文章编号：1000-5773(2012)05-0571-06

多点激光干涉测速系统和电探针技术在飞片速度测量中的应用对比*

金　山，陈永涛，汤铁钢，彭其先，蒙建华

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳　621900）

摘要：多点激光干涉测速系统和电探针技术均可用于测量高速运动物体的运动参数，为了相互验证测试结果，分析测试系统各因素对测量精度的影响，在平面爆轰波驱动飞片的实验中，利用多点激光干涉测速系统和多组电探针，同时测量金属飞片的自由面速度。将多点激光干涉测速系统测得的飞片速度-时间曲线进行积分，得到飞片的位移-时间曲线，并与电探针测得的飞片到达预定位置的时刻进行对比。结果表明：多点激光干涉测速系统各测点测得的飞片自由面速度随时间的变化曲线一致，各测点测得的速度最大相对偏差为1.45%；对两套测试系统的零时及信号传输时间进行修正后得到，当飞片飞行至5、10、15 mm位置时，电探针测得的飞片到达时刻与多点激光干涉测速系统测试结果的最大偏差值分别为0.02、0.02、0.07 μs；两套系统在同一测点的测试差值随飞片飞行距离的增加而增加，其原因可能是，炸药透镜的波形差对飞片运动的影响随着飞片飞行距离的增加而增大。

关键词：激光干涉测速；电探针；爆轰

中图分类号：O521.3；O436.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

随着激光的出现和激光技术的发展，根据光学多普勒效应研制出的激光干涉测速技术，是近几十年来波剖面测试技术的重要进步之一，其主要优点在于非接触测量，不干扰目标运动，并可以直接得到真实的速度和速度变化值。1972年，Barker等[1]首次报道了可测量任意反射表面的速度干涉仪（Velocity Interferometer System for Any Reflector，VISAR），具有量程宽、速度和时间分辨本领高的优点，可用于测量任意反射表面，很快得到了发展和推广。随后，Amery[2]、Hemsing[3]和Sweatt等人[4]的改进研究，使得VISAR成为冲击波研究领域的标准测试手段之一。国内学者也对VISAR的仪器结构、灵敏度和数据处理系统等方面进行了改进研究[5-8]，进一步推动了VISAR的发展。多点激光干涉测速技术可以同时测量多个点的连续速度历史，通过微分和积分，可以得出被测点的加速度历史和位移历史，使一发实验可以得到更多的实验数据，在爆轰实验中有着广阔的应用前景。

电探针常用于测量爆轰波阵面、冲击波阵面或运动物体表面到达预定位置的时间。早在1945年，Roberts和Nedzed就利用电探针技术测量了钢中的冲击波速度和自由表面速度。1955年Minshall利用光杆探针测量了钢中弹性波和塑性波的波速。1965年Richard等人研制了盖帽式电探针，弥补了光杆探针不能测量非导体材料冲击波速度的缺点。随着电探针测试技术的发展，探针的种类、应用范围、测试精度及效率也进一步提高，如时间分辨率为亚纳秒级的同轴探针技术[9]和可在一发实验中得到更

* **收稿日期**：2010-12-28；**修回日期**：2012-02-14

基金项目：国家自然科学基金（11272006，10902102）

作者简介：金　山（1981—），男，助理研究员，主要从事爆轰测试技术研究. E-mail：jin9835@163.com

多实验数据的高密集度小型组合探针技术[10-11]等。

本研究拟在平面爆轰波驱动金属飞片的实验中，利用多点激光干涉测速系统记录飞片的自由面速度历史，同时采用电探针技术测量飞片飞行到固定位置处的时刻，并对两者的测试结果进行对比分析。

2 实验装置及测试方法

2.1 实验装置

炸药平面波透镜将点起爆的凸面球面爆轰波变为平面爆轰波，常用于研究炸药的爆轰性能和材料的动力学压缩实验。实验装置如图 1 所示，利用炸药透镜产生平面爆轰波驱动金属飞片，飞片的自由面速度利用多点激光干涉测速系统记录，飞片到达某点的时刻由电探针系统记录。其中平面波透镜的底面直径为 200 mm，主炸药为∅200 mm×50 mm 的 RHT-901 炸药，金属飞片采用 2 mm 厚的 45 钢。钢飞片下方依次放置电探针支架和光纤探头支架，电探针支架上表面和金属飞片下表面的距离为 25 mm，光纤探头支架上表面和金属飞片下表面的距离为 90 mm。

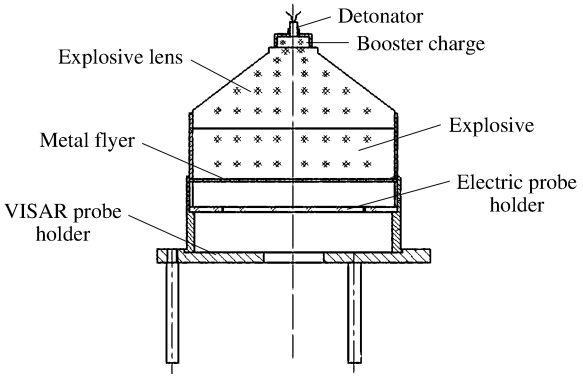


图 1 实验装置示意图

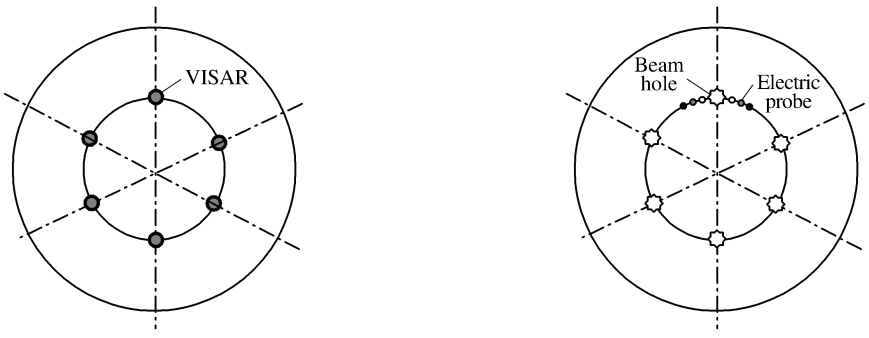
Fig. 1 Sketch of experimental set-up

实验时将整个装置放入密封罐中，罐内先抽真空，再充入一大气压甲烷气体，以防止实验过程中因空气电离而导致的电探针提前导通。

2.2 测试方法

采用多点激光干涉测速系统和电探针测试系统，分别记录飞片自由面速度和飞片到达固定点的时刻，光纤探头和电探针布局如图 2 所示。

图 2(a)为光纤探头支架示意图。由于越靠近炸药透镜边缘，其产生的爆轰波的平面度越差，对于∅200 mm 的炸药透镜，在∅100 mm 的同心圆周上的实测波形差小于 0.1 μs，考虑到炸药透镜平面度和边缘效应的影响，同时为了便于对比，将 6 个光纤探头测点均匀分布在直径为 100 mm 的圆周上。图 2(b)为电探针支架示意图，同样在∅100 mm 圆周上预留 6 个通光孔，与 6 个光纤探头测点相对应；在每个通光孔两边，对称分布 3 对电探针，每对电探针与飞片下表面的距离分别为 5、10、15 mm。



(a) VISAR probe holder (b) Electric probe holder

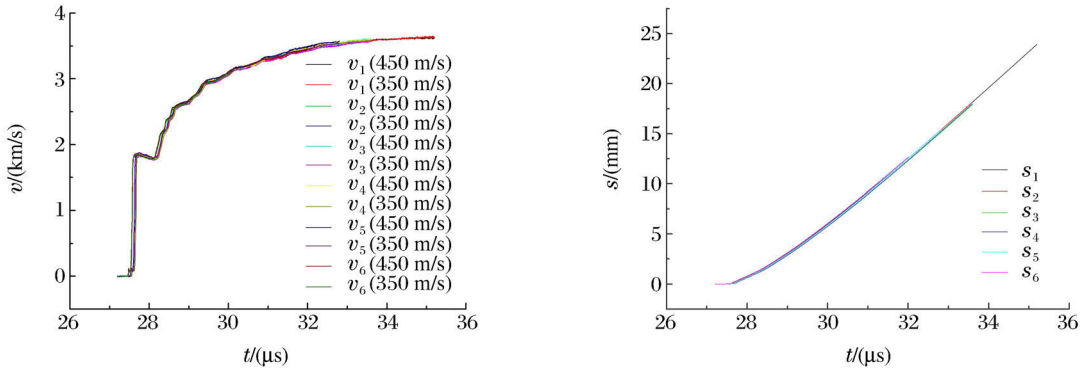
图 2 光纤探头及电探针布局

Fig. 2 Layout of VISAR probe and electric probe

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

多点激光干涉测速系统测得的飞片自由面速度随时间的变化曲线(v-t)如图 3(a)所示,其中 v_1～v_6 代表 6 个测点所测得的飞片自由面速度,由于每一测点同时采用两个条纹常数(350 m/s 和 450 m/s)进行测试,因此共得到 12 条飞片自由面速度随时间的变化曲线。对飞片 v-t 曲线进行积分(取两个条纹常数测试结果的均值),得到飞片的位移随时间的变化曲线(s-t),如图 3(b)所示,其中 s_1～s_6 为对应 6 个测点通过所测平均速度的积分得到的飞片位移随时间的变化曲线。



(a) v-t curves (b) s-t curves

图 3 飞片自由面速度和位移随时间变化曲线

Fig. 3 v-t curves and s-t curves of flyer

从图 3 中可以看出,6 个测点的 v-t 曲线及 s-t 曲线均基本重合,说明 6 个测点的测试结果是一致的。从图 3(a)v-t 曲线上的速度缓变区域,选取各测点所测速度差异的最大处进行测量,可以得出,当条纹常数为 350 m/s 时,6 个测点所测速度的最大偏差为 1.32%;当条纹常数为 450 m/s 时,6 个测点所测速度的最大偏差为 1.58%。

在电探针支架上每个测点通光孔的两侧,均对称分布 3 组电探针,每组 2 个电探针,与通光孔处于同一圆周上。3 组电探针与飞片表面的距离分别为 5、10、15 mm,取每组电探针测试结果的均值,作为飞片到达 5、10、15 mm 位置的时刻。

表 1 为 6 个测点的多点激光干涉测速系统与电探针测试系统的测试结果,其中 t_5、t_{10}、t_{15} 分别为多点激光干涉测速系统测得的飞片运动到 5、10、15 mm 位置的时刻,T_5、T_{10}、T_{15} 分别为电探针测试系统测得的飞片运动到 5、10、15 mm 位置的时刻。

表 1 各测点光纤探头与电探针测试结果

Table 1 Experimental results measured by VISAR and electric probes (Unit: μs)

No.	t_5	T_5	t_{10}	T_{10}	t_{15}	T_{15}
1	29.67	29.99	31.25	31.57	32.71	33.05
2	29.70	30.01	31.26	31.60	32.71	33.08
3	29.75	30.06	31.32	31.64	32.78	33.12
4	29.75	30.07	31.31	31.66	32.76	33.12
5	29.71	30.04	31.27	31.62	32.70	33.10
6	29.65	29.99	31.22	31.57	—	33.05

从表 1 中可以看出，当飞片运动到 5 mm 位置时，多点激光干涉测速系统与电探针测试系统的测试差值为 0.31～0.34 μs；10 mm 位置处，两者测试差值为 0.32～0.35 μs；15 mm 位置处，两者测试差值为 0.34～0.40 μs。

3.2 实验数据的修正及对比

3.2.1 多点激光干涉测速系统和电探针测试系统零点修正

多点激光干涉测速系统和电探针测试系统由同一台延时同步机输出的信号作为零时，由于延时同步机到两套系统连接电缆(或光纤)的长度不同，因此需对测得数据的零点位置进行修正。

延时同步机与多点激光干涉测速系统间的连接电缆及光纤总长为 58 m，与电探针测试系统间的连接电缆长 15 m，故多点激光干涉测速系统测试结果零点的修正量为＋0.29 μs，电探针测试系统零点的修正量为＋0.08 μs。

3.2.2 多点激光干涉测速系统和电探针测试系统信号传输时间的修正

当光纤探头和电探针接收到信号后，通过光纤或电缆传输至示波器进行记录，由于光纤和电缆长度存在差异，因此需要对信号传输时间进行修正。

实验中光纤探头至示波器的连接电缆及光纤总长为 48 m，电探针至示波器的连接电缆为 72 m，多点激光干涉测速系统信号传输时间的修正量为－0.24 μs，电探针测试系统信号传输时间的修正量为－0.36 μs。

3.2.3 修正后结果对比

将两套测试系统经过零点修正和信号传输时间修正后的结果进行对比，结果如图 4 所示，其中 No.1～No.6 为多点激光干涉测速系统 6 个测点的编号，Probe Ⅰ为多点激光干涉测速系统修正后的测试结果，Probe Ⅱ为相应位置的电探针测试系统修正后的测试结果。

为了便于比较，将多点激光干涉测速系统测得的飞片运动到 5、10、15 mm 位置的时刻，与相应位置电探针测得的时刻的差值列于表 2，其中 Δt_5、Δt_{10}、Δt_{15} 分别对应飞片运动到 5、10、15 mm 位置时两者的差值。

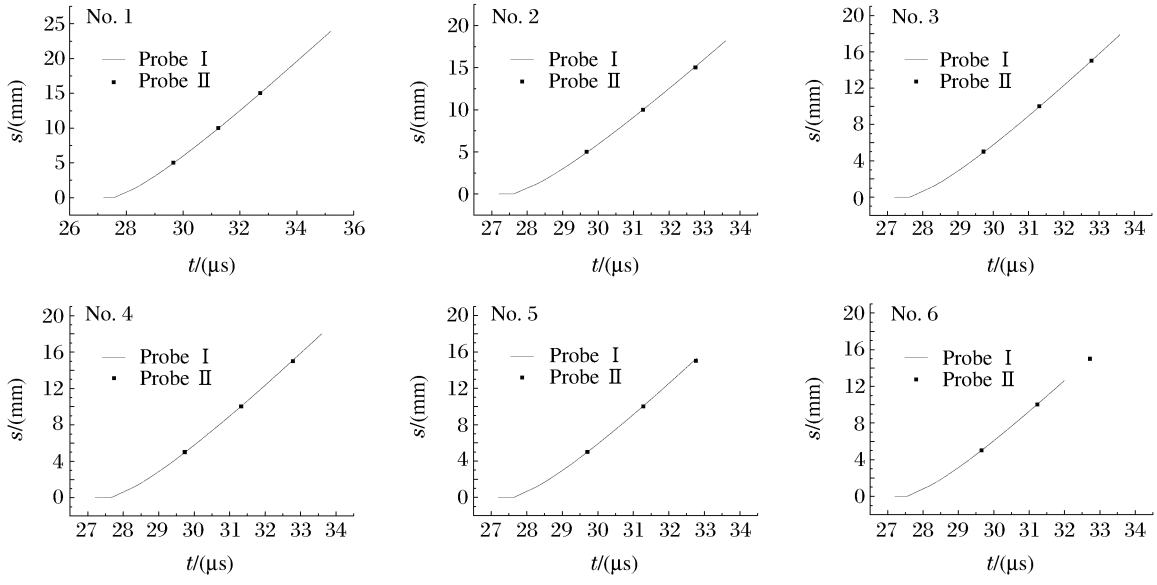


图 4 光纤探头与电探针测试结果对比

Fig. 4 Contrast of results from VISAR and electric probes

3.3 修正后的误差分析

由表 2 可以看出，经过零点修正和信号传输时间的修正后，当飞片运动到 5、10、15 mm 位置时，多点激光干涉测速系统与电探针测试系统测试结果的差值分别为－0.02～0.01 μs、－0.01～0.02 μs、

0.01～0.07 μs。实验中探针装配精度为±0.01 mm,对实验结果造成小于±5 ns 的误差。除此之外,信号判读方法及系统响应时间等均可能产生纳秒级的测试误差。

图 5 为各测点两套测试系统测量差值的趋势图,可以看出,随着飞片飞行距离的增大,两套测试系统的测试差值有增大的趋势,其原因可能在于,随着加载时间的增加,炸药透镜的原始波形差对被加载飞片运动的影响越来越大。

表 2　修正后多点激光干涉测速系统与电探针测试系统测试结果差值

Table 2　Difference of results between measured by VISAR and electric probes after modified

No.	Δt_5/(μs)	Δt_{10}/(μs)	Δt_{15}/(μs)
1	−0.01	−0.01	0.01
2	−0.02	0.01	0.04
3	−0.02	−0.01	0.01
4	−0.01	0.02	0.03
5	0.00	0.02	0.07
6	0.01	0.02	—

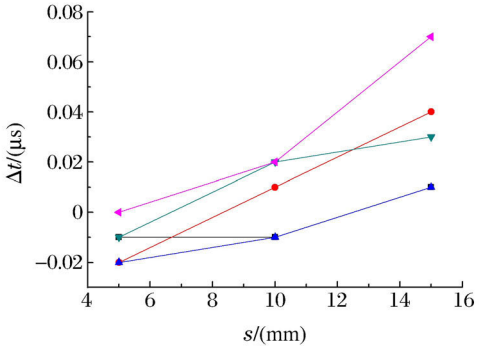


图 5　各测点两套测试系统测量差值趋势

Fig. 5　Development trend of difference of results from VISAR and electric probes

4　结　论

利用多点激光干涉测速系统,测量了平面爆轰波驱动金属飞片的自由面速度,同时与电探针测试系统的测量结果进行了对比,得出以下结论。

(1) 多点激光干涉测速系统在各测点均取得有效实验数据,且各测点之间的测试结果一致。

(2) 多点激光干涉测速系统与电探针测试系统的测试结果符合较好,对两套测试系统零时及信号传输时间进行修正后得到,当飞片运动到 5、10、15 mm 位置时,多点激光测速系统的测试结果与电探针测试结果的最大相对偏差分别为 0.02、0.02、0.07 μs。此偏差产生的原因可能在于探针装配精度、信号判读方法及系统响应时间等。

(3) 炸药透镜的原始波形差对被加载飞片运动的影响随着飞片运动距离的增加而增大。

References:

[1] Barker L M, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface [J]. Appl Phys, 1972, 43(11): 4669-4675.

[2] Amery B T. Wide range velocity interferometer [A]//The Proceedings of the 6th Symposium on Detonation [C]. Arlington, VA: Office of Naval Research, 1976: 673-681.

[3] Hemsing W F. Velocity sensing interferometer (VISAR) modification [J]. Rev Sci Instrum, 1979, 50(1): 73-78.

[4] Sweatt W C, Stanton P L, Crump O B. Simplified VISAR system [A]//The Proceedings of SPIE 1346, Ultrahigh- and High-Speed Photography, Videography, Photonics, and Velocimetry [C]. San Diego, CA, 1990.

[5] Peng Q X, Ma R C, Li Z R, et al. A high sensitivity VISAR with multireflection etalon [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4): 343-346. (in Chinese)
彭其先, 马如超, 李泽仁, 等. 高灵敏度 VISAR 研究与设计 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4): 343-346.

[6] Chen Y J, Yang Y Y, Zhuo Y M, et al. A construction of double-sensitivity VISAR [J]. Optical Instruments, 2006, 28(2): 71-75. (in Chinese)
陈阳杰, 杨甬英, 卓永模, 等. 双灵敏度 VISAR 测量的一种结构计 [J]. 光学仪器, 2006, 28(2): 71-75.

[7] Peng X S,Wang F,Liu S Y,et al. Development of an imaging velocity interferometer system for any reflector [J]. Acta Optica Sinica,2009,29(11):3207-3211. (in Chinese)
彭晓世,王 峰,刘慎业,等. 成像型任意反射面速度干涉仪研制 [J]. 光学学报,2009,29(11):3207-3211.

[8] Yan Y D,Zhang F Q,He J H,et al. Design of VISAR optical system for Shen-Guang-Ⅲ prototype [J]. Optics and Precision Engineering,2010,18(11):2355-2361. (in Chinese)
闫亚东,张法全,何俊华,等. 神光-Ⅲ原型装置用速度干涉仪的光学系统设计 [J]. 光学精密工程,2010,18(11):2355-2361.

[9] Wang J,Wen S G. Experimental study on deflagration-to-detonation transition in two pressed high-density explosives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2009,23(6):441-446. (in Chinese)
王 建,文尚刚. 以 HMX 为基的两种压装高密度炸药的燃烧转爆轰实验研究 [J]. 高压物理学报,2009,23(6):441-446.

[10] Li X M,Jin X G,Li D H,et al. Elementary measurement of free surface velocity of cylindrical metal tube under inward detonation [J]. Acta Armamentarii,2007,28(10):1252-1255. (in Chinese)
李雪梅,金孝刚,李大红,等. 内聚爆轰加载下金属圆管的自由面速度测量初探 [J]. 兵工学报,2007,28(10):1252-1255.

[11] Ming P M,Zhu D,Hu Y Y,et al. Fabrication of nickel soft contact microprobe based on UV-LIGA [J]. Optics and Precision Engineering,2007,15(5):735-740. (in Chinese)
明平美,朱 荻,胡洋洋,等. UV-LIGA 技术制备微型柔性镍接触探针 [J]. 光学精密工程,2007,15(5):735-740.

Comparison of Multi-Channel VISAR and Electric Probe Technology in Measuring Free-Surface Velocity of Metal Flyer

JIN Shan,CHEN Yong-Tao,TANG Tie-Gang,PENG Qi-Xian,MENG Jian-Hua

(*Institute of Fluid Physics,CAEP,Mianyang* 621900,*China*)

Abstract:Parameters of high speed object are often measured by multi-channel velocity interferometer system for any reflector (VISAR) or electric probe technology. In order to validate experimental results,and analyze test system factors affecting measurement precision,the free-surface velocity history of metal flyer driven by detonation was measured by multi-channel VISAR and electric probes. The displacement-time curve of metal flyer was calculated from the measured velocity-time curve,and then contrasted with the results measured by electric probes. Experimental results show that all v-t curves measured by multi-channel VISAR are coincident well within the maximum difference of 1.45%. And the maximum difference of time at 5,10,15 mm standoff measured by VISAR and electric probe is respectively 0.02,0.02,0.07 μs after modified. The difference between two sets of system at the same position increases with the movement distance of flyer,it could be resulted from the increased waveform difference of the explosive lens with the flight distance of flyer.

Key words:velocity interferometer system for any reflector (VISAR);electric probe;detonation