

用于瞬态高速飞片速度测量的光子多普勒测速系统

吴立志, 陈少杰, 叶迎华, 沈瑞琪, 刘 卫

(南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 针对目前 VISAR 等测速仪在测量瞬态高速小飞片速度时调试复杂、测试成功率低等问题, 基于光子多普勒效应和自混频原理, 采用 1 550 nm 单模激光, 成功研制了一套光子多普勒测速系统。使用该系统测量了不同激光能量密度下的复合飞片瞬时速度, 结果显示: 该系统测试成功率高, 响应速度快, 获得的速度曲线完整而清晰。与传统的 VISAR 和 F-P 干涉测速仪相比, 具有操作简单、测试成功率高、便于携带等非常明显的优势。该系统适用于速度在几百米/s~几千米/s 的微小飞片或者微区爆轰的速度测量, 也可应用于常规爆炸流场的测试。

关键词: PDV; 多普勒效应; 飞片速度; 光纤激光器

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1217001

Photonic Doppler velocimetry used for instant velocity measurement of high-speed small flyer

Wu Lizhi, Chen Shaojie, Ye Yinghua, Shen Ruiqi, Liu Wei

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

Abstract: Based Doppler shifted effect and self-mixing effect, an all-fiber photonic Doppler velocimetry was developed to solve the problem when VISAR was used to measure high-acceleration flyers, the Doppler-shifted signals often lost. Used this system to measure the laser-driven flyer's velocity at different energies. The results showed that the PDV system have a high measuring success rate, high react speed, and the calculated results is good. Compared with VISAR and F-P interference velocimetries, the PDV have many advantages such as operation more simple, high measuring success rate, easy for carrying. This system was suitable to measure the velocities of small flyers and small scale detonation which had speeds between hundreds and thousands meters per second, also the usual detonation speed measurement.

Key words: photonic Doppler velocimetry; Doppler effect; flyer's velocity; fiber laser

收稿日期: 2016-04-05; 修订日期: 2016-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(11202105); 中央高校基本科研业务费专项资金(30920140121002)

作者简介: 吴立志(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光与物质相互作用机理以及爆轰测试等方面的研究。Email: wulizhi82@163.com

0 引言

光子多普勒测速系统 (Photonic Doppler Velocimetry, PDV) 是根据激光多普勒效应研制而成的一种精密测速系统, 与传统测速系统相比, 具有非接触测量、空间分辨率高、动态响应快、测量精度高和测试量程大等优点, 广泛应用于各种科研和工业测量等领域。在爆轰流场以及爆轰驱动的高速飞片速度测量技术方面, 由于测试目标加速度高, 在几个微秒甚至几百纳秒的时间内由静止加速到几千米/s, 所以对相应的测试仪器要求很高。目前国内主流的测速仪器仍然为 VISAR 和 Fabry-Perot 干涉测速仪等传统测速系统, 这些传统测速系统操作复杂, 测试成功率低, 且后期数据处理繁琐^[1]。美国、英国、法国等发达国家在 2000 年之后就逐渐开始使用 PDV 测速技术^[2-4], PDV 测速技术由于采用全光纤结构, 与 VISAR 和 Fabry-Perot 干涉测速仪相比, 具有结构相对简单、测速范围大、数据处理相对简单、测试精度更高的特点^[5]。国内目前关于 PDV 的报道多数关于大尺寸目标、低速(几十米/s~几百米/s)测量领域^[6-7], 测试目标 ≤ 1 mm、速度范围在几千米/s 的有关报道很少, 其中中国工程物理研究院谭华等人研究的全光纤激光干涉速度测量系统 (DISAR) 文献实测飞片速度在 1300 m/s 左右, DISAR 同样基于多普勒频移效应, 只是输出信号为 3 路相位差为 120 的干涉信号^[8]。与 DISAR 相比, 文中介绍的 PDV 系统只需要一个通道记录, 数据处理更为简便。针对国内目前缺乏便于操作的瞬态高速小飞片速度测量设备现状, 该课题组基于自混频原理, 成功研制了一种单光路全光纤 PDV 测速系统。

1 PDV 测速原理

PDV 测速系统基于全光纤结构的 Michelson 干涉仪原理。其中, 根据多普勒效应, 系统输出的平均激光强度为:

$$I(t) = I_0(t) + I_d(t) + 2\sqrt{I_0(t)I_d(t)} \times \cos\left(2\pi \int_0^t \frac{2v(t)}{\lambda_0} dt + \varphi_0\right) \quad (1)$$

式中: $I_0(t)$ 为参考激光强度; $I_d(t)$ 为信号光强; f_0 为参考激光的频率; $f_d(t)$ 为由运动物体表面反射回来的多普勒频移后的光频率; φ_0 为初始相位差; $v(t)$ 为目标移动的速度; λ_0 为测试激光的波长。由公式(1)可看

出, 测试支路光信号的相位与运动表面的位移和运动表面速度对应的信号频率有如下关系:

$$f(t) = f_d(t) - f_0 = \frac{2v(t)}{\lambda_0} \quad (2)$$

采集的信号波形必须符合零平均值条件才能用于后续的时频分析。给定一个原型波 $\Psi(t) \in L_2(R)$, 则

$$\Psi_{(b,a)}(t) = \frac{1}{a} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), b \in R, a > 0 \quad (3)$$

式中: a 为尺度因子; b 为时间平移。若尺度参数 $a < 1$, 则基函数相当于将窗函数压缩, 使窗函数缩小。参数 $a > 1$, 则相当于将窗函数的频率特性压缩, 频率带宽变小; 而 $a < 1$ 则相当于将窗口函数的频率特性拉伸, 频率带宽增大。参数 b 仍然是时移作用。信号 $s(t)$ 的连续波形变换为:

$$W_s(b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \Psi_{(b,a)}^*(t) dt \quad (4)$$

式中: * 代表复杂的变化。

常用于时频分析的是复杂的 Morlet 波形:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (5)$$

式中: ω_0 为初始激光束的中心频率。

快速傅里叶变换是时频分析中的常用工具:

$$\Psi_{(b,\omega)}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-b)^2}{2}\right] \exp(i\omega_0(t-b)) \quad (6)$$

经变换后, 即可以得到时间-速度曲线。

2 PDV 测速系统

PDV 系统包括了光学系统和信号处理系统两部分, 如图 1 所示。光学系统包括单频激光器(波长

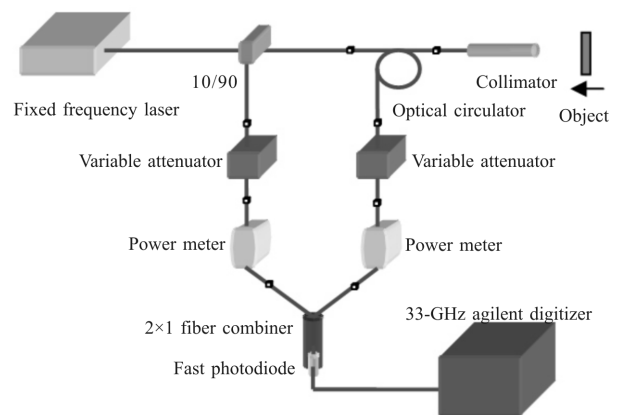


图 1 基于自混频效应的光子多普勒测速仪原理

Fig.1 Basic geometry of PDV based on self-mixing effect

1 550 nm)、10/90 分束器、环形器、光纤、光纤瞄准具、能量监视仪、能量衰减器、二合一光纤耦合器、光电二极管等，信号处理部分包括高带宽示波器和后续计算处理单元等。该系统全部采用单模光纤传输光信号，利用光学干涉混频技术获得飞片的速度，具有体积小、系统稳定性高、响应时间快等优点，图 2 为笔者课题组研制的 PDV 测速系统实物图。

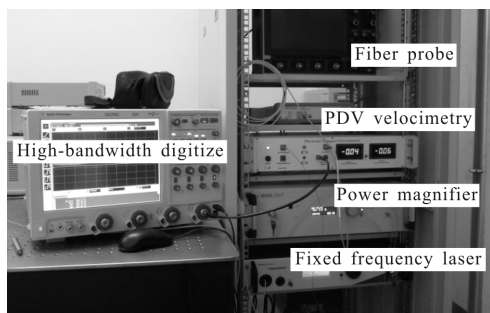


图 2 实验中使用的 PDV 测速系统
Fig.2 PDV system in our experiment

3 实验装置与方法

采用自主研发的光子多普勒测速仪(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)测量激光驱动复合飞片的速度。激光经聚焦透镜之后到达飞片发生器，飞片信号经光纤探头采集，光纤探头尾端连接示波器。Nd:YAG 激光器波长 1 064 nm、脉宽 6.5 ns。探测器和示波器组成了 PDV 测速系统的记录系统，光纤探头为光纤微透镜结构，示波器型号为安捷伦 DSA-X93204A，带宽 32 GHz，实时采样率为 80 GSa/S。

复合飞片结构示意图见图 3，基底为 K9 玻璃，烧蚀层为 CuO-Al，隔热层为 Al₂O₃，冲击层为膜厚 Al。三种复合飞片分别为 CuO-Al-Al₂O₃-Al(0.2-0.2-0.5-3 μm)、CuO-Al-Al₂O₃-Al(0.3-0.2-0.5-3 μm)和

CuO-Al-Al₂O₃-Al(0.4-0.2-0.5-3 μm)(为简便，下文分别用 I、II、III 来代表这三种飞片)。

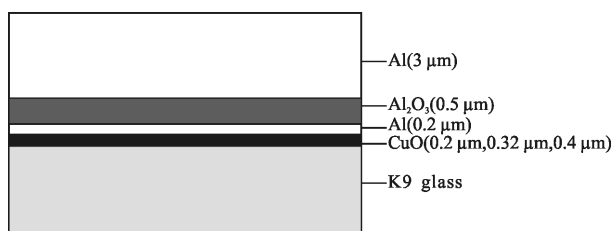


图 3 复合飞片结构示意图

Fig.3 Diagram of multiple-layers flyer structure

利用多普勒测速装置，复合飞片在每个激光能量密度下测速 4 次，如图 4 所示。

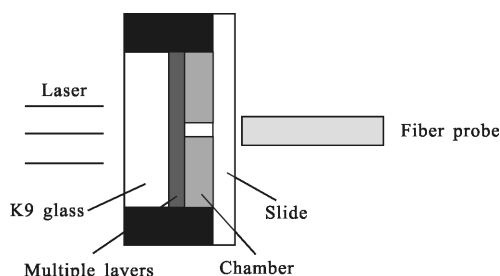


图 4 飞片速度测试示意图

Fig.4 Velocity measurement setup of laser-driven flyer

加速膛材料为 T10 钢，膛口直径 0.7 mm，长度 0.6 mm，测速前需对齐光路，在不放置复合飞片时，使 Nd:YAG 激光器发出的激光束能顺利通过加速膛膛口，并且光纤探头正对加速膛膛口，确保飞片表面反射光线能顺利反射回光纤探头。利用以色列 Ophire-II 激光能量计测量 Nd:YAG 激光器控制面板电压值所对应的激光能量，每个电压示数下测试 7 次，测试结果见表 1。可以看出，脉冲激光稳定性很好，波动性不超过 3%。

表 1 脉冲激光能量参数

Tab.1 Parameters of pulsed laser energy

Voltage/V	Laser energy/mJ							Average energy/mJ	Averagy energy density/J·cm ⁻²
560	25.5	25.6	25.3	24.2	25.1	22.3	22.5	24.4	3.1
600	51.7	48.9	50.5	51.2	55.8	49.3	54.0	51.6	6.6
640	96.0	94.9	97.1	98.2	94.6	97.7	92.4	95.8	12.2
680	134.6	138.7	135.0	135.0	131.4	136.0	133.7	134.9	17.2
720	168.2	167.5	166.3	166.1	167.3	168.1	163.9	166.8	21.3
760	198.5	197.0	193.6	194.1	193.3	195.3	193.7	195.1	24.9
800	221.0	222.0	223.0	223.0	221.0	221.0	222.0	221.9	28.3
840	259.0	253.0	252.0	249.0	248.0	250.0	250.0	251.6	32.1
880	280.0	278.0	278.0	277.0	276.0	276.0	276.0	277.3	35.3
920	307.0	304.0	304.0	307.0	306.0	309.0	306.0	306.1	39.0

DSA-X93204A 型安捷伦示波器采集的原始信号见图 5, 图中线 1 突变为触发信号, 线 2 突变为飞片的多普勒频移信号。示波器采集的多普勒频移信号经基于傅里叶变换方法的自编 Matlab 软件平台处理后, 可以得到飞片的速度曲线, 图 6 为激光能量 221.86 mJ 下 #II 飞片的典型速度曲线。

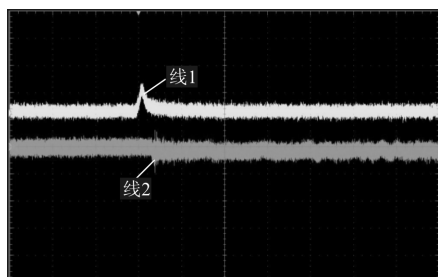


图 5 示波器记录多普勒拍频波形

Fig.5 Doppler beat wave saved by-oscillogrupR

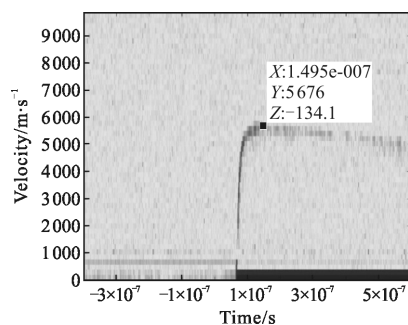


图 6 CuO-Al-Al₂O₃-Al(0.3-0.2-0.5-3 μm) 飞片速度

Fig.6 Velocity curve of CuO-Al-Al₂O₃-Al(0.3-0.2-0.5-3 μm)

4 结果与分析

激光能量密度为 28.3 J/cm² 时, 三种复合飞片的瞬时速度曲线见图 7, #I 飞片速度最高, #III 飞片速

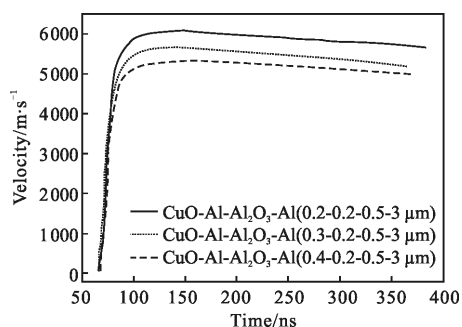


图 7 能量密度 28.3 J/cm² 时三种 CuO-Al-Al₂O₃-Al 飞片瞬时速度曲线图

Fig.7 Instant velocity curves of three kinds of CuO-Al-Al₂O₃-Al flyers at energy density of 28.3 J/cm³

度最低。飞片从峰值速度的 10% 增加到 90% 所需要的时间为上升沿时间, 三种飞片的上升沿时间均小于 22 ns, 飞片在激光加载 6.5 ns 后, 由于等离子体的扩散使得飞片继续加速一段时间, 这一点与参考文献[9]中对飞片加速特征的研究一致。图 8 和图 9 分别为三种飞片峰值速度和上升沿时间随激光能量密度的变化图。

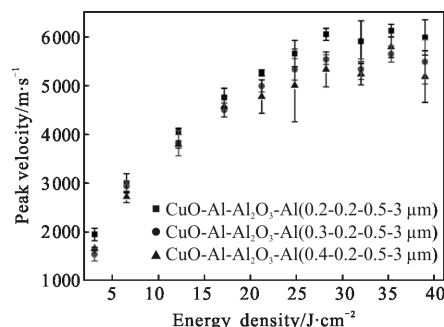


图 8 复合飞片峰值速度激光能量密度变化

Fig.8 Peak velocities of mutiple flyers vs laser energy densities

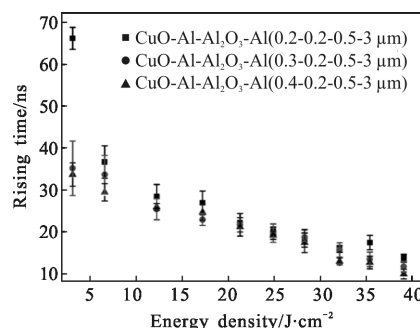


图 9 复合飞片上升沿时间变化图

Fig.9 Times of the rising edge in mutiple flyers' velocity

由图 8 和图 9 可知, 激光能量密度在 3.1~39 J/cm² 范围内, #I 飞片速度最高, #III 的飞片速度最低。速度越高, 飞片到达峰值速度的时刻也相应推迟, 激光能量密度 3.1 J/cm² 时, #I 上升沿时间比另外两种飞片上升沿时间高 30 ns 左右, 随着激光能量密度的进一步增大, 三种飞片的上升沿时间差值越来越小, 激光能量密度 39 J/cm² 时, 三种复合飞片上升沿时间差值约 2 ns。说明 #I 飞片加速度最高。

实验中激光驱动飞片瞬态速度实测 124 发, 得到有效数据 120 发, 测试成功率为 96.7%。其中未测到数据的有 4 发, 原因是由于实验装置调试问题。如果排除测试装置调试对准因素, PDV 测速系统的测

试成功率可达到 100%。

在 PDV 信号处理过程中,短时傅里叶变换处理出来的速度误差为 $\Delta f \cdot f_{\text{采样}} \cdot \lambda_0 / 2$ 。文中, λ_0 为 1550 nm, $f_{\text{采样}}$ 为 30 GHz, $\Delta f = f_{\text{实际}} - f_{\text{采样}}$, 以峰值速度 5335 m/s 为例,可得速度误差为 453.375 m/s。

对于短时傅里叶变换法,为了使大部分信号的时间分辨率比较合适,使用 1000 ns 固定宽度的时间窗口,这一窗口在速度比较高时适用,但在速度比较低的初始阶段(0~150 ns),约存在一个差频周期,这么短的时间窗口很难很好地分辨其差频频率,因此初始阶段求出的速度的误差就比较大。

5 结 论

成功研制了一种单光路全光纤 PDV 测速系统,经激光驱动飞片测速实验验证,该测速仪性能优良,与 VISAR 和 F-P 干涉测速仪相比,结构相对简单,便于操作,测试成功率高。该测速系统非常适合于爆炸箔高速飞片、激光驱动高速飞片、爆轰流场的速度测试以及冲击动力学等研究领域。该技术丰富了国内在微区高速测量领域的测试手段,对于提高动高压等领域研究具有重要意义。

参 考 文 献:

[1] Wu Lizhi, Shen Ruiqi, Xu Jiao, et al. Research advance in laser-driven flyer technology[J]. *Acta Armamentar* **II**, 2010, 31(2): 219-216. (in Chinese)
 吴立志, 沈瑞琪, 徐姣, 等. 激光驱动飞片技术的研究进展[J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 219-216.

[2] Maisey M P, Bowden M D. Characterization of detonator performance using photonic Doppler velocimetry [C]//SPIE, 2008, 7070: 70700P.

[3] Mercier P, Bénier J, Frugier P A, et al. Nitromethane

ignition observed with embedded PDV optical fibers [C]// *New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter*, 2010, 10: 00016.

[4] Craig M Tarver. Corner turning and shock desensitization experiments plus numerical modeling of detonation waves in the triaminotrinitrobenzene based explosive LX-17 [J]. *J Phys Chem A*, 2010, 114: 2727-2736.

[5] Cenobio H Gallegos, Bruce Marshall, Matthew Teel, et al. Comparison of triature Doppler velocimetry and visar [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 244: 032045.

[6] Xu Zumao. The study of laser Doppler velocimeter (LDV) for solid surface [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005: 62-63. (in Chinese)
 许祖茂. 固体激光多普勒测速仪研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005: 62-63.

[7] Wang Jian, Wu Chongqing, Song Hongwei, et al. Velocity measurement of back-free the surface of target after laser shock peening using all-fiber photonic Doppler velocimetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1212-1216. (in Chinese)
 王健, 吴重庆, 宋宏伟, 等. 激光冲击强化靶背面自由表面速度的全光纤光子多普勒测速法测量 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1212-1216.

[8] Tan Hua, Weng Jidong, Wang Xiang. A new all-fiber laser interference velocimetry system [C]//The Proceeding of the Eighth Explosion Conference of China, 2007: 275-278. (in Chinese)
 谭华, 翁继东, 王翔. 新一代全光纤激光干涉速度测量系统 [C]//第八届全国爆炸力学学术会议论文集, 2007: 275-278.

[9] Wang Fei, Chen Lang, Wu Junying, et al. Acceleration characteristics of flyers driven by pulsed laser beams [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24 (11): 2531-2536. (in Chinese)
 王飞, 陈朗, 伍俊英, 等. 激光驱动飞片加速特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2531-2536.