

# 同时线成像和分幅面成像任意反射面速度干涉仪测速技术

刘寿先 雷江波 陈光华 刘俊 温伟锋 袁树云 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** 研制了一套线面同时成像任意反射面速度干涉仪(VISAR)用于激光驱动飞片速度场时空分辨测量。将传统 VISAR 改为成像干涉结构,用变像管扫描相机和高速光电分幅相机分别记录作为信号载体的梳状干涉条纹,实现靶面一条线上各点速度历史和多个时刻二维靶面上所有点速度的测量。所研制的线面同时成像 VISAR 具有小于  $10\ \mu\text{m}$  的空间分辨和约  $15\ \text{m/s}$  的速度分辨能力,线成像 VISAR 时间分辨小于  $50\ \text{ps}$ ,面成像 VISAR 曝光时间小于  $5\ \text{ns}$ 。用其测量了激光驱动带约束刀口铝膜飞片的速度场,给出了高时空分辨全场速度分布,从中可以清晰看出飞片的演化发展过程。实验结果表明,线面同时成像 VISAR 将是各种飞片产生技术及相应加载手段中全场速度诊断的有力工具。

**关键词** 测量; 速度; 成像任意反射面速度干涉仪; 激光驱动飞片; 干涉条纹; 扫描相机; 分幅相机

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0108007

## Simultaneous Line Imaging and Plane Framing Imaging Velocity Interferometer for Shock Physics

Liu Shouxian Lei Jiangbo Chen Guanghua Liu Jun Wen Weifeng  
Yuan Shuyun Peng Qixian Li Zeren

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

**Abstract** A simultaneous line imaging and plane framing imaging velocity interferometer system for any reflector (VISAR) for spatial and temporal resolution measurement of velocity field of laser driven flyer is developed. Different from the conventional point VISAR, imaging VISAR uses streak camera and framing camera to record the movement of comb fringe, and provides a one-dimensional velocity history versus time along a line and a two-dimensional velocity map of the whole surface at different time. In addition, the instrument measures velocity field at spatial resolution of  $10\ \mu\text{m}$  and velocity resolution of  $15\ \text{m/s}$ . The technique is employed to measure temporal and spatial velocity field of Al foils flyer driven by a pulse laser, and to reveal the continuous evolution of flyers. These results demonstrate that the simultaneous line imaging and plane framing imaging VISAR can be a valuable diagnostics for shock physics.

**Key words** measurement; velocity; imaging velocity interferometer system for any reflector; laser-driven foil; interference fringe; streak camera; framing camera

**OCIS codes** 120.3180; 120.7250; 120.2650

## 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几种重要的实验技

术。在这些实验技术中,飞片是如何演化或者加载,冲击波在材料内部(特别是确定性结构样品内部)是如何传播的,是值得关注的物理问题。这需要对飞片自由面速度或者材料界面速度(或粒子速度)

**收稿日期**: 2013-08-02; **收到修改稿日期**: 2013-09-04

**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(2011B0401007)、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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

进行高分辨时间尺度和空间尺度测量。常规的低速振动情况下采用德国 Polytec 全场扫描式测振仪, 可以测量  $512 \times 512$  个点, 但测速范围低且不适宜于微秒甚至亚微秒量级的瞬态过程。而多点任意反射面速度干涉仪 (VISAR)<sup>[1-2]</sup>、光纤多普勒测速仪 (PDV)<sup>[3]</sup> 等离散多点激光多普勒干涉测速技术记录长度长, 探头可以非平面布置, 但受探头尺寸限制, 空间分辨率低 (最高  $127 \mu\text{m}$ ), 且为获得足够的数量, 比如同时测量 128 个点, 即便采用波分和时分技术的复用 PDV 系统, 也是非常复杂和昂贵的。为此, 需要发展基于成像原理的激光干涉测速技术, 才能够实现高空间分辨 (最高小于  $10 \mu\text{m}$ ) 和大信息的获取 (相对离散多点测速提高  $1 \sim 3$  个数量级)。线成像 VISAR<sup>[4-6]</sup> 可以测量样品表面一条线上所有点速度随时间变化的过程; 面成像 VISAR<sup>[7-9]</sup> 可以测量一个或者多个时刻样品表面各点的绝对速度或速度的相对分布。它们相对于离散多点测速技术最大的优势是图像比较直观, 线成像 VISAR 能测量速度随时间的变化, 但只能分辨靶面上一维空间信息, 而面成像 VISAR 可以给出整个表面二维空间分辨信息, 却只能测量离散的几个时间点, 因此, 两者相结合可以弥补彼此时空分辨上的不足, 直观给出飞片或者样品速度的发展演化过程, 数据量更加丰富。这将为不同加载装置加载效果评估、微细观结构对材料动态响应影响等的理论和数值仿真研究提供详实的实验数据, 满足日益发展的二维、三维数值仿真的需求。

本文建立了一套线面同时成像 VISAR 测量装置, 用它对脉冲激光驱动飞片的速度进行时空分辨测量, 给出了飞片速度发展历程及全场速度演化过程, 展示了线面同时成像 VISAR 测速技术特点和能力。

## 2 原理及装置

### 2.1 线面同时成像 VISAR 原理

VISAR 是典型的速度干涉仪, 利用标准具实现广角迈克耳孙干涉仪的模拟零程差条件, 进而可以对镜面或者漫反射面进行速度测量。成像 VISAR 是传统 VISAR 的发展, 最根本的变化是采用梳状干涉条纹取代“牛眼”状环纹, 用扫描相机和分幅相机分别记录梳状条纹, 且条纹与靶面具有成像关系, 能够实现空间分辨, 这正是成像 VISAR 具有重要应用的原因。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强度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 中各点速度随时间变化的过程与面成像 VISAR 中靶面各点绝对速度或者速度的相对分布可以分别表示为

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

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

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

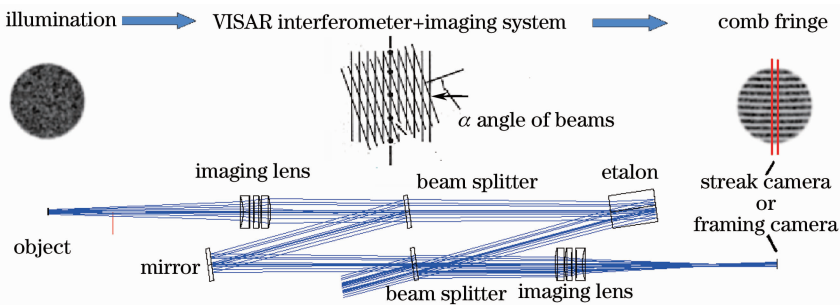


图 1 成像 VISAR 基本原理

Fig. 1 Principles of imaging VISAR

### 2.2 线面同时成像 VISAR 装置

设计搭建的线面同时成像 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、成像透镜后以圆形光斑投射到目标靶面, 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成像 VISAR 干涉仪中,形成梳状干涉条纹,梳状干涉条纹再由平面分束镜分成两个像,一个由变像管扫描相机记录,另一个由光电分幅相机记录。从偏振分束棱镜出射的水平线偏振光经过 1/4 波片后变成左旋椭圆偏振光,投射到靶面,从靶面返回的光再次经过 1/4 波片,从椭圆偏振光变为竖直线偏振光,由偏振分束棱镜折射到干涉腔中,这样的结构可避免采用平面分束镜时约 75% 的能量损失,使得采用 10 W 的固体连续激光器就能够满足线面同时成像 VISAR 的照明需求。系统主要技术指标为:线面成像视场直径为 2 mm,线面成像空间分辨小于 10  $\mu\text{m}$ ,干涉仪响应时间小于 860 ps,变像管扫描相机时间分辨小于 50 ps,分幅相机可以记录 4 幅图像,最短曝光时间小于 5 ns,系统速度分辨约 15 m/s。这套线面同时成像 VISAR 装置能够对 100 ns 至几个微秒的物理过程诊断,通过更改成像镜头还能够实现 15 mm $\times$ 12 mm 的视场内,100  $\mu\text{m}$  的空间分辨测量,在具备更高平均功率的照明光源时,还能够实现约  $\Phi$ 100 mm 更大视场的速度场测量,能够充分满足激光驱动、气炮加载、爆轰加载、磁驱动等诊断需求。

叶变换方法进行处理,得到包裹相位后再拼接在一起进行解包裹。对于二维面成像 VISAR,还需以鉴别率板作为目标参照物,对各分幅图像进行旋转、平移、缩放和自由变换等预处理<sup>[11]</sup>,以实现各幅图像像素间的匹配和对应,再采用傅里叶变换方法进行处理。

同时,成像 VISAR 中偏振分束棱镜、平板分束镜、反射镜及成像镜头的面形不完善,均会给条纹带来相位差,需要在实验前和实验时分别记录静态干涉条纹和动态干涉条纹,然后采用上述傅里叶变换方法分别对之进行处理,再用动态相位减去静态相位,就可以得到真实相位,再由(1)、(2)式计算速度。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;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,即速度的绝对值,但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,只能直接得到速度相对值,再由线成像 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。

### 3 实验及结果

以脉冲激光驱动的飞片速度场测量为例,说明线成像 VISAR 和面成像 VISAR 同时测量的必要性。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 10 ns,脉冲能量为 0.5~1 J,波长 1064 nm,光束直径 8 mm,用  $f=200$  mm 单透镜将光斑压缩到直径 2 mm 左右,此时功率密度为 0.8~1.6  $\text{GW}/\text{cm}^2$ 。将 25  $\mu\text{m}$  铝膜直接紧密粘贴在玻璃窗口上,再用直径为 1 mm、腔长为 1 mm 的金属

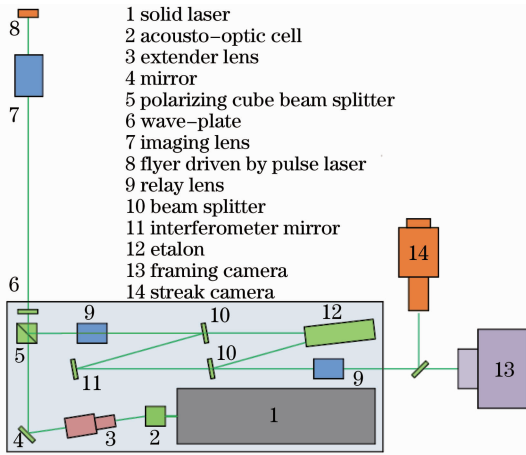


图 2 线面同时成像 VISAR 装置

Fig. 2 Schematic of the line and plane imaging VISAR

#### 2.3 数据处理方法

线成像 VISAR 用扫描相机记录时空分辨梳状条纹,面成像 VISAR 用光电分幅相机记录二维空间分辨的梳状条纹。对于条纹相位恢复而言,两者本质上都是一样的,不区分空间和时间信息,都可以采用二维傅里叶变换方法进行处理<sup>[10]</sup>。但线成像 VISAR 可能存在速度突变过程,使得条纹在时间轴方向有非常明显的变化,如果仍旧采用二维傅里叶变换方法,更容易造成载频频谱与零频交叠,不利于截取载频。为此,对每一个时刻依次采用一维傅里

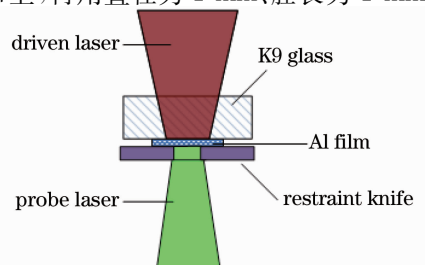


图 3 激光驱动飞片示意图

Fig. 3 Schematic of laser-driven foil

刀口进行约束以提高飞片速度。

在激光打靶前,变像管扫描相机和分幅相机分别记录静态干涉条纹,以便于在数据处理时减去光学系统不完善引入的相位误差。扫描相机和分幅相机记录到的干涉条纹如图 4(a)和图 5(a)~(c)所示。以飞片启动为 0 时刻,线成像 VISAR 记录的总长度约为 100 ns,面成像 VISAR 记录的三幅动态干涉图像约对应 30、70、270 ns。采用 2.3 节中数据处理方法进行处理,得到线成像 VISAR 和面成像 VISAR 的速度分布如图 4(b)和图 5(d)~(f)所示。对比干涉条纹和速度分布两个图,可以看出速度大小与条纹移动基本一致。为了更好地看清细节,单独给出 5 个离散位置点的速度曲线,如图 6(a)所示,很直观地看出它与无约束下铝膜飞片平滑上升的速度曲线<sup>[12]</sup>不同,在有刀口约束的情况下,速度是振荡上升的,图 6(b)中以 1 ns 为时间间

隔的速度剖面线稀疏、密集的变化过程,也反映了这种振荡加速的过程。速度剖面线的起伏还反映了飞片的挤压、褶皱,这又与面成像 VISAR 三个时刻的二维分布速度场相符合。在 30 ns 时速度分布相对平缓,而到了 270 ns,挤压、褶皱进一步加剧,最终形成明显的速度悬崖,如图 5(f)中虚线所示。初步分析认为,这与刀口的约束有关,驱动激光光斑约为 2 mm,而刀口直径只有 1 mm,严重限制了等离子体的膨胀,过量的等离子体不均匀扩散到边缘受到限制又返回中心,与中心等离子体的相互作用,使得飞片发生挤压和褶皱,在这个过程中飞片始终未脱离基底铝膜,30 ns 时飞片平均位移约 20  $\mu\text{m}$ ,270 ns 时飞片平均位移约 110  $\mu\text{m}$ 。图 7 是面成像 VISAR 测量得到的  $y=0$  处三个时刻的速度分布,可以看出其与图 6(b)中线成像 VISAR 的结果速度剖面形状是吻合的。

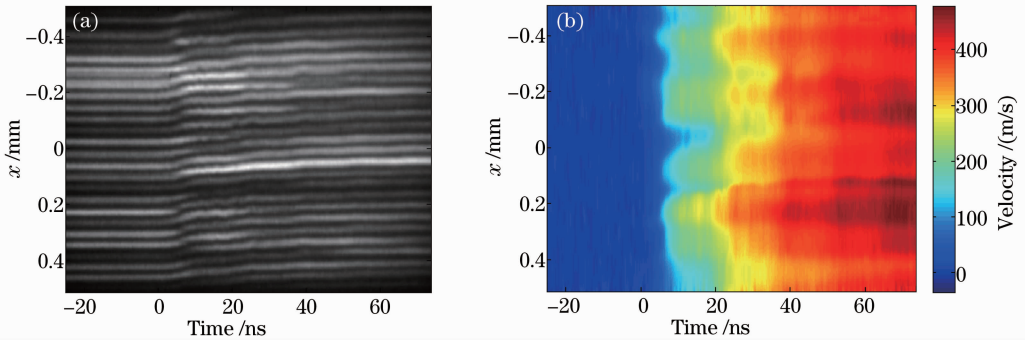


图 4 (a) 线成像 VISAR 干涉条纹和(b)速度分布

Fig. 4 (a) Interferometric fringe of line imaging VISAR and (b) distribution of velocity

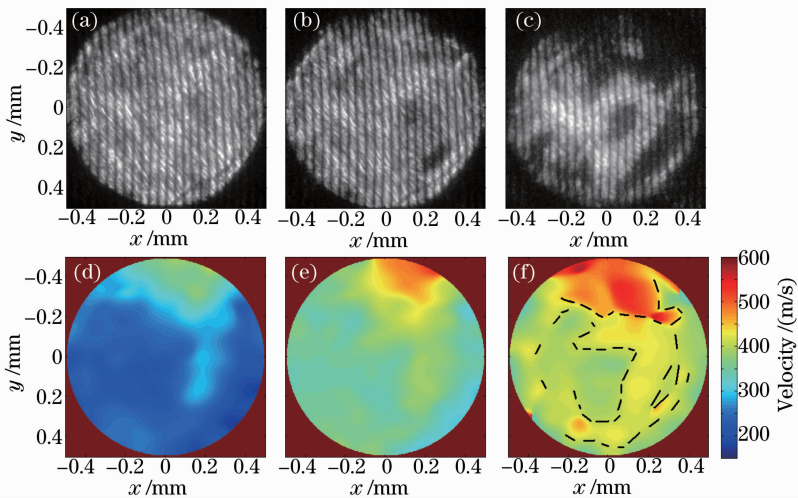


图 5 不同时刻(a)~(c)面成像 VISAR 条纹及(d)~(f)速度场

Fig. 5 (a)~(c) Fringes of plane imaging VISAR and (d)~(f) velocity fields at different time

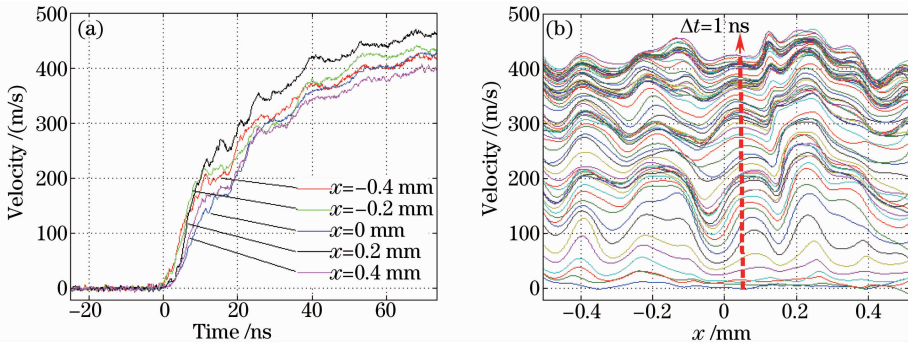


图 6 线成像实验(a)不同位置和(b)不同时刻的速度曲线

Fig. 6 Velocity changes of line imaging VISAR at (a) different points and (b) different time

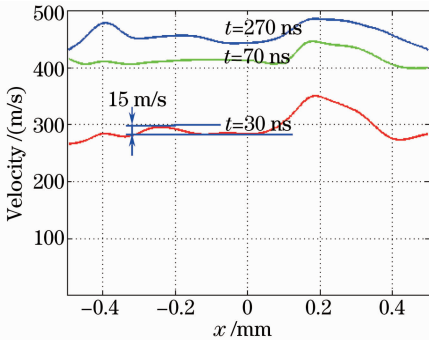


图 7 分幅面成像实验结果细节

Fig. 7 Details of plane framing imaging VISAR data

实验中,线成像 VISAR 很好地反映出了飞片速度振荡上升的过程,这是不具有连续时间分辨能力的二维面成像 VISAR 无法反映的。而二维面成像 VISAR 又弥补了线成像 VISAR 轴对称假设的不足,具有多个时刻的二维空间分辨能力,直观展示了整个飞片的发展、演化过程。

#### 4 关键技术指标测试分析

理论上,线面同时成像 VISAR 的响应时间受到 VISAR 干涉腔延迟时间限制,系统条纹常数为  $300 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{fringe})$ ,对应延迟时间为  $860 \text{ ps}$ 。而线成

像 VISAR 时间分辨决定于扫描相机时间分辨,采用慢扫描单元最高时间分辨为  $50 \text{ ps}$ ,面成像 VISAR 则由光电分幅相机曝光时间决定,最短  $5 \text{ ns}$ 。

空间分辨以鉴别率板为标准。将鉴别率板放于靶面位置,调整系统使之成像清晰。根据分辨率板线对组数,在靶面处,线成像 VISAR 空间分辨约  $7.49 \mu\text{m}$ ,面成像 VISAR 空间分辨约  $3.15 \mu\text{m}$ 。这是仪器中成像系统的空间分辨本领。以分辨率板标定,扫描相机 1 pixel 对应于  $1.8 \mu\text{m}$ ,分幅相机 1 pixel 对应于  $2.0 \mu\text{m}$ 。调整条纹间距,使条纹间距与扫描相机空间分辨(相机狭缝处空间分辨约为  $70 \mu\text{m}$ )匹配。动态实验中获得干涉条纹如图 8(a)和图 9(a)所示,从局部放大图像图 8(b)和图 9(b)中选择最细的条纹,读取波谷与波谷的距离,线成像 VISAR 距离为  $32 \mu\text{m}$ ;面成像 VISAR 为  $14 \mu\text{m}$ 。以 1 个条纹 4 个采样间隔估算,线成像 VISAR 实际空间分辨约  $8 \mu\text{m}$ ,而面成像 VISAR 则能够提高 1 倍,约  $3.5 \mu\text{m}$ ,比分辨率板测出的空间分辨率略低,但这是实际速度测量真实的空间分辨本领。显然,线面同时成像 VISAR 的空间分辨比离散多点激光干涉测速技术  $127 \mu\text{m}$  的分辨更具优势。

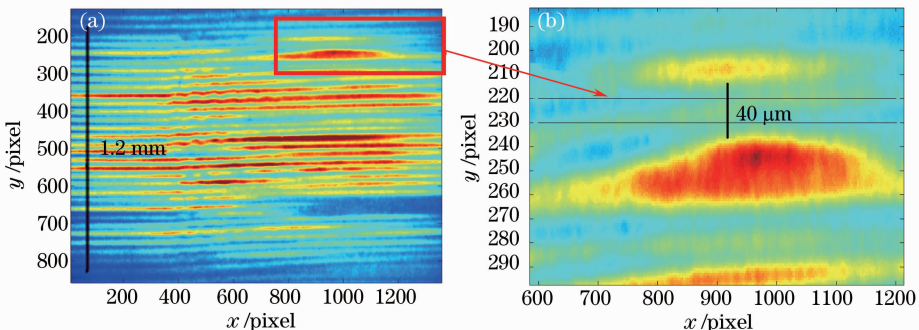


图 8 线成像 VISAR 空间分辨本领。(a) 干涉条纹;(b) 局部放大图像

Fig. 8 Spatial resolution of line imaging VISAR. (a) Interferometric fringe; (b) amplified part of fringe

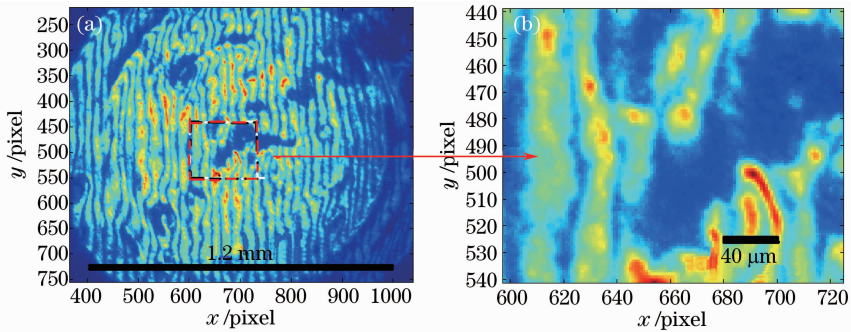


图 9 分幅面成像 VISAR 空间分辨本领。(a) 干涉条纹;(b) 局部放大图像

Fig. 9 Spatial resolution of plane framing imaging VISAR. (a) Interferometric fringe; (b) amplified part of fringe

以上述实验线成像 VISAR 速度曲线图 6(a) 为例,  $x$  方向 5 个位置处的速度曲线都能反映出第 3、4 个速度上升平台, 40 ~ 47 ns 的速度振荡小于 15 m/s。面成像 VISAR 过中心的速度分布如图 7 所示, 图中局部速度隆起的波峰与波谷差值也约为 15 m/s, 可以估算出线面同时成像 VISAR 的速度分辨约为 15 m/s。速度测量不确定度则有待进一步分析验证。

## 5 结 论

建立了一套线面同时成像 VISAR 测速装置, 既可以实现靶面上一条线上所有点速度历史的测量, 又能够实现多个时刻靶面所有点速度分布的测量, 两者相结合, 丰富了数据信息量, 清晰给出了速度场随时间和空间的演化过程, 非常有利于物理过程的解读和分析, 并能够为理论和数值模拟研究提供有效的比对数据。因此, 线面同时成像 VISAR 测速技术将是爆轰、气炮、激光驱动、磁驱动和电炮等飞片产生技术及加载手段诊断的有力工具。

## 参 考 文 献

- 1 Zeren Li, Ruchao Ma, Guanghua Chen, *et al.*. Multipoint velocity interferometer system for any reflector [J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, 70(10): 3872–3876.
- 2 J F Kevin, A B Theresa. Shock Analysis Using the Multi Point Velocimeter (VISAR) [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2003. SAND2003–3759.
- 3 Hu Changming, Wang Xiang, Cai Lincang, *et al.*. Study on dynamic compression performance of K9 glass with prefabricated defects[C]. *AIP Conf Proc*, 2012, 1426: 1089–1092.

- 4 Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, *et al.*. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility[J]. *Rev Sci Instrum*, 2004, 75(11): 4976–4929.
- 5 T J Vogler, W M Trott, W D Reinhart, *et al.*. Using the line-VISAR to study multi-dimensional and mesoscale impact phenomena[J]. *Int J Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1844–1852.
- 6 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.
- 7 W M Trott, J N Castaneda, J O Hare, *et al.*. Dispersive Velocity Measurements in Heterogeneous Materials [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2000. Sand2000–3028.
- 8 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.
- 9 Liu Shouxian, Wen Weifeng, Yuan Shuyun, *et al.*. Full field velocity measurement of laser-driven flyer using framing-imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912007.
- 刘寿先, 温伟峰, 袁树云, 等. 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[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912007.
- 10 Takeda M, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J Opt Soc Am*, 1981, 72(1): 156–160.
- 11 D J Erskine, R F Smith, C A Bolme, *et al.*. Two-dimensional imaging velocity interferometer: data analysis techniques[J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83(4): 043116.
- 12 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.

栏目编辑:何卓铭