

成像型 VISAR 在快点火金锥壳靶预热实验中的应用

徐 涛 魏惠月 王 峰 彭晓世 单连强 刘慎业

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 报道了成像型任意反射面速度干涉仪(VISAR)在快点火金锥壳靶预热实验中的应用情况,对不同的金锥壳靶型在间接驱动条件下的预热情况进行了实验研究。结果表明,越厚的锥顶受 X 射线预热的影响越小。采用了 $5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 两种锥顶,其锥顶平面的预热速度最大分别为 $2.2\ \text{km/s}$ 和 $0.6\ \text{km/s}$,而其产生预热的时刻基本上与主激光峰值时刻一致。实验中获得了丰富细节的条纹图像,揭示了金锥在预热过程中的物理现象,表明成像型 VISAR 可以为自由面低速测量及快点火金锥壳靶物理实验提供诊断基础。

关键词 测量;快点火;金锥壳靶;成像型 VISAR;预热

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0212003

Application of Imaging VISAR to Pre-Heating Experiment of Au Conical Target for Fast Ignition

Xu Tao Wei Huiyue Wang Feng Peng Xiaoshi Shan Lianqiang Liu Shenye

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

Abstract The application of the imaging VISAR to the pre-heating experiment of Au conical target for fast ignition is proposed. The pre-heating experiments using different kinds of Au cones which have the diverse thicknesses of $5\ \mu\text{m}$ and $10\ \mu\text{m}$ are studied. The experimental data show that the velocity of the two kinds of cone are $2.2\ \text{km/s}$ and $0.6\ \text{km/s}$. Details of the pre-heating physical progress are described, which indicate that the Au cone having thickness of $10\ \mu\text{m}$ is less affected by the pre-heating effect. The experimental results show that the imaging VISAR has the ability to measure the low velocity of free surface, and the whole facility is effective for further experiment.

Key words measurement; fast ignition; Au conical target; imaging velocity interferometer system for any reflector; pre-heating

OCIS codes 080.2740; 110.2960; 220.2740

1 引 言

快点火是一种实现惯性约束聚变点火的新方式^[1~4],它将靶丸压缩和点火过程分开进行,既能大大降低压缩所需要的驱动能量,也能降低内爆压缩的对称性要求。目前研究较多的是锥壳靶快点火,锥壳靶由氘代聚合物球壳与金锥组成^[5],通过金锥引导点火脉冲,使之直接到达靶丸高密度区域并形成超热电子^[6],不必预先使用激光在低密度区打通道和钻孔,减小了点火脉冲传输过程中的能量损耗。在间接驱动的靶丸预压缩过程中,X 射线会对金锥产生预热烧蚀效应,使锥的外表面发生预热烧蚀,导

致金锥材料的等离子体与燃料混合,混合效应严重时靶丸内部很难形成热斑。为了减少金锥材料等离子体与靶丸燃料的混合,要求在最大压缩时刻金锥的内表面要保持完整,尽量减小对金锥的预热。成像型任意反射面速度干涉仪(VISAR)作为测量常用透明材料中的冲击波速度的设备^[7],亦具备诊断低速自由面速度的能力。本文介绍了神光-III 原型激光装置上开展的间接驱动锥壳靶金锥的预热实验,报道了成像型 VISAR 在该实验中的应用。通过该装置诊断了金锥表面预热、膨胀及速度变化情况,分析了预热效应对不同厚度金锥的影响程度。

收稿日期: 2012-08-15; 收到修改稿日期: 2012-10-17

作者简介: 徐 涛(1985—),男,硕士,研究实习员,主要从事光学诊断设备研发方面的研究。E-mail: xutzo@163.com

2 成像型 VISAR 的测量原理

VISAR 是一种主动式测量装置^[8,9],其基本结构如图 1 所示。用于待测面速度测量时,它利用外置式的频率为 ν_0 的探针光入射到以速度 u_t 运动的待测面上,由于多普勒效应,从待测面反射回来的光信号频率变为 ν_t 。反射光与入射光频率之差称为多普勒频移 $\Delta\nu$,它携带了待测面的速度信息。多普勒频移 $\Delta\nu$ 为

$$\Delta\nu = \nu_t - \nu_0 = 2u_t \cdot \nu_0 / c = 2u_t / \lambda, \quad (1)$$

式中 λ 为探针光波长。由图 1 可见,由于干涉仪两支路光程有别,携带多普勒信息的反射光经由干涉

仪后将发生拍频相干,形成明暗相间的干涉环纹。在待测面速度发生变化时,环纹中心的强度将产生正弦变化。可以证明^[8],在 t 时刻产生的正弦波数(即条纹数) N_t 与待测面运动速度 u_t 之间的关系可表示为

$$u(t - \tau/2) = N_t \cdot F_v / (1 + \delta), \quad (2)$$

式中 $F_v = \lambda / (2\tau)$ 称为 VISAR 的条纹常数,它表示单位条纹变化所对应的速度改变量,也称为 VISAR 的速度灵敏度, τ 为标准具的延迟时间, δ 为标准具材料的色散修正因子。

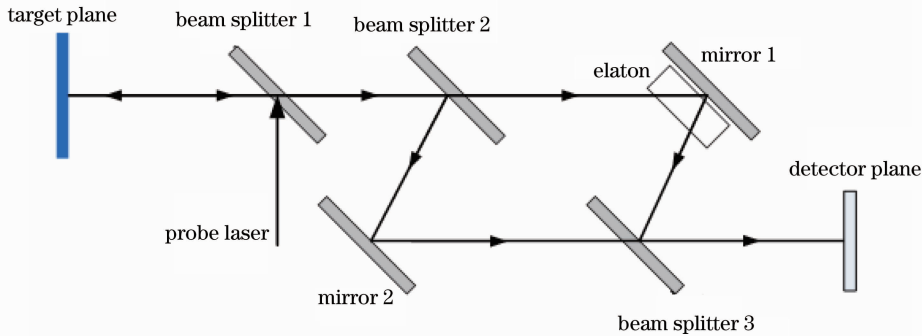


图 1 VISAR 装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VISAR

传统 VISAR 装置利用光电倍增管和示波器进行记录,只能对待测面上的一点或多点进行测量,如图 1 所示。成像型 VISAR 是将传统 VISAR 装置的收光部分改为成像部分^[10~12]、同时采用条纹相机进行瞬态记录的装置^[13]。成像型 VISAR 装置利用多次像传递过程实现了探针光的输入以及将靶面成像于条纹相机记录面上,实现了具有较高空间分辨能力的速度测量。这样既能记录靶面的速度信息,也能记录靶面在较大视场范围内的空间信息。通常情况下,被测面空间各个位置的速度不尽相同,成像型 VISAR 对于测量复杂被测面的速度具有明显的优势。

与传统 VISAR 将环纹中心引入光电倍增管进行记录不同,在利用成像型 VISAR 进行速度测量时,通过有意调节使干涉仪两支路间有微小夹角。此时干涉环会逐渐变成直线条纹簇,相当于环纹中心很远,曲率半径很大的一系列圆条纹。当待测面速度发生加速或减速变化时,由于光强的正弦变化,远场的这些直线条纹簇相对于它们的中心将会向外或向内移动。将移动的条纹数 N_t 代入(2)式即可求得待测面速度。

3 实验介绍及结果分析

3.1 实验介绍

间接驱动快点火预热研究实验中,驱动激光与金腔作用发出 X 射线,软 X 射线烧蚀靶丸从而对靶丸进行压缩。硬 X 射线部分主要来自金材料的 M 带发射,能谱范围为 1.8~3.6 keV,这些硬 X 射线会穿过靶丸壳层对锥壳靶中的金属导引锥进行预热或烧蚀,不仅会破坏锥顶,烧蚀的锥材料等离子体还会与燃料混合降低温度和核反应速率。国外 OMEGA 装置 2003 年的间接驱动锥壳靶压缩实验^[14],通过背光照相说明间接驱动下的 M 带预热引起的混合效应严重。而在直接驱动实验中,背光照相和自发光图像显示:在压缩区和锥顶中间有明显的凹陷区,这说明混合效应相对较弱。

间接驱动快点火锥壳靶的预热实验在神光-III 原型激光装置上进行。实验布局如图 2 所示。打靶激光共 8 束,波长为 351 nm,脉冲宽度为 1 ns,每束能量约 800 J。快点火锥壳靶的结构如图 3 所示,金腔为柱形腔,直径 $\Phi 1000 \mu\text{m}$,长度 $1700 \mu\text{m}$,激光注入孔径为 $\Phi 650 \mu\text{m}$,金腔的腔壁厚 $25 \mu\text{m}$,金腔侧壁

开有 $\Phi 450 \mu\text{m}$ 的诊断孔,以供分幅相机测量靶丸压缩过程的自发光图像。锥壳靶由碳氢材料(CH)球壳与平顶金锥组成,CH 球内径为 $380 \mu\text{m}$,球壁厚度为 $10 \mu\text{m}$,金锥张角为 60° ,锥壁厚度为 $15 \mu\text{m}$,锥

顶距 CH 球中心为 $20 \mu\text{m}$,锥顶直径约为 $80 \mu\text{m}$,厚度有 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 两种,以区分和对比不同厚度下的预热程度。

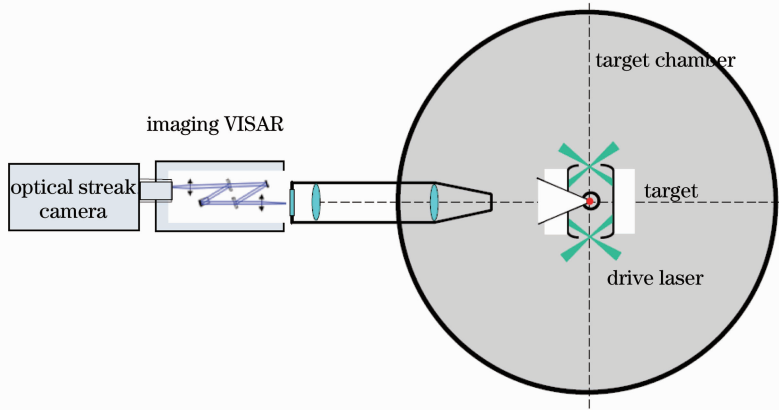


图 2 快点火锥壳靶预热实验基本布局图

Fig. 2 Experimental arrangement of Au conical target for fast ignition

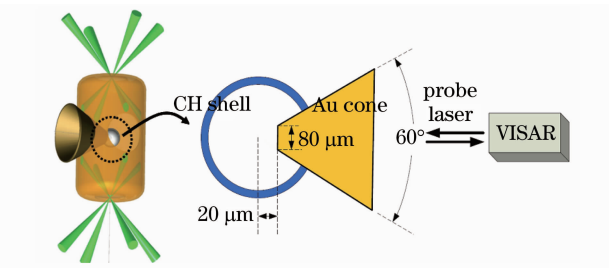


图 3 快点火锥壳靶结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Au conical target

利用成像型 VISAR 监测锥顶平面由预热膨胀引起的锥内表面速度变化,由于 VISAR 系统的测速能力主要取决于干涉仪标准具厚度^[15],厚度越厚时干涉仪条纹常数越小,能测量的速度越低。本次实验采

用的标准具由熔石英材料制成,折射率为 1.45847 ,厚度为 22 mm ,对应的条纹常数为 $2.35 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}/\text{fringe}$ (每变化一根条纹表征的速度为 2.35 km/s)。由于神光-III 原型激光装置的成像型 VISAR 系统的物方视场约为 1 mm ,而探针光光纤端面在靶点位置成像大小约为 1 mm ,故其将平顶金锥的内表面及在景深范围内的锥壁均成像并且传递到条纹相机的狭缝上。同时,VISAR 系统的干涉仪会记录由预热膨胀引起的锥内表面速度变化信息。

3.2 实验结果及分析

图 4 是实验中两种不同的锥壳靶获得的两组实验数据,图 4(a)中使用的锥顶厚度为 $5 \mu\text{m}$,图 4(b)中使用的锥顶厚度为 $10 \mu\text{m}$ 。图 5 是两组数据处理

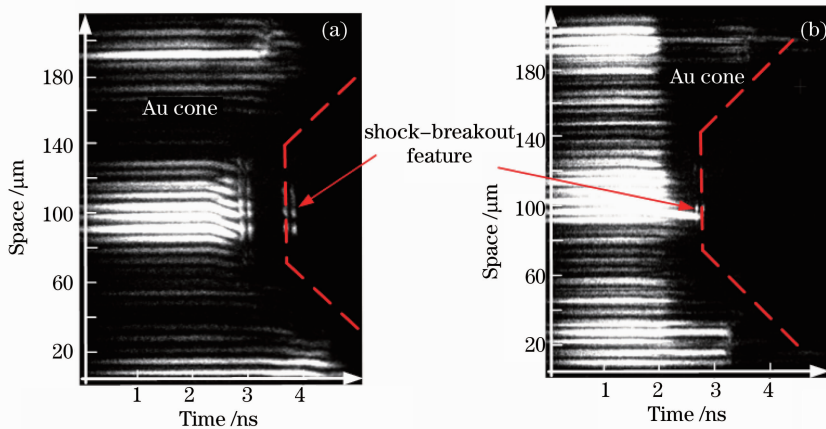


图 4 实验中两种不同厚度锥顶获得的预热条纹图像。(a) $5 \mu\text{m}$; (b) $10 \mu\text{m}$

Fig. 4 Images obtained in the experiment using two kinds of Au conical targets with different thicknesses. (a) $5 \mu\text{m}$; (b) $10 \mu\text{m}$

后得到的锥顶平面受到预热膨胀后的锥内表面速度变化曲线以及单束主激光的脉冲形状曲线。为对比速度大小,图5中处理的速度结果中,红色曲线(彩图请见网络电子版)为图4(b)中弯曲较为明显的条纹对应的空间位置速度变化曲线,蓝色曲线则为图4(a)中对应同一位置的速度变化曲线。

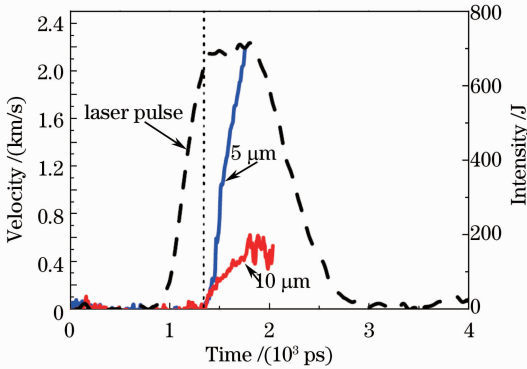


图5 两种不同锥顶空间同一位置处的预热速度变化曲线

Fig. 5 Pre-heating velocity curve at the same position of the Au conical targets with different thicknesses

图4包含着快点火锥壳靶预热物理过程中表现出的多种信息。不同厚度锥顶的预热膨胀现象不同,较薄锥顶的条纹弯曲较大,表明锥内表面速度较大、变化较快,而较厚锥顶的条纹变化缓慢且不明显,表明锥内表面的速度是很小的。从图5处理的速度信息来看,较薄锥顶的锥内表面最大速度达到了2.2 km/s,而相同空间位置上较厚锥顶的则仅为0.6 km/s。两幅条纹图像中,空间不同位置的条纹在不同的时刻消失,呈现出一个类似于金锥形状的图像,这是由于VISAR的视场较大,不仅能反映锥顶平面的速度信息,也能反映出部分锥壁的速度变化情况。图4(a)中可明显看出在锥顶区域的条纹弯曲到一定时刻后,出现了消失的情况;而图4(b)也出现了锥顶部分条纹的消失。这是由于预热会导致锥内表面温度持续升高,使锥表面金属电离化持续增长,导致探针光逐渐为等离子体吸收,降低了反射探针光的信号强度^[14]。在条纹消失一段时间后,两幅图像中均重新出现了两小段条纹信号,这是聚芯冲击波在锥内表面卸载后的冲击发光信号;而图4(b)与图4(a)的情况又有所不同,某些条纹一直持续到冲击波卸载时才消失,从另一个角度说明厚锥顶内受预热效应的影响较小、表面温度比较低、等离子体密度较小从而对探针光的吸收较少;图4(a)中探针光信号消失之前出现了类似于冲击发光信号的两段发光信号,这种物理过程目前难于理解。图5

的速度曲线图表明,两种靶型的锥顶内表面速度均在主激光最高峰值到达时发生跳跃式变化,这是由于两种不同厚度靶型的黑腔结构相同、锥顶与靶心的距离一致,X射线对于锥顶的预热影响在时间维度上是一致的。

4 结 论

介绍了成像型VISAR在间接驱动快点火锥壳靶预热实验中的应用,研究了两种不同厚度锥顶的预热情况并给出了相应的实验结果。实验中获得条纹图像中包含有丰富的物理信息:较厚的锥顶受X射线预热的影响较小,而不同厚度锥顶的预热发生时间较为一致,均处于主激光峰值时刻;由于预热对锥顶的影响会导致锥顶内表面温度升高,等离子体对探针光进行吸收会使探针光信号在一定时刻消失;在后期,聚芯冲击波在锥内表面的卸载会导致冲击发光,图像中出现了较短的发光信号。打靶实验结果表明,通过控制干涉仪标准具的长度,成像型VISAR可以用于低速自由面测量,而其成像功能可以使较大视场的靶面速度信息被条纹相机记录,从而观察到较为丰富的物理细节,为后续复杂的物理实验提供了诊断基础。此外,该实验中部分信号的出现难以理解,需通过更多实验和物理模拟来分析。

参 考 文 献

- 1 M. Tabak, J. M. Hammer, M. E. Glinsky *et al.*. Ignition and high gain with ultra powerful lasers [J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5): 1626~1634
- 2 Y. Sentoku, T. Z. Esirkepov, K. Mima *et al.*. Bursts of supper reflected laser light from inhomogeneous plasmas due to the generation of relativistic solitary waves [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(17): 3434
- 3 K. A. Tanaka, R. Kodama, K. Mima *et al.*. Basic and integrated studies for fast ignition [J]. *Phys. Plasmas*, 2003, **10**(5): 1925~1930
- 4 R. Kodama, K. Mima, K. A. Tanaka *et al.*. Fast ignition research at the institute of laser engineering, osaka university [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(5): 2268~2274
- 5 T. Norimatsu, K. Nagai, T. Takeda *et al.*. Update for the drag force on an injected pellet and target fabrication for inertial fusion [J]. *Fusion Sci. Technol.*, 2003, **43**(3): 339~345
- 6 Y. Sentoku, K. Mima, H. Ruhl *et al.*. Laser light and hot electron micro focusing using a conical target [J]. *Phys. Plasmas*, 2004, **11**(6): 3083~3087
- 7 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Liu Shenyue *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
- 8 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
- 9 Hu Shaolou. Laser Interferometry Technique for Measuring

- Velocity [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 32~33
- 胡绍楼. 激光干涉测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 32~33
- 10 P. M. Cellier, D. K. Bradley, G. W. Collins *et al.*. Line-imaging velocity meter for shock diagnostic at the OMEGA laser facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(11): 4916~4929
- 11 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *et al.*. Ionization effect in the transparent window for shock-wave diagnosis under indirect 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
- 12 Xu Tao, Wang Feng, Peng Xiaoshi *et al.*. Optical system design of imaging velocity interferometer system for any reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0722001
- 徐 涛, 王 峰, 彭晓世 等. 成像型任意反射面速度干涉仪系统的光学系统设计 [J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0722001
- 13 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Tang Daorun *et al.*. Development and application of a system for fusion reaction history measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112006
彭晓世, 王 峰, 唐道润 等. 聚变反应历程测量系统研制及应用 [J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0112006
- 14 W. Theobald, A. A. Solodov, C. Stoeckl *et al.*. Initial cone-in-shell fast-ignition experiments on OMEGA [J]. *Phys. Plasmas*, 2011, **18**(5): 056305
- 15 Shu Hua, Fu Sizu, Huang Xiuguang *et al.*. Key techniques of velocity interferometer for any reflector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 176~180
舒 桦, 傅思祖, 黄秀光 等. 任意反射面速度干涉仪研制中的关键技术[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 176~180

栏目编辑: 何卓铭