效方法之一^[2], 其中金属材料隔层广泛应用于冲击起爆实验。陈朗等^[3]利用隔板实验对固体炸药的冲击起爆过程进行研究, 得到了JO-9159炸药的起爆压力阈值和爆轰成长距离。胡湘渝等^[4]运用DYNA2D程序对隔板实验过程进行了数值模拟, 并与实验结果进行对比, 较好地拟合了实验结果。郑波等^[5]利用隔板实验对比探究了验证板对固体推进剂的冲击起爆影响。向梅等^[6]通过数值模拟比较了铝、有机玻璃、钢隔层和未反应JB-9014炸药的爆轰反应边界值, 发现有机玻璃对冲击波的衰减和铝近似, 钢隔层对冲击波的衰减较快。以上研究均把隔层作为一种实验工具, 没有针对隔层对冲击起爆的具体影响开展研究。

在冲击起爆过程中, 空气间隙是一个重要的干扰因素。空气间隙与隔层有较大差异, 传爆药和隔层间的空气间隙不仅会使冲击波衰减, 而且会使本来的冲击压缩过程转变成准等熵压缩^[7]和冲击压缩两个过程。因此, 探究空气间隙和金属隔层对冲击起爆的影响, 对于研究炸药的冲击起爆特性具有重要意义。

本研究以炸药驱动金属隔层和金属隔层冲击起爆B型炸药两个实验为基础, 在实验中加入空气间隙, 通过对测得的金属隔层后界面速度和B型炸药的粒子速度进行分析, 得到金属隔层和空气间隙对冲击起爆的影响。

* 收稿日期: 2019-07-27; 修回日期: 2019-08-30

基金项目: 国防技术基础科研项目(JSZL2016212C001); 科学挑战专题(TZ2018001); 军科委基础加强重点项目(2019-JCJQ-ZD-203)

作者简介: 彭文杨(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击起爆研究. E-mail: 1028981796@qq.com

通信作者: 谷 岩(1963—), 男, 研究员, 主要从事爆轰物理研究. E-mail: guyan@caep.cn

1 实验原理和方法

在火炮加载平台上对金属隔层和B型炸药进行冲击实验,采用光子多普勒测速仪^[8-10](Photonic Doppler velocimetry, PDV)测量金属隔层和B型炸药样品的粒子速度。样品和PDV光纤探头粘贴于样品架,位置关系如图1所示。

实验分为3个过程,装置如图2所示。首先,测量金属隔层自由界面速度,如图2(a)所示,用飞片撞击尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的A型炸药,使其达到爆轰状态,爆轰波通过厚度为0.3 mm的空气间隙到达金属隔层,用PDV测量金属隔层自由界面速度,金属隔层自由界面速度的变化可以反映传爆药和金属隔层间的空气间隙对冲击波的影响,通过界面速度计算出透射压力,再根据入射压力得到金属隔层的冲击波透射率。其次,如图2(b)所示,在金属隔层后贴合如图3所示的台阶型B型炸药,台阶厚度分别为2、3、4、5、7和10 mm,每个台阶面粘贴尺寸为 $\phi 15\text{ mm} \times 11\text{ mm}$ 的LiF窗口,通过PDV测速系统测量每个台阶样品和LiF窗口的界面速度,根据速度的变化,判断炸药的反应情况,得到传爆药和金属隔层间的空气间隙对冲击起爆的影响。最后,在金属隔层和B型炸药样品间增加一个0.22 mm厚的空气间隙,与上一过程中PDV测速系统测量得到的界面速度进行对比,得出金属隔层和B型炸药样品间的空气间隙对冲击起爆的影响。实验条件如表1所示。

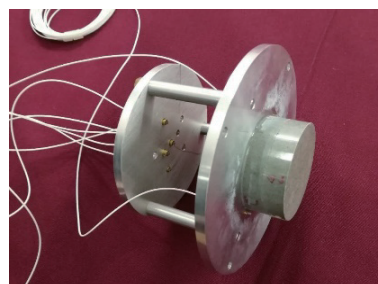


图1 样品架

Fig. 1 Sample holder

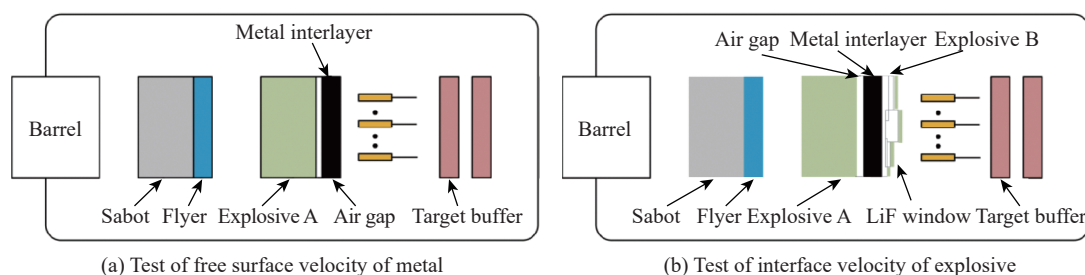


图2 装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental set-up

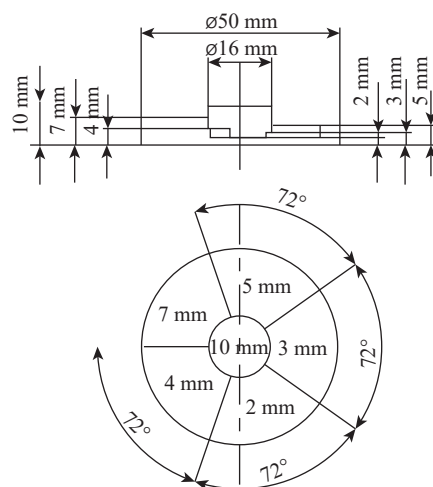
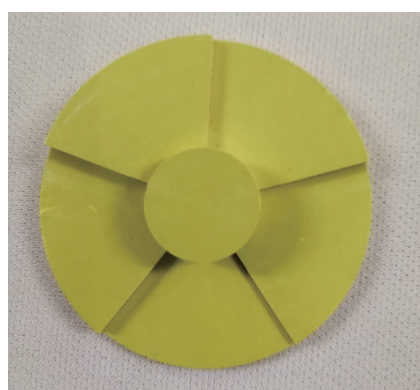


图3 台阶型炸药

Fig. 3 Stage explosive

表 1 实验条件
Table 1 Experimental conditions

Shot No.	Dimensions/(mm × mm)				Sample
	Booster	Air gap	Metal compartment	Air gap	
01	∅50 × 30	∅50 × 30	∅50 × 5		
02	∅50 × 30	∅50 × 30	∅50 × 5		
03	∅50 × 30	∅50 × 30	∅50 × 5	∅50 × 0.22	Explosive B
04	∅50 × 30	∅50 × 30	∅50 × 5		Explosive B

2 结果与分析

2.1 金属隔层和空气间隙对透射压力的影响

通过解析解预先估算金属隔层的速度, 根据声学近似理论^[11], 用等熵线方程描述爆轰产物, 金属视为刚体, 得到金属自由界面速度 u

$$u = D_j \left(1 + \frac{\theta - 1}{\eta \theta} - \frac{l \theta}{D_j t} \right) \quad (1)$$

式中: D_j 为 A 型炸药的爆轰速度; θ 和 η 为过程量, $\theta = [1 + 2\eta(1 - l/D_j t)]^{-1/2}$, $\eta = m(k+1)/Mk^k$; l 为装药长度; m 为 A 型炸药的质量; M 为金属片的质量; k 为爆轰产物的多方气体指数; t 为炸药起爆的零点时间。本研究中取 $D_j = 8.87$ km/s, $k = 3$, $l = 31.09$ mm, $m = 113.525$ g, $M = 179.47$ g。

把 D_j 、 k 、 m 、 M 和 l 的值代入式(1), 得到 u 关于 t 的函数, 根据该函数得出的金属隔层速度曲线解析解和由 Shot 01、Shot 02 测量得到的金属隔层自由界面中心点速度曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, 测量得到的金属自由界面速度与理论计算得到的速度解析解相比有一定偏差, 这是因为理论计算需要满足 3 个前提条件: (1) 金属隔层为刚体; (2) 爆轰波冲击绝热刚壁, 反射冲击波的熵增极小, 冲击波可视为波阵面上有间断的简单压缩波, 爆轰产物的熵视为常数; (3) 气体产物和被抛射物体都处于管内运动。上述条件与实际情况是不符合的。首先, 金属并不是刚体, 反应过程中有形变, 其熵是减小的; 其次, 炸药的爆轰波存在尖峰, 不是简单的压缩波; 最后, 本实验并非处于管内运动, 实验空间是开放的, 炸药质量应为有效部分质量 m_a , m_a 小于炸药质量 m 。因此, 解析解并不能反映爆炸的实际反应情况, 只能用来估算最终的理论速度, 且实际速度相较于理论值偏小。金属自由界面速度没有持续加速, 只有一次起跳, 是因为实验中使用的金属材料阻抗较大, 且相对较厚, 由后界面反射的冲击波在到达前界面的过程中, 在金属隔层中衰减, 冲击波到达自由界面时, 比自由界面压力低, 不能使自由界面速度加速。在爆轰产物的推动作用下, 金属隔层保持匀速飞行。

PDV 测速系统测得的是金属后界面速度, 根据应力波理论^[12], 冲击波后的粒子速度为后界面速度的 1/2。由冲击波后粒子速度可以得到后界面的透射压力 p_{2out}

$$p_{2out} = \rho_2 D_i \frac{1}{2} u_2 = \frac{1}{2} \left(c_2 + \frac{1}{2} \lambda_2 u_2 \right) u_2 \quad (2)$$

式中: ρ_2 为金属隔层密度, D_i 为金属隔层冲击波速度, c_2 和 λ_2 为线性 Hugoniot 关系式中的常系数, u_2 为金属后界面速度。

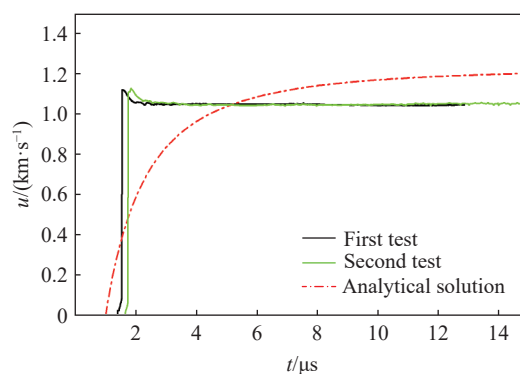


图 4 金属自由界面速度

Fig. 4 Free surface velocities of metal

为了得到金属隔层的冲击波透射率,需要首先得到金属隔层的入射压强。可由 A 型炸药与金属隔层阻抗匹配^[13] 得出

$$p_j = \frac{1}{2}u_i(\rho_2 D_i + \rho_1 D_j) = \frac{1}{2}u_i[\rho_2(c_2 + \lambda_2 u_i) + \rho_1 D_j] \quad (3)$$

式中: p_j 为 A 型炸药的爆轰压力, ρ_1 为 A 型炸药密度, u_i 为金属隔层前界面粒子速度。

p_j 数值见表 2, 其中, u_j 为炸药爆轰时的粒子速度, c_j 为炸药爆轰时的内部声速。把 p_j 代入式(3), 求得金属隔层前界面粒子速度 u_i 。金属隔层的入射压力 p_{2in} 可描述为

$$p_{2in} = \rho_2 D_i u_i = \rho_2(c_2 + \lambda_2 u_i)u_i \quad (4)$$

根据图 4, u_2 取图中速度起跳的最高点, 把 u_2 代入式(2), 计算得出透射压力 p_{2out} , 由式(4)计算得出入射压力 p_{2in} , 结果列于表 3。

表 2 A 型炸药和 JWL 状态方程参数^[14]

Table 2 Parameters of explosive A and JWL equation of state

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	$\bar{\omega}$	$\rho_1/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D_j/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$u_j/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$c_j/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	p_j/GPa
934.770	12.723	4.6	1.1	0.37	1.863	8.87	2.22	6.65	36.8

表 3 第 1 次和第 2 次金属自由界面速度测试计算结果

Table 3 Computation results of the first and second test for free surface velocities of metal

Shot No.	$u_2/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$D_2/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	p_{2in}/GPa	p_{2out}/GPa	Shot No.	$u_2/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$D_2/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	p_{2in}/GPa	p_{2out}/GPa
01	1.061	4.703	68.828	45.675	02	0.982	4.654	68.828	41.817
	1.113	4.734	68.828	48.193		1.058	4.700	68.828	45.490
	0.935	4.625	68.828	39.554		1.125	4.742	68.828	48.804
	1.118	4.738	68.828	48.475		1.182	4.777	68.828	51.644
	1.133	4.746	68.828	49.181					
	1.095	4.723	68.828	47.304					

图 5 为图 4 中第 3 个点速度开始增长时前面部分的放大图像。由图 5 可知, 金属自由界面粒子速度刚开始增长的时候, 并不是直接跳跃至最高点, 而是经过一段平滑的曲线增长。这是由于在金属隔层和传爆药之间存在厚度为 0.3 mm 的空气间隙, 当冲击波通过空气间隙时, 对空气进行压缩, 金属隔层压力的增加是连续的, 可以把这个过程看作是对金属隔层进行准等熵压缩。

同时, 空气间隙也会使冲击波的幅值衰减, 从冲击波传入空气间隙到传出这段时间, 爆轰产物在空气间隙中膨胀, 将其近似地视为等熵膨胀, 在此期间压强的改变量 Δp 为

$$\Delta p = \frac{\partial p}{\partial \bar{v}} \Delta \bar{v} \quad (5)$$

式中: $\Delta \bar{v}$ 为空气间隙的厚度和装药厚度的比值。 p 由 A 型炸药的爆轰产物 JWL 状态方程表示

$$p = A \left(1 - \frac{\bar{\omega}}{R_1 \bar{v}} \right) e^{-R_1 \bar{v}} + B \left(1 - \frac{\bar{\omega}}{R_2 \bar{v}} \right) e^{-R_2 \bar{v}} + \frac{\bar{\omega}}{\bar{v}} e_0 \quad (6)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 $\bar{\omega}$ 为经验系数, $\bar{v}$ 为爆轰产物的相对比容, e_0 为单位初始体积的比内能。对压强求相

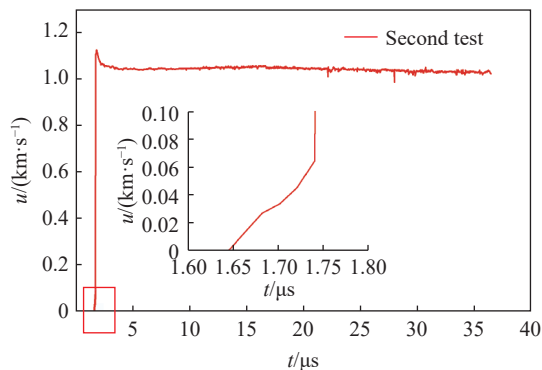


图 5 金属自由界面速度局部放大

Fig. 5 Local details for free surface velocities of metal

对体积的偏导可得

$$\frac{\partial p}{\partial \bar{v}} = -AR_1 \left(1 - \frac{\bar{\omega}}{R_1 \bar{v}}\right) e^{-R_1 \bar{v}} - BR_2 \left(1 - \frac{\bar{\omega}}{R_2 \bar{v}}\right) e^{-R_2 \bar{v}} + A \frac{\bar{\omega}}{R_1 \bar{v}^2} e^{-R_1 \bar{v}} + B \frac{\bar{\omega}}{R_2 \bar{v}^2} e^{-R_2 \bar{v}} - \frac{\bar{\omega}}{\bar{v}^2} e_0 \quad (7)$$

A 型炸药的 JWL 状态方程参数如表 2 所示。

把 $\Delta \bar{v}$ 和 JWL 状态方程参数代入式(5)和式(7), 得到爆轰产物在空气间隙中做等熵膨胀时减少的压强 Δp : $\Delta p = -119.819 \times 0.013 \text{ GPa} = -1.598 \text{ GPa}$ 。将炸药和金属阻抗匹配后的入射压力近似地处理为 p_{2in} 与 Δp 之和, 得到金属隔层厚度为 5 mm 时各个测量点的透射率 η_1 , 结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 金属隔层厚度为 5 mm 时, 冲击波透射率范围为 58.83%~76.82%, 平均透射率为 70.46%。考虑到侧向稀疏波影响, 选择两次测试中心点的透射率, 分别为 72.10% 和 72.59%, 取其平均值 72.35%。

2.2 金属隔层对钝感炸药冲击起爆的影响

分别测得金属隔层与台阶型样品炸药之间存在和不存在空气间隙情况下样品的后界面速度, 如图 6 和图 7 所示。

当金属隔层和 B 型炸药紧密贴合时, 对样品炸药产生作用的是 A 型炸药爆轰后通过金属隔层传播的冲击波, 图像显示为三角波。当金属隔层和 B 型炸药之间存在空气间隙时, 金属隔层撞击 B 型炸药会产生一个持续的压力, 输入的应是方波, 由于本实验中空气间隙过小, 仅为 0.22 mm, 因此未能形成方波。图 7 为不同厚度台阶面测试位置的速度对比图像。由图 7 可知, B 型炸药厚度为 2、3、5 和 10 mm 时, 当金属隔层和 B 型炸药之间有空气间隙时, 第一次起跳的速度高于没有空气间隙, 这是由于金属隔层在通过空气间隙时产生了加速。

由图 6 可知, 厚度小于 7 mm 的样品后界面速度都出现了二次起跳, 波系图如图 8 所示。因为 LiF 窗口和金属隔层的阻抗比 A 型炸药的阻抗高, 均会对冲击波产生反射; B 型炸药处于高温高压的爆轰状态时, 在金属前界面也会反射冲击波。利用式(8)、式(9)、式(10)可以估算金属隔层后界面反射的冲击波二次起跳的间隔时间 Δt 。取没有空气间隙、样品厚度为 3 mm 的后界面粒子速度 692.48 m/s, 代入式(8)、式(9)、式(10), 得到冲击二次起跳间隔时间为 0.94 μs , 如果是金属隔层前界面反射的冲击波, 二次起跳间隔时间还会增加 1 μs 左右。表 5 列出了从图像得到的二次起跳的间隔时间, 和理论计算基本一致, 所以二次起跳是由金属隔层后界面反射的冲击波引起的。

$$t_3 = \frac{h}{D_3} \quad (8)$$

$$\Delta t_1 = \frac{h - u_1 t_3}{D_3 - u_3 + u_1} + \frac{h - u_1 t_3}{D_3} \quad (9)$$

表 4 金属自由界面速度测试

Table 4 Test of free surface velocities of metal

Shot No.	p_{2in}/GPa	p_{2out}/GPa	$\eta_1/\%$
01	67.230	45.675	67.94
	67.230	48.193	71.68
	67.230	39.554	58.83
	67.230	48.475	72.10
	67.230	49.181	73.15
	67.230	47.304	70.04
02	67.230	41.817	62.20
	67.230	45.490	67.66
	67.230	48.804	72.59
	67.230	51.644	76.82

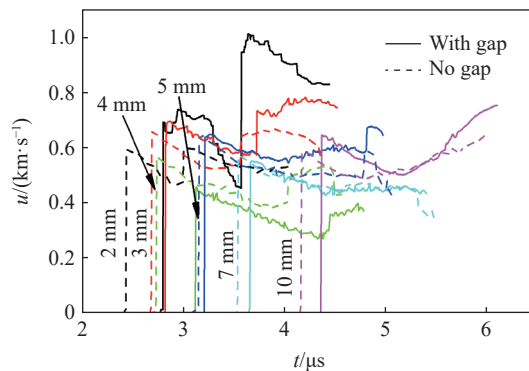


图 6 炸药样品界面速度剖面

Fig. 6 Interface velocities of the sample explosive

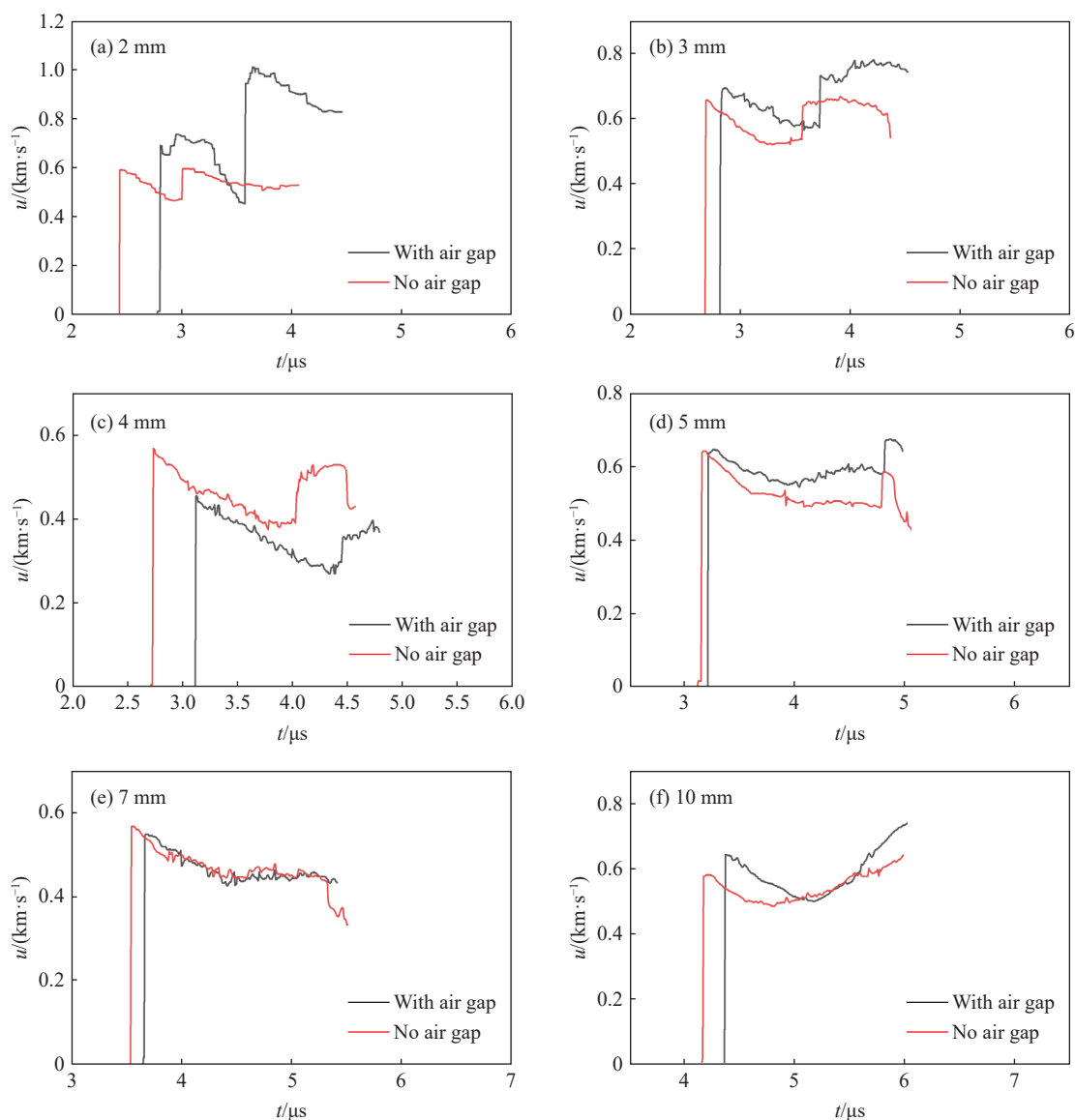


图7 不同厚度样品的界面速度对比

Fig. 7 Interface velocities comparison of the sample with different thicknesses

$$\Delta t_2 = \frac{h - u_t(t_3 + \Delta t_1)}{D_3} \quad (10)$$

式中: t_3 为冲击波从金属隔层后界面到达 LiF 窗口的时间, h 为样品台阶厚度, D_3 为样品冲击波速度, Δt_1 为冲击波从 LiF 窗口到达金属后界面的时间, Δt_2 为冲击波从金属后界面反射后追到样品粒子的时间。

由表5可知, 台阶样品厚度从 2 mm 增加到 5 mm 时, 二次起跳的时间间隔逐渐增加, 这是由于随着台阶厚度的增加, 冲击波反射时间变长。在台阶样品厚度为 7 mm 和 10 mm 时, 没有观察到二次起跳现象, 这是因为相较于前面的台阶, 7 mm 和 10 mm 台阶相对较厚, 冲击波追赶粒子所需的时间更长, 所以在光纤探头能够测量的时间范围内冲击波未能追到后界面的粒子。

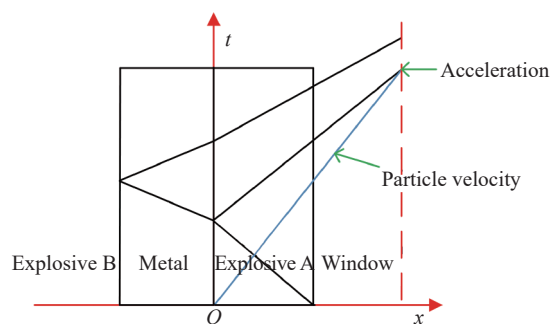


图8 波系图

Fig. 8 Wave interaction diagram

由于这 4 次实验都是利用飞片起爆 A 型炸药, 然后通过空气间隙和金属隔层, 所以 Shot 01、Shot 02 和 Shot 03、Shot 04 实验中金属隔层的速度相同。根据金属后界面自由速度对台阶型 B 型炸药进行阻抗匹配, 将 B 型炸药参数($\rho = 1.893 \text{ g/cm}^3$, $c = 2.418 \text{ 77 km/s}$, $\lambda = 2.139 \text{ 61}$)^[15] 代入式(3), 得到 B 型炸药的前界面粒子速度 u_3 为 0.980 km/s , 冲击波速度 D_3 为 4.515 km/s , 入射压强 p_3 为 8.389 GPa 。如图 6 所示, 仅台阶厚度为 10 mm 的 B 型炸药样品的后界面速度有上升趋势, 说明当入射压力为 8.389 GPa 时, 反应发生在样品厚度为 $7 \sim 10 \text{ mm}$ 之间的某个位置。

3 结 论

在火炮平台上进行了一系列一维平面冲击实验。采用 PDV 测速系统对金属隔层自由界面速度和 B 型炸药后界面速度进行了测量, 得到了速度随时间变化曲线, 由此分析得出以下结论。

(1) 运用阻抗匹配方法, 根据金属隔层后界面速度和 A 型炸药爆轰粒子速度, 得到了金属隔层的透射压力和入射压力, 进而计算得到金属隔层厚度为 5 mm 时冲击波的透射率为 72.35% ;

(2) 传爆药和金属隔层之间的空气间隙使原本的冲击压缩过程转变为准等熵压缩和冲击压缩两个过程, 同时使冲击波的幅值减小;

(3) 金属隔层和 B 型炸药间存在较小空气间隙时, 会使金属隔层产生加速, 炸药更加容易反应;

(4) 当金属隔层厚度为 5 mm , 并且存在空气间隙时, A 型炸药不能使厚度为 10 mm 的 B 型炸药达到爆轰状态。

参考文献:

- [1] 姬广富. 高能钝感炸药分子和晶体的结构和性能的理论研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
JI G F. Theoretical study on the structure and properties of molecules and crystalline of insensitive high explosives [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002.
- [2] 章冠人. 凝聚炸药起爆动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
ZHANG G R. Initiation kinetics of condensed explosives [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991.
- [3] 陈朗, 伍俊英, 方青, 等. 固体炸药冲击起爆研究 [J]. 火炸药学报, 2004, 27(1): 1–4.
CHEN L, WU J Y, FANG Q, et al. Investigation of solid explosives initiation under shock waves [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2004, 27(1): 1–4.
- [4] 胡湘渝, 黄风雷, 张德良. 铸装 B 炸药的隔板实验数值模拟 [C]//全国计算流体力学会议, 2000: 115–119.
HU X Y, HUANG F L, ZHANG D L. Numerical simulation of separator experiment for cast B explosives [C]//National Conference on Computational Fluid Dynamics, 2000: 115–119.
- [5] 郑波, 袁鹏刚. 验证板反射冲击波对固体推进剂冲击起爆影响的实验研究 [J]. 固体火箭技术, 2014, 37(5): 734–736.
ZHENG B, YUAN P G. Experimental study of influence of reflected shock from witness plate on propellant SDT [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(5): 734–736.
- [6] 向梅, 黄毅民, 饶国宁, 等. 复合装药结构隔板实验与数值模拟 [J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 246–250.
XIANG M, HUANG Y M, RAO G N, et al. Experimental and numerical simulation study of the shockwave sensitivity of composite charge explosive [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(2): 246–250.
- [7] 蔡进涛, 王桂吉, 赵剑衡, 等. 固体炸药的磁驱动准等熵压缩实验研究 [J]. 高压物理学报, 2010, 24(6): 455–460.
CAI J T, WANG G J, ZHAO J H, et al. Magnetically driven quasi-isentropic compression experiments of solid explosives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(6): 455–460.

- [8] GUSTAVSEN R L, DATTELBAUM D M, SHEFFIELD S A, et al. Application of photonic Doppler velocimetry (PDV) to shock and detonation physics experiments: LA-UR-11-00886 [R]. Los Alamos, NM (United States): Los Alamos National Laboratory, 2011.
- [9] SARGIS P D, MOLAU N E, SWEIDER D, et al. Photonic Doppler velocimetry: UCRL-ID-133075 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
- [10] 李建中, 王德田, 刘俊, 等. 多点光子多普勒测速仪及其在爆轰物理领域的应用 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0422001.
LI J Z, WANG D T, LIU J, et al. Multi-channel photonic Doppler velocimetry and its application in the field of explosion physics [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0422001.
- [11] 奥尔连科 И И. 爆炸物理学 [M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
ОПЛЕХКО И И. Explosive physics [M]. Translated by SUN C W. Beijing: Science Press, 2011.
- [12] 王礼立. 应力波基础 [M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
WANG L L. Foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing: Defense Industry Press, 2005.
- [13] 张震宇, 田占东, 陈军, 等. 爆轰物理 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2016.
ZHANG Z Y, TIAN Z D, CHEN J, et al. Detonation physics [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2016.
- [14] 向梅, 黄毅民, 韩勇, 等. JO-9159 与 JB-9014 复合药柱爆轰驱动平面飞片实验与数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2014, 28(3): 379–384.
XIANG M, HUANG Y M, HAN Y, et al. Experimental study and numerical simulation of plane flyer driven by detonation of JO-9159 and JB-9014 composite charge [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(3): 379–384.
- [15] 刘俊明, 张旭, 赵康, 等. 用 PVDF 压力计研究未反应 JB-9014 钝感炸药的 Grüneisen 参数 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 051301.
LIU J M, ZHANG X, ZHAO K, et al. Using PVDF gauge to study Grüneisen parameter of unreacted JB-9014 insensitive explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5): 051301.

Effects of Metal Interlayer and Air Gap on the Shock Initiation of Insensitive Explosives

PENG Wenyang^{1,2}, ZHONG Bin¹, GU Yan¹, ZHANG Xu¹, YANG Shuqi^{1,2}, SHU Junxiang¹, QIN Shuang^{1,2}

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. Department of Graduate Students, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: The influences of air gap and metal interlayer on the shock initiation of the $\varnothing 50$ mm stepped explosive B have been investigated by means of the sapphire flyer planar impact experiment and photonic doppler velocimetry (PDV) technique. In the experiment, a lithium fluoride (LiF) window was stuck to the rear interface of explosive sample to allow the rear interface velocity between the metal and the sample explosive be measured by PDV technique. Both the transmission shock pressure and the incident shock pressure can be obtained by the impedance-match method. The experiment results have shown that the air gap divided the impact compression process into quasi-isentropic compression and impact compression, respectively, and at the same time, the amplitude of the shock pressure was declined. Specifically, the shock wave attenuation range caused by 5 mm thick metal was achieved. When the explosive A was used as the booster, and with a 0.3 mm thick air gap and 5 mm thick metal experimental setup, the reaction of sample explosive B started in a range from 7 mm to 10 mm.

Keywords: metal interlayer; air gap; shock initiation; photonic doppler velocimetry; stepped explosive