

# X 射线相衬成像技术应用于高能量密度 物理条件下内爆靶丸诊断\*

晏骥 郑建华 陈黎 林稚伟 江少恩<sup>†</sup>

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011 年 11 月 9 日收到; 2011 年 12 月 14 日收到修改稿)

内爆压缩过程中多层球壳靶丸变化规律的研究是惯性约束聚变的核心内容. 利用相衬成像技术可以提高低  $Z$  材料分界面成像衬度的特点在神光 II 大型激光装置上开展了相关研究. 实验通过激光打 Ti 靶和针孔点背光的方式产生 4.75 keV 的 X 射线微点源, 针对内爆压缩过程中的靶丸样品投影成像获得了清晰的多层球壳靶丸图像, 空间分辨率优于 10  $\mu\text{m}$ . 同时利用一维流体力学数值模拟程序分析了球壳运动的过程, 实验结果与数值模拟结果符合较好. 表明了 X 射线相衬成像技术在高能量密度物理环境下仍然能够提高低  $Z$  材料分界面的衬度, 获得高质量的物理图像, 能够广泛应用于可控聚变能源、天体物理等前沿科学领域.

**关键词:** 高能量密度物理, 惯性约束聚变, 相衬成像技术, 多层球壳靶丸

**PACS:** 87.64.mh, 87.59.-e

## 1 引言

惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 是目前人类获取清洁、可控聚变能源的主要途径之一. 在 ICF 的研究中靶丸是存储聚变氘氚燃料的微球其主要结构包括氘氚气体层、氘氚燃料层和球壳烧蚀层. 当前的内爆靶丸设计中为了减小瑞利-泰勒不稳定性导致的混合效应、金  $M$  带能流导致的预热效应等不利因素对最终聚变点火产生影响, 靶丸球壳 (即烧蚀层) 往往会采用多层结构, 其每一层均为低  $Z$  材料构成<sup>[1,2]</sup>. 靶丸的结构组成使得传统的基于吸收原理的成像技术很难获取高质量的靶丸图像, 给内爆物理的研究带来困难.

相衬成像技术从另外一个层面入手, 利用硬 X 射线折射率中相移部分比吸收部分高三个数量级的特点对低  $Z$  材料成像, 从而获得高质量的靶丸图像. 国内外研究人员从 2004 年开始利用相衬成像

技术在 X 光机平台下对 ICF 靶丸进行测量和检测, 成功得到靶丸球壳的分层结构, 并将之作为靶丸参数测量的主要方法<sup>[3,4]</sup>; 从 2010 年开始在高能量密度物理 (HEDP) 环境下利用相衬成像技术对低  $Z$  材料样品成像. 这些研究虽然获得了初步的实验结果<sup>[5,6]</sup>, 但是在高能量密度物理环境下针对内爆压缩过程靶丸样品的动态成像仍然存在着成像空间分辨率要求高, 烧蚀碎片防护要求高, 噪声屏蔽要求高等难点, 需开展进一步相关研究.

本文以神光 II 大型激光装置为实验平台, 利用相衬成像可以提高低  $Z$  材料分界面衬度的特点, 在高能高密度物理环境下, 研究内爆压缩加速阶段靶丸球壳 (即烧蚀层) 的变化过程. 实验利用激光打靶和针孔点背光的方式产生了 4.75 keV 的准单能微点源, 通过烧蚀碎片防护和滤片优化最终获得了清晰的多层球壳的靶丸图像, 空间分辨率优于 10  $\mu\text{m}$ . 同时利用一维流体力学数值模拟程序分析了球壳运动的过程, 实验结果与数值模拟结果符合良好.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10775120) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: Jiangshn@vip.sina.com

实验结果表明了 X 射线相衬成像技术在高能量密度物理环境下仍然能够提高低 Z 材料分界面的衬度, 从而获得高质量的物理图像, 能够广泛应用于可控聚变能源, 天体物理等前沿科学领域.

## 2 实验设计

本文的工作是基于上海光学精密机械研究所的神光 II 大型激光装置为实验平台展开的, 该装置具有第八路 (约 260 J/1 ns/351 nm) 内爆压缩驱动激光和第九路 (约 1000 J/1 ns/351 nm) 背光激光. 实验采用的靶丸样品直径 250  $\mu\text{m}$ , 内部没有充气氙气体; 球壳厚度 20  $\mu\text{m}$ , 包括了两层结构, 分别为聚苯乙烯 (PS, 约 10  $\mu\text{m}$ ) 和碳氢 (CH, 约 10  $\mu\text{m}$ ). 实验采用的记录设备为天津 III 牌 X 光胶片.

相衬成像技术主要的实现方式分为干涉法 [7]、衍射法 [8]、类同轴相衬法 [9] 和光栅剪切法 [10]. 其中干涉法和衍射法需要平行光源才能实现而光栅剪切法目前并不成熟, 所以选择了类同轴相衬法作为主要的研究方法. 类同轴相衬成像原理如图 1 所示. 利用菲涅尔 - 基尔霍夫衍射获得相位调制, 从而最终在成像面上获得衬度增强的图像. 该方法实现的关键在于距离的选择, 光源与样品的距离  $R_1$  的选择主要为了保持光源的侧向相干性足够好, 在这里采用相干长度的概念来描述该问题. 一般来说相干长度  $l_{\text{coh}} = \lambda(R_1)/s$  ( $R_1$  是光源到样品的距离,  $s$  是微聚焦光源焦斑,  $\lambda$  是波长) 需要达到微米量级才能满足需求. 在神光 II 激光装置功率密度限制下, 选择 4.75 keV (约 0.26 nm) 能点的 X 射线作为光源, 其焦斑尺寸 7  $\mu\text{m}$ ; 在神光 II 激光装置光路限制下选择  $R_1 = 20$  mm, 最终该设计下其光源的相干长度达到 0.7  $\mu\text{m}$  满足实验需求; 样品到探测器的距离  $R_2$  的选择主要是满足衬度传递函数 (CTF) 相衬项极大值条件, 即  $R_2 = (2k + 1)(2\lambda u^2)^{-1}$  ( $k$  为自然数,  $\lambda$  是波长,  $u = s^{-1}$  是成像系统预计能达到的空间频率). 在  $k = 0$  条件下,  $R_2$  为 95 mm, 这个距离相对于靶点过近不利于噪声防护, 烧蚀碎片的屏蔽. 在  $k = 1$  条件下,  $R_2$  为 285 mm, 这个距离相对来说比较合适. 若  $R_2$  距离再增加, 将会导致图像空间分辨率降低以及光源亮度减弱等不利因素. 综合考虑最终选择了  $R_2$  为 285 mm 作为样品到探测器的距离 [11,12].

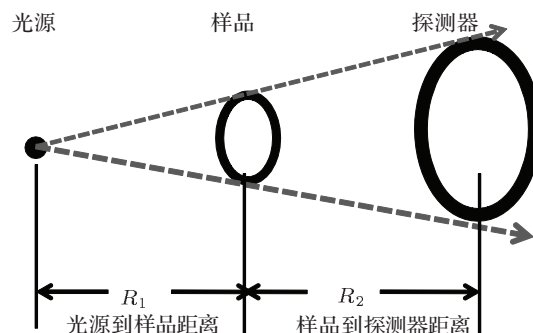


图 1 类同轴相衬成像示意图

本文工作通过三个部分的实验逐步推进. 第一步是针孔点背光的实验, 利用高功率密度激光器与靶物质相互作用获得焦斑小于 10  $\mu\text{m}$  的微点源; 第二步是静态靶丸成像实验, 通过同一个靶丸样品相衬像与吸收像对比结果, 突出相衬成像的优势; 第三步是内爆压缩动态靶丸成像实验, 获得靶丸动态相衬图像, 并将实验结果与数值模拟结果对比.

## 3 实验结果

### 3.1 针孔点背光实验

类同轴相衬成像需求一个焦斑在 10  $\mu\text{m}$  左右的微聚焦点光源作为实验用光, 在高功率密度激光器与靶物质作用过程中, 产生的 X 射线光源的焦斑通常是由激光焦斑大小来决定的. 纳秒级的强激光器焦斑往往在几百微米量级, 无法直接获取合适的点光源, 所以首先开展获取微点源的工作 [13,14]. 本文采用针孔点背光的形式来获得微点源, 其实验排布如图 2 所示. 第九路激光 (约 200 J/200 ps/351 nm) 注入背光靶上产生焦斑直径约 150  $\mu\text{m}$ 、能点约 4.75 keV 的 X 光源 (背光靶材料为 Ti), 距离背光靶 4.4 mm 放置 20  $\mu\text{m}$  厚的 Ta 片作为针孔板屏蔽背光靶部分产生的大量噪声, Ta 片上开孔径为 10  $\mu\text{m}$  的针孔, 通过小孔的约束, 在小孔处形成次级点光源. 实验设计中需要将针孔板与水平方向倾斜 15° 放置, 防止打靶产生的烧蚀碎片直接飞溅进入探测器, 这样的倾斜放置也使得小孔在水平方向的通光孔径缩小为 7  $\mu\text{m}$ . 实验中为了获得准单能的 4.75 keV 的 X 光源, 采用了多层组合滤片 (200  $\mu\text{m}$  Be + 4.7  $\mu\text{m}$  Al + 2  $\mu\text{m}$  Ti) 的形式来滤掉低能噪声部分, 优化了光源的单色性. 实验的样品采用镍网格, 周期分别为 50  $\mu\text{m}$

和  $25\ \mu\text{m}$ . 实验结果如图 3 所示. 通过针孔点背光可以获得清晰的高对比度的网格图像, 空间分辨优于  $10\ \mu\text{m}$ , 这种新型的基于强激光与物质作用的微

点源能够满足相衬成像物理实验的需求 (图像中出现的黑色斑点是由于胶片自身所携带, 对实验结果造成一定的影响).

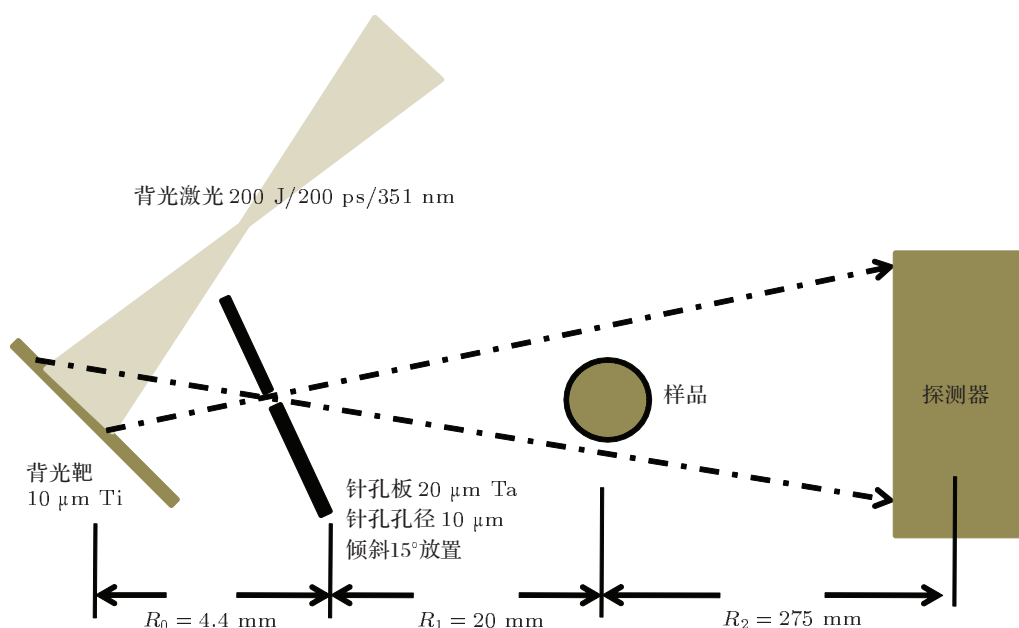


图 2 针孔点背光实验排布

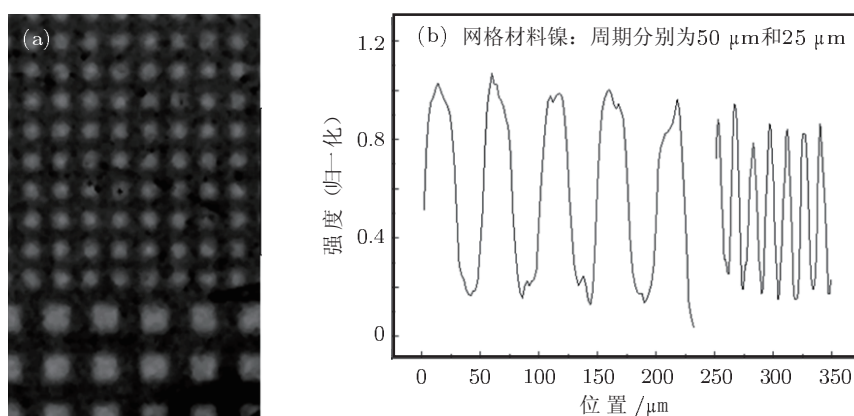


图 3 针孔点背光实验结果 (a) 网格样品图像; (b) 网格样品强度分布图

### 3.2 静态实验结果

第二步开展了对比性的实验, 对同一靶丸样品分别通过吸收成像和相衬成像获得实验结果并进行对比. 实验首先利用微聚焦 X 光机获得靶丸样品的吸收像. 根据衬度传递函数, 当样品到探测器的距离  $R_2$  为零即可获得纯吸收的像 (实际实验中

将靶丸样品放置于 IP 成像板上来实现样品到探测器的零距离). 然后将同一靶丸样品应用于激光打靶实验, 实验排布与针孔点背光实验相同. 实验结果如图 4 和图 5 所示. 图 4(a) 为吸收像, 图 4(b) 为相衬像. 对比吸收像和相衬像可以看到虽然由于碳氢材料 (密度  $0.97\ \text{g}/\text{cm}^3$ ) 与聚苯乙烯材料 (密度  $1.05\ \text{g}/\text{cm}^3$ ) 均是由 C, H 元素构成且密度差异极

小, 从实验图像上不能直观地区分靶丸两层球壳, 并且由于激光等离子体 X 光源相比较于 X 光机具有更大的噪声影响, 其成像质量相对较差; 但是图 4(b) 相衬像实验结果中靶丸球壳的内外界面具有明显的相衬成像特征, 即球壳内界面具有暗环, 球壳外界面具有亮环<sup>[15,16]</sup>. 而图 4(a) 吸收像实验结果则无法观测到这种物理现象. 换言之, 相衬成像可以更明显、清晰地分辨出靶丸球壳内外界面的位置. 这一特性使得相衬成像技术在 ICF 的研究中, 尤其是一些与烧蚀层变化过程紧密相关的物理量 (例如内爆流线、剩余质量、混合效应等) 的

研究中相比较于吸收成像具有显著的优势. 图 5(a) 为图 4(a) 靶丸球壳部分的强度分布图, 图 5(b) 为图 4(b) 靶丸球壳部分的强度分布图. 通过球壳强度分布图可以明显地看到吸收成像未能获得靶丸两层球壳之间碳氢层和聚苯乙烯层的分界面; 而相衬成像结果表明在靶丸球壳的中心位置出现了碳氢层和聚苯乙烯层的分界面, 碳氢层厚度和聚苯乙烯层厚度均为 10  $\mu\text{m}$ . 实验结果表明了相衬成像能够有效地提高低 Z 物质分界面处的衬度, 即使是碳氢和聚苯乙烯两种几乎没有差别的物质也能够明显地区分开来.

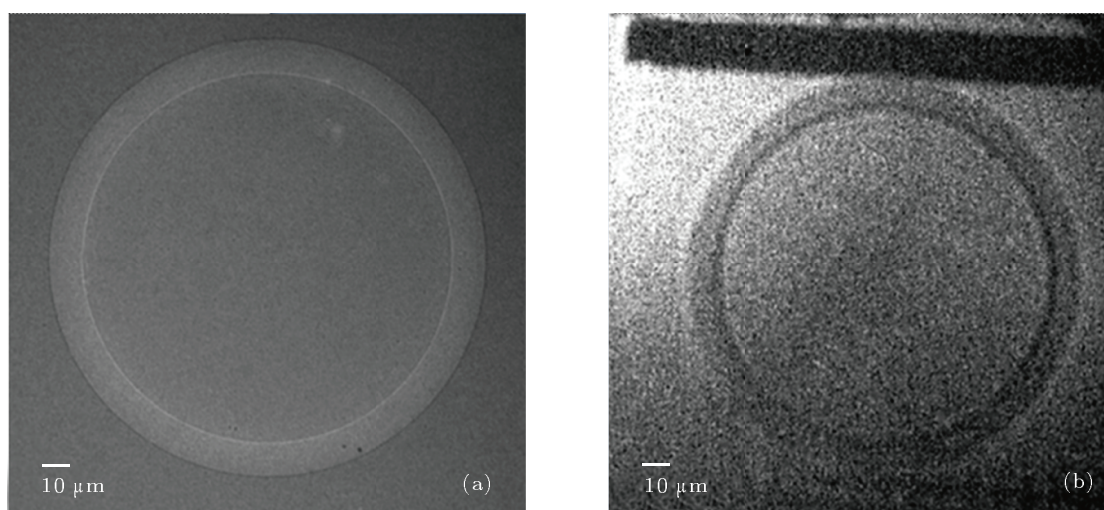


图 4 同一多层球壳靶丸样品 X 射线图像 (a) 利用 X 光机获得吸收图像 (样品到探测器距离为零); (b) 利用激光驱动 X 源获得相衬图像 (样品到探测器距离 275 mm)

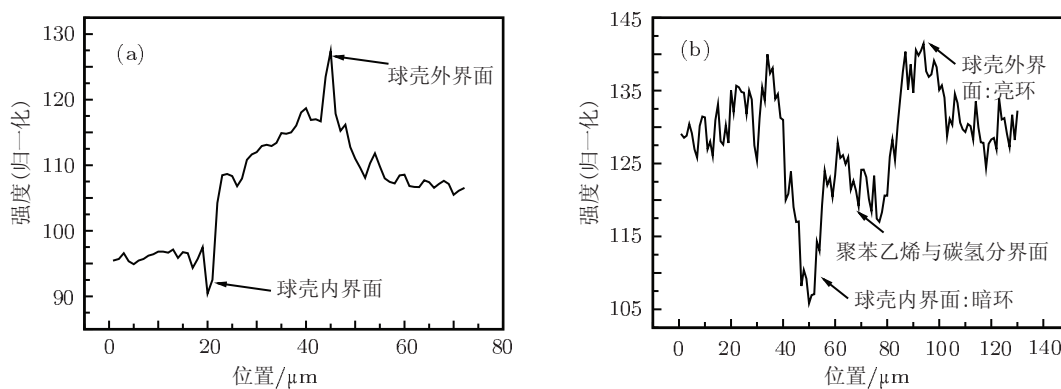


图 5 为图 4 靶丸图像球壳部分强度分布图 (a) 利用 X 光机获得吸收图像 (样品到探测器距离为零); (b) 利用激光驱动 X 光源获得相衬图像 (样品到探测器距离 275 mm)

### 3.3 动态实验结果

研究相衬成像技术的最终目的是将其应用

于内爆压缩实验中, 利用其可以提高低 Z 物质分界面衬度的特点来获得高质量的靶丸动态图像. 为此开展了第三步动态实验, 实验排布如



图 6 所示, 在静态实验基础上加入了四束驱动激光 (约 50 J/200 ps/351 nm) 单端直接驱动压缩靶丸. 通过改变第九路背光激光与四束驱动激光的延迟时间, 利用胶片记录内爆压缩过程某个时间点的靶丸动态图像, 延迟时间分别为 200 ps 和 1000 ps.

第九路背光激光 (约 200 J/200 ps/351 nm) 延迟驱动激光 (约  $4 \times 50$  J/200 ps/351 nm) 200 ps 的实验结果如图 7 所示. 由于背光持续时间为 200 ps, 实际上胶片记录到的内爆压缩时间为 200 ps—400 ps 的

短脉冲积分过程. 从图 7(a) 可以看到在内爆压缩初期受到激光辐照的一边 (右边) 与未受到激光辐照的一边 (左边) 基本相似, 没有明显的差异; 图 7(b) 是靶丸球壳受到激光辐照一边的细节图, 从球壳可以明显地观察到内部暗环和外部亮环的结构; 图 7(c) 是图 7(b) 球壳的强度分布图, 从图上可以看到碳氢层和聚苯乙烯层的分界面出现了变化, 并非处于球壳中心, 此刻内部的聚苯乙烯层厚度仍然为  $10 \mu\text{m}$  而碳氢层由于受到激光烧蚀的影响厚度减小为  $6 \mu\text{m}$ .

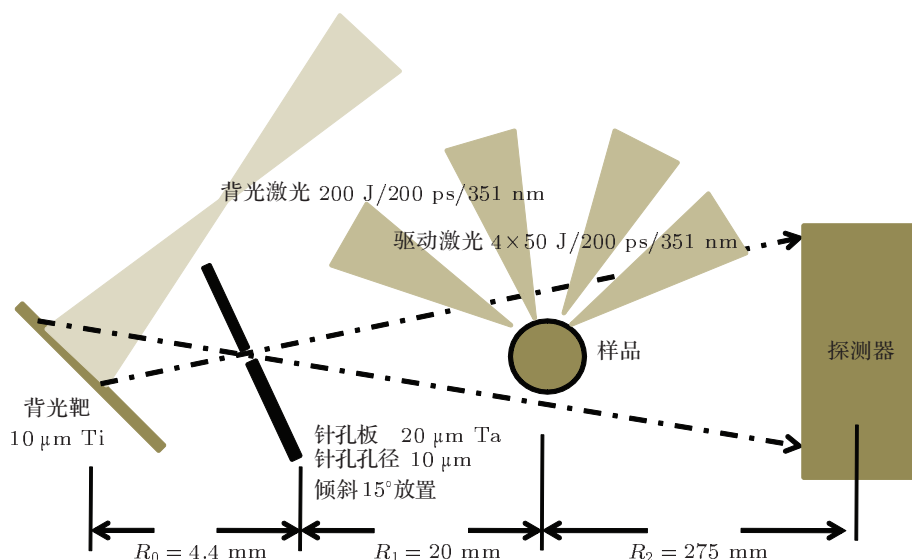


图 6 动态相衬成像实验排布

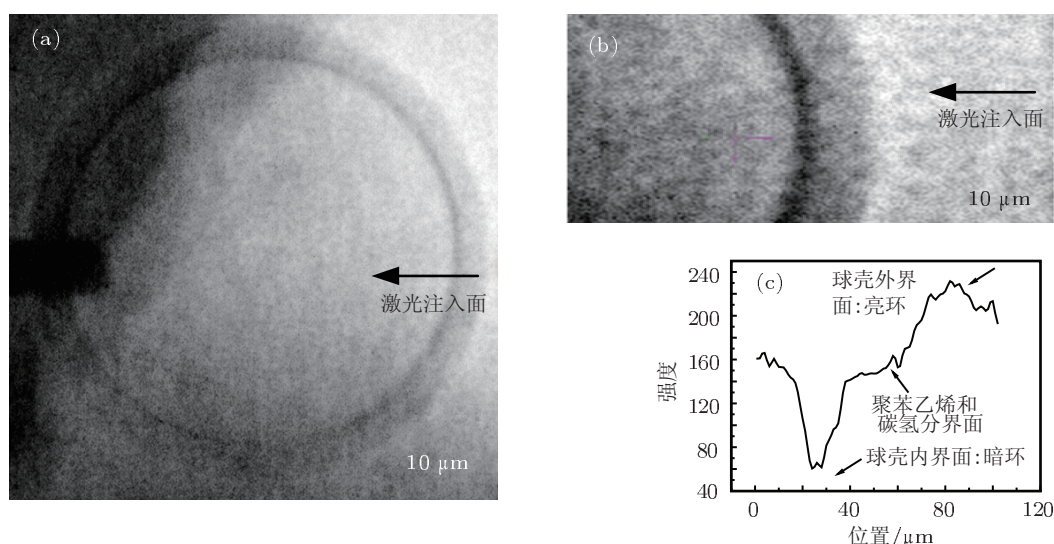


图 7 第九路激光延迟四路驱动激光 200 ps 条件下靶丸 X 射线相衬图像 (a) 整体靶丸图像 (激光从图像右面注入); (b) 激光注入面球壳细节图; (c) 图为 (b) 的球壳强度分布图

第九路背光激光(约 200 J/200 ps/351 nm) 延迟驱动激光(约  $4 \times 50$  J/200 ps/351 nm) 1000 ps 的实验结果如图 8 所示. 由于背光持续时间为 200 ps, 实际上胶片记录到的内爆压缩时间为 1000 ps—1200 ps 的短脉冲积过程. 从图 8 可以看到在内爆压缩中后期受到激光辐照的一边(右边)与未受到激光辐照的一边(左边)产生了明显的差异(黑色圆圈部分表示靶丸初始大小), 右边的球壳在受到激光辐照情况下烧蚀层(即球壳部分)几乎处于完全烧光状态, 且因为该靶丸内部并未充氙氙燃料气体, 烧蚀层并非单纯火箭模型般向外飞散, 而是向球心也有部分运动. 相对的左边的球壳未受到激光辐照仍然能够保持静态较完整的状态.

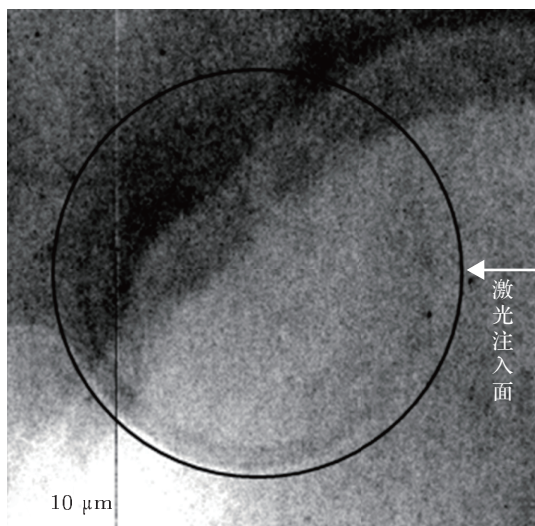


图 8 第九路激光延迟四路驱动激光 1000 ps 条件下靶丸 X 射线相衬图像(黑色圆圈部分为靶丸初始状态)

#### 4 一维流体力学数值模拟

基于实验条件采用了一维流体力学数值模拟程序进行了数值模拟, 模拟中采用  $200 \text{ ps}/10^{14} \text{ W/cm}^2$  的激光均匀球型对称内爆压缩靶丸, 靶丸参数为半径  $270 \mu\text{m}$ , 球壳  $20 \mu\text{m}$  的微球, 靶丸内部不填充气体, 球壳材料为碳氢. 模拟结果如图 9 所示. 从图 9 可以看到, 在内爆压缩初期(0—350 ps), 靶丸整体几乎没有运动, 只有球壳烧蚀层部分缓慢地往内部运动; 在这之后(> 350 ps) 靶丸开始显著地运动. 由于靶丸内部并没有充气, 在内爆压缩过程中靶丸球壳飞散较为严重. 在 1000 ps 附近压缩到初始半径的一半(一般认为这个状态下为内爆速度达到最大的状态). 数

值模拟结果与实验结果(图 7, 图 8) 相比, 在内爆压缩靶丸运动趋势上基本符合, 但是数值模拟结果比实验结果要压缩得更快一些, 这主要是因为一维流体力学数值模拟程序没有考虑实际中的二维扩散效应的因素所造成.

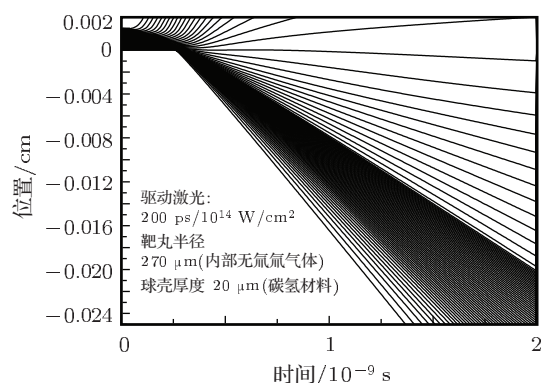


图 9 一维流体力学数值模拟结果(驱动激光  $200 \text{ ps}/10^{14} \text{ W/cm}^2$ , 靶丸不充气, 半径  $270 \mu\text{m}$ , 球壳厚度  $20 \mu\text{m}$ )

#### 5 讨论

综合分析物理实验结果和数值模拟结果(见图 7, 8, 9), 可以将内爆压缩中的加速过程分为两个较为明显的阶段. 第一个阶段物理过程简单描述为当驱动源烧蚀球壳外表面时, 产生一个向球心传播的冲击波, 当冲击波从球壳内表面传出之后将产生一个向外传播的稀疏波, 直到该稀疏波传播到球壳外表面, 这个阶段中靶丸受到驱动源烧蚀向内缓慢加速推进, 但是自身整体几乎不移动. 第二个阶段物理过程简单描述为当稀疏波传播出球壳外表面之后, 整个靶丸开始剧烈加速往球心运动, 直到外部烧蚀压与内部压强相等, 然后靶丸将近似匀速状态以最大内爆速度滑行. 通过物理过程分析可以看到, 在整个内爆加速过程中靶丸球壳(即烧蚀层)的变化对于内爆物理学的研究至关重要. 另一方面, 内爆压缩过程中烧蚀层变化也是非常复杂的, 在压缩初期烧蚀层为低  $Z$  低密度的碳氢材料, 而到了中后期烧蚀层将会逐渐变为低  $Z$  高密度的碳氢材料. 针对这样特殊的物理过程采用传统的 X 射线吸收成像机制对于 X 射线背光的能点选择非常困难: 若选取的背光能点较高(> 4 keV), 在内爆压缩初期靶丸球壳吸收太弱很难获得完整的靶丸图像; 若选取的背光能点较低(< 3.5 keV), 在内爆压缩中后期靶丸球壳吸收太强同样无法获取完整的靶丸图像. 但

是利用相衬成像技术可以提高低  $Z$  材料分界面衬度的特点, 选取能点较高 (5—20 keV) 的 X 射线作为背光源就能解决这样的问题, 从而获得完整的内爆过程高质量的靶丸图像.

## 6 结论

利用相衬成像技术可以提高低  $Z$  材料成像衬度的特点在神光 II 大型激光装置上开展了相关研究. 实验通过激光打靶和针孔点背光的方式产生 4.75 keV 的 X 射线微点源, 针对内爆压缩过程

中的靶丸样品投影成像获得了清晰的多层球壳靶丸图像, 空间分辨率优于 10  $\mu\text{m}$ . 同时利用一维流体力学数值模拟程序分析了球壳运动的过程, 实验结果与数值模拟结果符合较好. 表明了 X 射线相衬成像技术在高能量密度物理环境下仍然能够提高低  $Z$  材料分界面的衬度, 获得高质量的物理图像, 能够广泛应用于可控聚变能源、天体物理等前沿科学领域.

感谢神光 II 激光装置运行组和聚光聚变中心靶物理制备部同志的大力支持.

- 
- [1] Montgomery D S, Nobile A, Walsh P J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3986
- [2] Koziowski B J, Sater J D, Moody J D, Sanchez J J, London R A, Barty A, Martz H E 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 103105
- [3] Koziowski B J, Koch J A, Barty A, Martz H E 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 063103
- [4] Wu Z, Liu H, Yan A M 2005 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **234** 563
- [5] Workman J, Cobble J, Flippo K, Gautier D C, Montgomery D S, Offermann D T 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 10E520
- [6] Yan J, Jiang S E, Yin Z J 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 2047 (in Chinese) [晏骥, 江少恩, 阴泽杰 2010 强激光与粒子束 **22** 2047]
- [7] Atsushi M, Tohoru T, Itai Y 1994 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 2
- [8] Zhu P P, Wang J Y, Yuan Q X, Tian Y L, Huang W X, Li G, Hu T D, Jiang X M, Wu Z Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **51** 58 (in Chinese) [朱佩平, 王雋越, 袁清习, 田玉莲, 黄万霞, 黎刚, 胡天斗, 姜晓明, 吴白玉 2005 物理学报 **51** 58]
- [9] Oliva P, Carpinelli M, Golosio B, Delogu P, Endrizzi M, Park J, Pogorelsky I, Yakimenko V, Williams O, Rosenzweig J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 134104
- [10] Pfeiffer F, Bech M, Bunk O, Donath T, Henrich B, Kraft P, David C 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 102006
- [11] Huang W X, Tian Y L, Zhu P P, Mai Z H, Hu X F 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1041 (in Chinese) [黄万霞, 田玉莲, 朱佩平, 麦振洪, 胡小方 2002 物理学报 **51** 1041]
- [12] Liu J S, Duan Z L, Zeng Z N, Xie X H, Deng Y P, Li R X, Xu Z Z, Chin S L 2005 *Phys. Rev. E* **72** 026412
- [13] Babonneau D, Primout M, Girard F, Jadaud J P, Naudy M, Villette B, Depierreux S, Blancard C, Faussurier G, Fournier K B, Suter L, Kauffman R, Glenzer S, Miller M C, Grün J, Davis J 2008 *Phys. Plasmas* **15** 092702
- [14] Blue B E, Hansen J F, Tobin M T, Eder D C, Robey H F 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4775
- [15] Gureyev T E, Mayo S C, Myers D E, Nesterets Y, Paganin D M, Pogany A, Stevenson A W, Wilkins S W 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 102005
- [16] Koch J A, Landen O L, Koziowski B J, Izumi N, Dewald E L, Salmonson J D, Hammel B A 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 113112

# The application of phase contrast imaging to implosion capsule diagnose in high energy density physics environment\*

Yan Ji Zheng Jian-Hua Chen Li Lin Zhi-Wei Jiang Shao-En<sup>†</sup>

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

(Received 9 November 2011; revised manuscript received 14 December 2011)

## Abstract

The variation of multi-layer shell capsule in implosion process is the most important part of inertial confinement fusion. Phase contrast imaging which relies on gradients of the refractive index and wave interference is proposed to characterize the typical implosion capsule. The experiments are performed on the Shenguang II laser facility. The point-like X-ray source at 4.75 keV can be efficiently produced from laser interactions with Ti target and observed by pinhole- point backlight technique. The phase contrast images obtained with point-like X-ray source provide complementary information about the multi-layer shell capsule, and the spatial resolution is better than 10  $\mu\text{m}$ . The X-ray phase contrast imaging shows more detailed features than absorb imaging, and good agreement with one-dimensional numerical simulations.

**Keywords:** high energy density physics, inertial confinement fusion, phase contrast imaging, multi-layer shell capsule

**PACS:** 87.64.mh, 87.59.-e

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10775120).

<sup>†</sup> E-mail: Jiangshn@vip.sina.com