

基于速度干涉仪的冲击波精密调速实验技术研究*

王峰[†] 彭晓世 梅鲁生 刘慎业 蒋小华 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011年5月27日收到; 2011年10月19日收到修改稿)

冲击波精密调速技术是惯性约束聚变研究的关键技术之一. 针对冲击波精密调速诊断技术的要求, 以神光 III 原型上脉宽为 3 ns 的两台阶整形激光脉冲为源, 用石英晶体做窗口材料, 模拟了双冲击在石英晶体中传输和追赶的过程. 利用两发典型双冲击波调速的实验数据, 验证了神光 III 原型具有的精密调速能力. 实验结果表明, 在驱动源、靶和诊断系统参数一致的情况下, 两发实验获得的实验结果中两次冲击出现的时刻, 冲击波速度都很一致. 通过精细分析, 发现在两次冲击交会的时刻, 干涉条纹清晰度和完整性变化最大, 最终数据处理获得的冲击波速度偏差也最大. 同时, 在二次冲击的冲击波速度有较大增加的情况下, 并没有观察到冲击波阵面的反射率的明显增加. 本文的实验结果作为一个数据依据, 为全面开展冲击波调速实验提供了有效的方法.

关键词: 光学诊断, 冲击波, 调速, 散斑

PACS: 52.35.Tc, 52.50.Lp, 62.50.+p

1 引言

在惯性约束聚变研究中, 中心点火是确定的主要点火方式^[1-3]. 为了最大限度的降低冲击压缩时熵增, 使内爆过程接近等熵过程, 要求对打靶激光进行脉冲整形. 直接诊断冲击点火的物理过程是很困难的, 但是可以设计一维模拟实验分析内爆过程. 为了检验脉冲整形的效果, 需要相应的脉冲整形实验表征技术. 这可以通过测量透明介质中的冲击波速度, 冲击波会聚时间来实现. 由此带来了惯性约束聚变研究中的关键技术之一——冲击波调速技术. 国外关于冲击波调速方面的实验研究已经比较深入进行, 主要采用的诊断设备是成像型任意反射面速度干涉仪 (velocity interferometer system for any reflector, VISAR). 在该技术研究中已经采用过的窗口材料既包括硬材料, 如石英晶体、熔石英、蓝宝石、LiF、聚苯乙烯材料^[4-6], 也包括聚变燃料液氘^[7]. 同时, 在多冲击驱动源优化、精密定时、诊断系统参数优化和数据处理等方面都已积累了大量的实验经验和数据, 为最终点火打下了坚实的

基础. 但是, 我们在该领域的研究才刚刚起步. 在神光 III 原型装置具有脉冲整形能力并建立了基于神光 III 原型装置的成像型 VISAR 诊断系统后, 才能开展真正意义上的间接驱动下的冲击波调速技术研究.

根据我国惯性约束聚变的要求, 靶材料中需要进行烧蚀材料和液氘材料中冲击波调速的技术验证. 但是, 由于实际制靶能力和打靶资源的限制, 不能用烧蚀材料和液氘材料进行大量的实验. 尤其是前期诊断技术验证阶段, 需要首先完成诊断技术的精密化, 数据处理技术的精密定时以及全系统不确定度的分析等工作. 在诊断技术达到一定程度后, 才能进行烧蚀材料和液氘材料的一维分解实验和集成实验^[4-7].

在冲击波调速技术中, 使用相同的激光脉冲、靶、记录设备和数据处理方法完成调速基础实验, 并对其偏差进行分析是进行调速技术研究的出发点. 本文利用基本一致的激光脉冲和靶, 在同一台记录设备上获得了石英材料中两发重复的多冲击实验数据, 并对数据的一致性进行了分析. 通过精细分析, 发现在两次冲击交会的时刻, 干涉条纹清

* 国家自然科学基金 (批准号: 10805041)、等离子体物理重点实验室基金和中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2011B0102020) 资助的课题.

[†] E-mail: xiaozei7566@163.com

晰度和完整性变化最大, 最终数据处理获得的冲击波速度偏差也最大. 同时, 在二次冲击的冲击波速度有很大增加的情况下, 并没有观察到冲击波阵面的反射率有明显的增加, 甚至有反射率减小的现象. 本文对条纹完整性和反射率未增加这两种现象可能出现的原因进行了初步分析, 同时提出了下一步需要研究的问题. 本文提供的实验数据和方法, 为下一步冲击波调速技术的精密化研究打下了良好的基础.

2 实验设计与实验结果分析

2.1 靶和激光脉冲设计

成像型 VISAR 技术是惯性约束聚变研究中冲击波调速技术的关键诊断技术. 参考国外的设计, 在神光 III 原型装置上的整个成像型 VISAR 系统的实验装置已有文献详细报道 [8-13]. 图 1 是实验用靶的示意图. 由于是单端驱动, 而成像型 VISAR 是放置在赤道面上的, 所以需要在靶的下方放置一个反射镜, 以完成诊断. 石英晶体为 z 切的石英晶体 (即垂直于 z 轴切下的晶体), 其抗辐射能力很强, 可以作为样品和窗口材料完成辐射温度为 180 eV 以下的大部分验证性实验.

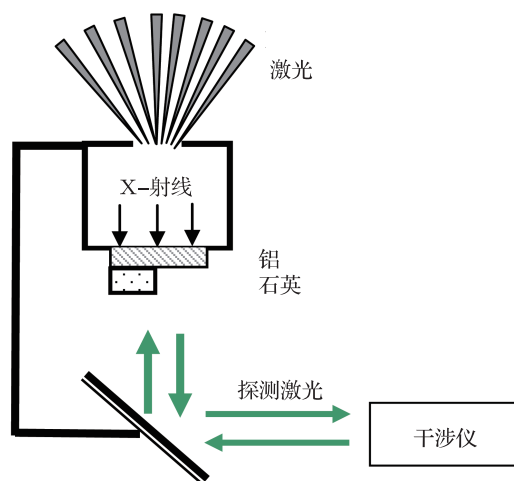


图 1 单端驱动打靶示意图

实验设计的激光波形如图 2 所示. 为了简化设计, 将其设计成两台阶. 两个台阶的时间比为 2 : 1, 能量比为 1 : 1, 总脉宽为 3 ns (半高全宽). 实验中采用单端驱动, 八束并打的条件. 单束激光条件为: 能量 400 J, 波长 351 nm, 激光脉宽 3 ns (半高全宽). 实验中 Al 基底的厚度为 50 μm , 透明窗口采用 z 切石

英晶体, 厚度为 180 μm . 为了减小黏合胶层的影响, 透明石英晶体窗口的背面镀了一层 1 μm 厚的 Al 层. 在冲击波达到透明窗口之前, 可以得到背景干净的干涉条纹图. 冲击波到达之后, 会在界面上产生很清晰的条纹跳变, 有利于数据的判读和分析.

图 3 是使用 Multi-1D 软件模拟的石英晶体中两次冲击波追赶的流线图. Al 基底为 50 μm 厚, 石英晶体为 100 μm 厚, 驱动源为图 2 产生的双台阶辐射源. 从图 3 看到, 在 2.6 ns, 冲击波传出 Al 基底材料, 在 3.3 ns 二次冲击赶上一次冲击, 产生一个冲击波加速, 而后冲击波减速. 对于诊断技术而言, 整个冲击波追赶过程重要的是看到一次冲击的加载过程和二次冲击的再次加载和减速过程.

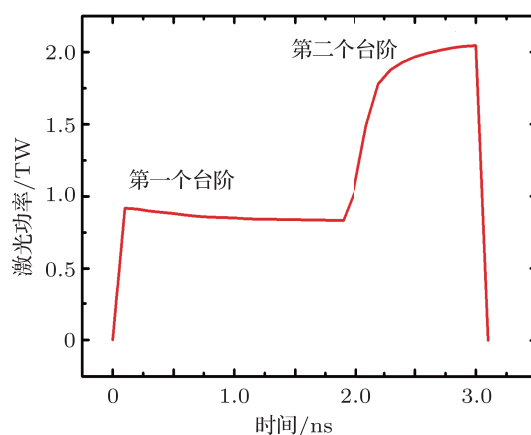


图 2 设计的驱动激光波形

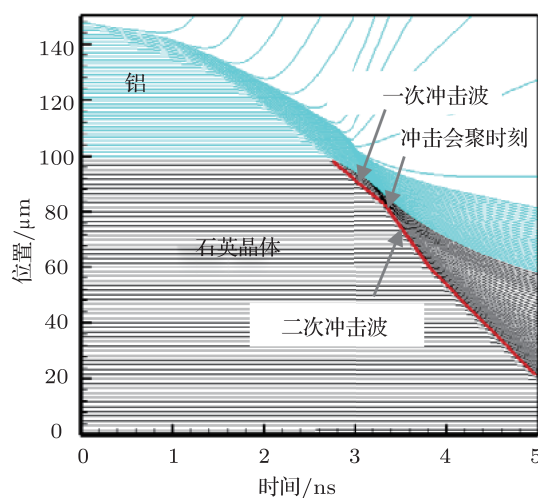


图 3 用 Multi-1D 模拟的石英晶体中双冲击追赶流线图

2.2 实验结果

在神光 III 原型装置上, 针对石英晶体的单冲击和多冲击的实验共进行了 12 发, 其中调速一致

性判断实验共进行了 4 发. 我们选取两发在完全相同的实验条件下获得的实验结果进行一致性分析. 完全相同的实验条件包括相同的靶、相同的驱动时间波形和能量比以及相同的诊断系统配置. 之所以这样安排, 主要目的是寻找一个精密化技术的起点. 因为冲击波调速技术的一个很重要的特点就是精密化. 就诊断技术而言, 精密化具体包括冲击波速度精确性、冲击波追赶时间点定时精确性. 但是, 因为激光波形的细微变化可能会对最终冲击波速度与追赶点定时产生很大的影响, 所以必须在初期实验时就将激光波形一致性和精密调控纳入冲击波调速技术的框架内.

图 4 是实际调速得到的激光波形. 可以看到激光波形实际形状与要求的形状有一定差距, 时间比没有严格按照要求达到 2 : 1, 能量比也未达到 1 : 1. 但是, 两发的波形比较一致, 可以用于一致性判断. 第 15 发第一个台阶强度上出现一个鼓包, 这对激光器来说也是需要下一步精密化改进的地方. 图 5 是针孔相机采集的两发实验的注入图像. 可以看到, 两发实验的注入情况基本一致, 没有出现明显的挂边问题. 对激光注入的总体评价是满足实验要求, 并且重复性较好.

图 6 是两发典型一致性实验的实验结果. 图 6 中两次冲击现象非常明显, 这与图 3 模拟结果相同. 但是两次冲击出现的时刻与图 3 模拟流线图中两次冲击出现的时刻不同, 可能是我们 Multi-1D 程序使用的状态方程参数不准和加载辐射源与实际有差别引起的. 图 6 中, 在 3 ns 时刻一次冲击波到

达 Al 基底后界面, 分别发生真空中的卸载和石英晶体中再次加载的现象. 图 6(a) 中右半边发生的是冲击波真空中卸载的现象. 原因是这部分基底材料后界面对应的是真空状态, 冲击波在到达 Al 后界面后卸载而产生条纹消失. 图 6(a) 左半边发生的是冲击波再次加载现象.

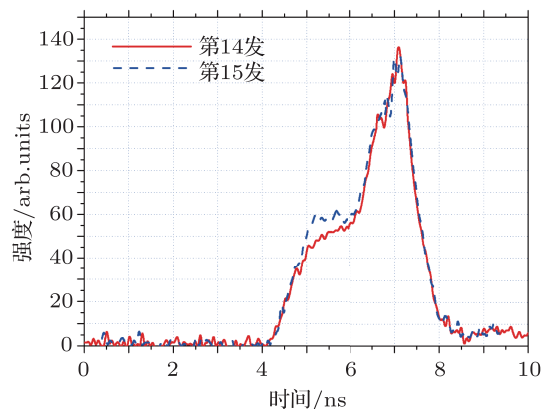


图 4 实验中使用的两阶段激光波形

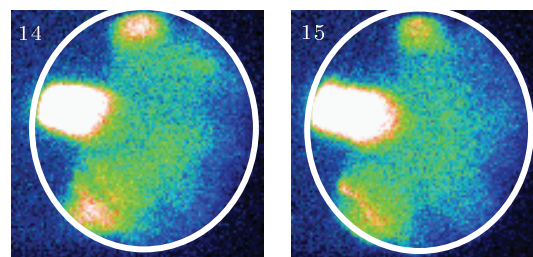


图 5 针孔相机观察到的两发实验注入孔照片

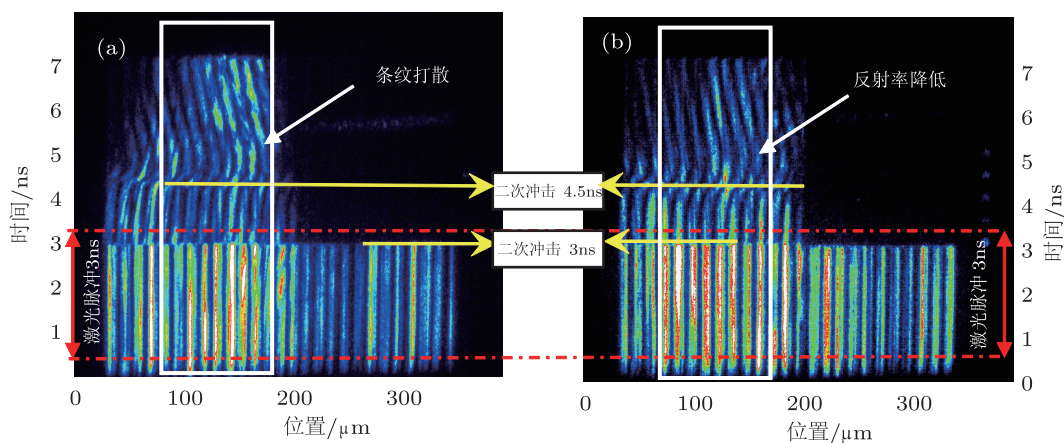


图 6 石英晶体中两冲击追赶的结果 (a) 第 14 发实验结果; (b) 第 15 发实验结果

图 6(a) 中, 在 0 到 3 ns 期间的直条纹表示的是 Al 基底上的背景干涉条纹. 虚线以内表示打靶激光脉冲的长度, 其脉宽为 3 ns. 在时间轴 3 ns 时刻条纹出现跳变, 说明一次冲击到达石英晶体, 产生了新的反射面. 条纹向右弯曲表明是加速过程, 向左弯曲表明是减速过程. 在 4.5 ns 时刻, 条纹再次出现跳变, 说明二次冲击追赶上了一次冲击, 形成了新的冲击波阵面. 之后, 冲击波速度出现一个约 500 ps 的增长期, 条纹向右弯曲. 由于这时打靶激光已经结束, 没有后续能量支持, 冲击波速度逐渐降低, 条纹向左边弯曲. 实验结果还表明, 在激光脉冲照射期间, 没有发生“致盲”效应^[14], 而且整形驱动产生的冲击波在激光脉冲结束之前就到达了石英晶体. 这就是一种典型的“边打边传”现象. 同时, 这种现象也是与状态方程实验不同的地方.

2.3 实验结果分析

图 7 是第 14 发和第 15 发数据的速度处理结果. 可以看到, 两发实验速度一致性不错. 第一个激光脉冲台阶产生的冲击波在石英晶体中为 27 km/s 到 30 km/s 的速度范围, 第二个激光脉冲产生的冲击波在石英晶体中追赶上第一个冲击波后的最高速度为 35 km/s 左右. 但是, 仅仅用图 7 的速度历史图并不能反映出两发实验获得的速度差别. 作为精密化实验的一部分, 分析速度差别量以及产生原因, 对下一步改进实验有很大的好处.

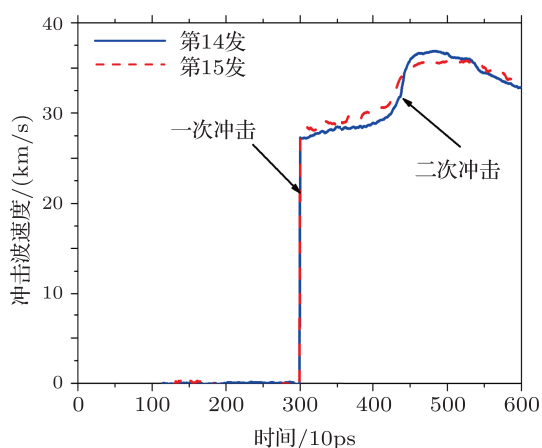


图 7 两发实验数据的双冲击速度处理结果

图 8 是两发速度数据差别比较图. 在第一个台阶时间段, 两发数据速度差别较大, 在跳变点附近差别达到 2 km/s 左右. 这有可能是由两发实验中激光器和靶的不一致性引起的. 第二个时间段速度差

别较小, 最大差别为 1.2 km/s. 对图 7 和图 8 进行仔细分析, 是精密调速技术的内涵所在. 如果扣除激光器和靶的影响, 认为其状态非常一致, 仅从诊断技术上讲, 还有一个需要认真改进的地方, 就是去除动态散斑干扰的问题. 仔细分析图 6(a) 中白框内的条纹, 发现条纹出现很多被打散的现象. 按照文献 [15] 的分析, 这是动态散斑的影响. 在某些发次的实验中, 已经达到了影响数据判读精度的程度. 动态散斑是与多普勒效应共生的一种现象. 这种现象的直接影响是在成像型 VISAR 记录的条纹中出现扭曲和打散的现象, 从而最终影响反演数据的精度. 对成像型 VISAR 技术来数, 与点 VISAR 技术有很大的区别. 在具有很高的空间分辨率的优势基础上, 成像型 VISAR 技术也带来了动态散斑与多普勒效应的联合问题. 动态散斑的定量化分析与消除工作将是下一步精密化改进的一个重要内容.

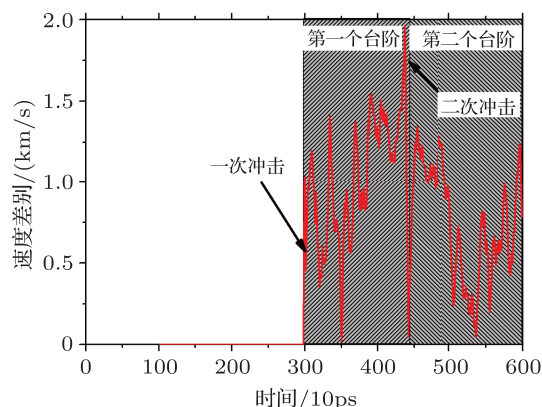


图 8 两发实验双冲击速度相减后取绝对值数据

为了定量化研究双冲击波阵面反射率变化的信息, 我们利用 Drude-自由电子气模型^[3] 计算了石英晶体中的冲击波阵面反射率、冲击波速度和冲击波温度的关系 (如图 9 所示). 石英晶体材料的雨贡纽曲线是利用 QEOS (quotidian equation of state) 方程计算得到的. 从图 9 可以看到, 在第一个台阶产生的冲击波速度范围内 (27 km/s—30 km/s), 冲击波阵面的反射率在 40% 左右变化. 第二个台阶产生的冲击波最高达到 35 km/s, 其冲击波阵面的反射率达到 50%. 通过与文献 [16] 的数据对比, 我们实验获得的均是冲击波阵面反射的信号. 图 10 是将图 6 中方框内信号取平均的结果, 目的是比较两发实验冲击波信号的反射率. 从图 10 看到, 第 14 发实验中两次冲击波信号的反射率数值与趋势都与

图9理论计算的基本一致.但是,第15发实验中第二次冲击波的反射信号比第一次有明显的降低(在图6(b)表现为条纹对比度变差),条纹质量也变差.这一现象与图9中理论计算得到的冲击波反射率增加的趋势并不一致.分析原因可能有两方面,一是第15发实验时激光器光强起伏将反射率上升这种变化掩盖了,导致最后测到的冲击波阵面反射率

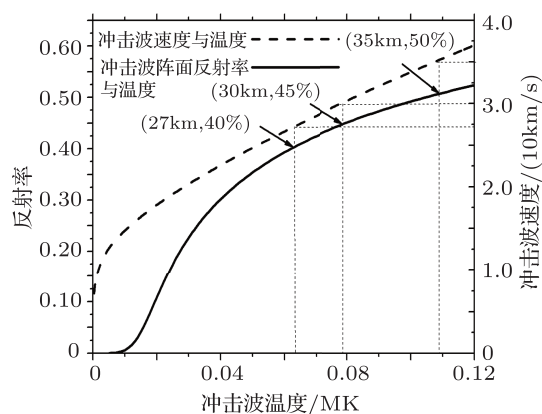


图9 石英晶体冲击波速度、波阵面反射率与冲击波温度的关系^[3]

3 结论

对冲击波精密调速技术而言,获得激光脉冲、靶、记录系统的一致性条件下的实验数据是考核调速技术的起点.本文以神光III原型上脉宽为3 ns的两阶段整形激光脉冲为源,完成了冲击波调速诊断技术的一致性实验,获得了一致性很好的实验数据.实验表明,在制靶水平和实验发次的限制下,利用硬材料进行冲击波调速诊断技术探索和考核是比较合适的.通过对实验结果的分析,我们并没有在二次冲击后观察到冲击波阵面反射率有明显的升高.这与Drude-自由电子气模型计算的结果并不完全一致.初步分析是由于激光器光束时间上不均匀和冲击波追赶后形成的新的反射面反射率不

变化不大;二是第15发实验中,二次冲击赶上一次冲击后形成新的冲击波阵面的漫散射特性较严重,并不利于形成很高的反射率.综合比较14发和15发的信号,我们发现二次冲击形成的反射面特性可能不应使用图9的数据简单外推获得.这方面的问题将是下一阶段理论研究的一个重点.

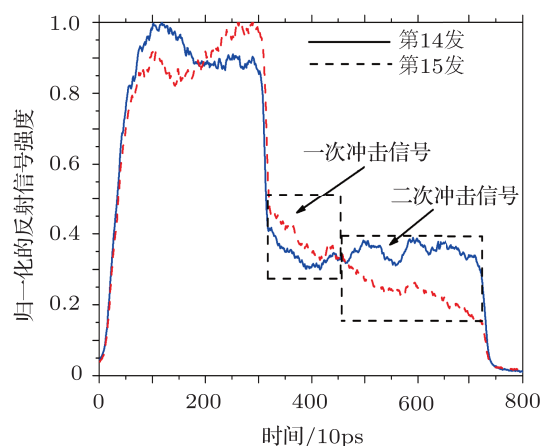


图10 两发实验冲击波反射率变化比较

高的引起的.因此,对多次冲击形成的反射面与单次冲击形成的反射面是否均为镜面反射的问题,将是我们下一步理论研究的一个问题.

对成像型VISAR技术来数,与点VISAR技术有很大的区别.在具有很高的空间分辨率的优势基础上,也带来了动态散斑与多普勒效应联合作用问题.由于散斑的空间和时间频率特性,在冲击波调速这种高速现象当中,我们只能在照明激光相干性、偏振特性和成像光路频域几个方面想办法,最终将散斑干扰压低到某一程度.关于这方面的研究,将是我们下一步精密化实验改进的重要内容之一.本文提供的实验思路和结果为下一阶段精密调速技术打下了良好的基础.

- [1] Munro D H, Celliers P M, Collins G W, Gold D M, Da Silva L B, Haan S W, Cauble R C, Hammel B A, Hsing W W 2006 *Phys. Plasmas* **8** 2245
- [2] Boehly T R, Vianello E, Miller J E, Craxton R S, Collins T J B, Goncharov V N, Igumenshchev I V, Meyerhofer D D, Hicks D G, Celliers P M, Collins G W 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056303
- [3] Hicks D G, Celliers P M, Collins G W, Eggert J H, Moon S J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 035502
- [4] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, Hicks D G, Boehly T R,

Armstrong W J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4916

- [5] Theobald W, Miller J E, Boehly T R, Vianello E, Meyerhofer D D, Sangste T C, Eggert J, Celliers P M 2006 *Phys. Plasmas* **13** 122702
- [6] Celliers P M, Collins G W, Da Silva L B, Gold D M, Cauble R, Wallace R J, Ford M E, Hammel B A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5564
- [7] Celliers P M, Collins G W, Hicks D G, Koenig M, Henry E, Benuzzi-Mounaix A, Batani D, Bradley D K, Da Silva L B, Wal-

- lace R J, Moon S J, Eggert J H, Lee K K M, Benedetti L R, Jeanloz R, Masclet I, Dague N, Marchet B, Rabec M, Gloahec Le, Reverdin C H, Pasley J, Willi O, Neely D, Danson C 2004 *Phys. Plasmas* **11** L41
- [8] Boehly T R, Munro D, Celliers P M, Olson R E, Hicks D G, Goncharov V N, Collins G W, Robey H F, Hu S X, Morozas J A, Sangster T C, Landen O L, Meyerhofer D D 2009 *Phys. Plasmas* **16** 056302
- [9] Wang F, Peng X S, Liu S Y, Li Y S, Jiang X H, Ding Y K 2010 *Acta Optica Sinica* **30** 1327 (in Chinese) [王峰, 彭晓世, 刘慎业, 李永升, 蒋小华, 丁永坤 2010 光学学报 **30** 1327]
- [10] He M Q, Dong Q L, Sheg Z M, Weng S M, Chen M, Wu H C, Zhang J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 363 (in Chinese) [何民卿, 董全力, 盛政明, 翁苏明, 陈民, 武慧春, 张杰 2009 物理学报 **58** 363]
- [11] Zhang Yi, Li Y T, Zheng Z Y, Liu F, Zhong J Y, Lin X X, Liu F, Lu X, Zhang J 2007 *Chin. Phys. B* **16** 3728
- [12] Lu J X, Wang Z, Liang J, Shan Y S, Zhou C Z, Xiang Y H, Lu Z, Tang X Z 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 799 (in Chinese) [路建新, 王钊, 梁晶, 单玉生, 周创志, 向益淮, 陆泽, 汤秀章 2006 强激光与粒子束 **18** 799]
- [13] Chen Y J, Yang Y Y, Zhuo Y M, Yang L M 2006 *Optical Instruments* **28** 71 (in Chinese) [陈阳杰, 杨甬英, 卓永模, 杨李铭 2006 光学仪器 **28** 71]
- [14] Olson R E, Bradley D K, Rochau G A, Collins G W, Leeper R J, Suter L J 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E523
- [15] Hicks D G, Boehly T R, Eggert J H, Miller J E, Celliers P M, Collins G W 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** (2) 025502
- [16] You B Shi 2007 *The Journal of Light Scattering* **19** 173 (in Chinese) [石右彬 2007 光散射学报 **19** 173]

Shock timing experiment based on imaging velocity interferometer system for any reflector*

Wang Feng[†] Peng Xiao-Shi Mei Lu-Sheng Liu Shen-Ye
Jiang Xiao-Hua Ding Yong-Kun

(Research Center of Laser Fusion, China Academic of Engineering and Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 27 May 2011; revised manuscript received 19 October 2011)

Abstract

The timing of multiple shock waves is crucial technique to the performance of inertial confinement fusion ignition targets. With the requirement for shock timing, the timing ability of Shen Guang-III prototype is analyzed by experimental data of two shots. The laser pulse in Shen Guang-III prototype is shaped in time scale, and the window material is z -cut quartz. The stream lines of two shock waves in quartz target are presented with Multi-1D program. Two steps of radiation drive two shock waves that coalesce in the quartz target, the resulting history, coalesce times, and transit times are observed in the stream lines. With the experiment results of two shots, the consistence of resulting history and coalesce times of two shock waves is provided under the same condition of laser pulse, target and diagnostic parameter. The differences in shock wave velocity, fringe contrast and quality occur at coalesce times of two shock waves. And the reflectivity of second shock wave does not increase compared with that of first shock wave. These experimental results and method provide the strong support for shock timing technique.

Keywords: optical diagnosis, shock wave, timing, speckle

PACS: 52.35.Tc, 52.50.Lp, 62.50.+p

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10805041), the Fund of the Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, and the Science and Technology Developing Foundation of China Academic of Engineering and Physics (Grant No. 2011B0102020).

[†] E-mail: xiaozei7566@163.com