

高压物理学报

钝感炸药冲击起爆反应过程的PDV技术

杨舒棋 张旭 彭文杨 舒俊翔 刘寿先 覃双 钟斌

PDV Technology of Shock Initiation Reaction Process of Insensitive Explosive

YANG Shuqi, ZHANG Xu, PENG Wenyang, SHU Junxiang, LIU Shouxian, QIN Shuang, ZHONG Bin

引用本文:

杨舒棋, 张旭, 彭文杨, 等. 钝感炸药冲击起爆反应过程的PDV技术[J]. 高压物理学报, 2020, 34(2):023402. DOI: 10.11858/gywlb.20190856

YANG Shuqi, ZHANG Xu, PENG Wenyang, et al. PDV Technology of Shock Initiation Reaction Process of Insensitive Explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(2):023402. DOI: 10.11858/gywlb.20190856

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190856>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属隔层和空气间隙对钝感炸药冲击起爆的影响

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

高压物理学报. 2020, 34(3): 033401 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190816>

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>

用PVDF压力计研究未反应JB-9014钝感炸药的Gr ü neisen参数

Using PVDF Gauge to Study Gr ü neisen Parameter of Unreacted JB-9014 Insensitive Explosive

高压物理学报. 2018, 32(5): 051301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180524>

基于双光源干涉的PDV数据补偿方法

A Compensation Method of Photonic Doppler Velocimeter Based on Two Laser Sources

高压物理学报. 2019, 33(5): 053201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180659>

高聚物黏结炸药的分子模拟进展

Progress of Atomistic Simulations for Plastic Bonded Explosives

高压物理学报. 2019, 33(3): 030104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190755>

爆炸冲击波在仿桥梁结构内传播的数值模拟

Numerical Simulation of Explosive Shock Wave Propagation in Imitation Bridge Structure

高压物理学报. 2019, 33(4): 042301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180649>

钝感炸药冲击起爆反应过程的 PDV 技术

杨舒棋, 张 旭, 彭文杨, 舒俊翔, 刘寿先, 覃 双, 钟 斌

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为研究 A 型钝感炸药冲击起爆反应演化过程, 进行了火炮驱动蓝宝石飞片的一维平面冲击实验。实验中采用光子多普勒测速仪 (Photonic Doppler velocimetry, PDV) 技术测量冲击起爆后台阶型炸药的粒子速度。在炸药不同厚度台阶的后界面固定镀铝膜的楔形氟化锂 (LiF) 窗口, 利用阻抗匹配将 PDV 测量的 LiF 窗口波后粒子速度转化为炸药样品波后粒子速度。比较组合式电磁粒子速度计和 PDV 两种测速技术, 结果表明, 相较于组合式电磁粒子速度计, PDV 测量的粒子精度更高。简要分析了 PDV 测速探头角度、探头孔径、窗口折射率等影响, 得到 PDV 测速的相对不确定度小于 1%。

关键词: 光子多普勒测速仪 (PDV); 台阶型钝感炸药; 边侧稀疏角; 组合式电磁粒子速度计

中图分类号: O384

文献标识码: A

钝感炸药 (Insensitive high explosive, IHE) 的安全性能是弹药设计的重点。以三硝基三氨基苯 (TATB) 为基的钝感高能炸药在国防领域有着广泛应用, 本研究中所用的 A 型炸药为我国研制的以 TATB 和黏结剂为主要成分的塑性黏结炸药, 密度为 1.895 g/cm^3 , 爆速为 7.660 km/s 。

在研究钝感炸药冲击起爆反应演化过程的测量方法中, 高精度的激光干涉测速技术被国内外学者广泛使用^[1]。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 和桑迪亚国家实验室 (SNL) 使用光子多普勒测速仪 (Photonic Doppler velocimetry, PDV) 和数据分析工具开展了大量测速实验, Jensen 等^[2] 和 Dolan 等^[3] 研究了影响 PDV 测速的不确定度因素。Gustavsen 等^[4] 采用 PDV 技术, 测量了 TATB 基和 HMX 基炸药的粒子速度, 准确获得了 TATB 基炸药的反应区。张涛等^[5] 采用自行研制的波分时复用多点激光干涉测速系统, 研究了钝感高能炸药 JBO-9021 的冲击起爆性能, 结合楔形炸药样品, 得到了冲击波进入炸药特定深度位置的波后粒子速度剖面。裴红波等^[6] 采用光子多普勒测速技术, 测得了 TATB 基 JB-9014 炸药的粒子速度剖面, 对粒子速度剖面求取时间的一阶导数, 利用时间导数拐点确定了炸药反应区宽度和反应时间, 测速的相对不确定度优于 2%。综合国内外研究发现, 激光干涉测速技术是研究炸药冲击起爆过程和爆轰性能的一种有效方法。

国内研究 A 型钝感炸药冲击起爆反应演化过程主要采用电磁粒子速度计测试方法。由于电磁法本身存在缺陷, 导致测量数据具有不准确, 因而需要采用高精度的 PDV 测量技术进行测量。在运用 PDV 测量技术研究炸药不同深度处的粒子速度时, 需采用不同厚度的圆柱形样品进行多发实验, 然而由于火炮加载的不可控性, 火药装药量相同时的入射压力依然存在差异。为此, 本研究设计了台阶形状的 A 型钝感炸药样品, 采用 PDV 技术测量其粒子速度, 实现了在同一发实验中测量不同厚度样品的粒子速度。

* 收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2019-11-30

基金项目: 军科委基础加强重点项目 (2019-JCJQ-ZD-203); 科学挑战专题 (TZ2018001)

作者简介: 杨舒棋 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事冲击起爆研究. E-mail: yangshuqi77@126.com

通信作者: 张 旭 (1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体动力学研究. E-mail: caepzx@sohu.com

1 实验原理

1.1 PDV 实验装置

采用火炮加载系统驱动蓝宝石飞片撞击炸药,进行一维平面冲击实验。实验装置主要包括火炮驱动系统、蓝宝石飞片、炸药样品、LiF窗口、光纤测速探头、PDV、示波器等。

火炮口径为 57 mm,采用尺寸为 $\phi 55\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的蓝宝石飞片撞击炸药产生一维平面波。通过改变火药装药量得到递增的蓝宝石飞片撞击速度,实验所用火药装药量为 1 000、1 100 和 1 150 g,分别命名为 Shot 01、Shot 02 和 Shot 03。炸药样品为台阶型,中心小圆柱处厚度为 10 mm,5 个扇面的厚度分别为 2、3、4、5 和 7 mm。实验安装 6 个光纤探头,分别正对炸药中心和 5 个不同高度的扇形台阶中心。实验装置和炸药安装如图 1 所示。

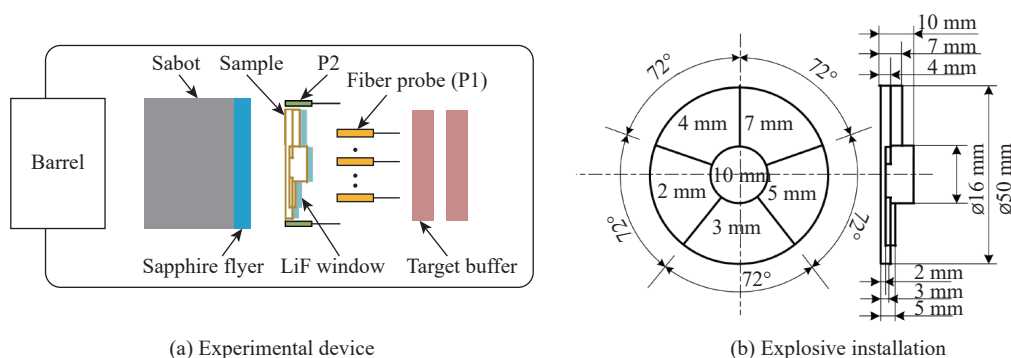


图 1 PDV 实验装置和炸药安装示意图

Fig. 1 Schematic of PDV experimental device and explosive installation

实验所用的 PDV 为全光纤结构,其光电探测器带宽为 12.5 GHz,输出激光波长为 1 550 nm。实验中配合使用的示波器带宽为 13 GHz,最高采样速率为 40 GS/s。

利用 PDV 测速系统测量炸药爆轰产物的界面粒子速度时,需在炸药背面安装 1 个尺寸为 $\phi 15\text{ mm} \times 11\text{ mm}$ 、5 个尺寸为 $\phi 20\text{ mm} \times 11\text{ mm}$ 的楔形 LiF 窗口,窗口和炸药之间涂少量硅油,排除二者之间的空气。LiF 窗口与样品接触一端镀厚度为 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 的铝膜,并且为避免输入激光在靠近光纤探针侧表面的 LiF 窗口处的反射光对测试信号光产生影响,LiF 窗口的上表面与水平的下表面存在 3° 的倾角。实验采用了两种直径的测速探头,其中测量界面粒子速度的探头直径为 3.2 mm,测量蓝宝石飞片速度的探头直径为 1.8 mm,测试探头输出激光的焦斑直径约为 0.2 mm,光纤芯径为 $90\text{ }\mu\text{m}$ 。探头到 LiF 窗口的测试距离为 35~42 mm,实验装置及炸药安装实物如图 2 所示。

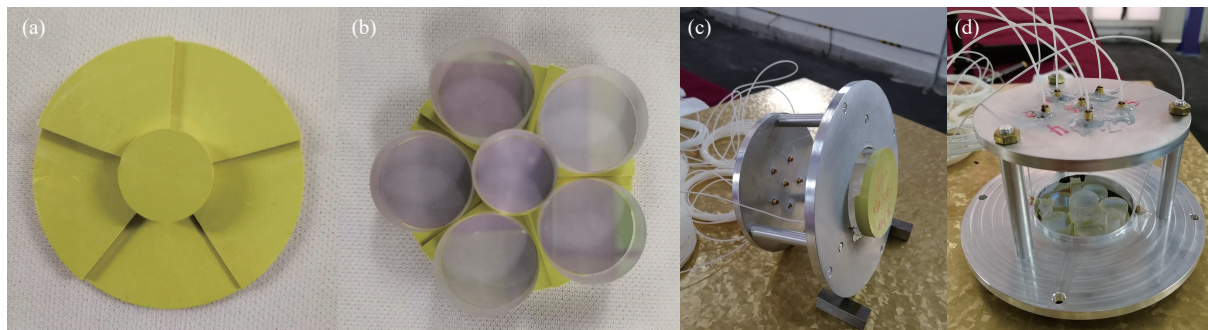


图 2 PDV 实验装置及炸药安装实物

Fig. 2 Images of PDV experimental device and explosive installation

1.2 组合式电磁粒子速度计测试实验装置

组合式电磁粒子速度计测试采用相同的火炮加载系统进行一维平面冲击实验。实验装置如图 3(a) 所示。通过改变火药装药量来控制蓝宝石飞片速度, 进而控制初始入射压力。所用火药装药量与 PDV 实验同为 1 000、1 100 和 1 150 g, 分别命名为 Shot 04、Shot 05 和 Shot 06。

A 型炸药是 $\varnothing 42 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的圆柱形组合药柱, 为测量炸药样品不同深度的冲击波后粒子速度, 炸药样品以 30° 角被切割成两块楔形炸药, 用环氧树脂把组合式电磁粒子速度计嵌入两块楔形炸药中。实验采用激光测速环测量蓝宝石飞片速度, 通过飞片测速环遮挡 3 组激光的时间差值计算飞片速度, 同时在炸药表面用环氧树脂粘贴 3 个电磁粒子速度计, 用于测量蓝宝石飞片撞击炸药表面瞬时的界面粒子速度。在冲击波传播方向, 铝基组合式电磁粒子速度计的 8 个电磁粒子速度计测量炸药样品的深度间隔为 1 mm, 3 个冲击波示踪器的间距为 0.5 mm, 组合式电磁粒子速度计炸药安装如图 3(b) 所示。

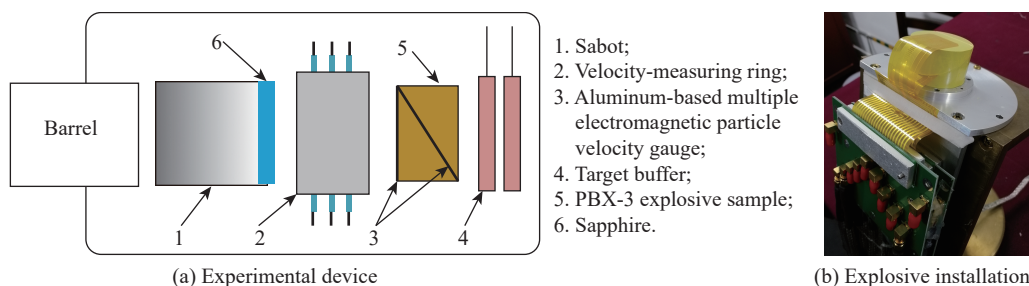


图 3 组合式电磁粒子速度计实验装置和炸药安装

Fig. 3 Experimental device and explosive installation of multiple electromagnetic particle velocity gauge

2 数据分析

2.1 入射冲击压力的计算

利用阻抗匹配法分析计算蓝宝石飞片撞击炸药产生的入射压力^[7]

$$p_{0L} = \rho_{0L} D_L (u_{\text{imp}} - u_p) \quad (1)$$

$$p_{0S} = \rho_{0S} D_S u_p \quad (2)$$

式中: p_{0L} 为蓝宝石初始入射冲击压力, GPa; p_{0S} 为炸药样品初始入射冲击压力, GPa; ρ_{0L} 为蓝宝石初始密度, g/cm^3 ; ρ_{0S} 为炸药样品初始密度, g/cm^3 ; D_L 为蓝宝石中的冲击波速度, km/s ; D_S 为炸药样品的入射冲击波速度, km/s ; u_{imp} 为蓝宝石飞片的撞击速度, km/s ; u_p 为波后粒子速度, km/s 。

根据蓝宝石材料和 A 型炸药的 Hugoniot 关系, 将式(1)和式(2)写为

$$p_{0L} = \rho_{0L} [C_{0L} + \lambda_L (u_{\text{imp}} - u_p)] (u_{\text{imp}} - u_p) \quad (3)$$

$$p_{0S} = \rho_{0S} (C_{0S} + \lambda_S u_p) u_p \quad (4)$$

式中: $\rho_{0L} = 3.985 \text{ g/cm}^3$; C_{0L} 、 λ_L 为蓝宝石的 Hugoniot 系数, $C_{0L} = 11.19 \text{ km/s}$, $\lambda_L = 1.00$ ^[7]; C_{0S} 、 λ_S 为炸药样品的 Hugoniot 系数, $C_{0S} = 2.42 \text{ km/s}$, $\lambda_S = 2.14$ ^[8-9]。

由界面连续性可知, $p_{0L} = p_{0S}$, 结合式(3)和式(4), 得到未反应炸药的波后粒子速度 u_p , 并计算得出实验的初始入射冲击压力 p_0 , 结果如表 1 所示。

2.2 样品/LiF 窗口界面粒子速度转换炸药样品波后粒子速度

由于 PDV 采用双光束混频干涉技术, 测量得到的干涉信号需进行时频分析, 使用中国工程物理研究院流体物理研究所开发的软件进行数据处理, 采用窗口傅里叶变换方法, 得到 PDV 测量炸药样品/LiF 窗口界面粒子速度。由于炸药样品和窗口材料的阻抗不匹配, 所以由 PDV 测得的 LiF 窗口波后粒子速度 u_w 并不等于炸药样品冲击波后粒子速度 u_s 。炸药样品波后粒子速度 u_s 的转换公式为^[8]

$$u_s = \frac{u_w [\rho_{0w}(C_{0w} + \lambda_w u_w) + \rho_{0s} D_s]}{2\rho_{0s} D_s} \quad (5)$$

式中: u_w 为 PDV 测得的 LiF 窗口波后粒子速度, km/s; ρ_{0w} 为窗口材料初始密度, $\rho_{0w} = 2.641 \text{ g/cm}^3$ ^[10]; C_{0w} 、 λ_w 为窗口材料系数, $C_{0w} = 5.176 \text{ km/s}$, $\lambda_w = 1.353$ ^[10]; D_s 为炸药样品内冲击波速度, km/s。

表 1 台阶型炸药平面冲击实验参数

Table 1 Parameters of plane impact experiments on stepped explosive

Shot No.	$\rho_{0s}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$u_{\text{imp}}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$u_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	p_0/GPa
01	1.897	1.385	1.151	10.66
02	1.897	1.502	1.240	11.93
03	1.895	1.550	1.277	12.47

由于实验过程中高速蓝宝石飞片在撞击炸药样品时会存在微小角度, 并且不同示波器的响应时间存在偏差, 线路损耗不同, 导致测量得到的台阶型炸药样品的起跳时间存在误差, 因此需要对实验数据进行修正。根据本课题组使用相同火炮加载系统和测速系统进行的 A 型炸药 Hugoniot 关系测量实验的结论^[8-9], 炸药的冲击 Hugoniot 关系为 $D_s = 2.418\,77 + 2.139\,61u_s$ 。结合冲击 Hugoniot 关系和式(5), 计算得到的波后粒子速度 u_s 和冲击波速 D_s 如表 2 所示。PDV 测量得到的炸药样品波后粒子速度-时间 (u_s-t) 曲线如图 4 所示。

表 2 台阶型炸药平面冲击实验数据

Table 2 Data of plane impact experiments on stepped explosive

Step thickness/mm	$u_w/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$			$u_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$			$D_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$		
	Shot 01	Shot 02	Shot 03	Shot 01	Shot 02	Shot 03	Shot 01	Shot 02	Shot 03
2	0.886	0.982	1.041	1.224	1.334	1.402	5.038	5.273	5.419
3	0.895	0.985	1.033	1.235	1.338	1.393	5.060	5.281	5.399
4	0.895	1.007	1.064	1.235	1.363	1.428	5.060	5.335	5.474
5	0.922	1.030	1.113	1.266	1.389	1.483	5.127	5.390	5.591
7	0.985	1.128	1.383	1.338	1.500	1.782	5.281	5.627	6.232
10	1.075	1.346	1.800	1.439	1.741	2.228	5.498	6.143	7.186

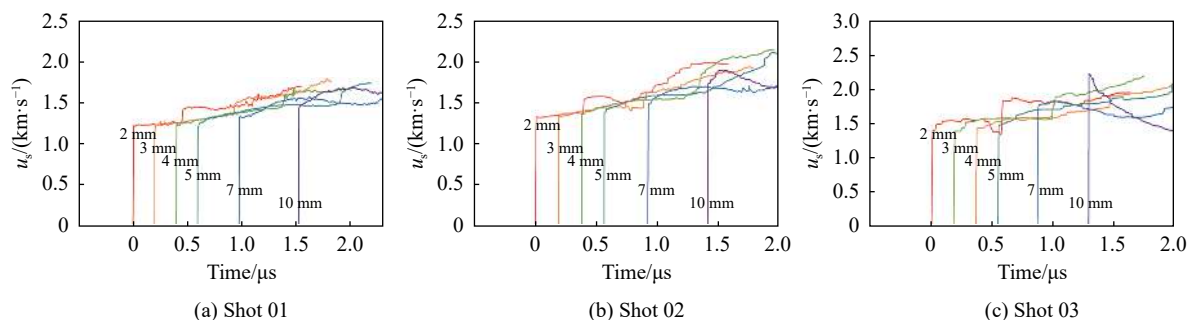


图 4 PDV 测量的炸药样品粒子速度-时间关系

Fig. 4 Particle velocity-time relationship of explosive measured by PDV

由炸药样品波后粒子速度 u_s 可以看出, A 型台阶炸药会发生二次加速现象, 根据图 4 可以得出不同厚度台阶样品二次加速的时间间隔, 如表 3 所示。其中 Δt_2 、 Δt_3 、 Δt_4 、 Δt_5 分别代表 2、3、4 和 5 mm 厚的台阶炸药样品发生二次加速的时间间隔。

由图 4 可知, 2、3、4 和 5 mm 厚样品粒子的速度发生了二次加速, 但 3、4、5 mm 厚样品的波后粒子速度的二次加速并不明显。由于 LiF 窗口和炸药样品的阻抗相差较大, 冲击波到达样品和 LiF 窗口的

接触面时会发生反射,反射的冲击波在炸药样品内传播到达炸药样品和蓝宝石飞片的交界面发生二次反射后,追赶上测量界面的粒子,因此在图 4 中可以看到粒子速度二次加速。由于 7 mm 和 10 mm 的炸药样品较厚,反射的冲击波在测量范围内未追赶上测量界面的粒子。

在入射压力分别为 10.66 GPa (Shot 01) 和 11.93 GPa (Shot 02) 的两发实验中,如图 4(a) 和图 4(b) 所示,冲击波分别在 2、3、4 和 5 mm 厚的台阶样品内传播时,随着样品发生化学反应释放能量,粒子速度增长缓慢,二次加速后速度信号呈现明显的“驼峰”形状。随着冲击波强度的增加,炸药反应速率不断加快,“驼峰”形状逐渐尖锐,但并没有转变为爆轰。当入射压力高达 12.47 GPa (Shot 03) 时,如图 4(c) 所示,2 mm 厚样品的波后粒子速度发生二次加速之前,已呈现明显的“驼峰”形状,并且 PDV 测量的相邻两个速度波形时间间隔逐渐减小,说明此时化学反应释放的能量使冲击波逐渐加强,最终转变为稳定的爆轰波,图 4(c) 中 10 mm 处的粒子速度曲线已呈明显的三角爆轰波,说明完成了冲击转爆轰过程(SDT)。

2.3 两种测速方法的实验数据对比

在炸药冲击起爆的研究中,国内外采用的测试技术主要为 PDV 和组合式电磁粒子速度计技术。在课题组提供的使用组合式电磁粒子速度计测量 A 型楔形炸药样品的实验数据中,选取了炸药密度相近、火药装药量相同的实验数据进行对比,组合式电磁粒子速度计测量实验所用楔形炸药的参数如表 4 所示,测量得到的实验数据如表 5 所示,其中 ρ_{01} 、 ρ_{02} 分别为位于上方和下方的两块楔形炸药样品的初始密度;组合式电磁粒子速度计测量得到的粒子速度如图 5 所示。

表 3 炸药二次加速时间间隔

Table 3 Time interval of secondary acceleration of explosive

Shot No.	$\Delta t_2/\mu\text{s}$	$\Delta t_3/\mu\text{s}$	$\Delta t_4/\mu\text{s}$	$\Delta t_5/\mu\text{s}$
01	0.435	0.714	0.962	1.291
02	0.388	0.695	0.833	1.310
03	0.575	0.800	1.085	1.415

表 4 楔形炸药平面冲击实验参数

Table 4 Parameters of plane impact experiments on wedge-shaped explosive

Shot No.	$\rho_{01}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_{02}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$u_{\text{imp}}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$
04	1.898	1.893	1.356
05	1.897	1.894	1.489
06	1.895	1.900	1.567

表 5 楔形炸药平面冲击实验数据

Table 5 Data of plane impact experiments on wedge-shaped explosive

Depth/mm	$D_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$			$u_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$		
	Shot 04	Shot 05	Shot 06	Shot 04	Shot 05	Shot 06
3	4.717	4.748	4.988	1.151	1.263	1.481
4	4.808	5.123	5.470	1.184	1.293	1.335
5	4.659	5.166	5.371	1.191	1.330	1.396
7	4.753	5.274	5.721	1.281	1.537	1.671
10	5.208	6.701	7.417	1.346	2.177	2.041

将 PDV 和组合式电磁粒子速度计测得的相同厚度样品的数据进行对比,如图 6 所示。由图 6 可知,随着入射压力的增加,两种测试方法得到的相同厚度样品的速度曲线的时间差逐渐减小,说明在高入射压力下,两种测试方法得到的速度曲线逐渐接近。但组合式电磁粒子速度计所测粒子速度较 PDV 测量的速度结果偏小,这是由于组合式电磁粒子速度计属于接触式测量,测量设备的制造工艺、装配方式、磁场的均匀性、飞片撞击的平面性、测试线路等均会影响测量结果,并且组合式电磁粒子速度计呈 30°角嵌入楔形炸药中,在飞片撞击炸药样品后,会随着样品运动,并对流场产生破坏。Cau^[11]对比了电磁粒子速度计在倾斜放置和水平放置时的测试结果,发现倾斜放置的电磁粒子速度计影响了原本的一维反应流场,测得的粒子速度信号幅度低于水平放置的电磁粒子速度计所测的实验结果。由

图5(d)可知,组合式电磁粒子速度计测得的粒子速度曲线相较于PDV测量结果存在很大噪声,楔形炸药样品表面0 mm处和沿冲击波传播方向3 mm处速度计测量的粒子速度存在速度尖峰,使数据点读取存在较大误差。而PDV属于非接触测量,不会对流场产生影响,粒子速度-时间曲线更加平滑,数据精度更高。

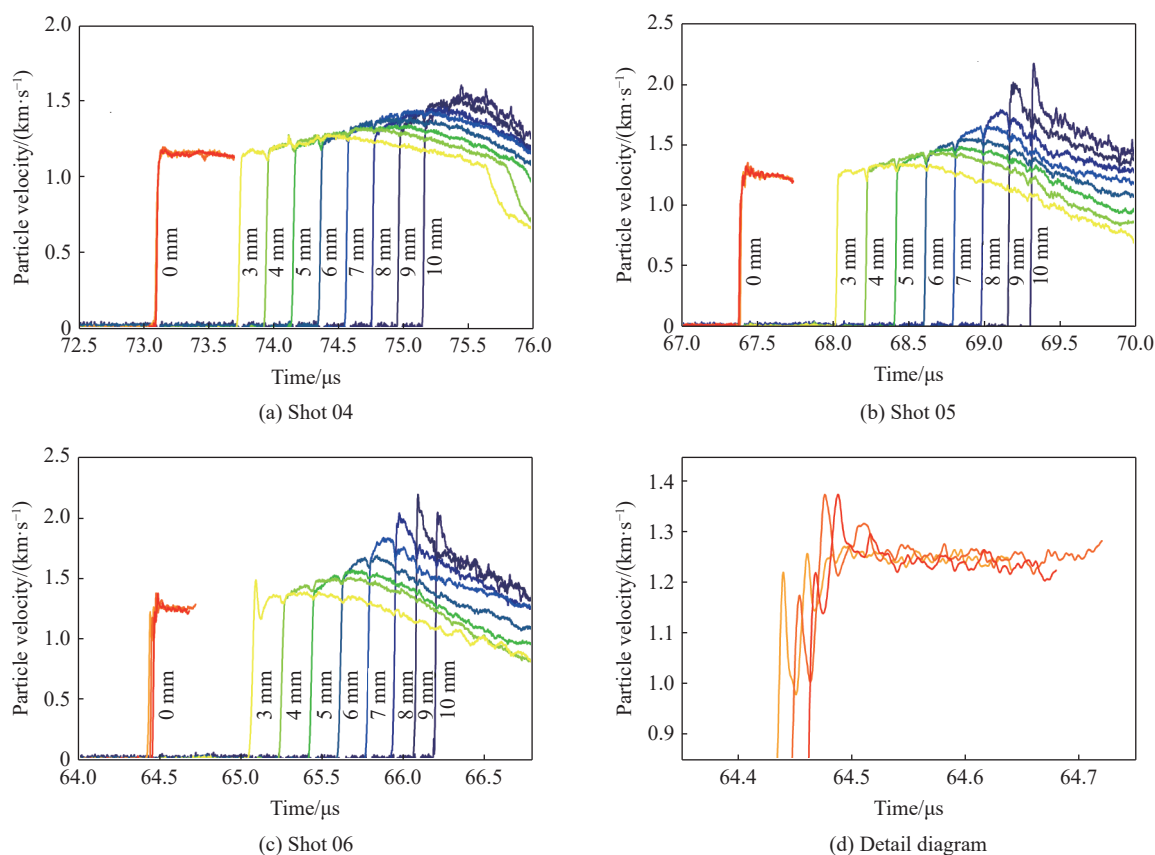


图5 组合式电磁粒子速度计测量的粒子速度历史

Fig. 5 History of particle velocity measured by multiple electromagnetic particle velocity gauge

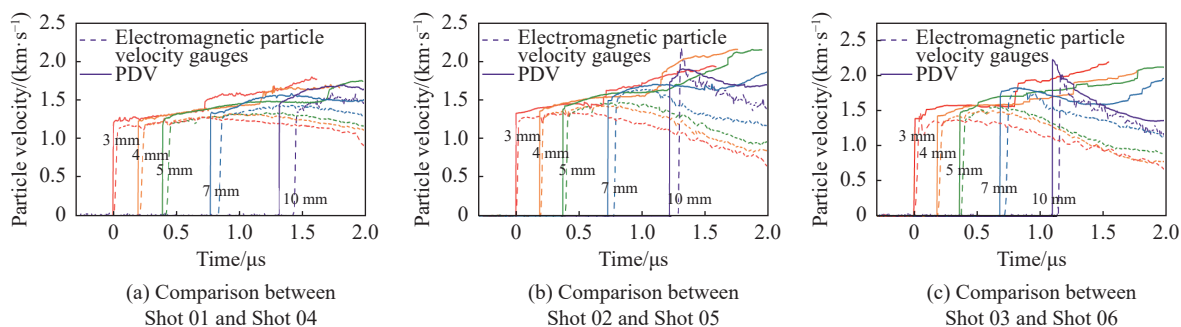


图6 两种方法测量得到的粒子速度对比

Fig. 6 Comparison of particle velocities obtained by two methods

3 误差分析

3.1 边侧稀疏波

由于炸药样品为不同厚度的台阶型炸药,需要考虑边侧稀疏波对激光探头测速的影响^[12]。PDV的6个探头分布在以炸药为圆心、直径为33 mm的圆周上,如图7所示。每个探头到达扇形炸药边缘的距离为8.5 mm,到达其他厚度炸药边缘的垂直距离为9.698 mm。

边侧稀疏波相对于冲击波后的物质以声速 C 传播(在样品被冲击压缩的过程中, 样品内的声速是不断变化的, 为方便计算, 取声速 $C = 5 \text{ km/s}$), 假设冲击波到达样品前表面 M_1N_1 的时间间隔为 Δt , 在 Δt 时间内炸药的后表面 A_1B_1 以粒子速度 u_s 运动到界面 AB 处, 如图 8 所示。在跟随粒子运动的坐标系中观察, 以 A 为中心, 半径为 $C\Delta t$ 的圆形区域即为受边侧稀疏波影响的 PDV 探头测速的范围。因此在实验坐标系中观察, 前表面的 MN 范围内是未受影响的区域。它是进行实验测量时, 在样品前表面可以布置探头的最大区域。A 型炸药平面冲击边侧稀疏波数据如表 6 所示, 其中 M_1M_2 、 M_1M_3 、 M_1M_4 、 M_1M_5 、 M_1M_7 、 M_1M_{10} 分别为 2、3、4、5、7 和 10 mm 厚的炸药样品受到边侧稀疏波影响的距离。

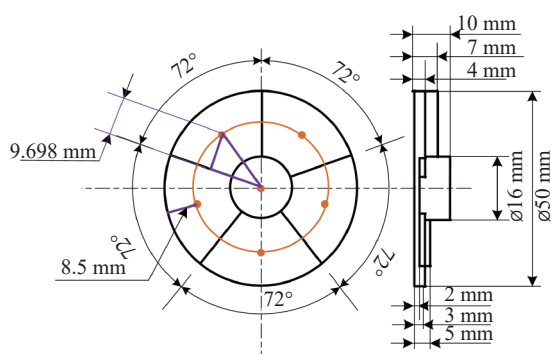


图 7 PDV 探头布置

Fig. 7 PDV probe arrangement

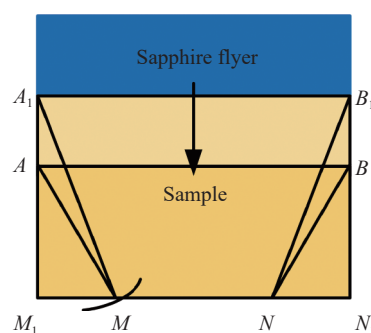


图 8 边侧稀疏的影响

Fig. 8 Effect of side sparsity

表 6 A 型炸药平面冲击边侧稀疏波数据(声速 $C = 5 \text{ km/s}$)Table 6 Data of sparse waves on the side of flat impact of A explosives ($C = 5 \text{ km/s}$)

Shot No.	M_1M_2/mm	M_1M_3/mm	M_1M_4/mm	M_1M_5/mm	M_1M_7/mm	M_1M_{10}/mm
01	1.374	2.048	2.503	3.264	4.225	5.579
02	1.240	1.857	2.436	2.616	3.489	4.245
03	1.088	1.600	1.973	2.393	2.569	2.530

由数据分析可以得出, 每个探头到达炸药扇形边缘的距离为 $(50 - 33)/2 = 8.5 \text{ mm}$, 可以认为边侧稀疏波不会影响探头探测点。考虑相邻扇形台阶是否相互影响: 由于每个探头到达其他厚度炸药边缘的垂直距离为 $\sin 36^\circ \times (33/2) = 9.698 \text{ mm}$, 均大于不同厚度样品受边侧稀疏波影响的最大距离, 因此同样可以认为边侧稀疏波不会影响探头探测点。

3.2 PDV 测量不确定度分析

PDV 测速采用的探头既作为激光发射器也作为反射光接收器, 测量的是粒子运动速度矢量在平行于测速探头方向的分量。根据 PDV 速度计算公式可以得到 PDV 测速探头角度相对标准不确定度。PDV 速度计算公式为

$$v(t) = \frac{\lambda(t)}{2} \cdot f(t) \cdot \cos \theta(t) \quad (6)$$

式中: $\lambda(t)$ 为激光波长, $\theta(t)$ 为探头与样品运动速度方向的夹角, $f(t)$ 为干涉信号的瞬时频率。当探头到 LiF 窗口的工作距离为 30 mm, 角度偏差小于 8° 时, 相对标准不确定度小于 1%。实际上, 由于测速探头具有一定孔径, 探头有效孔径内射出的光线在靶面被漫反射后, 探头孔径内的漫反射光都会被收集, 导致干涉信号为多个频率成分叠加, 根据中国工程物理研究院流体物理研究所刘寿先等提供的数据: 假设光纤探头的有效直径为 1.0 mm, 当工作距离为 30 mm 时, 最大相对误差为 0.028%。在测量加窗界面粒子速度时, 冲击波作用下的 LiF 窗口材料折射率发生改变, 引入了附加频移, 需将测量的表观速度信号进行修正, 而 LiF 修正系数的不确定度为 0.292%~0.495%^[2]。

4 结 论

采用 PDV 和组合式电磁粒子速度计技术分别测量了同种炸药样品的粒子速度。由于组合式电磁粒子速度计属于接触式测量,会影响原本的一维反应流场,导致测量的冲击波后粒子速度偏小,并且得到的粒子速度曲线存在噪声,使数据点读取存在较大误差。PDV 测速实验利用台阶型炸药样品,在同一发实验中能够得到不同位置处炸药的粒子速度,相较于单发普通圆柱形样品,本实验装置简洁,避免了大量重复实验操作,得到的测试信号上升前沿窄,速度曲线平滑,精度更高。

实验中考虑并分析了 PDV 测速探头角度、探头孔径、窗口折射率等的影响,得到测速的相对不确定度均小于 1%。每个探头到达炸药扇形边缘的距离为 8.5 mm,到达其他厚度炸药边缘的垂直距离为 9.698 mm,边侧稀疏波不会影响探头探测点。相较于组合式电磁粒子速度计,PDV 测试技术能为炸药性能研究和数值建模提供更准确的实验数据。

参考文献:

- [1] MORO E A. New developments in photon Doppler velocimetry [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(14): 142023.
- [2] JENSEN B J, HOLTKAMP D B, RIGG P A, et al. Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(1): 013523.
- [3] DOLAN D H. Accuracy and precision in photonic Doppler velocimetry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(5): 053905.
- [4] GUSTAVSEN R L, BARTRAM B D, SANCHEZ N J. Detonation wave profiles measured in plastic bonded explosives using 1550 nm photon Doppler velocimetry [C]//Shock Compression of Condensed Matter 2009. USA: AIP Conference Proceedings, 2009: 253-256.
- [5] 张涛, 赵继波, 伍星, 等. JBO-9021 炸药的冲击起爆 Pop 关系 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 743-748.
ZHANG T, ZHAO J B, WU X, et al. Pop relationship of JBO-9021 explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 743-748.
- [6] 裴红波, 黄文斌, 覃锦程, 等. 基于多普勒测速技术的 JB-9014 炸药反应区结构研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 485-490.
PEI H B, HUANG W B, QIN J C, et al. Reaction zone structure of JB-9014 explosive measured by PDV [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 485-490.
- [7] 张琪敏, 张旭, 赵康, 等. TATB 基钝感炸药 JB-9014 的冲击起爆反应增长规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(4): 041405.
ZHANG Q M, ZHANG X, ZHAO K, et al. Law of reaction growth of shock initiation on the TATB based insensitive explosive JB-9014 [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(4): 041405.
- [8] 刘俊明, 张旭, 裴红波, 等. JB-9014 钝感炸药冲击 Hugoniot 关系测量 [J]. *高压物理学报*, 2018, 32(3): 033202.
LIU J M, ZHANG X, PEI H B, et al. Measurement of Hugoniot relation for JB-9014 insensitive explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(3): 033202.
- [9] 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.
- [10] 赵万广, 周显明, 李加波, 等. LiF 单晶的高压折射率及窗口速度的修正 [J]. *高压物理学报*, 2014, 28(5): 571-576.
ZHAO W G, ZHOU X M, LI J B, et al. Refractive index of LiF single crystal at high pressure and its window correction [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(5): 571-576.
- [11] CAU J F. Inappropriate use of inclined electromagnetic velocity gauges in explosive [C]//Proceedings of 10th Symposium on Detonation. Office of Naval Research Report ONR, 1993: 33395-12.
- [12] 谭华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
TAN H. Experimental shock wave physics guidance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

PDV Technology of Shock Initiation Reaction Process of Insensitive Explosive

YANG Shuqi, ZHANG Xu, PENG Wenyang, SHU Junxiang, LIU Shouxian, QIN Shuang, ZHONG Bin

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: The shock initiation reaction of A-type insensitive explosive has been investigated by means of the one-dimensional planar impact experiment and photon Doppler velocimetry technique (PDV). In this experiment, a sapphire flyer was launched by the powder gun and then impacted the stepped insensitive explosive A. Meanwhile, the wedge-shaped lithium fluoride (LiF) windows coated with aluminum films were stuck to the different rear interfaces of stepped explosive. Therefore, the particle velocities among these interfaces could be measured. By employing the impedance matching method, the particle velocities in the explosive A were eventually obtained. The experimental results show that the PDV has a higher precision than the multiple electromagnetic particle velocity gauge. The effects of the speed probe's angle, the probe's aperture, and the refractive index of the window are briefly analyzed. The relative uncertainty of the measured speed is within 1%.

Keywords: photonic Doppler velocimetry (PDV); stepped insensitive explosive; side sparse angle; multiple electromagnetic particle velocity gauge