

分幅面成像任意反射面速度干涉仪诊断 激光驱动飞片全场速度

刘寿先 温伟峰 袁树云 陈光华 刘俊 彭其先 李泽仁

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 研制了一套分幅面成像任意反射面速度干涉仪(VISAR)用于飞片完整性、速度分散性和平面性的诊断。在线成像 VISAR 基础上,用更小的条纹常数实现更高的速度分辨,同时用光电分幅相机取代扫描相机记录干涉条纹图像,实现多个时刻全场速度的测量。所研制的分幅面成像 VISAR 具有 $5\ \mu\text{m}$ 的空间分辨和 $15\ \text{m/s}$ 的速度分辨能力。用其测量了激光驱动铜膜或铝膜飞片的速度场,给出了多个时刻的全场速度分布,从中可以清晰看出飞片的演化发展过程。实验结果表明,分幅面成像 VISAR 技术可以为激光驱动飞片平面性的理论研究和数值模拟提供有效实验数据。

关键词 测量;光学测量;全场速度;面成像任意反射面速度干涉仪;激光驱动飞片;干涉条纹;分幅面成像

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0912007

Full Field Velocity Measurement of Laser-Driven Flyer Using Framing-Imaging Velocity Interferometer System for Any Reflector

Liu Shouxian Wen Weifeng Yuan Shuyun Chen Guanghua Liu Jun

Peng Qixian Li Zeren

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract A framing-imaging velocity interferometer system for any reflector (VISAR) for measuring the integrity, speed dispersion and planarity of a flyer is developed. Based on the existing line-imaging VISAR, a smaller velocity-per-fringe constant is selected for higher velocity resolution, and a framing camera is used as a substitute for a streak camera to capture the two-dimensional (2D) interferograms at different time. Full-field velocity map is provided with a spatial resolution of $5\ \mu\text{m}$ and a velocity sensitivity of $15\ \text{m/s}$. The technique is employed to measure a two-dimensional spatial velocity field of Cu (or Al) foils flyer driven by a pulse laser, and to reveal the continuous evolution of flyers. These results demonstrate that the framing imaging VISAR can be a valuable addition to the suite of diagnostics for the flyer planarity study.

Key words measurement; optical measurement; full field velocity; 2D imaging velocity interferometer system for any reflector; laser-driven foil; interference fringe; framing imaging

OCIS codes 120.7250; 120.2650; 120.3180

1 引 言

爆轰、气炮、激光驱动、磁驱动和电炮等飞片产生技术及加载手段是材料动力学特性、高压物理、空间科学和武器物理等研究领域中的几种重要的实验技术。在这些实验技术中,主要用速度和飞片(或加载)平面性这两个指标来表征飞片质量或者加载状

态的好坏。相同条件下,速度越高,系统能量利用率越高;平面性越好,越有利于动态加载过程的研究。

速度通常采用任意反射面速度干涉仪^[1](VISAR)和光子多普勒测速仪^[2](PDV)来测量。平面性可以用快响应光纤探针系统^[3]、多点 VISAR^[4-5]、多点 PDV^[6]或者线成像 VISAR^[7-8]来

收稿日期: 2013-03-13; **收到修改稿日期**: 2013-05-08

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ130019)、国家自然科学基金(11075145)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011BO401007)、流体物理研究所发展基金(SFZ20110301)

作者简介: 刘寿先(1979—),男,硕士,副研究员,主要从事瞬态过程的光电测试技术方面的研究。

E-mail: pion55@163.com

间接测量,也可以用瞬时成像位移干涉仪^[9]或者剪切电子散斑干涉术^[10]来直接测量。快响应光纤探针系统^[3]测量飞片撞击不同位置处的光纤探针的时间差,对时间差进行曲面拟合获得平面性信息;多点 VISAR^[4-5]和多点 PDV^[6]是测量不同位置处的速度,积分获得位移,对不同位置处的位移进行曲面拟合获得平面性信息;线成像 VISAR^[7-8,11]与多点 VISAR 类似,可以获得飞片表面一条直线上各点的速度(位移),进而得到平面性一个维度(方向)的信息。离散多点的间接测量,空间分辨能力较低,要提高空间分辨能力,做到 16 点、32 点、64 点甚至更多点测量时,系统又非常复杂。而线成像 VISAR 只能够实现一个维度(方向)上的测量,图像仍不够直观,也不便于对物理过程的解读。为此,需要发展一种技术,实现对飞片平面性更加直观、精确的测量。二维(2D)面成像 VISAR^[12]是线成像 VISAR 技术的进一步发展,它能够实现一个或者多个时刻飞片表面各个点绝对速度或速度相对分布的测量,图像更加直观,信息量更丰富,能够给出飞片完整性和速度分散性的信息。且面成像 VISAR 技术与瞬时成像位移干涉仪相辅相成的,通常后者只能给出飞片某个时刻的平面性信息,但是飞片是如何演化和发展的,只能用分幅面成像 VISAR 给出。

本文建立一套 4 分幅二维面成像 VISAR 测量装置,用它诊断脉冲激光驱动飞片的全场速度,给出了飞片速度分散性信息及其演化过程。

2 原理及装置

2.1 面成像 VISAR 原理

激光干涉测速技术分为两大类:位移干涉仪和

速度干涉仪。位移干涉仪是靶面返回的带有多普勒信息的信号光与静态参考面返回的参考光相干涉,形成正弦干涉条纹,条纹数与靶面位移成正比。速度干涉仪将靶面返回光分成两束,其中一束经过标准具产生 τ 的时间延迟,然后两束光再干涉形成正弦干涉条纹,条纹数与速度成正比。

VISAR 是典型的速度干涉仪。成像 VISAR 则是传统 VISAR 的发展。其基本原理如图 1 所示,光源发射的激光扩束后照射到运动物体表面,从物体表面返回的漫反射激光由成像透镜收集后成像在成像型干涉测速腔前,利用成像型干涉测速腔中的延迟标准具实现 t 时刻和 $t + \tau$ 时刻返回光的干涉,并在记录像面形成包含多普勒频移信息的梳状干涉条纹,线成像 VISAR 用扫描相机记录靶面一条线上各点随时间连续变化的条纹图像;面成像 VISAR 用分幅相机记录多个时刻的整个表面二维空间分辨的干涉条纹。记录像面与靶面具有一一对应的物像关系,实现空间连续分辨,靶面各点多普勒频移量不一样,导致梳状条纹各点移动量(相位)不一样,通过数据处理可以得到条纹各点的相位,进而线成像 VISAR 的各点速度随时间的变化可表示为

$$v(x, t) = F \cdot \frac{\phi(x, t)}{2}, \quad (1)$$

式中 $\phi(x, t)$ 为 t 时刻点 x 处条纹相位, F 为干涉腔条纹常数。

面成像 VISAR 得到的靶面各点绝对速度或者速度的相对分布表达为

$$v_i(x, y) = F \cdot \frac{\phi_i(x, y)}{2\pi}, \quad (2)$$

式中 $\phi_i(x, y)$ 为 t 时刻点 (x, y) 处条纹相位。

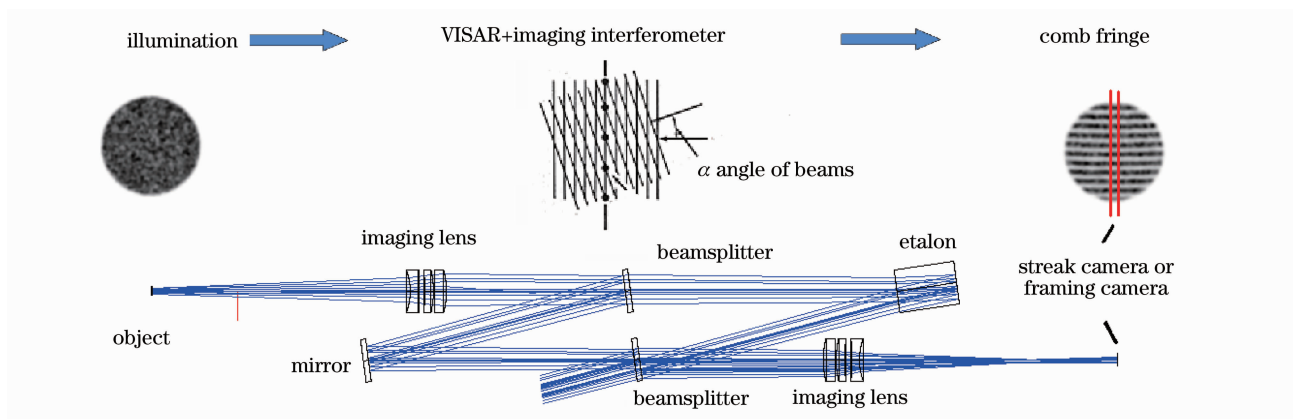


图 1 成像 VISAR 基本原理

Fig. 1 Principle of imaging VISAR

根据 VISAR 基本理论, t 时刻面 VISAR 各点输出信号的相位由 $t-\tau$ 和 t 时刻内的位移共同决定, 即与 $t-\tau \sim t$ 时间段内的平均速度有关, 表示为

$$\phi(x, y, t) = \frac{2\pi}{\lambda}(1 + \delta) \{ 2 \cdot [Z(x, y, t) - Z(x, y, t - \tau)] \} = 2\pi \frac{2\tau}{\lambda}(1 + \delta) \left\{ \left[\frac{Z(x, y, t) - Z(x, y, t - \tau)}{\tau} \right] \right\} = 2\pi \cdot F \cdot \overline{V\left(x, y, t - \frac{\tau}{2}\right)}, \quad (3)$$

式中 $\overline{V\left(x, y, t - \frac{\tau}{2}\right)}$ 为平均速度, $F = \frac{\lambda}{2\tau(1 + \delta)}$ 为条纹常数。

线成像 VISAR 有初始静态条纹, 可以得到 $\phi(x, t)$ 的绝对值, 即得到绝对速度 $\overline{V\left(x, t - \frac{\tau}{2}\right)}$; 二维面成像 VISAR 在靶面运动的前期, 如果条纹未发生错位, 可以得到相位 $\phi(x, y, t)$ 的绝对值, 即速度 $\overline{V\left(x, y, t - \frac{\tau}{2}\right)}$ 的绝对值, 如果在靶面运动的中后期, 运动表面与未运动表面两者之间的条纹发生错位, 则无法直接得到相位 $\phi(x, y, t)$ 的绝对值, 需要通过单点 VISAR 或线成像 VISAR 给出某一个点速度作为基准进行校正, 或者用物理过程的理论值对这个速度分布进行条纹常数整数倍的修正。

2.2 面成像 VISAR 装置

条纹常数 F 是 VISAR 装置中一个非常重要的参数。条纹常数越大, 干涉仪的响应时间(延迟时间 τ) 越快, 但速度分辨越低。面成像 VISAR 主要用于靶面各点速度相对差异的诊断, 需要较高的速度分辨能力, 另外与干涉仪响应时间比较而言, 面成像 VISAR 所采用的分幅相机的曝光时间为纳秒量级, 才是系统时间分辨的决定因素。为此选择较小的条纹常数, 其值为 $300 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{fringe})$, 对应的干涉仪响应时间为 860 ps , 速度分辨小于 $15 \text{ m}/\text{s}$ (依据条纹相位计算误差为 $\lambda/20$), 这对于速度相对差异的诊断而言是能够满足要求的。对于 10 ns 左右脉冲宽度的激光驱动飞片速度场诊断, 其速度上升沿约为 15 ns , 速度平台持续时间在 100 ns 以上, 因此, 分幅相机最短曝光时间为 5 ns 时, 在速度上升沿阶段有可能造成条纹模糊, 但在飞片的其他阶段能够满足使用要求, 即在 5 ns 时间内干涉条纹的移动量小于 $1/10$ 个条纹。对于微秒量级的爆轰过程, 最短曝光时间为 5 ns 更是可以满足使用要求。

在原有线成像 VISAR^[13-14] 基础上搭建的面成像 VISAR 装置如图 2 所示, 声光开关将连续激光斩波成所需要的时间长度, 由扩束器扩束后经过偏振分束棱镜、 $1/4$ 波片、成像透镜投射到目标靶面,

目标靶面的漫反射光再由成像透镜收集, 并在波片前形成一个中间像, 经波片后在偏振棱镜处折射到干涉仪中, 形成梳状干涉条纹, 并由中继成像镜头成像到光电分幅相机前再由其记录。装置主要技术指标如下: 成像视场 $3 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, 空间分辨小于 $5 \mu\text{m}$, 在条纹常数为 $30 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{fringe})$ 时干涉仪响应时间为 860 ps , 分幅相机最短曝光时间为 5 ns , 速度分辨率为 $15 \text{ m}/\text{s}$ 。只要靶面能够保持一定的反射率, VISAR 技术测速范围原理上没有上限。

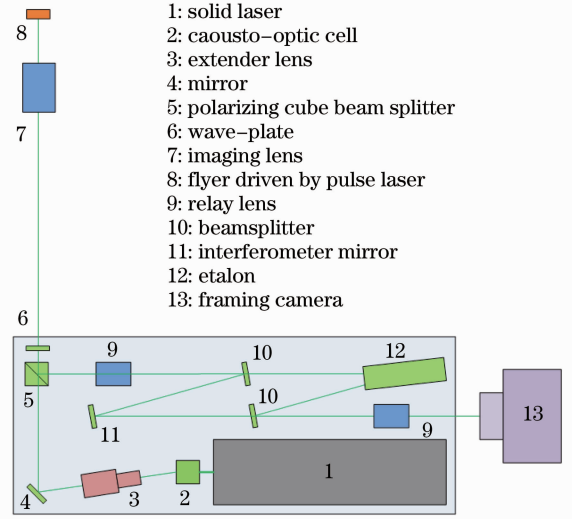


图 2 二维面成像 VISAR 装置

Fig. 2 Setup of 2D imaging VISAR

3 实验及结果

为了检验所搭建面成像 VISAR 装置的性能, 用其测量脉冲激光驱动的飞片速度场。激光驱动飞片装置如图 3 所示, 其基本原理是脉冲激光经过单透镜聚焦到附着在透明窗口的样品背面, 烧蚀一部分膜层材料使之转变为高温高压等离子体, 等离子体迅速膨胀, 但受到透明窗口的限制只能向前推动光斑内的剩余未烧蚀膜层高速冲出膜体, 形成飞片。激光器脉冲宽度约为 10 ns , 单脉冲能量最大为 1 J , 波长为 1064 nm , 光束直径为 8 mm , 用焦距为 200 mm 单透镜将光斑压缩到直径约 2 mm , 此时功率密度约为 $1.6 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。将铜膜或铝膜用硅油直接紧密粘贴在玻璃窗口上, 也可以

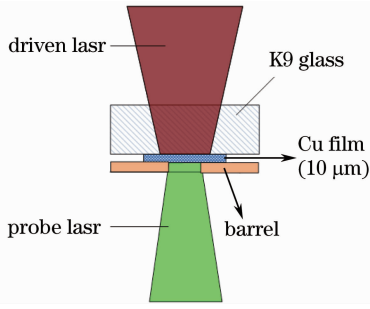


图 3 激光驱动飞片示意图

Fig. 3 Schematic of laser-driven flyer

用刀口进行约束以提高飞片速度。

第一发实验的驱动对象为 $10\ \mu\text{m}$ 厚的铜膜, 铜膜后表面被直径为 $1.5\ \text{mm}$ 的刀口约束着。激光驱动后的铜膜样品如图 4 所示。采用前述二维面成像 VISAR 测量, 分幅相机记录到的干涉条纹如图 5 所示。以飞片启动为 0 时刻, 四幅干涉图像约对应 -40 、 20 、 60 、 $120\ \text{ns}$ 。可看出, 动态情况下的三幅干涉条纹图像从外部向中心依次有较明显光强反射率变化, 这主要是激光驱动下铜膜表面受到高压加载产生的。采用傅里叶变换方法^[15]对干涉条纹进行处

理, 得到条纹相位, 再根据前文(2)式计算得到全场速度分布, 如图 6 所示。 $20\ \text{ns}$ 时, 飞片边缘先开始运动, 速度约为 $120\ \text{m/s}$, 飞片中间部分的速度约为 $80\ \text{m/s}$; $60\ \text{ns}$ 时, 仍然是左边边缘处的速度最高, 为 $210\ \text{m/s}$, 中间大部分区域的速度上升到 $160\ \text{m/s}$; $120\ \text{ns}$ 时, 左边缘部分速度缓慢上升到 $250\ \text{m/s}$, 中间大部分区域速度上升到 $200\ \text{m/s}$, 并且形成一个较为平整的平面。动态下三个时刻过中心的 X 方向和 Y 方向的速度分布如图 7 所示, 可以看出速度的分辨能力约为 $15\ \text{m/s}$ 。

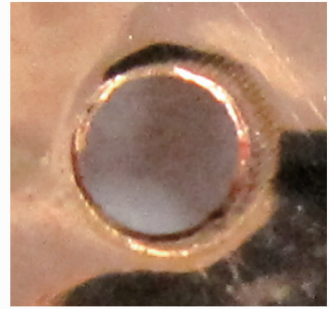


图 4 激光驱动后的铜膜样品

Fig. 4 Cu foil flyer driven by a pulse laser

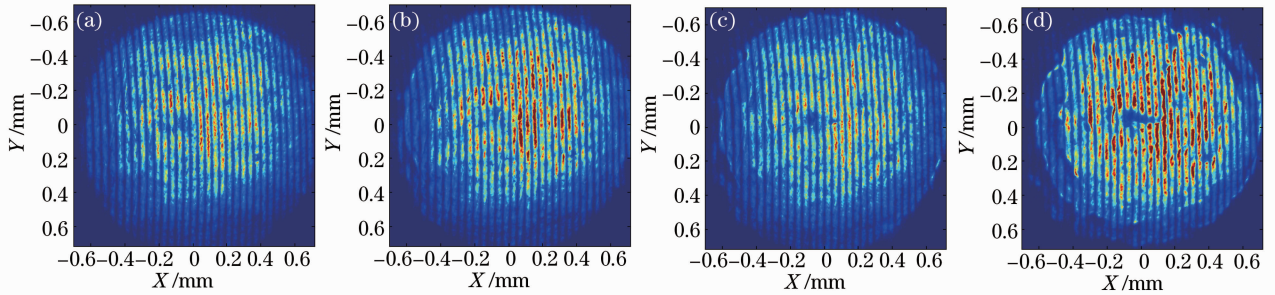


图 5 第一发实验分幅相机记录的面成像 VISAR 干涉条纹。(a) $t = -40\ \text{ns}$; (b) $t = 20\ \text{ns}$; (c) $t = 60\ \text{ns}$; (d) $t = 120\ \text{ns}$

Fig. 5 2D imaging VISAR interferogram of the first experiment, recorded by a framing camera. (a) $t = -40\ \text{ns}$; (b) $t = 20\ \text{ns}$; (c) $t = 60\ \text{ns}$; (d) $t = 120\ \text{ns}$

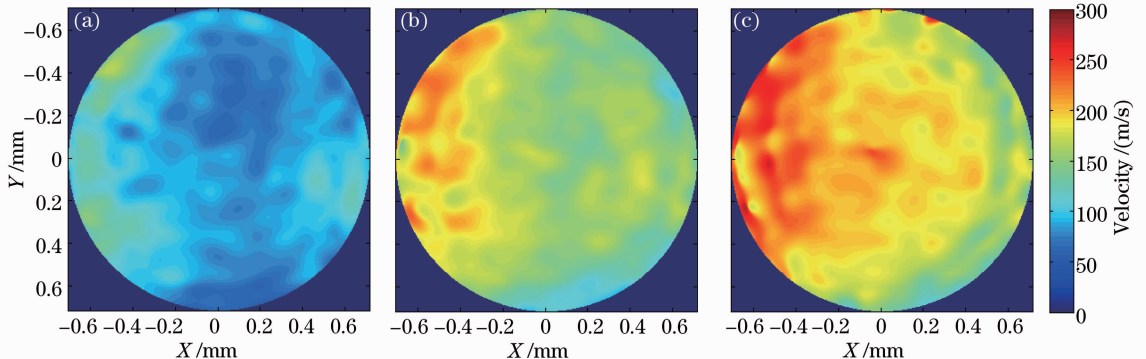


图 6 第一发实验各个时刻的全场速度分布。(a) $t = 20\ \text{ns}$; (b) $t = 60\ \text{ns}$; (c) $t = 120\ \text{ns}$

Fig. 6 Full-field velocity maps of the first experiment at different time. (a) $t = 20\ \text{ns}$; (b) $t = 60\ \text{ns}$; (c) $t = 120\ \text{ns}$

第二发实验的驱动对象为 $25\ \mu\text{m}$ 厚的铝膜，铝膜后无刀口约束。分幅相机记录到的干涉条纹如图 8 所示。以飞片启动为 0 时刻，四幅干涉图像约对应 20、80、120、160 ns。图 8(a)、(b) 中条纹强度变化不大，条纹也未有明显移动；图 8(c)、(d) 中，局部区域由于冲击压力的作用，反射率有明显的增加，且靶中心位置条纹有非常明显移动。计算得到的速度分布如图 9 和图 10 所示(受到噪声影响，前三幅图像中 $X=0\ \text{mm}$, $Y=0.5\ \text{mm}$ 处附件区域的数据有较大误差)。20 ns 时，飞片整体开始运动，速度分布较为平均，约为 140 m/s；80 ns 时，则是边缘先开始加速，Y 方向边缘处速度约为 280 m/s，而中心速度约为 180 m/s；120 ns 和 180 ns 时，边缘的速度增量开始变小，而中心开始逐渐加速，呈现明显隆起，如图 9(c)、(d) 和图 10 的速度剖面所示。从图 9 中四个时刻的全场速度分布，可以清晰看出激光驱动铝膜的速度场演化过程。结合已有多发实验的测量结果，初步分析激光驱动飞片在未有刀口约束的情况

下，烧蚀产生的等离子膨胀先是推动飞片整体鼓起，过量等离子体受到后窗口的约束只能先向四周扩散，使得边缘速度先增加，边缘膜层移动到一定程度就会与未烧蚀区域的膜层分离，形成飞片，残余等离子进一步驱动飞片缓慢加速，激光光斑中心能量最高，烧蚀的等离子最多，可使得飞片中间区域隆起。

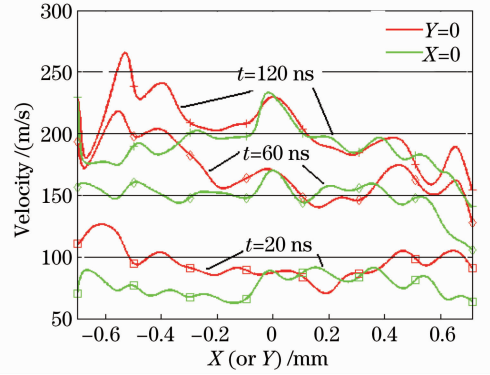


图 7 第一发实验动态下 $X=0$ 和 $Y=0$ 处的速度分布
Fig. 7 Velocity distributions at $X=0$ and $Y=0$ in the first experiment

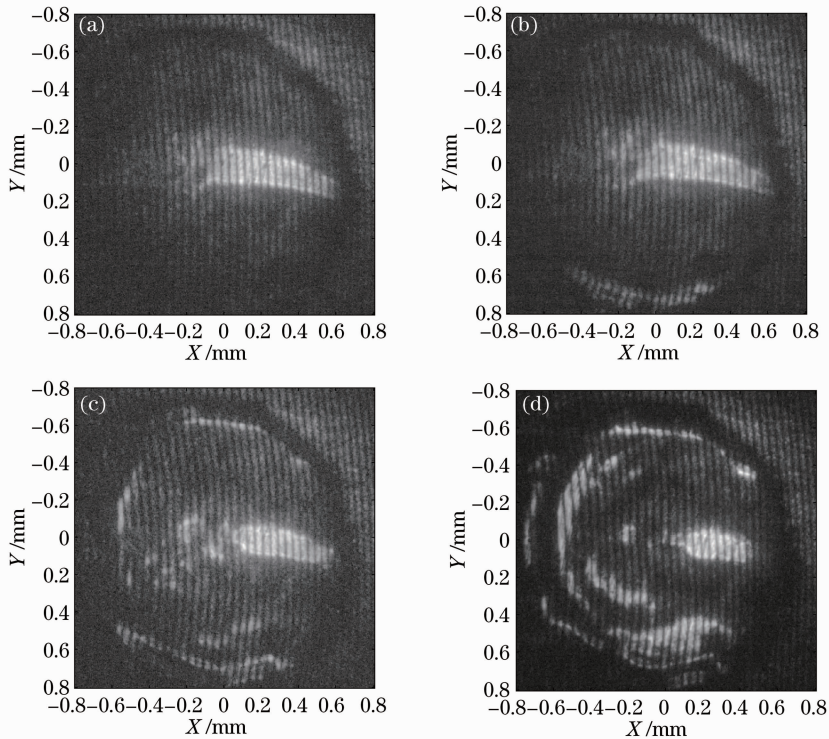


图 8 第二发实验分幅相机记录的面成像 VISAR 干涉条纹。(a) $t=20\ \text{ns}$ ；(b) $t=80\ \text{ns}$ ；(c) $t=120\ \text{ns}$ ；(d) $t=160\ \text{ns}$
Fig. 8 2D imaging VISAR interferograms of the second experiment recorded by a framing camera. (a) $t=20\ \text{ns}$ ；
(b) $t=80\ \text{ns}$ ；(c) $t=120\ \text{ns}$ ；(d) $t=160\ \text{ns}$

由此可见二维面成像 VISAR 技术是现有有线成像 VISAR 的有益补充，其结果有助于理解激光驱

动飞片的机理，能够为激光驱动飞片的理论和数值模拟研究提供有效的比对数据。

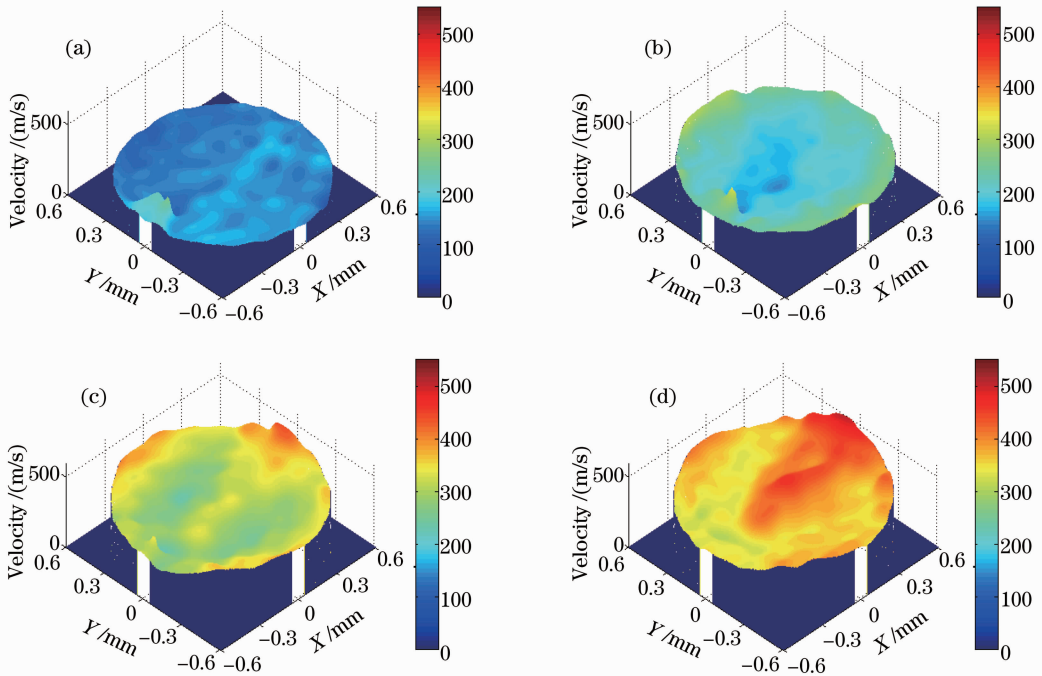


图9 第二发实验各个时刻的全场速度分布。(a) $t=20$ ns; (b) $t=80$ ns; (c) $t=120$ ns; (d) $t=160$ ns

Fig. 9 Full-field velocity maps of the second experiment at different time. (a) $t=20$ ns; (b) $t=80$ ns; (c) $t=120$ ns; (d) $t=160$ ns

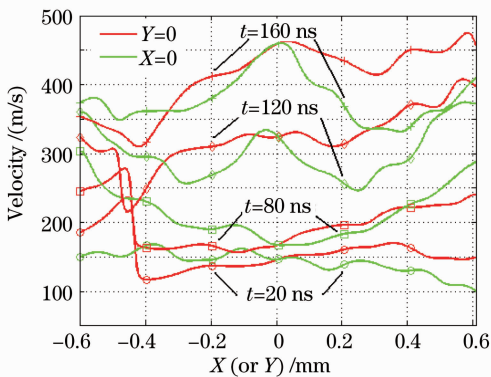


图10 第二发实验动态下 $X=0$ 和 $Y=0$ 处的速度分布

Fig. 10 Velocity distributions at $X=0$ and $Y=0$

4 结 论

建立了一套4分幅二维面成像VISAR测速装置,实现多个时刻激光驱动飞片的全场速度的测量,清晰给出了飞片的演化过程。二维面成像VISAR作为现有线成像VISAR技术的有益补充,为爆轰、气炮、激光驱动、磁驱动和电炮等飞片产生技术及加载手段提供了一种新的诊断技术,可以实现飞片或者样品速度分散性和完整性的诊断。只需要采用成像透镜组代替干涉仪中的标准具,面成像速度测量技术还可以实现10 m/s以下振动速度的全场测量,应用于振动模态分析。相对于扫描式激光多普勒测

振仪,具有更高的空间分辨和实验效率。

参 考 文 献

- 1 L M Barker, R E Hollenbach. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface [J]. J Appl Phys, 1972, 43(11): 4669—4675.
- 2 O T Strand, D R Goosman, C Martinez, *et al.*. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(8): 083108.
- 3 Wang Rongbo, Li Zeren, Tian Jianhua, *et al.*. Application of passive fiber-optic probe to detonation experiments [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(11): 117—121. 王荣波, 李泽仁, 田建华, 等. 无源光纤探针在爆轰实验中的应用[J]. 光学工程, 2008, 35(11): 117—121.
- 4 Zeren Li, Ruchao Ma, Guanghua Chen, *et al.*. Multipoint velocity interferometer system for any reflector [J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(10): 3872—3876.
- 5 J F Kevin, A B Theresa. Shock Analysis Using the Multi Point Velocimeter (VISAR) [R]. Sandia National Laboratories, 2003.
- 6 Changming Hu, Xiang Wang, Lincang Cai, *et al.*. Study on dynamic compression performance of K9 glass with prefabricated defects [C]. Chicago: Shock Compression of Condensed Matter-2011, AIP Conf Proc, 2012, 1426:1089—1092.
- 7 P M Celliers, D K Bradley, G W Collins, *et al.*. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility [J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(11): 4976—4929.
- 8 T J Vogler, W M Trott, W D Reinhart, *et al.*. Using the line-VISAR to study multi-dimensional and mesoscale impact phenomena [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(12): 1844—1852.
- 9 S R Greenfield, S N Luo, D L Paisley, *et al.*. Transient imaging displacement interferometry applied to shock loading [C]. Waikoloa: Shock Compression of Condensed Matter-2007: AIP

- Conf Pro, 2007, 955: 1093–1096.
- 10 Sun Ping, Fan Xiangju, Wang Xinghai. Three-dimensional electronic speckle pattern interferometry with carrier modulation by using large shearing block prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412012.
孙平, 范香菊, 王兴海. 基于大错位方棱镜的三维载频电子散斑干涉技术[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0412012.
- 11 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye, *et al.*. Active high-accuracy shock-wave velocity measure technique in laser indirect-drive experiment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1114004.
王峰, 彭晓世, 刘慎业, 等. 辐射驱动下主动式高精度冲击波速度精密诊断技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1114004.
- 12 P M Celliers, D J Erskine, C M Sorce, *et al.*. A high-resolution two-dimensional imaging velocimeter [J]. *Rev Sci Instrum.* 2010, 81(3): 035101.
- 13 Liu Shouxian, Li Zeren, Peng Qixian, *et al.*. A novel line-imaging velocity interferometer for shock diagnostics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 213–216.
刘寿先, 李泽仁, 彭其先, 等. 一种新的线成像激光干涉测速系统[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(2): 213–216.
- 14 Liu Shouxian, Li Zeren, Peng Qixian, *et al.*. Line-imaging velocity interferometer for laser driven flyer diagnostics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(10): 2281–2284.
刘寿先, 李泽仁, 彭其先, 等. 用于激光驱动飞片诊断的线成像速度干涉仪[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(10): 2281–2284.
- 15 M Takeda, S Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J Opt Soc Am*, 1981, 72(1): 156–160.

栏目编辑：何卓铭