

文章编号: 0253-2239(2010)05-1327-05

# 预热效应影响下冲击波速度推算方法

王 峰<sup>1</sup> 彭晓世<sup>1</sup> 刘慎业<sup>1</sup> 李永升<sup>2</sup> 蒋小华<sup>1</sup> 丁永坤<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

(<sup>2</sup> 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要** 介绍了超高压条件下应用于透明材料中冲击波速度直接测量的成像型速度干涉仪技术。利用成像型速度干涉仪技术研究了间接驱动实验中产生的预热效应对冲击波速度计算的影响。对预热效应出现的时间点进行了分析,发现在辐射温度高于 160 eV 以后,不能从现有速度干涉仪系统获得的实验结果直接反演出冲击波速度。对实验数据进行了处理,获得了预热出现时间点的实验数据,发现预热效应出现在方波激光脉冲平台期到达时刻,在激光最强处达到最大,而且在激光脉冲平台期结束后,预热效应可以逐渐恢复。实验发现,对辐射温度高于 160 eV 获得的实验结果,可以从条纹断点直接外推,得到冲击波减速数据。讨论了条纹外推方法处理间接驱动条件下方波打靶时,使用固体无机透明材料作为窗口获得的实验结果。

**关键词** 激光技术;冲击波;离化;条纹间断

**中图分类号** TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1327

## Shock Wave Velocity Calculation Under X-Ray Preheat Effect

Wang Feng<sup>1</sup> Peng Xiaoshi<sup>1</sup> Liu Shenye<sup>1</sup> Li Yongsheng<sup>2</sup> Jiang Xiaohua<sup>1</sup> Ding Yongkun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

(<sup>2</sup> Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

**Abstract** The technique of measuring the shock wave velocity directly in the transparent material under the ultra-high pressure is introduced. The preheat effect on shock wave velocity calculation in the indirect driven experiment is studied with imaging velocity interferometer system for any reflector (IVISAR). After analyzing the beginning time of preheat effect, it is found that the shock wave velocity cannot be deduced directly from the experimental data when the radiation temperature is higher than 160 eV with IVISAR. From the experimental data, the starting point of preheat effect is consistent with the laser pulse, and it is found that the preheat effect is the worst when the intensity of laser pulse is the highest. The preheat effect recovers after the intensity of laser pulse decreases. For the experimental data above 160 eV, the shock velocity curve can be calculated by extrapolating the background stripe to the jumping edge. This method is suitable for processing experimental data gotten from the indirectly driven square wave laser and the inorganic transparent window.

**Key words** laser technique; shock wave; ionization; stripe jump

## 1 引 言

在冲击波诊断领域,可测量任意反射面的速度干涉仪(VISAR)技术<sup>[1]</sup>,已经成为诊断冲击波作用下样品自由面速度剖面或粒子速度剖面的主要技术。该技术主要用于材料的高压状态方程研究和冲击波作用下材料物态响应特性的研究。针对超高压

条件下时空分辨冲击波诊断技术的需求,国外发展了新型 VISAR 技术,现已用于超高压状态方程研究等多个领域<sup>[2~12]</sup>。

在冲击压力高达 TPa 以上的强冲击波作用下,固体透明材料将会金属化,从而在冲击波阵面上产生反射面,反射探针光<sup>[1~3]</sup>。在冲击高压作用下,整

收稿日期: 2009-04-15; 收到修改稿日期: 2009-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(10805041)资助课题。

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

E-mail: xiaozei7566@sohu.com

个离化区的表面,也就是冲击波阵面会反射探针光,其基本原理是非涅耳定律。只是根据离化度的不同,穿透深度会有所不同。目前国际上使用 Drude 模型<sup>[2,3]</sup>来计算离化效应产生的反射率。在国外的文献中,直接驱动获得的实验结果都比较好,条纹连续,断点清晰,激光脉冲和冲击波信号的时间关系也很清楚。但是,在使用间接驱动的实验中,出现了有时得不到信号的现象。W. Theobald 等<sup>[1,9,10]</sup>对这一现象作了解释。

本文对间接驱动冲击波实验中出现的 X 光离化和冲击波传输现象的时间顺序进行实验研究,给出现有光学系统探测冲击波源的辐射温度上限。根据不同辐射温度下的实验结果,确定了有离化现象出现的成像型 VISAR 冲击波速度确定方法,并且通过对比理论和实验的数据确定了该方法的有效性。

## 2 光路系统介绍

实验装置如图 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扩束,进入成像系统聚焦后,打到靶上,靶反射的光重新被成像系统收集,并被分光进入两套光路。实验中使用的激光器波长 532 nm,脉宽为 10 ns,线宽小于 100 MHz。根据估算,其速度分辨率优于每帧 30 m/s,满足实验要求。

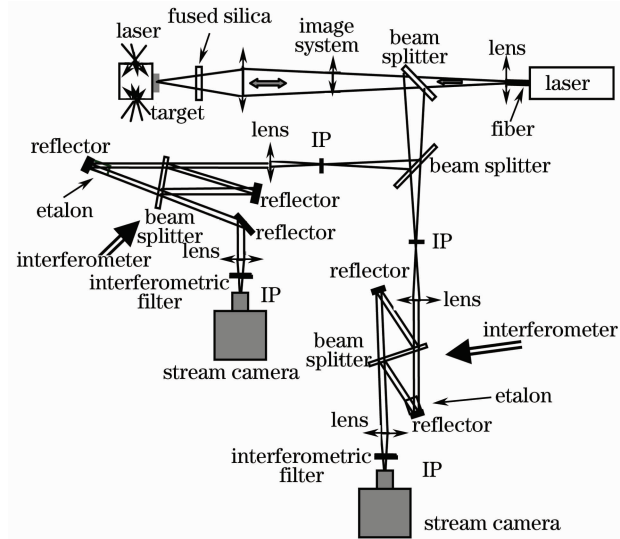


图 1 成像型 VISAR 系统排布示意图

Fig. 1 Schematic of IVISAR system configuration

在成像系统前面与靶之间用石英玻璃保护成像系统的透镜不被实验中产生的碎片损伤。为了减小光路的长度,将成像系统的像面设计在干涉仪之前,从而能够进行下次的像传递。靶点的像在进入干涉

仪之前进行扩束,变成平行光,以利于干涉仪系统的调试。每路干涉仪都是按照广角迈克耳孙干涉仪的原理工作的。在两路干涉仪中放入不同厚度的标准具,将组成双灵敏度系统。干涉仪将靶点的反射光分光后重新叠加,经过成像透镜在条纹相机的狭缝上再次成像,同时形成干涉条纹。为了使条纹相机狭缝上的像和靶点的物成一一对应关系,在条纹相机前采用通常的透镜,从而保证测到的条纹信息是靶点上对应点的信息,有利于数据的判读。在系统中使用干涉滤光片是为了减小杂散光的影响,所以干涉滤光片透射率的半峰全宽(FWHM)很重要。实验中选用半峰全宽只有 2 nm 的干涉滤光片,根据实验结果,其滤光效果很好。

一般用固体透明材料,如蓝宝石, LiF 或者 CH 材料做冲击波调速过程诊断的传输材料。打靶时激光照射进靶腔内,产生的冲击波在靶内部传播。在冲击波传入透明窗口材料以后,固体透明材料将会产生“金属化”效应,从而在冲击波阵面上产生反射面,反射探针光<sup>[1~3]</sup>。冲击波阵面的运动反映为条纹相机狭缝上条纹的移动。通过反演条纹相机上条纹的移动,将获得冲击波阵面的速度历史。干涉条纹图的使用要求是,强度分布范围应该在条纹相机的动态范围内,条纹间隔合适,条纹数目合适。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 实验结果

图 2 是实验用装置的示意图。实验中采用单端驱动,8 束并打的条件。单束激光条件为,能量 500 J,波长 351 nm,峰值脉宽 1 ns。实验中铝基底的厚度为 90  $\mu\text{m}$ ,透明窗口采用蓝宝石。相对于传统 VISAR 技术而言,这里使用的是平行平面窗口。主要原因有两个方面。1)窗口的尺寸很小,只有 1 mm $\times$ 1 mm $\times$ 0.5 mm。对这么小的片子来说,加工一个小的斜角和保证一个确定的角度是比较困难的;2)斜角的存在除了把前表面反射的探针光反射出记录系统,还会对后表面获得的信号光进行偏折,导致冲击波阵面的反射光有一部分偏出了记录系统。也就是说,斜角的存在对实验来说并没有特别的好处。尤其是对于提高信号探测底限来说,更没有特别的优势。针对以上分析,设计了平行平板的窗口,而且在迎光面镀增透膜。实验中发现,效果很好,即使在冲击波压力比较小的情况下也获得了比较好的信号。根据文献<sup>[2]</sup>,选用蓝宝石作窗口,可以获得比较高的反射率。

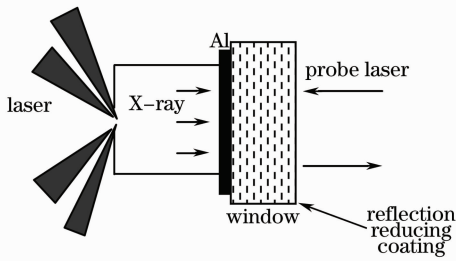


图 2 实验打靶示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shooting experiment

图 3 是最高辐射温度为 160 eV 的实验图。可以看到,在主激光到达后出现了一个黑区。另外,仔细分析图 3 可以看到,在黑区里面条纹出现了明显的减弱,但是仍然可以追溯其轨迹。条纹在黑区里面并没有移动,这就是 X 光离化引起的反射率减弱<sup>[9]</sup>。在激光脉冲平台期结束 400 ps 左右,出现一个很强的反射光信号,可分析出这是一个冲击波阵面形成离化面的反射信号<sup>[2,3,11]</sup>。虽然图 3 的条纹在黑区部分对比度不好,但是仍然可以直接处理得到条纹跳变点处的条纹跳变小数部分,然后利用理论计算和实验对比的方法补出丢失的整数倍条纹,进而得到冲击波在窗口材料里面的减速曲线。但对于辐射温度高于 160 eV 的源产生的条纹图怎么处理,就是面临的主要问题了。

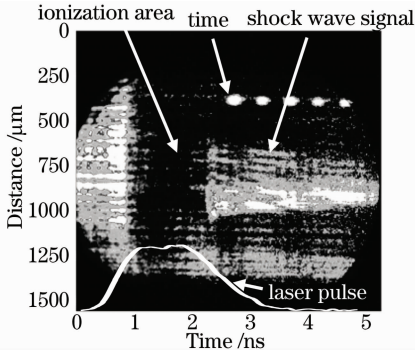


图 3 最大辐射温度 160 eV 条件下实验结果

Fig. 3 Experimental data under  $T_{max} = 160$  eV

图 4 是用最高辐射温度为 185 eV 的源获得的实验图(该条纹相机动态范围为 100)。在加大了实验图片的亮度以后,可以发现,在黑区的部分,条纹仍然是连续的。以时标光作为时间基准,对图 3 和图 4 两副图画上了主激光信号。在离化效应仍然存在时,图 4 中约 2.5 ns 的位置出现一个高反射率的反射面。通过与图 3 对比,发现是冲击波的反射面。图 4 中沿着时间方向的调制是由于激光器的非单纵模引起的。在冲击波反射区域的反射光强度约为背景强度的 30% 左右,这和文献报道的相符<sup>[2]</sup>。图 4

中黑区里面的条纹没有移动,在消除激光器多模调制的情况下就可以直接处理条纹图了。根据多纵模时间调制的周期,可以初步判断单纵模的数目比较少,但是具体数目难以判断。

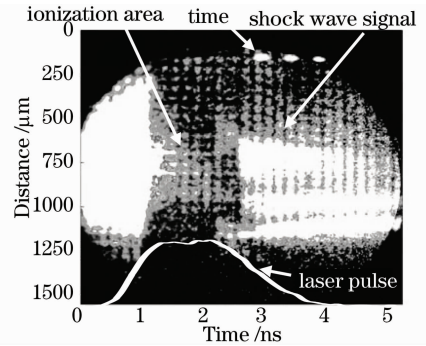


图 4 最大辐射温度 185 eV 条件下实验结果(71 发)

Fig. 4 Experimental data under  $T_{max} = 185$  eV (shot 71)

对单纵模的消除,主要有两种方法:一个是数据处理方法,利用滤波的方法在频域消除时间方向上周期性的调制,另一个是改善激光器,使其做到真正的单纵模输出。这里采用的是前一种方法。

图 5 是最高辐射温度 185 eV 条件下得到的条纹图,其靶参数和打靶条件与图 4(71 发)实验相同。可以看到,图 5 中间有一段黑区,这就是 X 光离化效应造成的。在黑区结束后,出现了新的反射面,这就是冲击波阵面在透明窗口中传输形成的。由于条纹相机动态范围的限制,即使增加图片的亮度,也没有看到黑区里面的连续条纹(该条纹相机动态范围仅有 30 左右)。但是,根据物理过程分析和综合图 3,图 4 的结果,可以得到:1)由于离化效应的影响,这段黑区里面的条纹没有显示出来;2)条纹仍然存在并且是连续的。

根据以上结论,分析得出最高辐射温度 185 eV 有黑区条纹图的处理方法:直接将背景条纹延伸

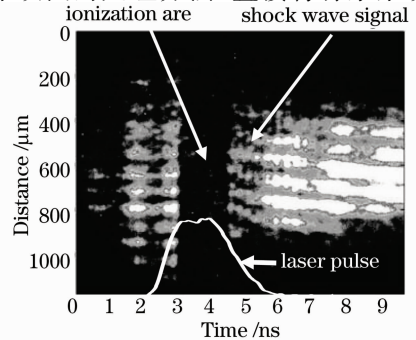


图 5 最大辐射温度 185 eV 条件下小动态范围相机记录的实验结果(72 发)

Fig. 5 Experimental data recorded by small dynamic range camera under  $T_{max} = 185$  eV (shoot 72)

间断点处,比较间断点处的相位跳变就可以得出间断点处的相位变化的小数部分。根据已有的数据处理程序,对图 5 进行处理,得到了冲击波在蓝宝石中的减速曲线。数据处理程序的主要步骤为<sup>[13]</sup>:1)取窗函数,滤波;2)傅里叶变换;3)频域移频并进行反傅里叶变换,得到相位分布图;4)相位解缠;5)去背景相位变化;6)带入条纹常数,得到速度历史;7)将波前的空间信息恢复,得到波前传播的历史信息。小数部分可以根据条纹图直接处理得到。冲击波起始时刻的条纹跳变量可以根据跳变点的相位与背景条纹的相位(设定为零)直接比较得到。对于整数部分,根据理论计算结果加上了 3 个丢失条纹数据来确定。最终得到了图 6 中的冲击波速度曲线。

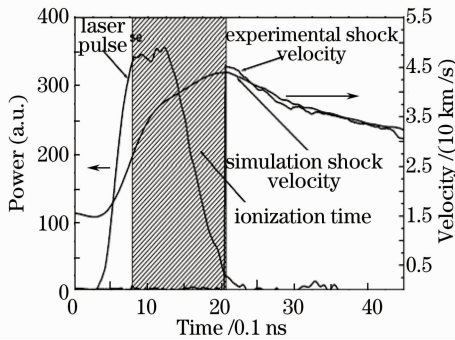


图 6 激光脉冲与冲击波速度历史对比图

Fig. 6 Relation of laser and the velocity curve of shock wave

图 6 是将激光波形、理论计算的冲击波速度曲线和实验处理的冲击波速度曲线放在一起进行对比的数据图。理论计算得到的速度曲线是将实验中的靶参数、激光波形以及辐射温度波形代入(Radiation Diffusion Multi-Group, RDMG)程序计算得到的。蓝宝石静态折射率的值  $n = 1.77$  (532 nm), 条纹常数每帧 13 km/s, 标准具色散引入的修正项为 0.0318<sup>[7]</sup>。图 6 中网格部分就是离化效应作用的时间区间。其起点是根据图 3 中黑区起点与主激光平台期起点的关联关系确定的。可以发现,冲击波速度最大值在主激光最高值出现后 700 ps 左右,黑区持续时间 1.3 ns 左右。理论计算与实验得到的冲击波速度符合比较好,只是在刚出基底材料的时候,冲击波速度要比理论计算稍快一些。初步分析,原因可能是由粘合蓝宝石和 Al 的胶层引起的。在冲击波传入胶层时,会产生冲击波加速。这个加速在数据处理后就体现在刚出基底材料的时候实验值比理论计算值稍高。后期的冲击波在蓝宝石里面整个减速的历史看得很清楚。

### 3.2 实验结果分析

#### 3.2.1 条纹间断解释

图 7 表示 X 光离化效应对成像型 VISAR 诊断影响的示意图<sup>[9]</sup>。首先是间接驱动时靶腔里面产生的 X 光对透明窗口材料离化,使得透明窗口材料中产生大量的“自由电子”;其次产生大量“自由电子”的透明窗口材料对探针光产生了强烈的吸收,造成反射光信号很弱;最后从表象上来看,这种离化效应就像窗口材料被 X 光漂白,严重时这种现象将会导致诊断失败,无法得到速度信息。

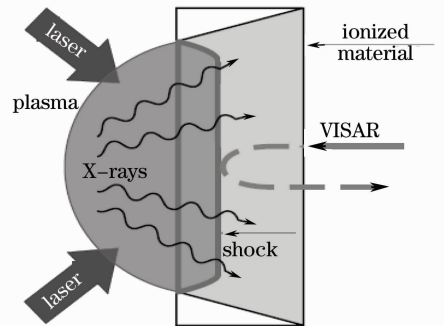


图 7 X 光离化对探针光的影响示意图

Fig. 7 Effect of X-ray ionization on the probe light

图 8 是腔里面的辐射谱与不同厚度铝片对比的数据图。根据图 8 可以知道,使用 60  $\mu\text{m}$  厚的 Al 做滤片,有 1.5 eV 和大于 3 keV 的 X 光大量透过基底材料,造成 X 光离化效应。即使选择 90  $\mu\text{m}$  厚的 Al 做滤片,其阻挡 X 光的效果也不是很明显。在实验中,大量的高能 X 光(主要能量大于 3 keV, 小于 5.5 keV<sup>[9]</sup>)将穿透基底材料,先于冲击波对透明窗口进行离化,产生“自由电子”,从而降低探针光的反射率,严重时会导致探测失败。

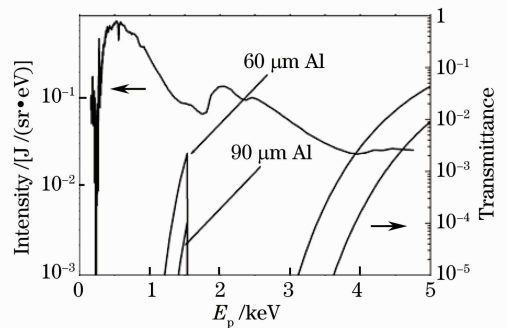


图 8 半腔靶的辐射能谱分布与不同厚度 Al 基底透射率比较图

Fig. 8 Comparison of radiation spectra from Hohraum and transmittance of Al substrate with different thickness

#### 3.2.2 条纹外推法的适用范围

该方法适用于间接驱动中方波激光打靶获得的

条纹图处理,对整形脉冲打靶获得的条纹图并不适用。原因是方波打靶中 X 光对透明窗口离化效应产生的时间和冲击波对透明窗口“金属化”产生的时间是有一个先后顺序的。先是 X 光离化,产生黑区,然后是冲击波“金属化”,形成冲击波波前的反射面。

然而,整形脉冲打靶时,X 光对透明窗口的离化与冲击波对透明窗口的金属化是同步进行的。如果有三个能量依次升高的整形脉冲注入腔靶中,当第二个台阶产生的冲击波信号正在透明材料中追赶第二个台阶产生的冲击波信号时,第三个台阶产生的 X 光就可能使得整个窗口离化,从而在条纹相机屏幕上产生黑区,造成条纹图产生中断,导致诊断失败。

对不同的窗口材料,该方法的适用性也不同。如果透明窗口材料是 CH,那么其 X 光离化效应的影响的时间就可能很长<sup>[9]</sup>,其“自由电子”复合的时间也很长,所以这种方法对 CH 材料作窗口的实验就不适用。但对于一般的固体透明材料,利用文献<sup>[9]</sup>中对 X 光产生的“自由电子”及其复合过程的解释,该方法是适用的。

### 3.2.3 速度计算公式的变化

在加窗测界面运动速度的时候, $\Delta\nu/\nu_0$ <sup>[14]</sup>是由于界面之前的冲击波对窗口进行预压缩,引起窗口材料折射率的变化,从而引入附加多普勒频移所引起的。在我们的实验中,直接测量的是冲击波阵面的速度,冲击波之前的介质折射率并没有变化。由于进入蓝宝石的光波波长发生了变化,所以,产生的多普勒频移也与进入的光波长有关。在蓝宝石里面光波长变成  $\lambda_0/n$ ,冲击波阵面的速度计算公式为

$$u\left(t - \frac{\tau}{2}\right) = \frac{\lambda_0}{2\tau(1+\delta)n} \cdot F(t),$$

式中  $F(t)$  为条纹移动数目,  $t$  为样品运动时间,  $\tau$  为干涉仪内两光路间的延迟时间,  $\lambda_0$  为激光波长,  $\delta$  为标准具色散引入的修正项。

## 4 结 论

通过多幅条纹图的对比,得到以下结论:1)最高辐射温度超过 160 eV 以后,不能从该系统获得的条纹图直接反演冲击波速度;2)X 光离化效应在方波脉冲平台期到达的前沿时刻开始,在平台期后沿时刻结束以后约 400 ps 减弱到不影响探测冲击波信号;3)即使离化效应没有完全结束,在冲击波到达后,仍然可以形成一个反射面。冲击波反射面的反

射率约为背景信号的 30%;4)对于出现黑区的条纹图处理,可以将冲击波到达时刻跳变点的条纹相位与背景条纹的相位直接对比,就能确定条纹跳变小数部分的处理方法。该方法适用于间接驱动中方波打靶的实验结果处理,其透明窗口材料应该是一般的无机固体透明材料。

## 参 考 文 献

- 1 T. R. Boehly, E. Vianello, J. E. Miller *et al.*. Shock-timing experiments using double-pulse laser irradiation [J]. *Phys. Plasma*, 2006, **13**: 056303-1~056303-6
- 2 D. G. Hicks, P. M. Celliers, G. W. Collins *et al.*. Shock-induced transformation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and LiF into semiconducting liquids[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3): 035502-1~035502-4
- 3 D. G. Hicks, T. R. Boehly, J. H. Eggert *et al.*. Dissociation of liquid silica at high pressures and temperatures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**: 025502-1~025502-4
- 4 L. M. Barker, R. E. Hollenbach. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**: 4669~4675
- 5 Han Jinghua, Feng Guoying, Yang Liming *et al.*. Study on cut-off laser pulse of laser-induced dielectric breakdown[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1547~1551  
韩敬华, 冯国英, 杨李茗等. 激光诱导介质击穿中的脉冲截断问题[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1547~1551
- 6 Dong Jiaqin, Fu Sizu, Xiong Jun *et al.*. Experimental research on pinhole-assisted point projection diagnostic scheme [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 604~608  
董佳钦, 傅思祖, 熊俊等. 针孔辅助点投影诊断方法实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 604~608
- 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): 4916~4929
- 8 Hu Shaolou. Laser Interferometry for Measuring Velocities[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001  
胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001
- 9 W. Theobald, J. E. Miller, T. R. Boehly *et al.*. X-ray preheating of window materials in direct-drive shock-wave timing experiments[J]. *Phys. Plasmas*, 2006, **13**: 122702-1~122702-11
- 10 R. E. Olson, D. K. Bradley, G. A. Rochau *et al.*. Time-resolved characterization of Hohlraum radiation temperature via interferometer measurement of quartz shock velocity[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**: 10E523-1~10E523-5
- 11 P. M. Celliers, G. W. Collins, L. B. Da Silva *et al.*. Shock-induced transformation of liquid deuterium into a metallic fluid [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(24): 5564~5567
- 12 Chen Xiao, Su Yucheng, Wang Yiquan *et al.*. Nonlinear propagation properties of ultrashort laser pulses in water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1131~1136  
陈笑, 苏玉成, 王义全等. 超短激光脉冲在水中的非线性传输特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1131~1136
- 13 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu shenye *et al.*. Data processing method of imaging velocity interferometer system for any reflector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(5): 709~713  
王峰, 彭晓世, 刘慎业等. 成像型任意反射面速度干涉仪数据处理方法[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(5): 709~713
- 14 L. M. Barker, R. E. Hollenbach. Shock-wave studies of PMMA, fused silica and sapphire [J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(10): 4208~4226