

文章编号: 1006-9941(2014)03-0413-04

## PDV 方法测量电爆炸驱动小飞片速度

陈清畴<sup>1,2</sup>, 陈朗<sup>1</sup>, 覃文志<sup>2</sup>, 郭菲<sup>2</sup>, 韩忠飞<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 为优化爆炸箔起爆器性能, 采用光子多普勒速度测量技术(PDV)获得了电爆炸驱动小飞片的速度历程。设计了一种电爆炸驱动小飞片测试装置, 可以产生  $\Phi 0.35 \text{ mm} \times 25 \mu\text{m}$  尺寸的小飞片, 试验中未对飞片进行任何处理。对两发电爆炸驱动小飞片进行了 PDV 测速试验, 获得了小飞片的速度历程, 测得的有效时长约为 160 ns。两发飞片的最大速度分别为  $4520 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $4330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 速度差约为 4%, 一致性较好。飞片速度剖面有明显拐点。在拐点之前速度上升较快, 在 60 ns (0.1 mm 位移) 内达到了最终速度的 75%。在拐点之后, 速度上升相对变缓, 在 100 ns 内完成了剩余 25% 速度的增加。

**关键词:** 爆炸力学; 飞片速度; 光子多普勒速度测量技术(PDV); 电爆炸

**中图分类号:** TJ45; O38

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.026

### 1 引言

飞片速度是爆炸箔起爆器 (exploding foil initiators, EFIs) 的重要表征指标之一, 其对于爆炸箔起爆器可靠性设计与评估、性能优化具有重要参考意义。

国外对 EFIs 飞片速度的理论与试验研究较为成熟, 已掌握多种小飞片速度测试技术。Prinse 等<sup>[1]</sup> 采用 Febry-Perot 系统获得爆炸箔起爆器的小飞片速度历程, 但未对飞片参数进行介绍。Davies 等<sup>[2]</sup> 利用高速条纹相机研究了桥箔尺寸和炮筒长度对飞片速度的影响规律。Ralph Hodgkin 等<sup>[3]</sup> 通过光子多普勒速度测量技术 (photonic doppler velocimetry, PDV) 获得了电爆炸驱动小飞片的速度历程, 结果表明, 与 Febry-Perot 系统对比, PDV 测速系统具有经济、高效和高时间分辨率的优点, 但试验数据必须经过处理才能获得。国内采用试验手段研究小飞片速度的报道较少, 并且前期的研究仅局限于平均速度的测量<sup>[4-5]</sup>。何碧等<sup>[6]</sup> 用激光速度干涉仪 (VISAR) 测量了电爆炸箔起爆器驱动 Mylar 飞片速度历程, 其飞片直径为  $\Phi 1.2 \text{ mm}$ ; 邓向阳<sup>[7]</sup>、王桂吉<sup>[7-8]</sup> 和钱勇等<sup>[10]</sup> 采用相同的方法测量了更小飞片 ( $\Phi 0.7 \text{ mm}$  和  $\Phi 0.5 \text{ mm}$ ) 的速度历程。

收稿日期: 2013-06-20; 修回日期: 2013-12-14

作者简介: 陈清畴 (1983-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事新型火工品设计和爆轰数值模拟计算。e-mail: chenqingchou@163.com

通信联系人: 陈朗 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事燃烧物理、爆轰物理及含能材料安全性研究。e-mail: chenlang@bit.edu.cn

但在 VISAR 测量中, 需要对飞片表面进行处理以获得漫反射表面, 否则很难测到信号。处理方法包括涂色、贴附抛光纸、镀膜和喷钢砂等<sup>[11]</sup>。这些处理方法改变了 EFIs 飞片状态, 增加了飞片质量, 使得测试飞片与实际飞片不符, 由此测得的速度将略低于实际速度。

EFIs 的低能化和小型化发展, 使其飞片的直径越来越小、厚度越来越薄。由于 VISAR 系统结构复杂, 调试难度大, 很难获得更小飞片的速度历程。对于薄飞片来讲, 表面处理带来的质量增加将更加显著, 速度误差也更大。国内尚未见到有关未经表面处理的小飞片速度历程的报道。本研究采用 PDV 测速系统测量未经表面处理的小飞片速度历程, 为爆炸箔起爆器的优化设计提供依据。

### 2 试验原理与装置

PDV 是一种新型激光干涉测速技术, 由 Strand 等<sup>[12]</sup> 于 2004 年提出。从国外的研究结果<sup>[13-15]</sup> 来看, PDV 的测试精度可以达到或超过 VISAR 系统, 将有可能在大多数应用上代替 VISAR。

PDV 对物体速度的测试是基于物体运动产生的光学多普勒效应, 具体原理如图 1 所示。激光探头表面的反射光返回系统, 作为参考光; 飞片上反射回来的激光, 作为信号光。两次反射光发生干涉后, 利用探测器的平方检测特性, 检测参考光和信号光的差拍干涉信号, 并实现光电转换, 电信号放大后由示波器采集。

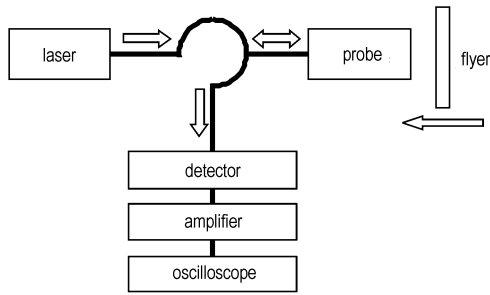


图1 试验原理示意图

Fig.1 Principle diagram of PDV system

时频分析采用快速傅里叶变换(SFFT)<sup>[12]</sup>。设参考光光强为  $I_0$  (cd), 频率为  $f_0$  (Hz), 波长为  $\lambda_0$  (m), 信号光光强为  $I_d$  (cd), 频率为  $f_d$  (Hz), 由多普勒效应和光场的干涉公式可得:

$$I = I_0 + I_d + 2\sqrt{I_0 I_d} \cos[4\pi \int_0^t v(t) / \lambda_0 dt + \varphi] \quad (1)$$

式中,  $\varphi$  为两光束的初始相位差, rad。

令  $N(t) = 2 \int_0^t v(t) dt / \lambda_0$ , 称为条纹数, 则拍频:

$$f_b = f_d - f_0 = 2v(t) / \lambda_0 = dN/dt \quad (2)$$

由此可得飞片运动速度:

$$v(t) = \lambda_0 f_b / 2 = (\lambda_0 / 2) dN/dt \quad (3)$$

由(3)式可以看出, PDV 测得的速度与条纹数的微分有关, 而与条纹数无关。  $f_b$  可以通过对干涉信号进行时频分析得到, 由于干涉信号  $f_b$  较大, 需要记录系统具有高的带宽和采样率来保证记录信号不会失真。试验中使用的示波器为 Agilent MSO-X 93204A, 采样率为  $40 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$ , 带宽为  $32 \text{ GHz}$ 。

设计了一种电爆炸驱动小飞片的 PDV 测速装置, 其主要结构如图 2 所示。桥箔材料为铜, 尺寸(宽度×厚度)为  $0.2 \text{ mm} \times 3 \text{ } \mu\text{m}$ ; 飞片材料为聚酰亚胺, 尺寸为  $\Phi 0.35 \text{ mm} \times 25 \text{ } \mu\text{m}$ , 试验中未对飞片进行任何处理; 炮筒尺寸为  $\Phi 0.35 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 。测试装置和光纤探头通过支架固定在平台上, 调整相对位置, 使炮筒孔与光纤探头对准。光纤探头前放置载玻片以保护探头。采用  $0.2 \text{ } \mu\text{F}$  的放电电容, 充电电压为  $2800 \text{ V}$ , 放电周期为  $1.14 \text{ } \mu\text{s}$ 。

电容释放出脉冲大电流, 激发金属桥箔发生电爆炸, 剪切并驱动飞片高速运动。飞片反射的光信号通过光纤及光电转换器由示波器记录, 其原始信号如图 3 所示。示波器采集的原始信号通过快速傅里叶变换可获得飞片速度历程。

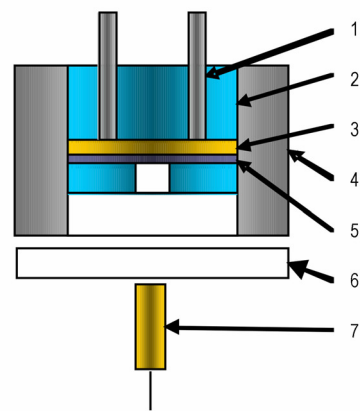


图2 小飞片速度 PDV 测试装置示意图

1—插针, 2—基底, 3—桥箔, 4—壳体, 5—飞片, 6—载玻片, 7—光纤探头

Fig.2 Velocity measurement scheme of mini flyers driven by electrically exploded foils with PDV diagnostics

1—pins, 2—substrate, 3— bridge foil, 4—housing, 5—flyer, 6—glass slice, 7—probe

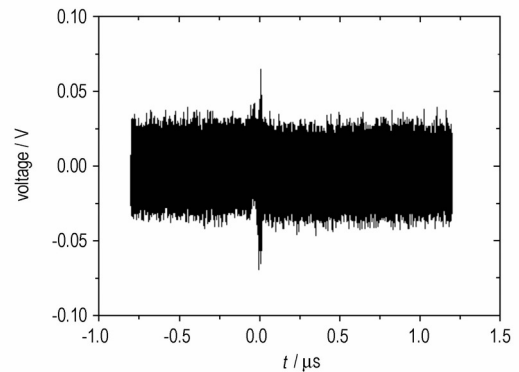


图3 示波器原始数据

Fig.3 Raw data of oscilloscope

### 3 试验结果与分析

采用图 2 装置, 对两发电爆炸驱动小飞片进行了速度测试。试验获得的飞片速度历程如图 4 所示, 测到的有效时长约为  $160 \text{ ns}$ 。

PDV 测速系统是将示波器获得的频率信号处理为彩色图片, 通过颜色深浅来表征频率高低。需要采用图像处理软件处理后才可获得相应的速度细节。通过 GRAFULA 3 软件读取图 4 中的数据, 获得两发试验的飞片速度历程, 如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 两发试验结果较为一致, 在主要时间段内两条曲线几乎重合, 仅在测试范围的末段略有差异。在  $0.86 \text{ } \mu\text{s}$  时刻, 飞片速度出现拐点, 在此之前飞片速度上升较快, 在  $60 \text{ ns}$  内达到了最终速度的

75%。在速度拐点之后,飞片速度上升相对变缓,在 100 ns 内完成了剩余 25%速度的增加。整个速度剖面反映了电爆炸驱动小飞片的物理过程,并与文献[16]中的实验曲线相吻合,也与 VISAR 的测试曲线<sup>[7,11]</sup>吻合。两发飞片的最大速度分别为 4520,4330 m·s<sup>-1</sup>,速度差约为 4%。

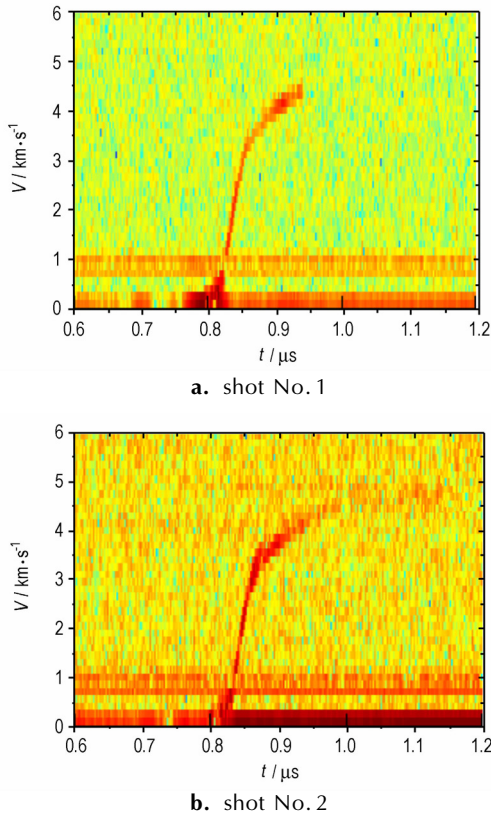


图 4 快速傅里叶变换后的速度曲线图像

Fig. 4 Velocity profiles after Successive Fast Fourier Transform (SFFT)

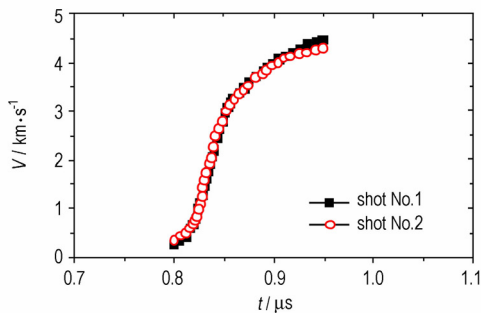


图 5 数据处理后的小飞片速度历程

Fig. 5 Velocity histories of mini flyers after data treatment

通过对速度曲线进行积分可获得飞片位移,从而获得飞片速度和位移的关系,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,与图 5 中的速度拐点相对应,速

度位移曲线也有拐点,其出现在 0.1 mm 位移处。飞片位移在 0.3 mm 之前,两条曲线较为一致,而在 0.3 mm 之后,飞片速度差逐渐增大。理论上,在等离子体驱动飞片的前期(0.3 mm 之前),等离子体的压力较飞片在炮筒孔中飞行的摩擦力大数个量级,摩擦力对飞片的影响非常小;但是到了后期,等离子体的压力逐渐降低,摩擦力对飞片的影响逐渐增大。而飞片飞行的摩擦力与炮筒孔加工质量有关,因此飞片速度差在 0.3 mm 位移后的增大,与两发试验装置中的炮筒加工质量差异有关。

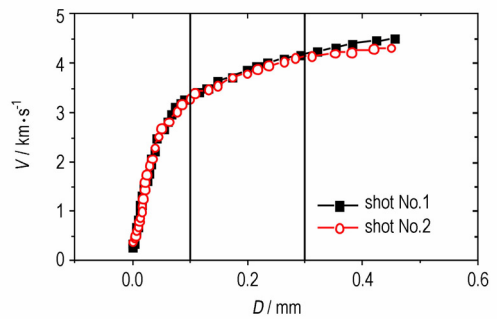


图 6 飞片速度和位移的关系

Fig. 6 Relationship of flyer velocity and displacement

## 4 结 论

用 PDV 测速系统获得了电爆炸驱动小飞片的速度历程。

设计了一种电爆炸驱动小飞片测试装置,可以产生  $\Phi 0.35 \text{ mm} \times 25 \text{ }\mu\text{m}$  尺寸的小飞片,试验中未对飞片进行任何处理。对两发电爆炸驱动小飞片进行了 PDV 测速试验,获得了小飞片的速度历程,测得的有效时间约为 160 ns; 两发飞片的最大速度分别为 4520,4330 m·s<sup>-1</sup>,速度差约为 4%,一致性较好。

飞片速度剖面有明显拐点,在拐点之前速度上升较快,在 60 ns(0.1 mm 位移)内达到了最终速度的 75%,在拐点之后,速度上升相对变缓,在 100 ns 内完成了剩余 25%速度的增加。炮筒孔的加工质量会影响飞片在加速后期的飞行状态,飞片速度在 0.3 mm 位移之后分散性增大。

致谢: 试验得到了南京理工大学的吴立志博士和陈少杰博士的大力支持,在此表示感谢!

### 参考文献:

[1] Prinse W C, Van't Hof P G, Cheng L K, et al. High-speed ve-

- locity measurements on an EFI-system [C] // 27th International congress on High-Speed Photography and Photonics. International Society for Optics and Photonics, 2007; 62795E-62795E-10.
- [2] Davies H R, Chapman D J, Vine T A, et al. Characterization of an exploding foil initiator (EFI) system [C] // Proceedings of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, AIP Publishing, 2009, 1195 (1): 283–286.
- [3] Hodgkin R, May C, Hanks R, et al. Fabry-Perot/PDV Comparison [R]. UCRL-CONF-230794. 2007.
- [4] 耿春余. 一种简易测量小飞片速度的方法 [J]. 科技学报, 1984 (1): 34–37.  
GENG Chun-yu. A simple method of measuring the velocity of the flyer with small size [J]. *Journal of Science and Technology*, 1984 (1): 34–37.
- [5] 付秋波, 蒋小华, 郭菲, 等. 爆炸箔尺寸对飞片速度的影响 [J]. 兵工学报, 2010 (4): 434–436.  
FU Qiu-bo, JIANG Xiao-hua, GUO Fei, et al. Effect of Exploding Foil Size on Flyer Velocity [J]. *Acta Armamentarii* 2010 (4): 434–436.
- [6] 何碧, 蒋小华, 李泽仁, 等. 用双灵敏度 VISAR 测试爆炸箔起爆器的飞片速度 [J]. 爆炸与冲击. 2005, 25 (1): 31–34.  
HE Bi, JIANG Xiao-hua, LI Ze-ren, et al. Flyer velocity measurement of an exploding foil initiation system using a double-sensitivity VISAR [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25 (1): 31–34.
- [7] 邓向阳, 彭其先, 赵剑衡, 等. VISAR 测量电爆炸箔驱动飞片速度的实验研究 [J]. 火炸药学报. 2007, 30 (2): 45–48.  
DENG Xiang-yang, PENG Qi-xian, ZHAO Jian-heng, et al. Experimental studies on velocity measurement of mylar flyer driven by exploding metal foils with VISAR [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30 (2): 45–48.
- [8] 王桂吉, 蒋吉昊, 邓向阳, 等. 电爆炸驱动小尺寸冲击片实验与数值计算研究 [J]. 兵工学报, 2008, 29 (6): 657–661.  
WANG Gui-ji, JIANG Ji-hao, DENG Xiang-yang, et al. experiments and numerical simulation of small-scale slapper driven by electrical explosion [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29 (6): 657–661.
- [9] 王桂吉, 邓向阳, 谭福利, 等. 爆炸箔起爆器小尺寸飞片速度测试 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28 (1): 28–32.  
WANG Gui-ji, DENG Xiang-yang, TAN Fu-li, et al. Velocity measurement of the small size flyer of an exploding foil initiator [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28 (1): 28–32.
- [10] 钱勇, 褚恩义, 同红海, 等. 爆炸箔起爆器飞片速度测试研究 [J]. 火工品, 2009 (2): 42–44.  
QIAN Yong, CHU En-yi, TONG Hong-hai, et al. Study on flyer velocity measurement of exploding foil initiator [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009 (2): 42–44.
- [11] Hatt D J. A VISAR velocity interferometer system at MRL for slapper detonator and shockwave studies [R]. MRL-TR-91-42. 1991.
- [12] 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: 593–599.
- [13] Lowry M E, Molau N E, Sargis P D, et al. Photonic doppler velocimetry [R]. UCRL-ID-133075. 1999.
- [14] Dolan D H. Accuracy and precision in photonic Doppler velocimetry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81 (5): 3905–3907.
- [15] Cenobio H Gallegos, Bruce Marshall, Matthew Teel, et al. Comparison of Triature Doppler Velocimetry and VISAR [J]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010 (3): 2045–2049.
- [16] Chow R, Schmidt M. Advanced Initiation Systems Manufacturing Level 2 Milestone Completion Summary [R]. LLNL-TR-417546. 2009

## Photonic Doppler Velocimetry of Mini Flyers Driven by Electrically Exploded Foils

CHEN Qing-chou<sup>1,2</sup>, CHEN Lang<sup>1</sup>, QIN Wen-zhi<sup>2</sup>, GUO Fei<sup>2</sup>, HAN Zhong-fei<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** To optimize the performance of exploding foil initiators, the velocity histories of mini flyers driven by electrically exploded foils were obtained by Photonic Doppler Velocimetry (PDV). A electrically driven flyer device was designed, which could generate a mini flyer with  $\Phi 0.35 \text{ mm} \times 25 \mu\text{m}$  size and the flyers in tests do not have any special treatment. Two shot flyers were tested by PDV diagnostics, and the velocity histories of mini flyer were obtained. The effective length is about 160 ns. The maximum velocities of two shots of flyers are 4520, 4330  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  respectively, and the velocity difference is about 4%, which having a good consistency. The profiles of two velocities have an evident inflection point. Before the point, the velocities grow quickly and reach 75% of the final velocity in 60 ns (0.01 mm displacement). After the point, the velocities grow relatively slow and finish the rest 25% acceleration in 100 ns.

**Key words:** explosive mechanics; flyer velocity; Photonic Doppler Velocimetry (PDV); electrically explosion

**CLC number:** TJ45; O38

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.026