文章编号：1000-5773(2013)04-0511-06

横向 VISAR 及其在爆轰驱动楔形靶自由面横向速度测量中的应用*

陈光华，刘 俊，蒙建华，彭其先，袁树云，王德田，邓向阳

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：利用多点双灵敏度 VISAR（任意反射面速度干涉仪）和三探头装置，搭建了横向 VISAR 测量系统。在三探头装置中，一个探头发射并接收激光，另外两个探头从不同方向接收激光。根据三探头接收激光的多普勒频移，可推出测点的纵向和横向速度。开展了爆轰驱动楔形靶实验，利用平面波透镜和 T/Γ 炸药在 10°钢楔形靶中产生平面冲击波，采用横向 VISAR 测量系统，观测冲击波斜碰撞楔形靶自由面引起的自由面横向运动。测量得到的最大纵向速度约 1680 m/s，最大横向速度约 140 m/s。对横向速度测量不确定度进行了分析，不确定度约为 33 m/s。

关键词：横向 VISAR；横向速度；纵向速度；冲击波；楔形靶

中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

自从 Barker 和 Hollenbach[1] 建立首个任意反射面速度干涉仪（Velocity Interferometer System for Any Reflector，VISAR）以来，VISAR 已广泛应用于爆轰物理、冲击波物理以及其它动高压物理研究[2-3]。经过多年发展，VISAR 技术从单点测量发展到多点测量[4]，开发出线成像 VISAR 技术[5-6]，在空间和时间分辨能力上都取得了很大进步。此外，包括 Fabry-Perot 干涉测速仪[7-9]和光子多普勒速度仪（Photonic Doppler Velocimetry，PDV）[10]在内的其它测速技术的发展，进一步拓展了测量范围。但是到目前为止，上述测速技术基本上只能应用于纵向速度测量，即仅能测量观测方向上的速度分量，不能测量垂直于观测方向的速度分量（横向速度）。实际上，横向速度的测量对于材料力学性能研究、工程结构力学及流体力学研究等具有重要意义。1977 年，Kim 等人[11]提出一种 TDI 系统（横向位移干涉仪），即将光栅刻在样品表面，通过零级衍射光获得法向位移，利用一对 n 级衍射光之间的干涉测量横向位移，再对位移进行微分，进而得到速度。1996 年，Espinosa 等人[12]在 TDI 基础上提出了 VSDI 系统（可变灵敏度位移干涉仪）。但是 TDI 及 VSDI 方法需在样品表面刻蚀光栅，故表面不是任意反射面，不但操作不便、光栅易遭冲击破坏，而且只能测量垂直于光栅刻线方向的横向位移和速度。1979 年，Chhabildas 等人[13]提出了一种在石英冲击加载实验中用于测量自由面粒子横向速度的横向 VISAR 技术。该技术将粒子速度分解为法向和横向分量的线性组合，由两台 VISAR 从两个不同方向观测，得到一个线性方程组，进而解出横向分量和法向分量。2010 年，Alexander 等人[14]将横向 VISAR 应用于磁流体动力驱动的材料切变强度测量。横向 VISAR 技术的缺点是横向速度的测量精度较低，尤其当横向速度远小于纵向速度时，情况更为严重。为解决横向速度测量精度低的问题，本研究采用共腔式多点 VISAR 搭建横向 VISAR 系统，以减小不同 VISAR 之间的相对测量误差，同时采用小条纹常数和大角

* **收稿日期**：2012-05-21；**修回日期**：2012-06-18

作者简介：陈光华（1973－），男，硕士，副研究员，主要从事激光干涉测量技术研究. E-mail：chen_guanghua@sina.com

度入射的方法，对横向速度远小于纵向速度时的横向速度进行测量；此外，不同于 Chhabildas 等人[13]的两方向测量，本研究从 3 个不共面方向进行测量，以获得横向速度的两个正交分量。

2 测量原理

多普勒频移与质点运动速度、质点运动方向、激光入射方向和观察方向有关。多普勒频移与质点速度的关系可写为

$$\Delta\nu = \boldsymbol{u}\cdot(\boldsymbol{e}_r - \boldsymbol{e}_i)\nu_0/c \tag{1}$$

式中：$\Delta\nu$ 为多普勒频移，ν_0 为入射激光频率，$\boldsymbol{u}$ 为粒子速度矢量，$\boldsymbol{e}_r$ 为激光反射方向的单位矢量，$\boldsymbol{e}_i$ 为激光入射方向的单位矢量，c 为光速。为了求出 $\boldsymbol{u}$，需要 3 个方程，且系数矩阵行列式的值不为零，即 3 个 $\boldsymbol{e}_r-\boldsymbol{e}_i$ 矢量不共面。

采用如图 1 所示的探头布局：探头 1 由发射和接收两部分组成，用于发射激光并接收样品反射光，其光轴垂直于样品表面，即沿 z 轴方向；探头 2 和探头 3 不发射激光，只接收样品反射光，其光轴分别在 xz 和 yz 平面上，并且与探头 1 光轴的夹角相同，均为 α。

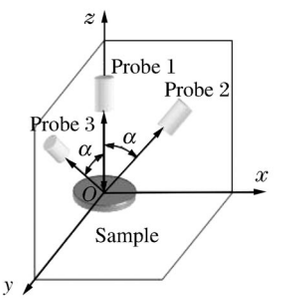


图 1 横向 VISAR 的探头布局

Fig. 1 Layout of probes in transverse VISAR

3 个探头接收的激光分别进入 3 个独立的 VISAR，利用 $v=F(t)k$，计算每个探头探测到的表观速度，其中 $F(t)$ 为干涉条纹数量，k 为条纹常数。令探头 1、探头 2 和探头 3 探测到的表观速度分别为 v_1、v_2 和 v_3，则测量速度矢量的计算公式为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{2v_2 - v_1(1+\cos\alpha)}{\sin\alpha} \\ v_y = \dfrac{2v_3 - v_1(1+\cos\alpha)}{\sin\alpha} \\ v_z = v_1 \end{cases} \tag{2}$$

式中：v_x 和 v_y 为横向速度的两个正交分量，v_z 为纵向速度。

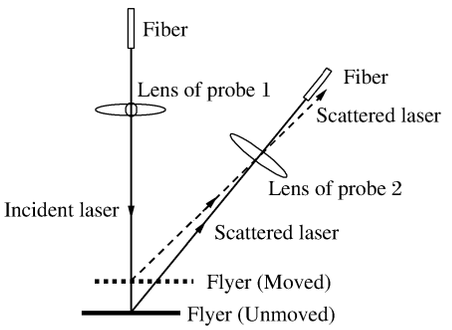


图 2 探头接收角对测量景深影响示意图

Fig. 2 Schematic diagram of how receiving angle of probe influences the depth of field

为提高横向速度的测量精度，α 越接近 90°越好。但是 α 越接近 90°，散射光越弱，测量景深越小，如图 2 所示，飞片纵向移动一段距离后探头 2 接收的散射激光偏离接收光纤，即超出测量景深范围。因此，为兼顾测量精度、探头接收激光能量和测量景深，α 取 30°～45°比较合适。此外，探头 2 和探头 3 的接收透镜对测点的张角不能过大，否则同一探头接收到的激光将同时含有较大差异的多普勒频移成分，增大测量误差。

3 实 验

采用∅100 mm×37°平面波炸药透镜驱动∅100 mm×45 mm T/Γ 主炸药，靶材料为 45 钢，靶的两平面间呈 10°夹角，如图 3 所示。平面爆轰波进入楔形靶后，与楔形靶自由面发生斜碰撞，使楔形靶自由面的质点速度方向偏离靶面初始法线方向。探头 1 与靶面垂直；探头 2 的光轴在靶面的投影沿楔形靶高度的梯度方向；探头 3 的光轴在靶面的投影沿楔形靶等高线方向，探头 3 在图 3 和图 4 的视图中与探头 1 重合，故未画出。探头 2 及探头 3 与探头 1 的夹角均为 30°。坐标系设置见图 3，z 轴与靶面垂直，

y 轴沿靶的高度梯度增大方向,x 轴沿靶的等高线方向(垂直纸面向外)。利用共腔式多点 VISAR 搭建横向 VISAR 系统,多点 VISAR 中的 3 个测点分别对应横向 VISAR 中 3 个测量方向,条纹常数为 160 和 402 m/s,其中小条纹常数干涉仪用于测量表观速度,大条纹常数干涉仪只起补条纹作用。

为增大测量景深,采用增大探头 1 在靶面上入射光斑尺寸的方法,使靶面移动较长距离后光斑仍能被 3 个探头接收。但是这却带来另一个问题:随着靶面的移动,3 个探头的实际测点将逐渐分离,因此需要对测点偏移进行修正,见图 4。测点 A、B、C 分别对应探头 1、探头 2 和探头 3 的实际测点,测点 C 在图 4 的视图中与测点 A 重合。由于测点 A 和测点 C 始终位于靶面的同一等高线上,具有同样的速度历程,因此不需要修正。测点 B 的速度历程落后于测点 A,以探头 1 的观测方向为基准,计算时间差 Δt,通过修正时间轴,将测点 B 的速度历程还原到测点 A,这样得到的 3 个表观速度即对应相同的速度历程。通过靶面的纵向位移量(当靶面近似垂直于探头 1 的观测方向时,对纵向速度积分即可得到),求出测点 B 和测点 A 之间的高度差,再由靶内的冲击波速度(通过自由面纵向速度估算),便可计算每个时刻测点 B 落后于测点 A 的时间差。

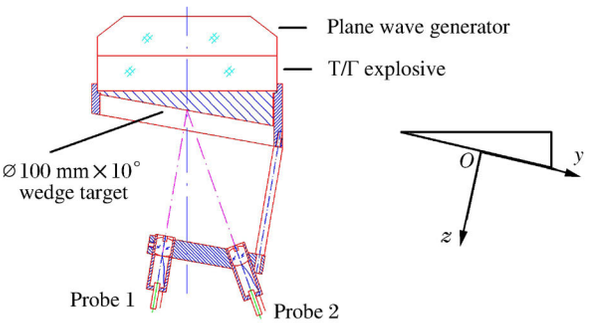


图 3　楔形靶横向速度测量实验装置

Fig. 3　Experimental configuration for measurement of transverse velocity of wedge target

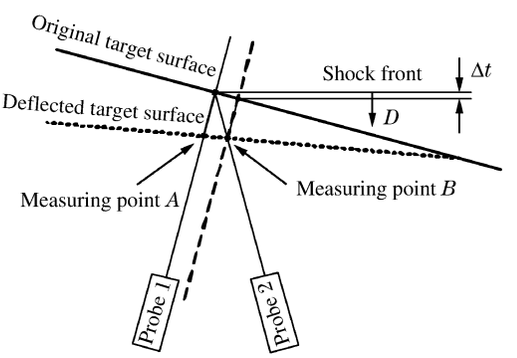
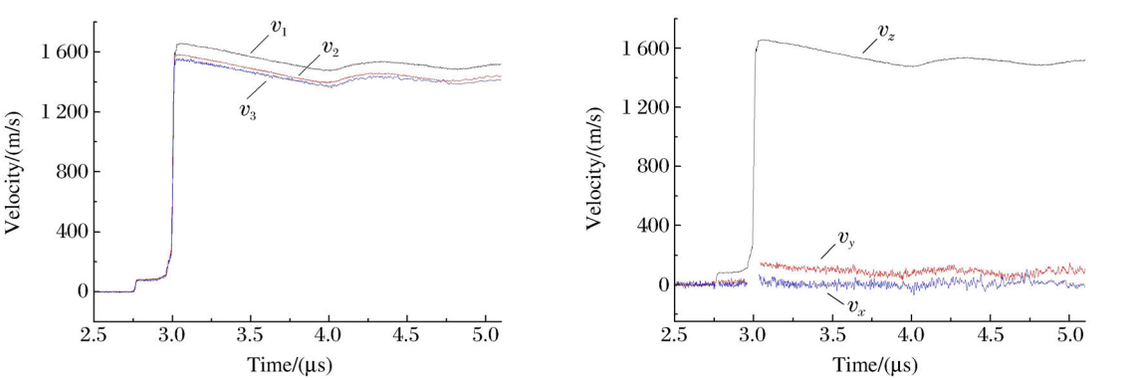


图 4　测点偏移修正示意图

Fig. 4　Correction of measuring point shift

图 5(a)给出了一发实验中 3 个探头探测到的修正后的表观速度,通过计算得到楔形靶自由面的横向和纵向速度分量,如图 5(b)所示。可以看出,最大纵向速度为 1 650 m/s,横向速度沿 y 轴分量的最大值约 140 m/s,横向速度沿 x 轴的分量基本为零。

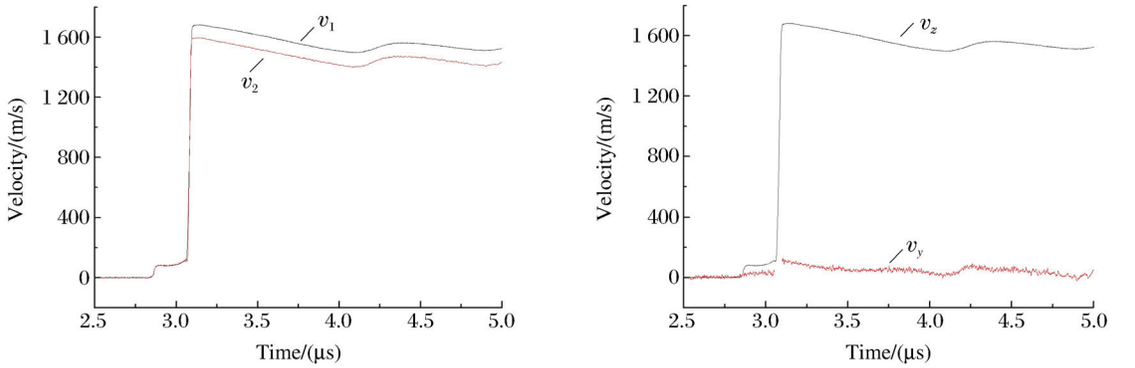


(a) Apparent velocity histories recorded by the VISAR　　(b) Resolved transverse and longitudinal velocity histories

图 5　楔形靶自由面横向和纵向速度测量结果(第 1 发)

Fig. 5　Transverse and longitudinal velocity histories of free surface of the wedge target (Shot 1)

图 6 为第 2 发重复实验的测量结果。可见,最大纵向速度为 1 680 m/s,横向速度沿 y 轴分量的最大值约 110 m/s。



(a) Apparent velocity histories recorded by the VISAR (b) Resolved transverse and longitudinal velocity histories

图 6 楔形靶自由面横向和纵向速度测量结果(第 2 发)

Fig. 6 Transverse and longitudinal velocity histories of free surface of the wedge target (Shot 2)

图 7 显示了第 1 发实验中探头 2 获得的原始信号。从图 7 中可以看出,受测量景深的影响,信号在起跳后约 2.5 μs 的时间内归零,在此 2.5 μs 内靶自由面沿纵向移动 3.5 mm,沿横向移动约 0.2 mm。

需要指出的是,本研究中的横向速度不同于切向速度。横向速度是指在特定坐标平面(xy 平面,见图 1 和图 3)内的速度,而切向速度(v_t)的方向则取决于靶面的姿态变化,如图 8 所示。从图 5、图 6 可以看出:弹性前驱波引起的自由面纵向速度约 80 m/s,远小于声速,由此引起的楔形靶自由面偏转不超过0.3°;但是,当塑性波到达后,自由面纵向速度瞬间超过 1.6 km/s,导致楔形靶自由面发生明显偏转。通过计算可知,该偏转角约 3°,并随时间轻微波动;从测量结果可知,自由面速度矢量偏离原法线方向的角度在 0°~5°之间,并且偏转方向与自由面的偏转方向相同。因此,切向速度 v_t 小于横向速度 v_y,如图 8 所示。经计算,第 1 发实验中切向速度在−20~50 m/s 之间,第 2 发实验中切向速度在−60~30 m/s 之间,切向速度大小基本与切向速度测量误差相当,因此受测量精度限制,切向速度测量结果的可信度不高。

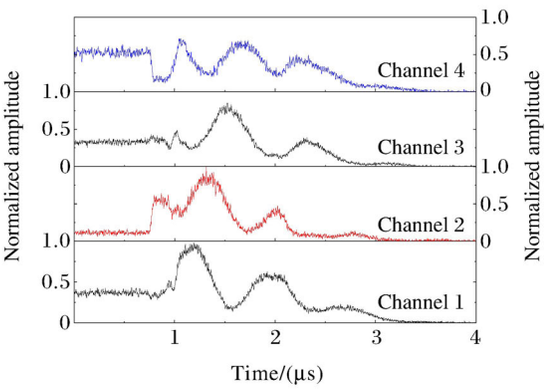


图 7 探头 2 获得的原始信号

Fig. 7 Original signals obtained by probe 2

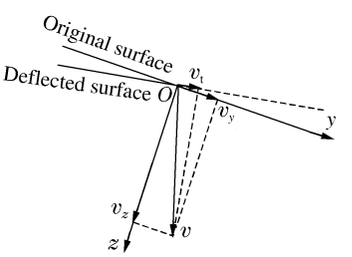


图 8 横向速度与切向速度的关系

Fig. 8 Relationship between transverse and tangential velocity

4 测量不确定度分析

由(2)式可知,引起测量误差的因素有表观速度 v_1、v_2、v_3 的测量误差以及探头接收角 α 的装配误差,其中表观速度测量误差由条纹常数误差和条纹计数误差引起。由于本实验采用共腔式多点 VISAR,3 个表观速度的条纹常数误差相同,因此大大减小了条纹常数误差对横向速度测量结果的影响,1%的条纹常数不确定度引起的横向速度测量不确定度小于 2 m/s;如果测量表观速度的 3 台 VISAR 的条纹常数误差不同,则 1%的条纹常数不确定度引起的最大横向速度测量不确定度接近 100 m/s。

由于 3 个表观速度是独立测量的,因此 3 个表观速度的条纹计数误差是相互独立的。假设 3 个条

纹计数误差相同，则条纹计数不确定度 u_F 对横向和纵向速度测量不确定度的影响可表示为

$$\begin{cases} u_{y,F} = u_{x,F} = \dfrac{\sqrt{4+(1+\cos\alpha)^2}}{\sin\alpha} k u_F \\ u_{z,F} = k u_F \end{cases} \tag{3}$$

式中：$u_{y,F}$、$u_{x,F}$分别表示条纹计数不确定度 u_F 引起的 y 方向和 x 方向横向速度分量的测量不确定度，$u_{z,F}$为条纹计数不确定度 u_F 引起的纵向速度测量不确定度。对于 $\alpha=30°$，由(3)式可得，$u_{y,F}=u_{x,F}=5.5ku_F=5.5u_{z,F}$。可见，当 α 不大时，横向速度测量不确定度远大于纵向速度测量不确定度。影响条纹计数不确定度的因素较多，包括信噪比、探测器非线性响应、热辐射本底杂散光、接收光强的急剧变化、数据处理过程等。为了估算条纹计数不确定度，本研究对采用该干涉仪获取的 7 组双灵敏度数据(两次实验的 5 组数据)进行统计分析，得出条纹计数标准不确定度为 1/40 个条纹，扩展不确定度为 1/20 个条纹。采用标准不确定度时，条纹计数引起的横向速度分量的测量不确定度约 22 m/s，该不确定度大小与表观速度值无关。

探头接收角 α 的装配误差引起的横向速度测量不确定度可表示为

$$\begin{cases} u_{x,\alpha} = \dfrac{v_1+(v_1-2v_2)\cos\alpha}{\sin^2\alpha} u_\alpha \\ u_{y,\alpha} = \dfrac{v_1+(v_1-2v_3)\cos\alpha}{\sin^2\alpha} u_\alpha \end{cases} \tag{4}$$

式中：$u_{y,\alpha}$和$u_{x,\alpha}$分别表示探头接收角α 的不确定度u_α 引起的y 方向和x 方向横向速度分量的测量不确定度。安装探头导致的接收角 α 的不确定度在 1°左右，引起横向速度测量不确定度在 25 m/s 左右，该不确定度大小与表观速度值有关。

考虑到探头透镜具有一定的口径，透镜不同部位的接收角不同，最终的测量结果需对整个口径进行积分，因此应考虑探头口径对测点张角引入的横向速度测量误差。本实验中，探头的口径张角为 6°，依据实验结果进行数值模拟计算。当探头接收的是均匀漫反射光时，得到横向速度测量误差约 −3 m/s，该误差较固定，可看作对结果的一种修正。但是，若反射光在探头接收口径上的光强分布不均匀，相当于探头的接收角发生了变化，由此产生的测量误差较大。将靶面打磨成均匀粗糙表面，能产生均匀漫反射光，可避免探头接收口径上光强的非均匀分布。

综上所述，对横向速度测量不确定度起决定性作用的因素是探头接收角不确定度和条纹计数不确定度。对于本实验结果，总的横向速度测量不确定度为 $u_y \approx u_x \approx 33$ m/s。对于切向速度，由于靶面偏转角的计算会引入额外误差，因此切向速度测量不确定度比横向速度测量不确定度更大。

5　结　论

采用共腔式多点 VISAR 和三探头装置，搭建了横向 VISAR 系统，成功实现了爆轰驱动楔形靶的自由面横向速度测量。由于采用共腔式干涉腔结构，大大减小了由条纹常数误差引起的横向速度测量误差。即便如此，横向速度的测量精度仍然不高，特别是在横向速度远小于纵向速度的情况下。为进一步提高横向速度测量精度，需采用更小的条纹常数，并提高探头接收角的安装精度。

References：

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

[2] Chen G H, Li Z R, Liu Y K, et al. Flyer velocity measurement using double-sensitivity VISAR [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(1): 70-74. (in Chinese)
陈光华，李泽仁，刘元坤，等. 用双灵敏度 VISAR 测量铜飞片自由面速度 [J]. 高压物理学报，2001，15(1)：70-74.

[3] Wang D T, Peng Q X, Liu J, et al. Application of laser velocity interferometry in interior ballistic projectile velocity

measurement [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(2): 133-137. (in Chinese)
王德田, 彭其先, 刘 俊, 等. 激光干涉测速技术在内弹道弹丸速度测量中的应用研究 [J]. 高压物理学报, 2011, 25(2): 133-137.

[4] Li Z R, Ma R C, Chen G H, et al. Multipoint velocity interferometer system for any reflector [J]. Rev Sci Instrum, 1999, 70(10): 3872-3876.

[5] Hemsing W F, Mathews A R, Warnes R H, et al. VISAR: Line-imaging interferometer [C]//American Physical Society (APS) Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Williamsburg, USA, 1991.

[6] Liu S X, Li Z R, Peng Q X, et al. Line-imaging velocity interferometer for laser driven flyer diagnostics [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2281-2284. (in Chinese)
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.

[7] Durand M, Laharrague P, Lalle P, et al. Interferometric laser technique for accurate velocity measurement in shock wave physics [J]. Rev Sci Instrum, 1977, 48(3): 275-278.

[8] Chen G H, Liu S X, Li Z R, et al. Application analysis of angular dispersion Fabry-Perot velocity interferometry [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 585-591. (in Chinese)
陈光华, 刘寿先, 李泽仁, 等. 角色散 FP 干涉测速技术应用与分析 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 585-591.

[9] Chen G H, Li Z R, Liu J, et al. Angular dispersion-type Fabry-Perot interferometer with velocity spectral resolution [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(4): 402-408. (in Chinese)
陈光华, 李泽仁, 刘 俊, 等. 具有速度谱分辨能力的角色散 FP 干涉测量技术 [J]. 高压物理学报, 2012, 26(4): 402-408.

[10] Strand O T, Goosman D R, Martinez C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. Rev Sci Instrum, 2006, 77(8): 083108.

[11] Kim K S, Clifton R J, Kumar P. A combined normal- and transverse-displacement interferometer with an application to impact of y-cut quartz [J]. J Appl Phys, 1977, 48(10): 4132-4139.

[12] Espinosa H D, Mello M, Xu Y. A desensitized displacement interferometer applied to impact recovery experiments [J]. Appl Phys Lett, 1996, 69(21): 3161-3163.

[13] Chhabildas L C, Sutherland H J, Asay J R. A velocity interferometer technique to determine shear-wave particle velocity in shock-loaded solids [J]. J Appl Phys, 1979, 50(8): 5196-5201.

[14] Alexander C S, Asay J R, Haill T A. Magnetically applied pressure-shear: A new method for direct measurement of strength at high pressure [J]. J Appl Phys, 2010, 108(12): 126101.

A Transverse VISAR for Measuring Free Surface Transverse Velocity of Detonation-Driven Wedge Target

CHEN Guang-Hua, LIU Jun, MENG Jian-Hua, PENG Qi-Xian,
YUAN Shu-Yun, WANG De-Tian, DENG Xiang-Yang

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

Abstract: A transverse velocity interferometer system for any reflector (VISAR) has been developed by combination of a multipoint VISAR and a tri-probe device. One probe emits and receives laser, and the other two probes receive laser from different directions. The transverse and longitudinal velocities can be deduced from Doppler shift of laser received by the tri-probe. The transverse VISAR were applied to detonation driving wedge target experiments. Planar shock wave in a 10° wedge steel target was generated by plane-wave lens and T/Γ explosive. The free surface transverse velocities induced by oblique collision of shock wave were measured. The maximum measured longitudinal velocity is about 1 680 m/s, and the maximum measured transverse velocity is about 140 m/s. The uncertainty of the transverse velocity measurement was analyzed, and the uncertainty is estimated to be about 33 m/s in the experiments.

Key words: transverse VISAR; transverse velocity; longitudinal velocity; shock wave; wedge target