

# 利用成像型速度干涉仪进行聚苯乙烯材料中 冲击波调速的实验研究\*

王峰<sup>†</sup> 彭晓世 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)

(2010年7月7日收到; 2011年3月29日收到修改稿)

利用一维实验, 模拟了惯性约束聚变中烧蚀层中冲击波传输和多次冲击追赶过程. 针对聚苯乙烯材料(CH)容易被X射线离化的问题, 通过较详细的数值模拟, 分析了用Au和Cu做阻挡层对冲击波信号的影响. 利用两种不同的辐射源, 研究了辐射源两个台阶强度变化对两次冲击信号的影响. 经过分析, 使用在Al基底上面加厚度为5 μm的Au膜以挡X射线的办法, 获得了单次冲击在CH材料中加载和减速的清晰条纹图. 利用在Al基底上加厚度为2 μm的Au膜和厚度为3 μm的Cu膜的方法, 获得了两次冲击在CH材料中加速、减速和二次加载的条纹图. 实验证明, 适当加大辐射源两个台阶强度的差别, 选用阻抗较低的Cu和阻抗较高的Au配合做阻挡材料会获得更好的双冲击结果. 这些实验结果为进一步开展辐射驱动条件下CH材料中的冲击波传输过程提供了很好的基础数据.

**关键词:** 光学诊断, 冲击波调速, 离化效应

**PACS:** 52.35.Tc, 52.50.Lp, 62.50.-p

## 1. 引言

辐射驱动条件下的冲击波是由腔靶内产生的X射线对靶材料烧蚀产生的, 其冲击波的产生方式与气炮加载和激光直接驱动加载产生冲击波的方式都有很大的区别. 气炮加载中, Al材料中会产生100 GPa以上的压力. 激光加载辐射驱动条件下, 能够产生比气炮加载更高的压力. 这为开展超高压条件下的冲击波物理研究开辟了新的领域. 强激光进入腔靶以后, 首先在腔靶内产生X射线, 之后X射线烧蚀材料产生冲击波. 因此在激光加载条件下, 其冲击波的波系结构与气炮加载下很不相同. 在获得超高压的同时, 也会引入X射线对材料的预热、离化等问题<sup>[1-9]</sup>.

在惯性约束聚变研究中, 冲击波调速技术是实现燃料层近等熵压缩的关键技术<sup>[1,2]</sup>. 为了实现冲击波时序的精确调控, 需要精密调控驱动激光波形. 在聚变靶的多层结构中, C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>(CH)材料是外围的烧蚀层, 由调控激光波形产生的多个冲击波大部

分时间是在CH材料中传输的. 这种材料中冲击波多次追赶技术, 对于冲击波调速研究而言是一项关键技术. 同时, 由于间接驱动有很强的致盲效应, 会在作为记录设备的条纹相机时间方向上出现一段黑区, 严重影响数据质量和数据的判读<sup>[4,7]</sup>. 如何在避免间接驱动中致盲效应的前提下实现CH材料中多冲击过程的诊断, 是冲击波调速技术在间接驱动中必须解决的问题.

本文介绍了在“神光-III”原型装置上开展的CH材料中冲击波调速实验. 利用数值模拟程序, 分析了在两种辐射源驱动下用Au和Cu作为X射线的阻挡层对两次冲击的冲击波传输速度和二次冲击出现时刻的影响. 提出了间接驱动条件下获得双冲击的驱动源和靶设计条件, 并利用实验验证了模拟分析的结果. 利用调控激光波形的方法获得了CH材料中双冲击追赶的实验结果. 这些数据为下一步开展辐射驱动条件下多冲击调速实验打下了良好的基础, 也说明“神光-III”原型装置已经具备了进行间接驱动条件下冲击波调速的能力.

\* 国家自然科学基金(批准号:10805041)和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(批准号:9140C6801021001)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: xiaozei7566@163.com



为了减小 X 射线对透明材料离化的影响,可以采用两个完全不同的方法. 第一个方法是增加窗口材料带隙宽度,以达到减小分子内自由电子数的目的<sup>[4]</sup>. 这种方法不是从根本上消除 X 射线的影响,但对某些材料(例如石英晶体)材料的实验有用. 第二个方法是在烧蚀层中增加阻挡层,从而将 X 射线挡到透明窗口之外,达到从根本上消除 X 射线离化效应影响的目的. 但是,这种方法也有一个明显的缺点. 由于加了一层阻挡层(通常是高 Z 材料),冲击波在从中 Z 材料(通常是 Al)传到这些高 Z 材料(通常是 Au)时会发生减速,甚至出现多波耦合的现象. 这些现象的存在给冲击波传输过程的分析带来很大的干扰,尤其是对冲击波调速一维近似模型提出了很大挑战. 但是,对于现阶段研究间接驱动中冲击波传输过程而言,这是一个比较好的方法.

图 3 所示为腔靶辐射能谱和两种设计方案的 X 射线透过率,横轴表示 X 射线光子能量. 图 3 中有两种滤片的设计方案:第一种方案是在厚度为 30  $\mu\text{m}$  的 Al 基底上溅射厚度为 2  $\mu\text{m}$  的 Au 膜和 3  $\mu\text{m}$  的 Cu 膜;第二种方案是在厚度为 30  $\mu\text{m}$  的 Al 基底上溅射 5  $\mu\text{m}$  的 Au 膜. 从图 3 可以看到,腔靶的大部分辐射集中于 1.5 keV 以下的能段,1.5 keV 以上的能段能量并不高. 而两种方案在 4 keV 以下的透过率都很低,所以两种方案不会在阻挡 X 射线的效果上产生根本性的差别. 图 4 所示为两发已有的辐射温度曲线. 从总体上分析,辐射温度波形可以分为 1.0—2.5 ns 的第一个台阶和 3.0 ns 处的第二个台阶两部分. 第 25 发中第一个台阶辐射温度在 150—160 eV 之间小幅变化,而第 26 发的第一个台阶在 130—155 eV 之间变化. 同时,第 25 发和第 26 发在第二个台阶的最高辐射温度都达到了 180 eV (不确定度为 3%). 在 180 eV 温度下,如果不进行 X 射线阻挡,CH 材料中会出现很强的致盲效应,导致诊断失败<sup>[4,7]</sup>. 相对于第 25 发,第 26 发降低了第一个台阶的能量,以使得第一个冲击波的速度更低,利于第二个冲击波追赶上第一个冲击波.

为了观察 Au 和 Cu 以及两种辐射源对冲击波传输过程的影响,按照实验设计和辐射源的条件,对三种条件分别进行了模拟. 第一种是在基底厚度为 30  $\mu\text{m}$  的 Al 加上厚度为 5  $\mu\text{m}$  的 Au 膜,辐射源数据选用第 25 发数据(图 5). 第二种是在基底厚度为 30  $\mu\text{m}$  的 Al 加上厚度为 5  $\mu\text{m}$  的 Au 膜,辐射源数据为第 26 发数据(图 6). 第三种是在基底厚度为

30  $\mu\text{m}$  的 Al 加上厚度为 5  $\mu\text{m}$  的 Cu 膜,辐射源数据为第 26 发数据(图 7). 但是,由于 Au 和 CH 材料状态方程的参数不是很准确,所以模拟结果中双冲击出现的时刻和速度值只能作为参考. 而且,由于程序本身的限制,只做了三种材料的模拟分析. 但这些并不影响我们对实验结果做初步分析.

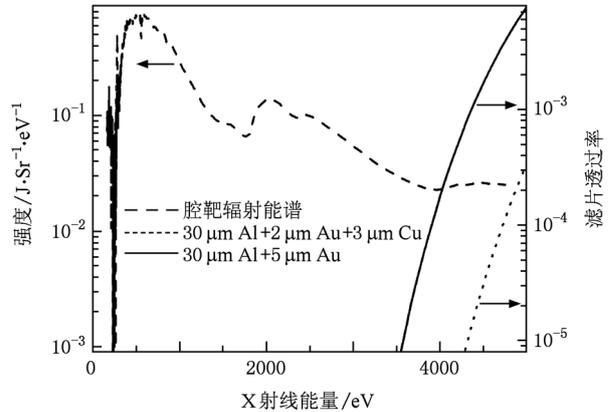


图 3 腔靶辐射能谱和两种设计方案的透过率

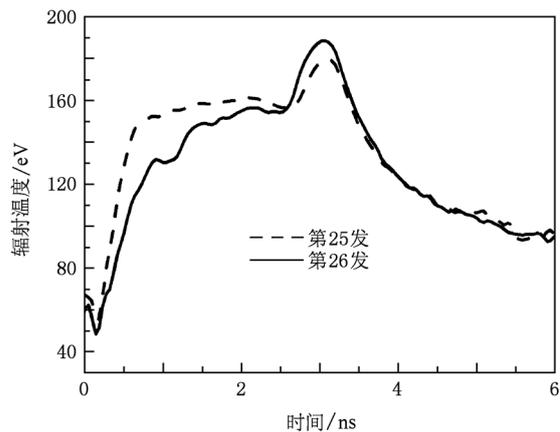


图 4 两发数据的辐射温度

如图 5 所示,利用第 25 发做辐射源,用 Au 做阻挡层模拟获得的双冲击速度变化为 5.3 km/s,第二个冲击波出现的时刻为 3.6 ns. 两个冲击波的速度变化小的原因是 Au 的阻抗很高,冲击波在 Au 层中减速很多. 虽然辐射源在 1.0—2.5 ns 区间的强度很大,但是对冲击波速度的贡献并不高. 而且,在 3.0 ns 时刻出现的第二个辐射峰由于受到 Au 层的阻挡,并没有产生明显的加速现象. 所以,纯粹用 Au 作阻挡层对冲击波传输过程的影响是很大的.

为了对比 Au 膜的影响,利用第 26 发做辐射源,用 Au 做阻挡层,获得的模拟结果如图 6 所示.

从图6可以看到,降低1.0—2.5 ns 区间辐射源的强度对第一个冲击波的影响有限,仅仅降低了3.5 km/s.但是,增加3.0 ns 时刻出现的第二个辐射峰的强度却可以将两次冲击的速度差拉开,达到14.7 km/s.如果换用中Z的Cu,仍然使用第26发辐射源,通过图7可以发现其两次冲击的速度都很高,速度差也最大,达到17.3 km/s.这个速度变化已经超出了诊断系统条纹的速度灵敏度(8.2 km/s),而且远远大于图5中的速度变化率.另外,就二次冲击出现的时刻而言,在图5中二次冲击出现的时刻为3.5 ns 处,图7中为3.35 ns 处,所以第26发二次冲击出现的时间比第25发更早.

通过模拟发现,如果要获得清晰的双冲击调速数据,也就是在光学条纹相机上看到辐射源改变所带来的二次冲击波出现时刻的变化,需要开展三个方面的优化工作.第一个方面是应该使用梯度变化比较明显的辐射源.第二个方面是需要选用阻抗合适的阻挡层,使其既能够阻挡X射线又对冲击波速度减速不多.第三个方面是如果将第二个辐射峰强度提高,或者将阻挡层阻抗降低都可以将第二个冲击波出现的时刻提前,反之亦然.

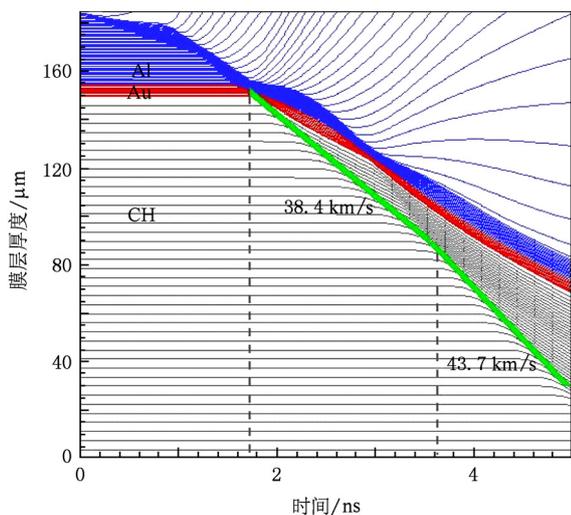


图5 基底为30 μm的Al加上5 μm厚Au膜的模拟结果 辐射源为第25发数据

经过分析,选择了两个能够互相对比的方案.第一个方案是在厚度为30 μm的Al基底上溅射厚度为5 μm的Au膜.加上厚度为5 μm的Au膜是为了将绝大部分X射线阻挡在CH材料之前,使其不能发生X射线离子化.该方案的缺点是由于Au膜的阻抗比Al基底大,冲击波在经过Au膜以后出现减

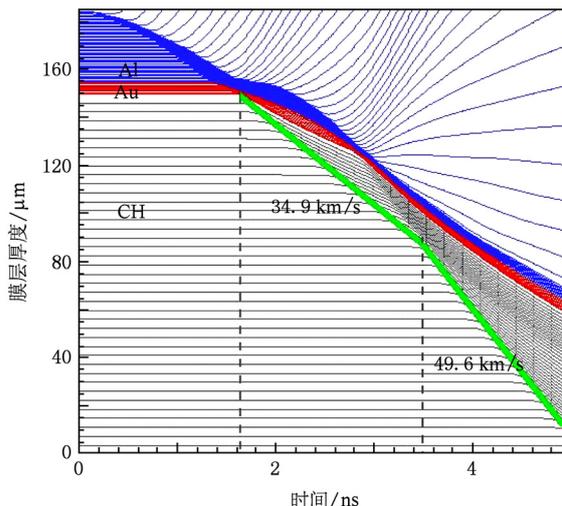


图6 基底为34 μm的Al加上5 μm厚Au膜的模拟结果 辐射源为第26发数据

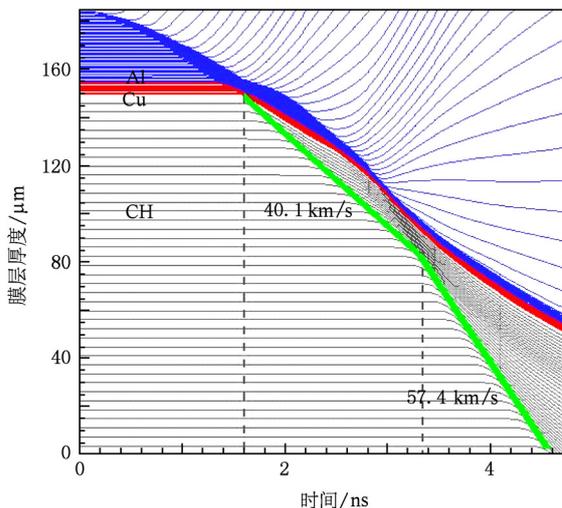


图7 基底为34 μm的Al加上5 μm厚Cu膜的模拟结果 辐射源为第26发数据

速,所以不利于使用这种靶型进行多冲击实验.第二个方案是在厚度为30 μm的Al基底(制作工艺问题导致实际靶的基底厚度为34 μm而非30 μm)上溅射厚度为2 μm的Au膜和厚度为3 μm的Cu膜.使用这种双层膜的目的有以下两个:一是减薄Au膜,观察减薄Au膜对冲击波阻挡效果减弱的程度;二是加入中Z材料,分析其阻挡X射线的效果和对冲击波的影响.

#### 4. 实验结果及分析

图8是采用第一个方案(30 μm厚的Al基底加

5  $\mu\text{m}$  厚 Au 膜) 获得的实验结果. 图 8 中上半部分的条纹是 Al 基底反射的信号. 在冲击波传到 CH 材料以后, 厚基底中的冲击波仍然在 Al 中传输. 经过一定的时间以后, 冲击波传到 Al 表面发生卸载. Al 表面反射率急剧下降, 条纹消失. 图 8 中下半部分条纹表示探针光信号在 CH 材料中反射的历史. 在 2.3 ns 左右, 冲击波到达 CH 材料并产生高压离化, 其波阵面直接反射探针光产生清晰的条纹跳变. 在冲击波到达 CH 材料以后有一个加速和减速过程, 这一过程可从图 8 中看得非常清楚. 但是, 图 8 中没有出现两次冲击过程. 经初步分析认为, 这可能是由于第 25 发的辐射源中第一个台阶部分能量太高, 导致其产生的第一个冲击波速度太快, 而条纹相机的记录窗口长度有限, 所以最终没有能够获得二次冲击的数据.

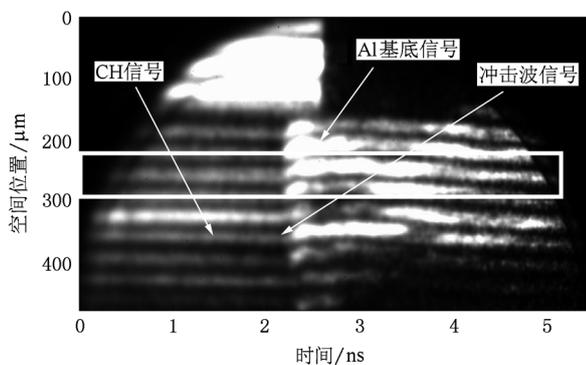


图 8 第 25 发的实验结果

图 9 是采用第二个方案(34  $\mu\text{m}$  厚的 Al 基底加 2  $\mu\text{m}$  厚 Au 膜和 3  $\mu\text{m}$  厚 Cu 膜) 获得的实验结果, 可以发现整个记录区都没有 X 射线离化产生的致盲效应出现, 而且在 4.7 ns 时还出现了二次冲击的信号. 图 9(b) 是对图 9(a) 两次冲击信号的放大. 从图 9 可以看到, 第二次冲击的波面弯曲更加严重, 导致二次冲击后的反射信号收集效率降低. 经初步分析认为, 这可能是二次冲击产生的冲击波需要经过第一次冲击的压缩区, 受到物质压缩状态影响较大所致. 同时, 其能量相对第一个冲击波而言没有增加很多, 所以冲击波阵面能量衰减很快, 最终表现为波阵面弯曲很严重.

图 10 是对图 8 和图 9 冲击波信号的分析, 信号取自框线内的部分. 分析图 10(第 25 发) 并与图 8 对比后可以看到, 从一次冲击在 2.2 ns 出现后, 冲击波反射信号中没有明显的二次冲击信号. 分析图 10(第 26 发) 并与图 9 对比后发现, 在 2.4 ns 处出

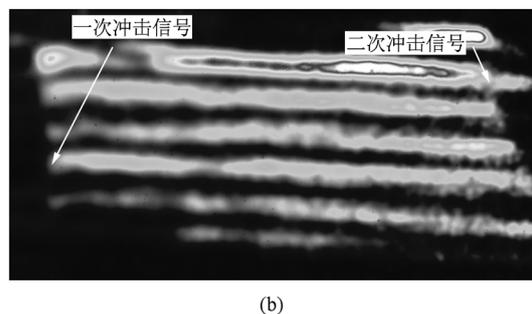
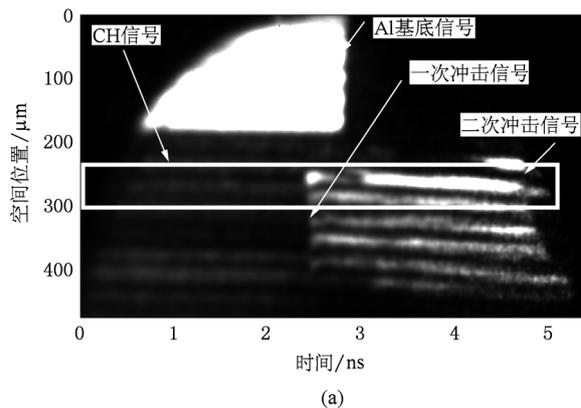


图 9 第 26 发的双冲击实验结果 (a) 全过程实验结果, (b) 双冲击放大的条纹图

现一次冲击产生的反射信号跳变, 在 4.7 ns 处信号强度又有一个突然跳变, 说明二次冲击的波阵面追上了一次冲击的波阵面, 重新形成新的反射面. 同时, 由于第 25 发比第 26 发在第一个台阶的辐射温度高 10—20 eV, 所以第 25 发的实验结果中第一次冲击波出现的时刻比第 26 发早大约 200 ps. 这种辐射温度调控数据与冲击波出现时刻之间的对应关系正是间接驱动下冲击波调速技术需要精确测量的关键数据. 另外, 通过对比两发的实验结果可以

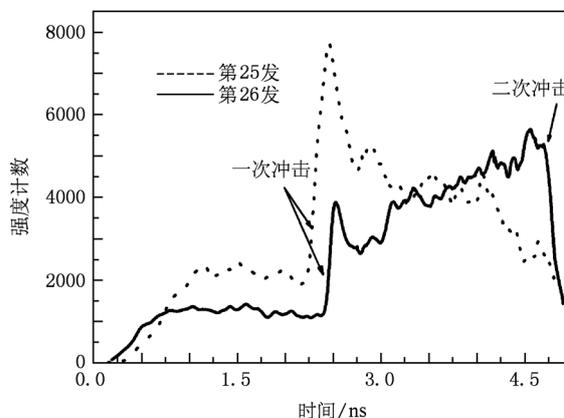


图 10 第 25 发和第 26 发中冲击波出现时刻比较

发现,压低辐射源第一个台阶的温度,提高第二个台阶的温度,可以使第二个冲击波更快赶上第一个冲击波.这个实验也可以为后续的多冲击波调速实验提供宝贵的经验.

## 5. 结 论

对球形靶进行一维模拟实验是现阶段惯性约束聚变研究的重要工作之一.对CH材料中冲击波传输特性以及多冲击调控技术的研究是整个冲击波调速技术的一个很重要的方面.在间接驱动条件下,材料中的高压状态是由腔靶内的高能X射线利用辐射烧蚀的原理产生的,其冲击波强度可以达到TPa量级,这给我们进行材料超高压特性的研究提供了有利条件.同时,X射线也会在冲击波到达样品材料之前对样品材料进行预热、离化等,这些现象又会干扰间接驱动条件下冲击波的诊断.本文分析

了产生X射线离化的原因,提出了两种阻挡X射线的方案,实验证明这两种方案都很有效.通过模拟和实验发现,如果要获得清晰的双冲击数据,需要三个方面的优化工作.第一,使用梯度变化比较明显的辐射源;第二,选用阻抗合适的阻挡层,使其既能够阻挡X射线又对冲击波速度影响不大;第三,将辐射源第二个台阶的强度提高或者将阻挡层阻抗降低都可以将第二个冲击波出现的时刻提前,反之亦然.使用厚度为2  $\mu\text{m}$ 的Au膜做阻挡层获得的实验结果对下一步优化实验用靶和选择合适的阻挡层有重要的参考意义.我们将在选择合适的阻挡层组合上再完成一系列实验,以达到既阻挡X射线又不影响调速研究的目的.同时,本文利用两发有代表性的实验结果证明了“神光-III”原型装置已具有了进行冲击波调速实验的能力.这为下一步开展CH材料中弱冲击实验和完成更复杂条件下的实验提供了坚实的基础.

- [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* **13** 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] Theobald W, Miller J E, Boehly T R, Vianello E, Meyerhofer D D, Sangster T C, Eggert J, Celliers P M 2006 *Phys. Plasmas* **13** 122702
- [5] Celliers P M, Collins G W, Da Silva L B, Gold D M, Cauble R, Wallace R J, Foord M E, Hammel B A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5564
- [6] 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, Wallace R J, Moon S J, Eggert J H, Lee K K M, Benedetti L R, Jeanloz R, Masclet I, Dague N, Marchet B, Le Gloahec M R, Reverdin C, Pasley J, Willi O, Neely D, Danson C 2004 *Phys. Plasmas* **11** 141
- [7] Wang F, Peng X S, Liu S Y, Li Y S, Jiang X H, Ding Y K 2010 *Acta Opt. Sin.* **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]
- [8] He M Q, Dong Q L, Sheng 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]
- [9] Zhang Y, 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
- [10] 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、向益准、陆泽、汤秀章 2006 强激光与粒子束 **18** 799]
- [11] Chen Y J, Yang Y Y, Zhuo Y M, Yang L M 2006 *Opt. Instrum.* **28** 71 (in Chinese) [陈阳杰、杨雨英、卓永模、杨李铭 2006 光学仪器 **28** 71]
- [12] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, Hicks D G, Boehly T R, Armstrong W J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4916

# Shock timing experiment in polystyrene target based on imaging velocity interferometer system for any reflector<sup>\*</sup>

Wang Feng<sup>†</sup> Peng Xiao-Shi Liu Shen-Ye Jiang Xiao-Hua Ding Yong-Kun  
(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)  
(Received 7 July 2010; revised manuscript received 29 March 2011)

## Abstract

The shock timing experiment in ablator material wave, where the shock wave transferring and catching up are investigated, can be simulated with an inertial confinement fusion planar target. The photo ionization effect caused by the X-ray from Hohlraum target is explained. With the simulation data, the block effects of Au and Cu for shock wave are analyzed. The shock velocity and the transfer time of two-shock wave in CH material are compared by using two radiation sources. The shock signals of acceleration and deceleration are obtained after adding Au block layer with thickness 5  $\mu\text{m}$  to the Al layer. The shock signals of acceleration, deceleration and reloading for two shock wave experiment are achieved after adding Au layer with thickness 2  $\mu\text{m}$  and Cu layer with thickness 3  $\mu\text{m}$ . The experimental data show that the two conditions should be satisfied in order to obtain the two shock signals. The first condition is that the difference in radiation between two steps source should be large, and the second condition is that the shield layer should be the combination of high impedance Au and low impedance Cu. These experimental results show the shock timing ability of "Shenguang-III", and give the reference design for planar target in shock timing technique.

**Keywords:** optical diagnosis, shock timing, ionization effect

**PACS:** 52. 35. Tc, 52. 50. Lp, 62. 50. - p

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10805041) and the Foundation of Key Laboratory of National Defense Science and Technology for High-Temperature and High-Density Plasma Physics, China (Grant No. 9140C6801021001).

<sup>†</sup> E-mail: xiaozei7566@163.com