

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.05.012

基于 PDV 技术的微型雷管爆炸驱动飞片速度测试研究^{*}

朱 振 胡 艳 吴立志 叶迎华 沈瑞琪

南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 针对微型装药爆炸驱动飞片速度问题,搭建微型雷管爆炸驱动钛金属飞片速度测试装置,利用光子多普勒测速技术(photonic Doppler velocimetry,简称 PDV),对直径 0.7 mm 的微型雷管爆炸驱动飞片的速度进行测试,获得小飞片的速度历程,可清晰观察到飞片速度成长、保持、降低的过程。研究了防护 PDV 光探头有机玻璃厚度对飞片速度的影响,结果显示:当增大有机玻璃厚度时,测试的飞片平均速度会减小,测试相对误差增大;研究了光探头端面与飞片表面不同距离对测试结果的影响,对速度曲线进行位移积分,结果显示:距离较小时,测试结果的一致性较好,速度、位移增长拐点出现时机较为一致。针对整个测试系统,分析了高斯光束条纹间距、防护玻璃、金属表面反射率、试验装置振动因素对测试精度的影响。

[关键词] 飞片速度;飞片位移;PDV 测试;距离

[分类号] TQ565+.2;TD235.2+2;TJ45+2

引言

微型化、灵巧化和集成化是火工品技术发展的重要方向^[1],由此带来的尺度效应^[2]使传统的物理测量方法已经不能准确可靠地表征微型火工品和传爆序列的能量传递过程和做功过程。爆炸驱动飞片的速度是火工品能量转换和传递过程中的重要特征参量之一。目前,通常采用光学干涉法来测量飞片速度,其中最典型的是任意反射面速度干涉法(velocity interferometer system for any reflector,简称 VISAR)^[3]、光学记录速度干涉法(optically recording velocity interferometer system,简称 ORVIS)^[4]和法布里-珀罗干涉法(Fabry-Perot interferometry,简称 FPI)^[5]。VISAR 测试系统主要由光纤、分束镜、光电倍增管、数字示波器等构成,优点是条纹常数可记录较大的速度范围,响应时间主要由光电倍增管决定;然而,目前光电倍增管响应速度和采样率还不能完全满足人们的要求,而且在测量驱动飞片的速度时,会发生“丢波”现象。ORVIS 测试系统主要由电子条纹相机、柱面透镜、光纤、分束镜等构成,采用高速变相管记录的方法,不使用光电倍增管及数字示波器,响应速度很快;但是技术难度高,对仪器的要求也很严格,数据处理困难^[6]。VISAR 和 ORVIS 的共同缺点是价格昂贵,操作复杂,测试系统体积大,

不便携带,并且不能测量多点速度。FPI 测试系统由柱面透镜、球面透镜、条纹相机等部件构成,优点是可靠性好,数据处理比 VISAR 稍微简单,可实现同步多点测速;缺点是价格昂贵,记录长度有限。

光子多普勒测速技术(photonic Doppler velocimetry,简称 PDV)由 Strand 等^[7]于 2004 年提出,是一种低成本、非接触光学测速技术,具有便于携带、同步多点测速、允许所测速度变化范围大等优点,可用于爆炸箔冲击片、爆炸驱动飞片和冲击波自由表面速度的测量。原理是利用多普勒效应,通过测量初始激光和从运动表面反射回来的激光之间的干涉频率差来确定运动表面的速度,与 VISAR 相比,PDV 可容易地实现多点同时测速^[8-9]。Bowden 和 Knowles^[10]采用 PDV 技术进行了激光驱动飞片的速度测量研究,被测飞片速度大于 5 km/s,建立数学模型对速度进行理论估算,发现实际测量结果和理论计算一致性很好;Morris 等^[11]运用 PDV 技术测量不同结构的纳米级的 Al/Ni 爆炸的质点运动速度和能量输出,测试成功率较高。

本研究中,应用 PDV 测试系统,以 0.7 mm 装药直径的叠氮化铅装药为测试对象,对爆炸驱动飞片速度进行了测试,研究了防护玻璃厚度和被测目标物距离对爆炸驱动飞片速度的影响。

^{*} 收稿日期:2016-03-10

作者简介:朱振(1989-),男,硕士,研究生,主要从事爆炸测试技术的研究。E-mail:zhuzhen2008_hi@163.com

通信作者:胡艳(1977-),女,硕士,副研究员,主要从事纳米复合材料、含能材料等的研究。E-mail:huyan@njust.edu.cn

1 试验

1.1 PDV 测速原理

PDV 方案原理如图 1 所示。光纤激光器输出连续激光,经过相位外调制器的调制后,可以形成调相的激光信号。该激光信号经过饱和输出功率为 500 mW 或 1 W 的光纤放大器的放大后,输出功率可以达到 500 mW 或 1 W 左右。经由光纤放大器出来的激光,用分束器分为两束激光,一束输出给光纤环形器,另一束输出给干涉耦合器。高功率光纤环形器(1 端进,2 端出)输出的激光经过光发射和接收探头,照射运动目标。经由目标反射回来的携带目标信息的有用光信号经光学反射/接收天线接收,由光环行器的 2 端进,3 端出,进入光纤放大器,经光纤放大器放大后,进入 2 进 1 出的耦合器进行干涉,干涉信号经低噪声带前置放大器的光电探测器,转换成电信号,供信号分析处理系统使用。

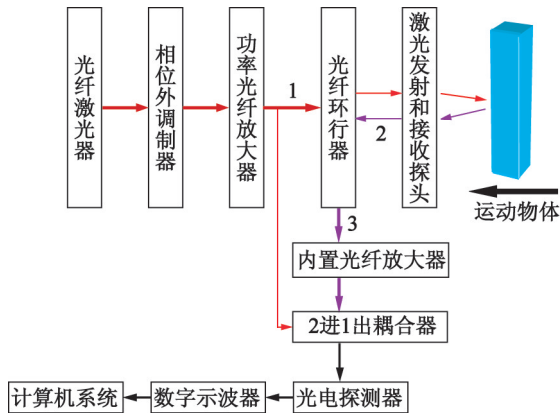


图 1 原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle

当发射的激光束被移动中的物体表面反射时,激光的波长会发生变化,而变化幅度取决于物体的速度^[12],式(1)是激光波长的变化公式。

$$\lambda_2 = \lambda_1 \sqrt{\frac{c - u}{c + u}} \tag{1}$$

式中: λ_1 是初始波长; λ_2 是变化后的波长; c 是光速, u 是被测物体的速度。

被测物体速度 u 的变化会导致激光波长 λ_2 的变化,从而使照射在运动物体表面的激光频率发生变化,然后在耦合器中与原始激光频率发生干涉,由光电探测器将差频信号转化为电信号。图 2 为测速仪纪录的原始差频信号,含有差频信号的波形经快速傅里叶变换(FFT)^[13] 程序可直接解算出被测物体的运动速度 u 。

1.2 试验装置与测试方法

测试的微型雷管壳内径为 0.70 mm,外径为 1.05

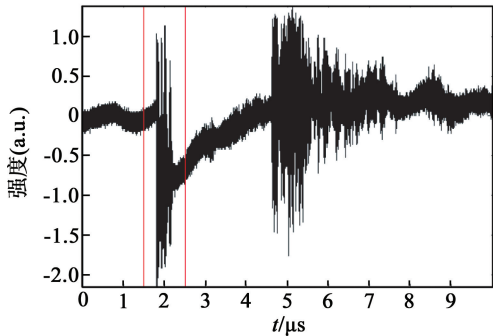
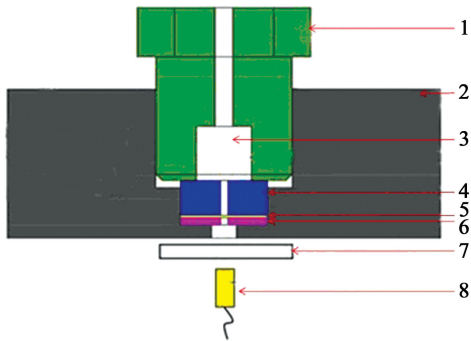


图 2 原始差频信号

Fig. 2 Original difference frequency signals

mm,长度为 3.00 mm,采用叠氮化铅装药,装药密度为 3.4 g/cm³。

针对微型雷管设计了爆炸驱动飞片速度测试装置,示意图见图 3。固定工装由下及上依次为加速腔、钛片、套筒、盖帽。加速腔厚 0.6 mm,孔径 0.6 mm,材质为 SUS303 不锈钢;钛片厚 0.1 mm,材质为钛合金,牌号 TA0。微型雷管装在套筒内,斯蒂芬酸铅电点火头装在盖帽的腔体中,盖帽与固定工装以螺纹配合,微型雷管壳的装药端面紧贴电点火头的药头。加速腔输出端面正对 PDV 光探头端面。



1 - 盖帽;2 - 固定工装;3 - 腔体;4 - 套筒;5 - 钛片;
6 - 加速腔;7 - 有机玻璃板;8 - PDV 探头。

图 3 微型雷管爆炸驱动飞片装置示意图

Fig. 3 Diagram of miniature detonator explosion driving flyer

PDV 测速系统如图 4 所示,组成如下:1) 1 550 nm 单频光纤激光器,用于产生激光,输出功率为 20 mW;2) 激光放大器,作用是将激光源产生的激光放大,增加激光能量;3) 光子多普勒测速仪,测试信号在该仪器内发生的差频干涉,并将信号输出;4) 光纤,作用是传输激光及接收反射回来的信号光,然后将信号光传输到光子多普勒测速仪中;5) 高带宽示波器,带宽为 32 GHz,采样率为 80 GHz。

利用 PDV 测速系统和爆炸驱动飞片测试装置,开展微型雷管爆炸驱动飞片速度测试研究,试验测

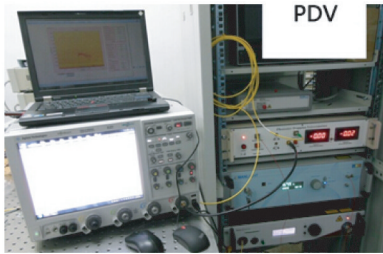


图 4 PDV 测速系统照片

Fig. 4 Picture of PDV velocity test system

试系统组成示意图如图 5 所示。首先打开 PDV 测速系统,调整激光光路,然后装配微型雷管爆炸驱动飞片测试装置,采用串联的 4 节 1.5 V 干电池为电点火头供电,铺设点火回路,起爆微型雷管。

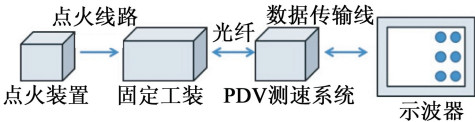


图 5 试验测试系统组成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test system

在测试过程中,当 PDV 光纤探头端面与被测目标距离不同时,光纤探头发出的激光照射在被测目标表面上的能量密度会发生变化,导致频移信号的差别会直接给测试结果造成偏差,且 PDV 光纤造价昂贵。因此,在使用时,可在光纤端面和被测目标之间放置一块玻璃片,保护光纤探头,玻璃片的引入也会影响频移信号的采集。本试验通过固定飞片距离,研究了防护有机玻璃厚度对飞片速度的影响;固定有机玻璃厚度,研究了 PDV 光探头端面与飞片表面不同距离对测试结果的影响;并对得到的飞片速度进行误差处理,进行速度曲线的位移积分,得到速度增长拐点与位移增长拐点。

2 试验结果与分析

采集到的原始电信号如图 6 所示。在 Matlab 上运行 FFT 解算程序,将示波器记录到的差频电信号导入,可得到飞片速度成长、保持、下降的历程图,如图 7 所示,可直接读取被驱动飞片的飞行速度。

飞片飞出加速膛后继续飞行,直至撞击到防护的有机玻璃板上,如图 8 所示。由图 8 可知,在爆炸的冲击作用下,微型装药的外壳紧贴附于套筒的内壁,加速膛未发生明显变形,SUS303 不锈钢材质能够满足此条件下的试验强度需求。钛合金片从中心部位被完整切割,效果较好,有机玻璃板上有飞片撞出的明显凹坑,周围附着的爆轰产物大致呈圆形。由图 7 可知,被驱动飞片飞行姿态较好,可明显观察到加速、匀速、减速的历程,飞行的整个过程中,金属飞片未发生解离、电离,在观察飞行历程上比爆炸箔

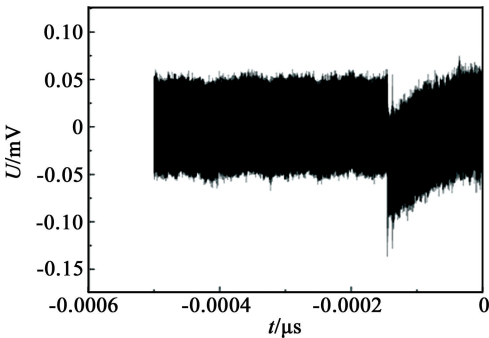


图 6 示波器记录的典型差频电信号

Fig. 6 Typical difference frequency electrical signals recorded by the oscilloscope

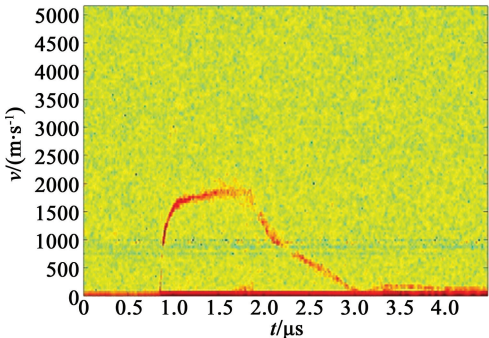
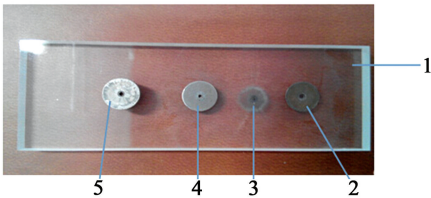


图 7 快速傅里叶变换后典型速度曲线图像

Fig. 7 Typical speed curves after FFT



1 - PMMA; 2 - 被切割后的钛片; 3 - 被切割的飞片在 PMMA 上撞击的凹坑; 4 - 加速膛; 5 - 雷管套筒。

图 8 试验效果图

Fig. 8 Experimental results

飞片^[14]有着明显的优越性。

固定 PDV 光探头端面与飞片表面距离 25 mm, 试验研究了防护有机玻璃厚度 5、10 mm 条件下飞片速度规律,每个条件下均进行 6 次试验,将得到的飞片速度测试结果及误差分析列于表 1 和表 2 中。

将表 1 与表 2 的试验结果进行比较可知,当增大有机玻璃厚度时,测试的飞片平均速度减小,测试相对误差增大,测试精度降低,分析原因是由于有机玻璃厚度增大时,遮光率变大,从而增大了激光光束的线宽,使线宽误差变大。固定防护有机玻璃厚度 5 mm,试验研究了 PDV 光探头端面与飞片表面的距离分别为 11、25、50 mm 条件下飞片速度规律,将得到的飞片速度测试结果及误差分析列于表 3 和表 4 中,其中距离 25 mm 条件下的飞片速度见表 1。

表 1 有机玻璃厚度 5 mm 条件下飞片速度测试结果及误差分析

Tab. 1 Test results and error analysis of flyer velocity under the condition of 5 mm-thickness PMMA

序号	峰值速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	标准误差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度 极限误差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/ %
1	1 925				4.5
2	1 804				2.0
3	1 805				2.0
4	1 857	1 841	63	± 103	0.8
5	1 897				3.0
6	1 760				4.4

表 2 有机玻璃厚度 10 mm 条件下飞片速度测试结果及误差分析

Tab. 2 Test results and error analysis of flyer velocity under the condition of 10 mm-thickness PMMA

序号	峰值速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	标准误差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度 极限误差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/ %
1	1 594				8.2
2	1 917				10.4
3	1 292				25.6
4	1 889	1 737	252	± 415	8.6
5	1 792				3.2
6	1 938				11.6

表 3 光纤探头端面与飞片表面距离为 11 mm 条件下飞片速度测试结果及误差分析

Tab. 3 Test results and error analysis of flyer velocity under the condition of 11 mm target distance

序号	峰值速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	标准误差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度 极限误差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/ %
1	1 786				1.9
2	1 744				0.5
3	1 776				1.4
4	1 771	1 752	30	± 50	1.1
5	1 726				1.5
6	1 710				2.4

分析表 1、表 3、表 4 中数据可得出:1) 在 PDV 光探头端面与飞片表面距离为 11 mm 条件下时,飞片速度的测试结果一致性最好,相对误差均小于 2.4 %。分析原因是由于飞片与光探头表面的距离较近,激光光路在照射和被反射的过程中,被空气中

表 4 光纤探头端面与飞片表面距离为 50 mm 条件下飞片速度测试结果及误差分析

Tab. 4 Test results and error analysis of flyer velocity under the condition of 50 mm target distance

序号	峰值速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	标准误差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度 极限误差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/ %
1	1 779				1.1
2	1 761				2.1
3	1 766				1.8
4	1 816	1 779	69	± 113	1.0
5	1 741				3.2
6	1 930				7.3

粒子等外界因素影响的程度较低,不确定因素较少。2)在 PDV 光探头端面与飞片表面距离为 25 mm 条件下时,飞片的平均速度最大,理论上分析是在焦距位置时,信号的归一化效率最大^[15]。3)在 PDV 光探头端面与飞片表面距离为 50 mm 条件下时,整组数据的分散性最大。

进一步分析,可得出表 3 中数据测试误差较小,测试精度最高,对这组数据在 Origin 里作出时间-速度曲线,如图 9 所示;并对曲线进行积分,可得时间-位移曲线,如图 10 所示。

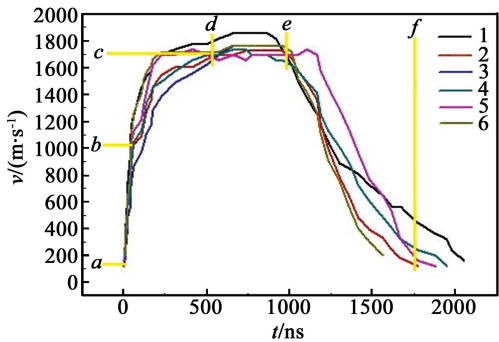


图 9 时间-速度曲线

Fig. 9 Time-speed curves

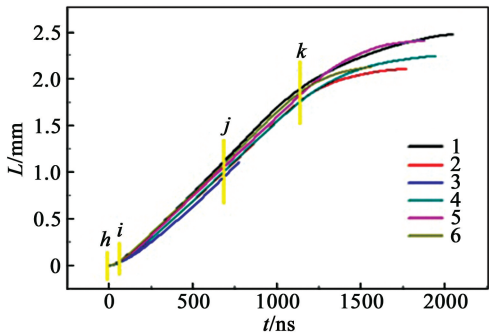


图 10 时间-位移曲线

Fig. 10 Time-displacement curves

由图 9 可知:6 组飞片速度历程较为一致,取峰值速度平均值 $1\,752\text{ m/s}$,对应的飞行位移为 0.995 mm ,在位移曲线上,6 组试验位移增长拐点出现时机一致。

ab 段:被切割飞片在 60 ns 时间内速度增长到 $1\,049\text{ m/s}$,*b* 点为速度增长拐点,此时对应位移为 $0.047\,8\text{ mm}$,位移曲线对应 *hi* 段。此区间为爆轰能量驱动飞片的前期,爆轰压力的数量级远远大于飞片的外界阻力,速度增长较为迅速。

bc 段:速度增长拐点出现后,速度增长变慢,速度曲线上变缓,直至达到峰值速度,位移曲线对应 *ij* 段。此段区间由于飞行距离的增加、作用时间的变长,被切割飞片受到爆轰能量的作用力减弱,受到外界阻力增加,但作用力仍大于阻力,飞片仍然处于加速阶段。

de 段:随着飞行距离的增加,飞片受到的作用力进一步减弱、阻力继续增加,直至两者相等,飞片开始做匀速飞行,这区间持续 442 ns ,飞行位移 0.77 mm ,位移曲线对应 *jk* 段,*k* 点为位移增长拐点。

ef 段:飞片受到的作用力迅速减弱,小于阻力,飞片开始做减速运动。位移曲线中,出现位移增长拐点时飞片飞行位移为 1.8 mm ,位移增长拐点出现后(如图 10 *k* 点),位移增长明显变慢,此时外界阻力为主导力。由于外界影响因素较多,所以在速度曲线中,呈现出速度下降历程的差别。

综合分析表 1 ~ 表 4 中数据,得出在应用 PDV 系统测试微型雷管爆炸驱动飞片速度时,存在测试误差,最高值 25.6% 。从 PDV 系统基本原理分析原因:1)是由于多普勒频率与被测速度成正比,这是对信号光的频率做了近似,略去了高次项,从而给多普勒频率带来了原理上的误差。2)通常在做理论分析和计算时,都把光看成是平面波束,因而认为两光束形成的干涉条纹是等宽的平行条纹。然而,从激光器射出的光并不是平面波束,而是高斯光束,其所形成的干涉条纹并不是等宽的平行条纹。因此,会产生高斯光束带来的条纹间距误差。3)对于 PDV 系统发射出来的激光,一般都认为是单色的,然而,在实际应用中激光器射出的激光总有一定的线宽,由线宽带来的误差与光束的线宽成正比。因此,在测量时要选用线宽较窄的激光器。在本测试系统中,需要在测试光路上放置具有一定厚度的有机玻璃来保护光纤探头,而有机玻璃片的引入增加了激光束的线宽。

从被测对象上分析,为增加测试过程中多普勒频移信号的强度,应增强被测对象表面的反射率。

因此,飞片表面应处理为漫反射表面,放置久的钛片会在表面形成一层灰色的氧化层,该氧化层会降低飞片表面对激光的反射率,甚至造成反射光信号的缺失,从而导致多普勒频移信号的减弱或者缺失;对于整个固定工装测试系统,爆炸时不可避免会产生振动,有可能导致激光的入射方向与飞片运动方向的夹角出现变化,使得在检测到的信号中叠加一个随机的低频成分,从而使信号的频谱变宽,给测试结果带来误差,会造成测试失败,图 11 为示波器记录到的失败波形信号。因此,在实际测试时,对光学元件的安装具有很高的要求,需要增加防振措施,必须将测试对象和 PDV 光探头都固定在隔振性能良好的光学隔振平台上。

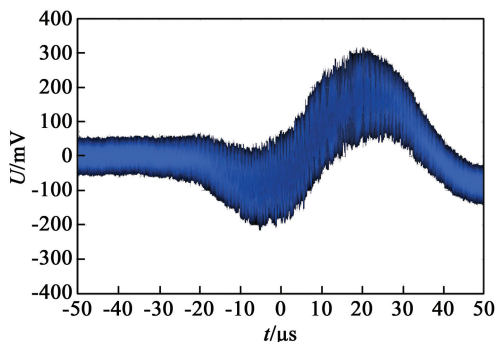


图 11 失败波形信号

Fig. 11 Failure waveform signals

3 结论

1)应用光子多普勒测速技术,对 0.7 mm 装药直径的叠氮化铅装药爆炸驱动飞片的速度进行测试,获得小飞片的速度历程,可清晰观察到飞片速度成长、保持、降低的过程。

2)试验研究了防护有机玻璃厚度对飞片速度的影响,结果表明:当增大有机玻璃厚度时,测试的飞片平均速度减小,测试相对误差增大。研究了 PDV 光探头端面与飞片表面距离对测试结果的影响,在 PDV 光探头端面与飞片表面距离为 11 mm 条件下时,飞片速度的测试结果一致性最好;对此组数据进行位移积分,结果显示:各组试验的飞片速度和飞片飞行位移增长拐点出现时机较为一致。

3)飞片速度相对误差最高值 25.6% ,略去高次项的数据处理误差,高斯光束带来的条纹间距误差、放置有机玻璃的激光光束线宽误差、被测对象表面的低反射率、试验装置的防振处理均会使试验结果存在误差,从而造成 PDV 测试系统精度降低。

参 考 文 献

- [1] 何爱军,严楠. 羧甲基纤维素叠氮化铅微装药压力与密度关系试验研究[J]. 含能材料,2010,18(2):200-204.

- HE A J, YAN N. Experimental study on relation-ship between pressure and density of CMC-Pb(N₃)₂ micro-changes [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(2): 200-204.
- [2] 程松. 小尺寸装药爆轰驱动飞片速度测试研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.
- CHENG S. Test study on flyer velocity driven by small-charged diameter abstract [D]. Taiyuan: North University of China, 2010.
- [3] WANG Z H, LUO S N, BARNES C W, et al. Correlated-intensity velocimeter for arbitrary reflector for laser-produced plasma experiments [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(10): 516.
- [4] BLOOMQUIST D D, SHEFFIELD S A. Optically recording interferometer for velocity measurements with sub-nanosecond resolution [J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(4): 1717-1722.
- [5] 唐孝容, 李剑峰, 张大勇, 等. 高速运动飞片的 F-P 干涉测量技术研究 [J]. 激光技术, 2007, 31(2): 172-174.
- TANG X R, LI J F, ZHANG D Y, et al. Measurements of high-speed flyer using F-P cavity interferometer [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 172-174.
- [6] 谷卓伟, 孙承伟, 刘仓理, 等. 小型激光器驱动飞片的平均速度测量研究 [J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(3): 309-312.
- GU Z W, SUN C W, LIU C L, et al. The measurement of the average velocity of flyer driven by mini size laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(3): 309-312.
- [7] STRAND O T, BERZINS L V, GOOSMAN D R, et al. Velocimetry using heterodyne techniques [C]//26th International Congress on High-speed Photography and Photonics Alexandria, VA, 2004, 5580: 593-599.
- [8] BARKER L M. The development of the VISAR, and its use in shock compression science [C]//Shock Compression of Condensed Matter-1999. AIP Publishing, 2000, 505(1): 11-18.
- [9] VALENZUELA A R, RODRIGUEZ G, CLARKE S A. Optically based velocity and topographic measurement systems in the nano-scale for developing optical initiation [C]//Photonic Devices + Applications. International Society for Optics and Photonics, 2007, 6662: 0-10.
- [10] BOWDEN M D, KNOWLES S L. Optimisation of laser-driven flyer velocity using photonic Doppler velocimetry [C]//SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7434: 3-11.
- [11] MORRIS C J, MARY B, ZAKAR E, et al. Rapid initiation of reactions in Al/Ni multilayers with nanoscale layering [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2010, 71(2): 84-89.
- [12] MAISEY M P, BOWDEN M D. Characterization of detonator performance using photonic Doppler velocimetry [C]//Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics, 2008, 7070: 0-9.
- [13] 胡昌华, 李国华, 刘涛, 等. 基于 MATLAB 6. x 的系统分析与设计: 小波分析 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [14] 陈清畴, 陈朗, 覃文志, 等. PDV 方法测量电爆炸驱动小飞片速度 [J]. 含能材料, 2014, 22(3): 413-416.
- CHEN Q C, CHEN L, QIN W Z, et al. Photonic Doppler velocimetry of mini flyers driven by electrically exploded foils [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(3): 413-416.
- [15] STRAND T, BONNER R, HESTER D, et al. Factors to consider when choosing a probe for PDV [C]//3rd Annual PDV Conference. LLNL, Albuquerque, NM: 2008.

Investigation on Flyer Velocity Driven by Miniature Detonators Based on the PDV Technology

ZHU Zhen, HU Yan, WU Lizhi, YE Yinghua, SHEN Ruiqi

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] A velocity test system was built to study the flying process of titanium flyer plates driven by miniature detonators. Flying process for 0.7 mm-diameter detonators was obtained through PDV system. Velocity history of tiny flyer was obtained, from which the rising, holding and decreasing of flyer velocity could be observed clearly. Plexiglass was used to protect the optic probe and its effect on flyer velocity was also studied. Results show that flyer velocity decreases and relative error increases with the increasing of plexiglass thickness. Effect of distance between optic probe and flyer plate on flyer velocity was researched, and displacement integral of velocity curves was also analyzed. It shows that when the distance is small, turning point of velocity and displacement curves are in great consistency. Meanwhile, effects of fringe spacing of Gaussian beam, protective glass, reflectivity of metal surfaces, and vibration of test device on test accuracy were examined.

[KEYWORDS] flyer velocity; flyer displacement; PDV test; distance