

# 神光Ⅲ原型单端驱动黑腔等离子体聚心时间研究\*

曹柱荣<sup>†</sup> 李三伟 江少恩 丁永坤 刘慎业 杨家敏 张海鹰 杨正华 黎航 易荣清 何小安

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2009 年 10 月 24 日收到; 2010 年 1 月 11 日收到修改稿)

在神光Ⅲ原型装置上, 利用 8 束激光单端驱动半腔靶实验研究了黑腔等离子体聚心时间. 通过改变腔底结构建立了 4 种黑腔辐射源, 比较了等离子体径向的聚心时间与黑腔辐射温度的变化关系. 径向聚心时间和辐射温度分别由 X 射线分幅相机和软 X 射线能谱仪给出. 研究发现, 4 种辐射源的等离子体径向聚心时间与辐射温度之间存在正比关系, 聚心时间随辐射温度升高而延后.

**关键词:** 聚心时间, 辐射温度, 半腔靶, X 射线分幅相机

**PACC:** 5225, 5240, 5270

## 1. 引 言

利用高功率激光器、强流粒子束和 Z 箍缩等大型装置可以在实验室产生类似黑体辐射的高温 X 射线辐射源, 从而为探索天体物理状态下的流体力学、辐射流、辐射不透明度、高 Mach 数射流、状态方程、相对论等离子体等物理现象提供了实验数据, 也使校验超新星研究及惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, 简记为 ICF) 数值模拟程序成为可能<sup>[1,2]</sup>.

在激光惯性约束聚变研究中, 依靠黑腔靶实现入射激光-X 射线的转换. X 射线能谱逼近黑体辐射的 Planck 谱, X 射线辐射在腔壁约束下多次吸收和再发射, 然后把能量运输到整个腔内表面, 产生的高温等离子体环境使辐射场在空间均匀化并渐近热力学平衡. 利用可控高温 X 射线辐射源可以对激光 ICF 和高能量密度物理的一些基本物理环节进行模拟研究<sup>[3-6]</sup>, 因此高温黑腔辐射源研究是 ICF 内爆物理、辐射运输和流体力学不稳定性等物理过程研究的基础.

高温黑腔辐射源特性一方面依赖于激光参数, 另一方面依赖于黑腔结构. 神光Ⅲ原型相对神光Ⅱ装置驱动能量高 5 倍, 并具有 8 束激光单端驱动打靶的能力, 为产生较高辐射温度的黑腔辐射源提供

了条件. 在激光器输出条件一定的情况下, 追求高温、均匀、干净和近平衡的黑腔辐射场是黑腔设计的目标<sup>[6,7]</sup>. 从激光腔靶耦合角度要求激光能量主要沉积在腔壁附近, 并以面发射的形式在腔壁附近将激光能量转换为软 X 射线, 控制 X 射线发射的强度和空间位置, 从而控制靶丸的辐照均匀性. 这不仅要求腔壁附近的等离子体有高的激光吸收效率和 X 射线转换效率, 同时要求黑腔内部的等离子体电子密度足够低, 保持激光向腔壁的能量传输通道畅通, 因此需要细致诊断等离子体时空行为.

我们利用神光Ⅲ原型装置的 8 束激光并打条件开展了单端驱动半腔靶实验. 通过激光注入口方向的 X 射线分幅相机 (x-ray framing camera, 简记为 XFC) 观测了腔靶等离子体的堵腔效应和聚心时空演变过程, 并与辐射温度的测量结果进行了比较研究.

## 2. 激光打靶条件和诊断排布

图 1 为激光打靶条件和诊断排布的示意图. 神光Ⅲ原型 8 束激光在相对柱腔轴线成 45° 角方向从腔靶注入孔注入腔内, 三倍频 ( $3\omega$ ) 激光能量约为  $8 \times 0.8$  kJ, 脉宽为 1 ns, 激光聚焦注入, 8 束激光焦点重合并位于激光注入孔中心. 为了降低剩余基频光、二倍频光辐照到屏蔽片上产生的 X 射线能量, 减少这些剩余光对注入孔方向辐射温度测量精度

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB814802) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: cao33jin@yahoo.com.cn

的影响,屏蔽片外形尺寸较大为  $\Phi 10\text{ mm}$ ,锥形部分长  $2\text{ mm}$ ,并在外表面涂  $5\text{ }\mu\text{m}$  厚的 CH 层<sup>[8]</sup>.

实验采用的半腔靶腔柱尺寸为  $\Phi 1.0\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ ,激光注入孔为  $\Phi 0.65\text{ mm}$ .半腔靶位于真空靶室中央,为了便于说明,图 1 中腔靶尺寸被放大.为改变辐射流,半腔靶的靶底部分为 A,B,C 和 D 四种类型. A 型靶底端全开放;B 型靶底端用双层薄膜( $0.1\text{ }\mu\text{m}$  金膜加  $1\text{ }\mu\text{m}$  CH 膜)密封;C 型靶底端用金箔密封后,在底部中心开宽度为  $0.3\text{ mm}$  的直条孔,然后再用双层薄膜密封;D 型底端用金封底后,中心开  $\Phi 0.4\text{ mm}$  的小孔,孔上贴  $0.5\text{ }\mu\text{m}$  厚的 CH 膜.通过贴膜和开孔考察膜层对辐射流的衰减和对散射激光的阻挡效果,最后比较各种靶型的辐射温度时间演化过程和堵腔效应.

主要诊断设备为软 X 光能谱仪 (soft x-ray spectrometer, 简记为 SXS) 和 XFC. SXS 采用的一套 15 通道的软 X 射线能谱仪<sup>[9]</sup>,安装位置在偏上极轴  $20^\circ$  方向.由 SXS 从激光注入孔测量黑腔辐射温度和不同能道 X 射线发射的时间行为. XFC 布置在靶室上极轴位置,通过激光注入孔观测腔内 X 射线辐射时空演化,考察激光注入情况和黑腔等离子体填充引起的等离子体径向聚心效应. XFC 以高压电脉冲为微通道板光阴极快门,通过  $4 \times 4$  针孔阵列获得时间分辨的 16 个分幅像.单幅时间分辨为  $70\text{ ps}$  ( $1\text{ ps} = 10^{-12}\text{ s}$ ),分幅像相对激光入射靶点的时间定标精度为  $50\text{ ps}$ <sup>[10,11]</sup>. XFC 成像的放大倍数为 6 倍.滤片选用  $200\text{ }\mu\text{m}$  的 Be,所测 X 射线主要为激光等离子体作用 Au 的 M 带主辐射的  $2\text{--}5\text{ keV}$  能区.

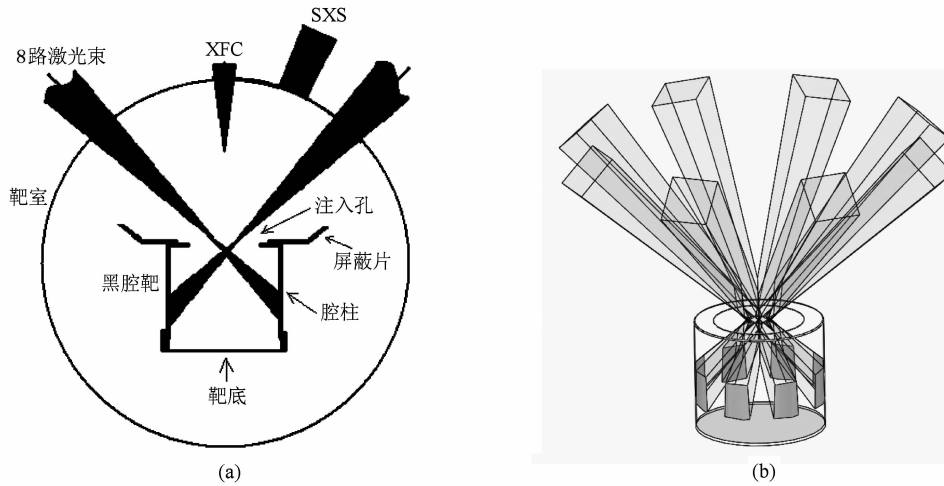


图 1 激光打靶条件和诊断排布示意图 (a) 激光打靶条件和诊断排布, (b) 激光束打靶三维效果图

### 3. 实验结果及分析

#### 3.1. 径向聚心时间诊断

首先通过 XFC 可以检验神光Ⅲ原型 8 束激光打靶的弹着点瞄准精度 ( $\leq 50\text{ }\mu\text{m}$ ) 和同步精度 ( $\leq 100\text{ ps}$ ).对单幅 XFC 二维轴对称强度分布图像,选取注入孔中心为极坐标原点,由 XFC 获得的图像可以直接观测等离子体在激光注入过程中的二维分布.激光注入中早期观测瞄准精度和同步是 XFC 单幅图像的典型结果,如图 2 所示.图 2 给出了第 C-38 发在  $465\text{ ps}$  时 XFC 图像,本文中发次标识规范为靶型加序号,如“C-38”中的“C”即为该发次对应的靶型.由图 2 可见,8 路激光两两相对的连线都可

以通过中心,并且各个弹着点等离子体聚心运动的形貌基本一致,可以说明神光Ⅲ原型的激光弹着点瞄准精度和同步精度满足实验的要求.

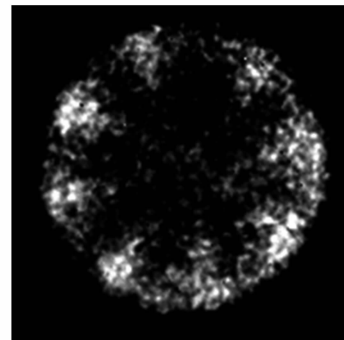


图 2 第 C-38 发在  $465\text{ ps}$  时 XFC 图像

等离子体径向聚心时间是指在径向观测位等离子体聚心时相对激光入射的时间. 从实验角度定义等离子体径向聚心时间为: 在 XFC 分幅像中, 当出现腔靶中心发光强度等于激光等离子体径向喷射的发光强度时, 对应的分幅图像时标为等离子体径向聚心时间. XFC 分幅时标是指曝光图像的中心时间点相对激光入射靶点的时间关系. XFC 的 4 条微带的总记录长度为 1.4 ns, 可以分 16 帧幅记录腔靶与 1.0 ns 入射激光作用的时空演化过程. 由于多路激光等离子体聚心过程为三维空间上的动态过程, 分幅照相只能实现二维投影方向上的非连续瞬态照相, 因此聚心时间的读取精度由分幅相机的时

间分辨力决定.

等离子体径向聚心时间的处理方法如图 3 所示. 图 3 为第 A-33 发在 385, 450, 515 和 580 ps 4 个时刻的 XFC 图像, 图 3(a) 为二维灰度图, 图 3(b) 为 4 幅图像的中心区域选取框内在  $x$  方向的强度统计,  $x$  轴为像素, 单位像素尺寸为  $24 \mu\text{m}$ , 读取软件为 PI 公司为 CCD 配置的 WINVIEW 软件<sup>[10]</sup>. 中心区域选取框的宽度基本与单路激光焦斑径向投影的宽度相当. 从图 3 的 4 幅图像中, 腔靶中心发光强度在第 3 幅时等于单路激光等离子体径向喷射强度 (扣除中心的本底后). 由等离子体径向聚心时间的定义, 该发次的聚心时间为 515 ps.

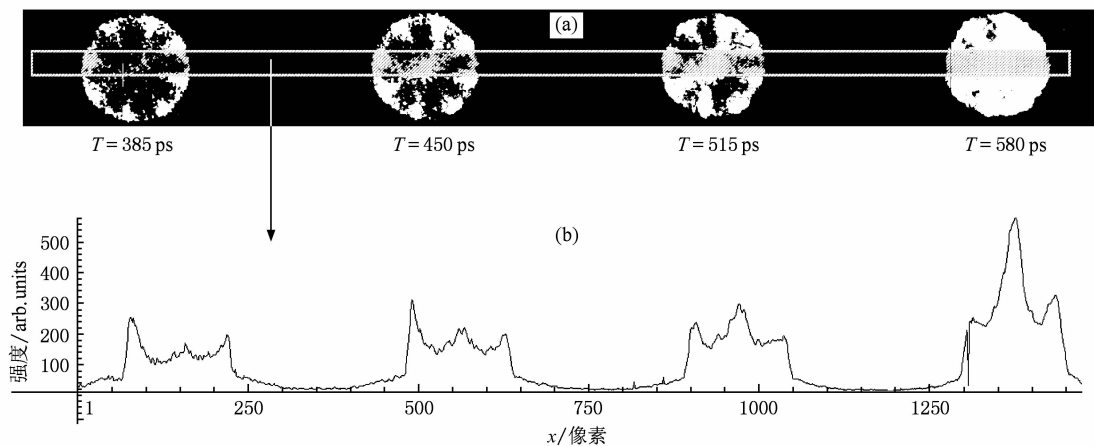


图 3 第 A-33 发聚心时刻读取结果 (a) XFC 图像, (b)  $x$  方向的强度分布统计

### 3.2. 径向聚心时间与辐射温度比较

神光 III 原型 8 束激光 1 ns 单端驱动半腔靶实验中, 等离子体径向聚心时间和辐射温度的比较结果如图 4 所示. 图中各个数据点的标识为数据点对应的发次编号和激光总能量. 由图 4 可见, 在 8 束激光同条件注入情况下, 等离子体径向聚心时间越晚, 辐射温度越高. 聚心时间与辐射温度两个诊断量变化趋势一致. 整体上, 4 种靶型辐射温度幅值的变化幅度约为 50 eV, 等离子体径向聚心时间的变化幅度约为 250 ps.

由图 4 可见, 等离子体径向聚心时间与辐射温度之间存在正比关系. 腔靶底端结构对黑腔辐射源的影响主要是激光直接转换的辐射流漏失现象. A 型靶由于底端全开放, 存在严重的辐射流漏失, 所以辐射温度最低. 同时, 底端面反照率为 0, 激光注入过程中等离子体向自由真空膨胀, 所以等离子体径向聚心的速度快, 聚心时间早. B 型靶在底端贴膜

后, 聚心时间得到一定的延迟, 辐射温度升高 17 eV. 但从聚心时间的结果看, 其薄膜在聚心之前已经烧穿. 比较 C 型靶和 D 型靶可以看出, 封底面积越大, 聚心时间越晚, 相应的腔内辐射温度越高.

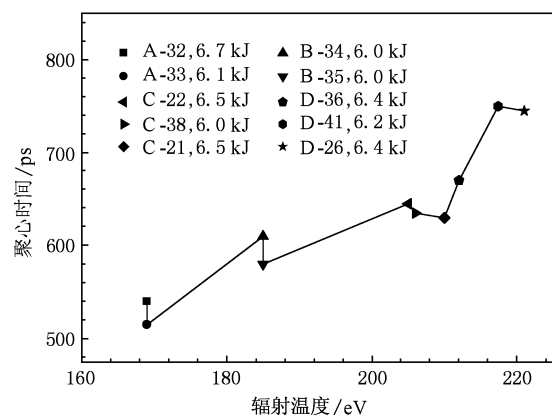


图 4 等离子体径向聚心时间与腔内辐射温度峰值的关系

辐射温度时间波形也反映辐射流漏失率对辐

射温度的影响,4种靶型的辐射温度时间波形如图5所示.由图5可见,在辐射脉冲上升阶段,A型靶由于底端全开放,在4种靶型中辐射温度上升最慢.B型靶由于底端薄膜的作用,在400 ps之前与C和D型靶基本一致.在400 ps之后辐射温度上升突然变缓,说明此时底端薄膜基本烧穿,腔底辐射流漏失加强.C和D型靶辐射温度的时间波形基本一致,只是由于开口面积不同,决定了辐射温度大小不同.

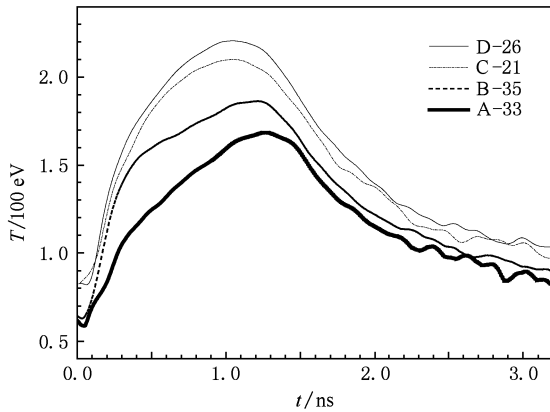


图5 四种靶型的辐射温度时间波形

### 3.3. 聚心时间对激光-X射线转换效率的影响

聚心时间是黑腔辐射源时空演化过程的综合效应.由于等离子体运动过程非常复杂,目前还不具备定量模拟能力.黑腔的作用除了将激光能量转换为X射线能量以驱动置于黑腔中心的内爆靶丸,还阻止了所产生的X射线辐射能的逃逸,提高驱动内爆的辐射场温度.下面的黑腔辐射温度定标规律对于激光脉冲广泛适用,包括任意辐射能量漏失的金黑腔<sup>[3,8,12]</sup>.

$$\sigma T_R^4 = \frac{\lambda \eta P_L}{S} t^{0.5} \left\{ 1 + \frac{1}{4(\lambda \alpha_H)^2 t} [2e^{-2\lambda \alpha_H t^{0.5}} - 1 - (1 - 2\lambda \alpha_H t^{0.5})^2] \right\}, \quad (1)$$

其中  $T_R$  是腔内辐射温度(达  $10^6$  K),  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常量,  $\eta$  为激光-X射线转换效率,  $P_L$  为激

光功率( $10^{14}$  W),  $S$  是黑腔内表面面积( $\text{cm}^2$ ),  $t$  为时间(ns),  $\lambda = 6.02$ ,  $\alpha_H = S_H/S$ , 为腔靶开口部分面积与黑腔内表面面积之比.在神光Ⅲ原型1 ns单端驱动半腔靶实验中,  $P_L = 9 \times 10^{14}$  W/ $\text{cm}^2$ , 则A和D型靶的  $\eta$  分别为0.48和0.82. D型靶比A型靶的激光-X射线转换效率高1.7倍,说明减小辐射漏失可以明显提高激光-X射线转换效率.

从等离子体径向聚心时间的结果来看,激光-X射线转换效率的提高主要依赖于腔底端对辐射流的漏失和反照作用<sup>[13]</sup>.腔底端面的作用除了阻止辐射流漏失,还有进行X射线反照的作用.激光光斑处产生的X射线,在其输运过程中除少量经激光入射口(或者腔底端)逃逸外,绝大部分通过辐射烧蚀过程重新被腔壁吸收<sup>[14]</sup>.被辐射加热的腔壁(或者腔底端)反过来又会进行再发射,将部分吸收了X射线发射回黑腔.反照产生的低密度等离子体改变了腔内等离子体的密度分布,产生的压力将延缓腔壁等离子体径向膨胀的速度,从而延缓了激光作用区等离子体径向聚心的时间,提高了激光-X射线转换效率.

## 4. 结 论

在神光Ⅲ原型装置上,通过8束激光单端驱动半腔靶(腔柱尺寸为  $\Phi 1.0 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , 激光注入孔为  $\Phi 0.65 \text{ mm}$ ) 实验,研究了单端驱动黑腔辐射源的等离子体聚心效应.利用XFC观测了等离子体径向聚心的时空演化过程,结合时标系统给出了等离子体径向聚心时间.在半腔靶4种腔底结构下,通过改变腔底开放面积和贴膜获得了4种不同的半腔靶辐射源,在此基础上比较了等离子体径向聚心时间与黑腔辐射温度的变化关系.研究发现,聚心时间与辐射温度的变化关系具有很好的一致性,聚心时间越晚,辐射温度越高.从4种靶型的比较可见,聚心时间诊断为高温黑腔辐射源的获得提供了一种新的研究方法.

[1] Drake R P 2006 *High Energy Density Physics* (New York: Springer) p335

[2] Campbell E M, Hogan W J 1999 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **41** B39

[3] Lindl J D 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933

[4] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339

- [5] Cavailler C 2005 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **47** B389
- [6] Rothman S D, Evans A M, Horsfield C J, Graham P, Thomas B R 2002 *Phys. Plasmas* **9** 1721
- [7] Chang T Q, Wang G Y 2001 *Phys. Plasmas* **8** 1659
- [8] Li S W, Yi R Q, Jiang X H, He X A, Cui Y L, Liu Y G, Ding Y K, Liu S Y, Lan K, Li Y S, Wu C S, Gu P J, Pei W B, He X T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3255 (in Chinese) [李三伟、易荣清、蒋小华、何小安、崔延莉、刘永刚、丁永坤、刘慎业、蓝可、李永升、吴畅书、古培俊、裴文兵、贺贤士 2009 物理学报 **58** 3255]
- [9] Sun K X, Jiang S E, Yi R Q, Cui Y L, Ding Y K, Liu S Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 68 (in Chinese) [孙可熙、江少恩、易荣清、崔延莉、丁永坤、刘慎业 2006 物理学报 **55** 68]
- [10] Cao Z R, Ding Y K, Zhang H Y, Bai X H, Liu B Y, Bai Y L 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 321 (in Chinese) [曹柱荣、丁永坤、张海鹰、白晓红、刘白玉、白永林 2007 强激光与粒子束 **19** 321]
- [11] Cao Z R, Ding Y K, Zhang H Y, Liu S Y, Miao W Y, Yi R Q, Bai X H, Liu B Y 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 19 (in Chinese) [曹柱荣、丁永坤、张海鹰、刘慎业、缪文勇、易荣清、白晓红、刘白玉 2009 光子学报 **38** 19]
- [12] James H H, Rosen M D 2003 *Phys. Plasmas* **10** 1829
- [13] Jiang S E, Li W H, Sun K X, Jiang X H, Liu Y G, Cui Y L, Chen J S, Ding Y K, Zheng Z J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3424 (in Chinese) [江少恩、李文洪、孙可熙、蒋小华、刘永刚、崔延莉、陈久森、丁永坤、郑志坚 2004 物理学报 **53** 3424]
- [14] Zheng W D, Zhang G P 2007 *Chin. Phys.* **16** 2439

## Plasma convergence time of radiation hohlraum with single-end drive on SG-III prototype laser facility<sup>\*</sup>

Cao Zhu-Rong<sup>†</sup> Li San-Wei Jiang Shao-En Ding Yong-Kun Liu Shen-Ye Yang Jia-Min

Zhang Hai-Ying Yang Zheng-Hua Li Hang Yi Rong-Qing He Xiao-An

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

(Received 24 October 2009; revised manuscript received 11 January 2010)

### Abstract

Plasma convergence time of half-hohlraum target with single-end drive by 8 bundled lasers are researched on SG-III prototype laser facility. Four radiation sources were established by changing the structure of target bottom. The relation between plasma radial convergence time obtained by x-ray framing camera and radiation temperature from soft x-ray spectrometer have been investigated. The results showed that plasma radial convergence time is directly proportional to radiation temperatures on different structures of target bottom, which lengthens as radiation temperature increases.

**Keywords:** convergence time, radiation temperature, half-hohlraum target, x-ray framing camera

**PACC:** 5225, 5240, 5270

<sup>\*</sup> Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB814802).

<sup>†</sup> E-mail: cao33jin@yahoo.com.cn