

自校准靶型在冲击波实验中的应用

王 峰 陈 铭 彭晓世 刘慎业 徐 涛 魏惠月

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 在使用任意反射面速度干涉仪(VISAR)测量运动表面速度的过程中,利用双灵敏度方法可以获得唯一的速度。由于双灵敏度方法对速度的判断需要人为干预,所以就会出现速度的非唯一性问题。在成像型 VISAR 中,由于散斑和条纹质量下降等问题,该现象更加严重。提出了一种可进行自校准判断的靶型,可以在获得冲击波速度的同时获得唯一冲击波速度,从而改进了双灵敏度方法。通过积分速度曲线的面积,获得运动表面所经历的距离。比较几组相近速度曲线的积分值与已知样品的厚度,可以获得准确的冲击波速度历史曲线图。同时该方法也是一种从实验上验证 VISAR 系统不确定度的方法,与理论上的评估结果相互吻合,证明了该方法的正确性。这种改进的双灵敏度测速方法和不确定度评估方法,可为未来的 VISAR 诊断精密化发展提供技术思路。

关键词 测量;靶设计;冲击波速度;条纹丢失;双灵敏度方法;不确定度

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1012004

Self-Check Target for Shock-Wave Experiment with Radiation Drive Source

Wang Feng Chen Ming Peng Xiaoshi Liu Shenye Xu Tao Wei Huiyue

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The shock-wave velocity can be obtained with two-sensitivity method on the measurement of shock-wave velocity with imaging velocity interferometric system for any reflector (VISAR). Since the decision difference for shock-wave velocity, the velocity curve may be not unique. This problem will be serious due to the effect of speckle and decrease of fringe pattern. The new method for target design is provided. After comparing the area of shock-wave velocity and the thickness of transparent window, the shock-wave velocity can be confirmed. And the uncertainty of VISAR system can be achieved which is agreement with the theoretical prediction. This method, which presents the shock wave velocity and uncertainty of VISAR, provides the new way for accurate diagnosis by VISAR system.

Key words measurement; target design; shock-wave velocity; fringe loss; two-sensitivity method; uncertainty

OCIS codes 120.7250; 120.4640; 120.5050

1 引 言

成像型任意反射面速度干涉仪(VISAR)是在冲击波物理领域测量强动载表面运动速度的非常重要的诊断设备。在进行惯性约束聚变(ICF)物理实验中,为了使压缩过程与等熵过程更为接近并降低熵增,要求对激光脉冲进行整形。脉冲整形需要获得冲击波速度、冲击波汇聚时间等参数来进行表征^[1,2]。在辐射驱动条件下,冲击波阵面由于压致

离化,会形成一个对可见光的反射面。这个反射面的速度与冲击波速度直接关联。可以通过测量反射面速度的方法获得冲击波阵面的速度信息。VISAR 作为脉冲整形时的主要测试设备,可以对冲击波发起的时间、汇聚时间和冲击波速度等参数进行测量^[3]。在解决了先前扫描光学高温计等被动式冲击波诊断设备在抗干扰、预热等问题上的一系列不足之后,成像型 VISAR 技术目前已在神光 III 原

收稿日期: 2012-04-19; **收到修改稿日期**: 2012-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(10805041)、等离子体重点实验室基金(9140C6801021001)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B0102020)资助课题。

作者简介: 王 峰(1975—),男,博士,副研究员,主要从事光学诊断技术研发方面的研究。

E-mail: xiaozei7566@163.com

型激光实验中应用于冲击波测量和诊断^[4,5]。

在冲击波物理的实际测试中,利用 VISAR 进行实验常会遇到整数级条纹丢失的问题^[6]。目前常用的解决方法为双灵敏度测试技术,即通过两种速度灵敏度的 VISAR 同时测试一点的速度历程。但根据文献^[7]中的分析,该方法也存在一定的不足之处。在诊断系统不确定度达到一定精度后,会存在多值问题。也就是说,从算法上会出现多个速度值的选择问题。通常利用理论计算的速度值为双灵敏度方法获得的速度提供边界条件。但是,在理论模型存在偏差的条件下,这种方法往往不能为实验结果提供准确的参照。尤其是在待测材料的参数比较复杂而不能事先进行理论预估的条件下,仅仅利用双灵敏度的方法并不能完全从实验上获得唯一准确的冲击波速度值,也就不能利用阻抗匹配法等方法开展状态方程的相关实验。

本文提出了一种具有自校准能力的靶型设计思路,并在实验中获得验证。在靶型设计中,将透明材料的厚度控制在一定范围内,利用获得的冲击波速度曲线进行积分,然后比较积分面积与已知材料厚度之间的差别。通过比较多个可能速度等级的积分值与厚度值可以比较容易地获得正确的速度曲线,同时可以验证测速系统的不确定度。这样,可以完全通过实验的方式唯一确定冲击波速度的数据值。从而为获取未知材料状态方程参数提供了高精度的靶型设计技术。比较理论分析系统不确定度与实验数据的结果后,发现实验不确定度与理论分析相一致,从而验证了该方法的可行性与准确性。该方法为双灵敏度方法的进一步应用提供了一种新的思路。

2 双灵敏度原理

双灵敏度方法同时测速是指实验中同时用两个条纹常数档测量同一物体的运动速度。被测物体的速度 $v(t)$ 与 VISAR 信号的条纹数 $F(t)$ 有如下关系:

$$v(t) = kF(t), \quad (1)$$

当用条纹常数分别为 k_1 和 k_2 的两个档同时测量 $v(t)$ 时,则有

$$v(t) = k_1 F_1(t), \quad (2)$$

$$v(t) = k_2 F_2(t), \quad (3)$$

假设测量中两档丢失的信号条纹数分别为 N_1 、 N_2 , 实际测得的速度为 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$, 则有

$$v(t) = k_1 N_1 + u_1(t), \quad (4)$$

$$v(t) = k_2 N_2 + u_2(t). \quad (5)$$

由于记录仪器的补偿作用, N_1 、 N_2 只能是整数,因此联立(1)~(5)式,可得 N_1 、 N_2 的最小整数解,即为丢失的条纹数。

利用(1)~(5)式求得的是一系列的 N_1 、 N_2 组, N_1 、 N_2 均为非负整数。为唯一确定 N_1 和 N_2 , 再利用实验边界条件粗略判断待测速度范围,然后将满足(4)、(5)式的各 N_1 、 N_2 组代入,求得速度。若所得速度值在由边界条件估算的速度范围内,这一组 N_1 、 N_2 即为所求。

从理论上讲,如果数据处理程序的精度够高,信号信噪比够好,而且有边界条件的情况下,那么由几个公式联立可以获得唯一的一组 N_1 、 N_2 值。但是,由于条纹质量的变化、数据处理程序的精度偏差等因素,有可能会在一定的精度范围内出现多个 N_1 、 N_2 值满足公式要求的情况。尤其是对复杂材料或未知材料进行诊断时,这种多值情况出现的几率更高。

$$v(t) = k_1 N_1 + u_1(t) + \delta_1, \quad (6)$$

$$v(t) = k_2 N_2 + u_2(t) + \delta_2, \quad (7)$$

式中 δ_1 和 δ_2 分别表示由两个条纹图处理获得速度值时带入的不确定数据值。正是这些不确定的数据造成了双灵敏度方法存在多个选择的问题。在一定的实验精度范围内,可以获得很多组 N_1 、 N_2 值。仅用这种方法不能唯一确定速度。其原因在于,判断 N_1 、 N_2 值时使用目视判断的方法,而且,由于图像质量等问题,不可能使两组值完全重合,从而带来速度的不能唯一确定问题。这个问题在复杂材料实验中表现得尤为突出。在 ICF 实验中,对状态方程未知的复杂材料实验中,由于没有理论计算结果作支撑,所以更加需要实验中唯一确定最终的速度。提出特殊靶型设计技术,利用实验的方法就可以唯一确定速度值,从而解决了特殊材料实验中面临的问题。这种靶型的核心技术就是将透明窗口的厚度控制在很薄的范围内,利用条纹相机获得冲击波在透明材料中加载、传输直至卸载的全过程数据。在事先精确获得窗口材料厚度的前提下,将双灵敏度方法获得的不同速度曲线进行积分,获得曲线的面积。从获得的不同积分值中挑选出最接近事先测量厚度值的速度曲线,从而获得唯一正确的速度曲线。换句话说,就是将双灵敏度方法用可测量的窗口材料厚度确定下来,达到了简单、可靠的目的。

3 实验设计与结果

为了验证这种靶型设计思路,进行了聚苯乙烯 $C_8H_8(CH)$ 材料的冲击波调速实验。在事先没有 CH

材料状态方程的条件下,可以获得唯一正确的高精度冲击波速度数据。采用的核心诊断设备是基于神光 III 原型建立的成像型 VISAR 设备。整个 VISAR 系统的装置示意图如图 1 所示。探针光发出的激光通过多模光纤进入实验系统,光纤输出的激光通过透镜进行扩束,进入成像系统后聚焦,再打到靶上,靶反射的光会重新被成像系统收集,并被分光进入两套光

路。经过干涉仪后,将靶的像与干涉条纹同时投影在条纹相机的狭缝上。在扫描状态下就可以获得运动表面的变化条纹图。实验中使用的激光器波长为 532 nm,脉宽为 10 ns,线宽小于 100 kHz,其速度分辨率优于 30 (m/s)/fringe,满足实验要求。全系统的空间分辨率优于 5 μm ,时间分辨率为 30 ps,完全满足该实验的需要。

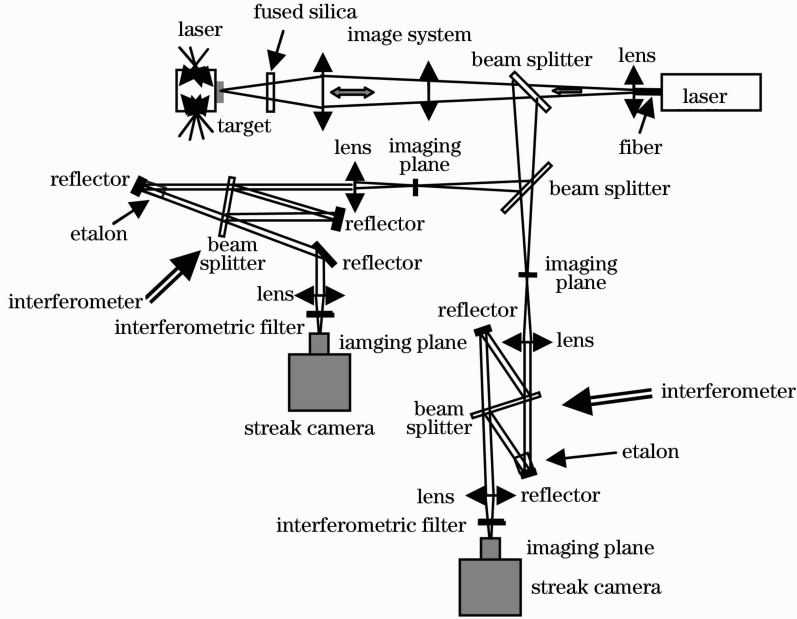


图 1 成像型 VISAR 系统排布示意图

Fig. 1 Schematic of imaging VISAR system

实验过程如图 2 所示。神光 III 原型装置 8 路激光以 400 J-1 ns-351 nm 的参数双端注入腔靶中。样品沿腔轴放置,成像型 VISAR 放置在靶室赤道北偏东 26°方位诊断口。根据已有文献[5]的数据,在平衡预热效应与信号测量之间关系的条件下,选择实验靶的参数如下:厚度为 40 μm 的 Al 为基底,厚度为 59.5 μm 的 CH 材料作为窗口。选择 40 μm 厚的 Al 材料作为基底最主要的目的是抑制 X 射线对窗口材料的预热效应干扰。如果小于这个厚度,可能在 CH 材料中出现致盲效应。在 CH 窗口和 Au 之间有一层水溶胶粘合,厚度约为 1 μm 。在 CH 窗口靠近靶的一侧镀有约为 600 nm 厚的 Al 膜,其目的是为了抑制胶层在强冲击和 X 射线照射下对冲击波信号诊断造成的影响^[8,9]。为减小胶层的影响,一般采用的方法是用尽量薄的胶层粘结样品或者使用真空吸附的方式。但是真空吸附的方式制作样品的稳定性比较差,不能满足实际打靶的需要,所以仍然选择胶层粘结的方式。

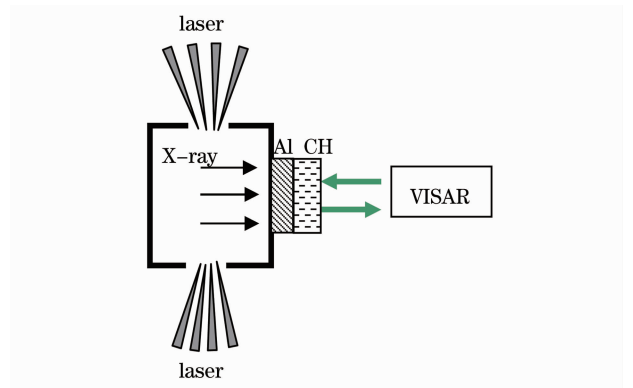


图 2 实验用靶示意图

Fig. 2 Schematic of target in the experiment

可以看到,在开始阶段,条纹连续并没有移动,说明冲击波还在 Al 和 Au 中传播。这时的干涉条纹是由铝膜反射探针光而引起的。在整个记录窗口范围内没有看到条纹亮度的明显下降,说明对 CH 材料靶设计是成功的,没有出现明显的致盲效应。背景条纹也没有明显的移动,说明穿透的 X 射线没有对窗口材料的静态折射率进行改变,因而可以按照先

图 3 为 CH 中冲击波传输的实验结果。从图 3

前的计算公式计算速度。在 2.75 ns 时刻,出现了明显的条纹跳变,表示冲击波传出 Al 并进入 CH 透明窗口中。

在 2.75~4.25 ns 期间,冲击波是在逐渐增大的,随后在 4.25 ns 时刻第二个冲击波追上第一个冲击波,出现了一次速度的跃变。而后,冲击波速度逐渐降低。冲击波将继续在 CH 材料中传播,直至最终到达自由面。所以冲击波表现为持续减速状态,条纹向下弯曲。在 5.00 ns 时刻,冲击波到达 CH 材料后界面发生卸载,条纹消失。本实验中,在探针激光脉冲结束以前,冲击波已经传出窗口材料的后界面。因此,条纹图完整记录了冲击波在窗口材料中传播的情况,这是与以往的很多实验所不同的地方,也是为了后面改进双灵敏度方法的采用所专门设计的。

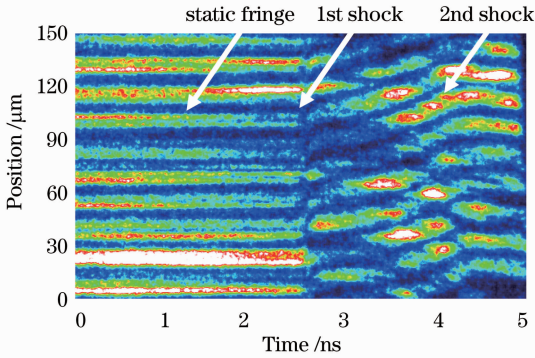


图 3 CH 材料中多冲击追赶的条纹图。第二次冲击的速度变化很小

Fig.3 Fringe pattern of two shock waves in CH material. The fringe change is very little for the second shock wave

对图 3 进行处理后,利用双灵敏度方法就可以获得最后的速度值了。图 4 是利用双灵敏度方法获得的一系列速度值。由于双灵敏度方法存在多值问题(可能来源于人为判断误差),所以需要另一种独立的判据来判断获得数据的准确性。从图 4 可以看出,仅仅使用双灵敏度方法就会出现两种可能的速度曲线。一组是速度 22~27 km/s 的速度曲线,一组是 31~37 km/s 的速度曲线。如果没有其他判据,则很难从两组曲线中取出真正的速度值来。这也是双灵敏度方法明显的缺点。通过分析不难发现,由于条纹图完整的记录了冲击波在 CH 窗口中传播的过程,如果将速度沿时间方向进行积分,其速度曲线下方的面积就是 CH 材料的厚度。而 CH 的厚度可以事先测出,与实验过程无关。所以可以用 CH 的厚度来唯一确定哪条速度曲线是准确的速度

曲线。由于事先精确测出了 CH 材料的厚度,所以可以分别积分两组曲线的面积来判断谁更加接近真实值。下面使用(8)式来表示这一思路:

$$X_v = \int_{t_0}^{t_1} N_c f(t) dt, \quad (8)$$

式中 X_v 为积分的面积; t_0 为积分起始时刻,也就是第一次冲击到达时刻; t_1 为积分的截止时刻,也就是第二次冲击在后界面卸载的时刻; N_c 为条纹常数; $f(t)$ 为与条纹数相关的速度曲线。

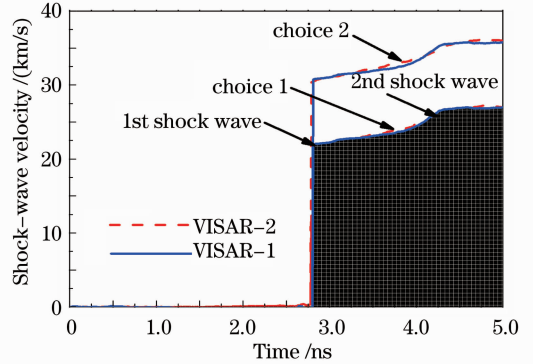


图 4 CH 材料中多冲击追赶的速度曲线图。阴影部分表示对该速度曲线进行积分的效果

Fig.4 Velocity curve of two shock waves in CH material. Shaded part shows the effect of integral for the velocity curve of choice 1

通过图 4 可以计算出,第一种选择中速度曲线下积分的面积为 $60.3 \mu\text{m}$,第二种选择中速度曲线下积分的面积为 $72.3 \mu\text{m}$ 。由于事先量出来 CH 材料的厚度是 $59.5 \mu\text{m}$,所以选择第一种速度曲线为双灵敏度法确定的速度曲线,相应的偏差为 1.34%,符合实验预期。

4 理论分析该方法测速的不确定度

根据文献[10],CH 窗口材料中的冲击波速度计算公式为

$$u(t) = \frac{\lambda}{2\tau} \frac{F(t)}{1 + \delta n_s}, \quad (9)$$

式中 λ 为探针光波长, τ 为参考光相对于信息光的延迟时间, F 为条纹移动数, n_s 为 CH 材料的折射率, δ 为采用熔石英标准的修正系数。

冲击波速度属于间接物理量,由(9)式可知速度标准不确定度传播公式为

$$\frac{\sigma_u}{u} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_F}{F}\right)^2}, \quad (10)$$

式中 σ_x 表示物理量 x 的标准不确定度, σ_x/x 为该物

量的相对标准不确定度。由(10)式可知,速度不确定度由激光波长不确定度、延迟时间不确定度和条纹计数不确定度三方面因素决定。在实验中,激光波长不确定度非常小,对结果可忽略不计。延迟时间相对不确定度的贡献也较小(对本实验中高灵敏度支路所采用的 10 mm 标准具,该值仅为 0.07%)。因此测速不确定度的来源主要是条纹计数不确定度。条纹计数不确定度主要由两方面因素决定,一是条纹移动不确定度,二是条纹的判读精度。

4.1 条纹移动不确定度

最终记录图得到的条纹移动数实际上是干涉仪两支路多普勒频移的差拍在延迟时间内积分的表现,因此进行条纹计数不确定度分析时需要考虑多普勒频移差别所造成的影响。光路系统采用 F 数为 4.5 的收光系统收集回波信号。在这种情况下,可认为多普勒频移 $d\nu = \frac{2u}{c}\nu_0$,而它的带宽为 $\Delta\nu = \frac{2u}{c}\nu_0(1 - \cos\theta)$ 。在透镜边缘 $\cos\theta = 0.994$,所以光锥引入的频移相对不确定度也就是相应的条纹移动不确定度为 $1 - \cos\theta = 0.6\%$ 。

4.2 条纹判读不确定度

成像型 VISAR 条纹判读不确定度的评定最大的难点在于找到一种方法或一个值来集中反映成像系统元件的加工精度、干涉仪两支路的光强比以及记录仪器噪声带来的不确定度。参考 OMEGA 装置上对不确定度评定的方法^[10],按照条纹图质量最差的位置作为评价标准,即选取条纹粗细变化最大的部分并用一个值来表示其判读不确定度。图 5 表示的是图 4 中第一组速度曲线从 2.75~5 ns 期间两台条纹相机获得数据的差别。可以看到,在第一次冲击到达时刻附近 2.75~3 ns,两台相机获得速度值差别比较大,在 3~4 ns 附近,冲击波基本上处于稳定上升阶段,两台相机获得速度差别比较小,基本上在 300 m/s 附近,也就是条纹常数的 1/15 左右 [5.2 (km/s)/fringe]。但是,在第二个冲击波追上第一个冲击波的时候,也就是 4.25 ns 附近,两台相机获得速度差别达到了 700 m/s。说明在两次冲击波融合期间发生了比较快速的相位跳变,光信号变化很大,散斑等破坏条纹质量的因素影响非常严重,所以在最终实验数据上反映了出来。在 4.5 ns 以后,冲击波传输又进入了稳定区,所以两台相机获得的速度差别明显小了。图 5 中大部分的条纹偏差

是 1/15 个条纹,而对应的移动条纹数为 5,则其条纹判读不确定度为 1/75 (1.33%)。综合以上各种因素考虑系统的不确定度,其总的不确定度合成结果为 1.46%。这个数据与实验结果比较相符,说明理论分析过程与实验数据比较可靠。

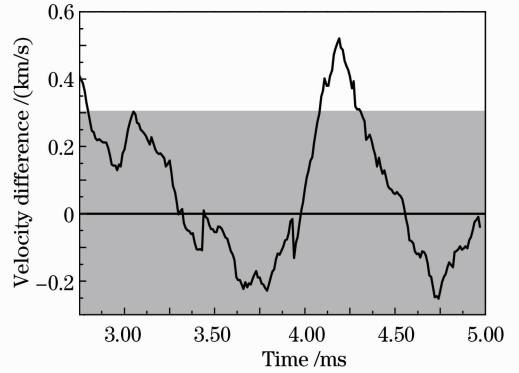


图 5 对图 4 中 Choice 1 中整个速度历程中两台相机获得数据差别的分析
Fig. 5 Difference of two velocity curves of shock wave in choice 1 from Fig. 4 by two cameras

5 结 论

针对双灵敏度方法使用中出现的多种选择的问题,提出了一种唯一确定 VISAR 测量冲击波速度方法。在靶设计时,将透明窗口材料的厚度控制在几十微米左右很薄的可测量范围内。利用冲击波在透明窗口中整个传输历程中所走过的面积与已知样品厚度比较,从而可以快速地确定唯一的速度值。该方法具有操作简单、可靠性高的优点,可以为 VISAR 技术的精密化提供很好的技术思路。同时,通过比较面积值与厚度,可以评估全系统的不确定度,从而可以从实验角度闭环的确定唯一的冲击波速度。对于某些仅有一台条纹相机的诊断系统,利用该方法也可以唯一确定冲击波速度,从而可以大大降低系统复杂性,具有很好的实用价值。

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 R. M. Malone, J. R. Celeste, P. M. Celliers *et al.*. Combining a thermal-imaging diagnostic with an existing imaging VISAR diagnostic at the National Ignition Facility [R]. 2005, UCRLCONF-213575
- 3 R. M. Malone, J. R. Bower, D. K. Bradley *et al.*. Imaging VISAR diagnostic for the National Ignition Facility (NIF) [C]. *SPIE*, 2005, **5580**: 505~516
- 4 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Liu Shenye *et al.*. Development of an imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3207~3211
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
- 5 Feng Wang, Xiaoshi Peng, Shenye Liu *et al.*. Shock wave velocity measurement in the Al_2O_3 under ultrahigh pressure [J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(6): 065202
- 6 Hu Shaolou. Laser Interferometry for Measuring Velocities[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 45~46
胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 45~46
- 7 Chen Guanghua, Li Zeren, Liu Yuankun *et al.*. Flyer velocity measurement using double-sensitivity VISAR [J]. *Chinese J. High Pressure Physics*, 2001, **15**(1): 70~74
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
- 8 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *et al.*. Ionization effect in the transparent window for shock-wave diagnosis under in-direct drive[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312002
王 峰, 彭晓世, 刘慎业等. 辐射驱动条件下冲击波诊断用透明窗口离化现象研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0312002
- 9 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *et al.*. Shock wave velocity calculation under X-ray preheat effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1327~1331
王 峰, 彭晓世, 刘慎业等. 预热效应影响下冲击波速度推算方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1327~1331
- 10 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): 4916~4929

栏目编辑: 何卓铭