

# 间接驱动的内爆不对称性随腔长和时间变化的研究

黎航<sup>1)2)</sup> 蒲昱东<sup>2)</sup> 景龙飞<sup>2)</sup> 林雉伟<sup>2)</sup> 陈伯伦<sup>2)</sup> 蒋炜<sup>1)2)</sup> 周近宇<sup>2)</sup> 黄天暄<sup>2)†</sup>  
 张海鹰<sup>2)</sup> 于瑞珍<sup>2)</sup> 张继彦<sup>2)</sup> 缪文勇<sup>2)</sup> 郑志坚<sup>2)</sup> 曹柱荣<sup>2)</sup> 杨家敏<sup>2)</sup> 刘慎业<sup>2)</sup>  
 江少恩<sup>2)</sup> 丁永坤<sup>1)2)</sup> 况龙钰<sup>1)2)</sup> 胡广月<sup>1)</sup> 郑坚<sup>1)</sup>

1) (中国科学技术大学近代物理系, 中国科学院基础等离子体重点实验室, 合肥 230026)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2013年3月30日收到; 2013年6月30日收到修改稿)

在激光间接驱动惯性约束聚变中, 为达到高密度压缩以实现点火, 对靶丸内爆对称性和黑腔辐射场均匀性有严格的要求. 为了研究内爆不对称性随腔长和时间的变化, 实验中采用了三种不同尺寸的黑腔, 利用 X 光分幅相机观测了靶丸燃料区自发光, 获得了压缩变形过程和椭圆度变化规律, 初步判断了在三种腔型中腔长 1700  $\mu\text{m}$  的黑腔较接近神光 III 原型装置内爆对称性要求. 根据视角因子程序计算得到辐射流不对称性随时间变化情况, 通过一个简化的解析模型推导出内爆形变不对称性随时间变化过程, 与实验结果大致符合. 由此进一步分析了黑腔辐射场不均匀性的演化导致内爆不对称性随腔长和时间变化的物理机制.

**关键词:** 内爆不对称性, 黑腔辐射场不均匀性, 腔长, 视角因子程序

**PACS:** 52.57.Fg, 52.70.La, 52.50.Jm

**DOI:** 10.7498/aps.62.225204

## 1 引言

在激光间接驱动惯性约束聚变 (ICF) 研究中, 激光束注入高 Z 黑腔转换成 X 光辐射, 然后 X 光辐射烧蚀黑腔中心的靶丸使之压缩内爆. 高的内爆效率不仅要求腔壁等离子体有高的激光吸收效率和 X 光转换效率, 同样对靶丸的辐射驱动均匀性有十分严格的要求. 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 光, 控制 X 光发射的空间位置和时间过程, 从而控制靶丸的辐射驱动均匀性. 在实际的圆柱状黑腔中, 由于黑腔长径比、腔壁反照率、腔壁等离子体运动、腔球比例、光斑排布、腔壁开孔和激光等离子体相互作用等因素, 使得腔内很难形成均匀辐射场来对称驱动靶丸, 且整个驱动过程中辐射强度不对称性一直动态变化<sup>[1-4]</sup>.

Nova 等激光装置的内爆对称性实验分为最大压缩时刻对称性和压缩过程中的对称性两种: 前

者指直接观测最大压缩时刻的对称性, 对一个完整的驱动过程进行时间积分, 过程中的驱动辐射强度的不对称性可抵消, 以在最大压缩时刻实现近似球形内爆; 后者指研究内爆靶丸随时间变形过程, 前期采用再发射技术而后期采用加速壳层技术. 要经过一个完整的驱动过程后达到近似球形内爆的目标, 就要研究压缩过程中内爆靶丸随时间变形过程<sup>[1,2,5-7]</sup>. 目前美国国家点火装置 (NIF) 激光装置采用了双环注入、束间能量交换等技术控制辐射对称性, 最关注最初 2 ns 和最大压缩时刻的对称性, 近期的国家点火项目点火攻关实验表明, 内爆对称性的问题仍然严重<sup>[8]</sup>.

神光 III 原型激光装置上用 X 光分幅相机 (XFC)<sup>[9-12]</sup> 观测并研究了不同腔长的内爆对称性演化过程<sup>[4]</sup>.

## 2 实验安排

如图 1 所示, 神光 III 原型激光装置两侧各四

† 通讯作者. E-mail: huangtx2002@yahoo.com.cn

束激光分别从金腔靶的上下两个注入口 (LEH) 同步注入黑腔, 通过激光等离子体相互作用将激光转换成 X 光, 烧蚀黑腔中心的靶丸使之压缩内爆. 激光每束能量约 600 J, 脉宽 1 ns, 三倍频波长 0.35  $\mu\text{m}$ , 相对柱腔轴线成 45° 角注入, 两侧激光光路旋转错开 45°, 激光打击腔壁的位置距离临近一侧的腔靶 LEH 端面 500  $\mu\text{m}$ . 实验中采用了三种腔形, 分别是长 1600  $\mu\text{m}$  的短腔、长 1700  $\mu\text{m}$  的中腔和长 1800  $\mu\text{m}$  的长腔. 除腔长  $L$  外三种腔形其余配置相同: 柱腔直径 1000  $\mu\text{m}$ , 壁厚 25  $\mu\text{m}$ , LEH 直径 700  $\mu\text{m}$ , 单诊断口 (DH) 450  $\mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$ , 上覆盖厚 3  $\mu\text{m}$  的 CH 膜. 靶丸  $\Phi 300 \mu\text{m}$ , 塑料球壳厚 18  $\mu\text{m}$ , 球内填充  $\text{D}_2$  气压  $10^6 \text{ Pa}$ , 掺杂 Ar 原子比 1%.

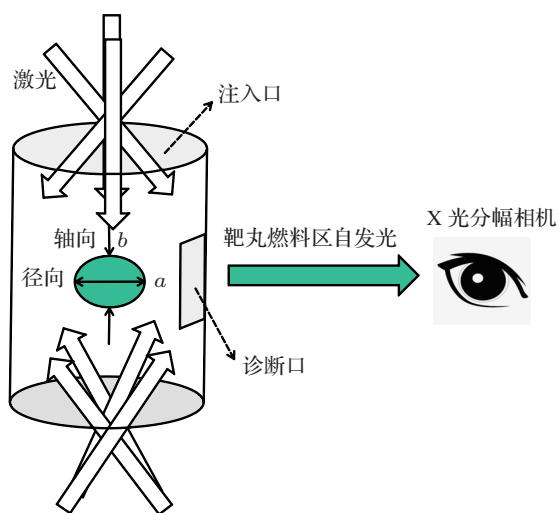


图 1 内爆对称性实验的靶结构及实验布置示意图

4×4 针孔阵列配 XFC 正对 DH 观测内爆压缩形状的演化过程. 针孔孔径  $\Phi 15 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ , 12 倍放大, 总空间分辨率优于 21  $\mu\text{m}^{[13]}$ . XFC 时间分辨率约 100 ps, 定义八路激光起始半高点为时标零点. 前置 120  $\mu\text{m}$  厚的 Be 滤片.

在神光 III 原型装置没有专门背光诊断束的情况下, 只能通过芯部气体压缩后高温自发光来诊断内爆过程. 由于在内爆时燃料区电子温度比壳层和腔壁高, 芯部会发射更多、更硬的 X 光<sup>[14]</sup>. 120  $\mu\text{m}$  的 Be 滤片透过率和 XFC 的能谱响应配合下<sup>[15-17]</sup>, 所测 X 光主要为 2 keV 以上能区, 主要是燃料区自发光.

### 3 实验结果与分析

如图 2 所示, XFC 观测得到三种腔型的内爆靶丸压缩变形的演化过程, 可见明显的不对称性且随时间变化, 强度没有归一, 主要展示形状变化. 方形虚线指示了 450  $\mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$  诊断口的位置, 椭圆形虚线指示了激光打击点的位置. 激光打击点的位置对内爆对称性至关重要: 短腔由于打击点较靠近 DH, 可见明显的激光打击 Au 腔壁 X 光发射, 由于两侧激光光路旋转错开 45°, 故只看到一侧的打击点; 而中腔和长腔中由于激光打击点离 DH 较远, 透过 DH 看不到打击点. 表明在神光 III 原型装置光束较少的情况下, 三维空间中辐射场并非绕腔轴旋转对称, 三维靶丸芯部形状需用球函数来描述;

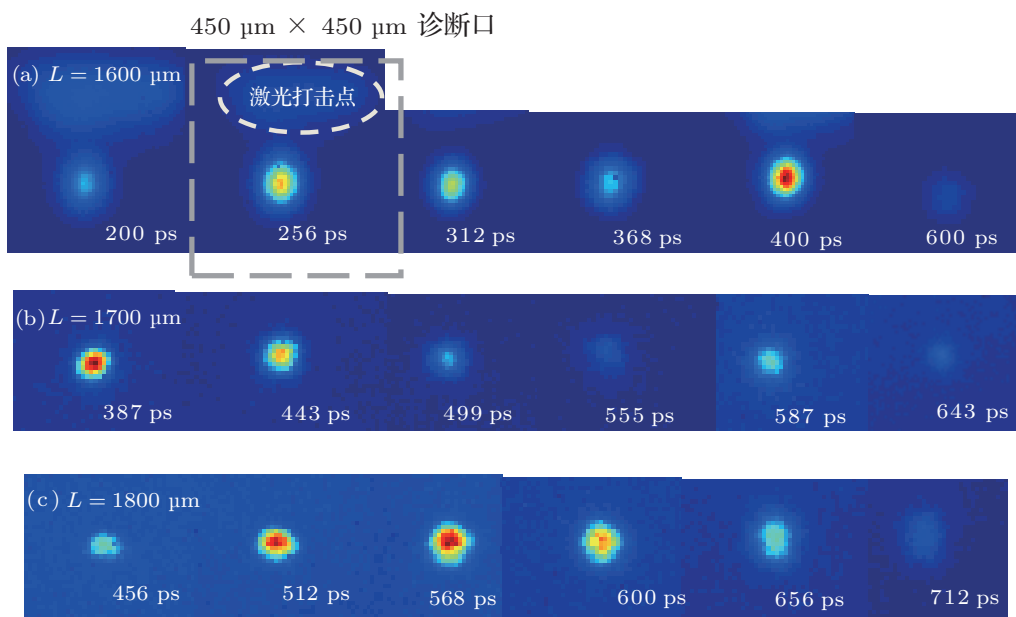


图 2 XFC 观测得到的内爆对称性实验结果 (a) 长 1600  $\mu\text{m}$  的短腔; (b) 长 1700  $\mu\text{m}$  的中腔; (c) 长 1800  $\mu\text{m}$  的长腔 (强度没有归一, 主要展示形状变化)

实验测量得到的二维图像来源于三维芯部在二维记录面上的投影,即便近似将其看作沿腔轴对称,但是由于神光 III 原型装置中两个半腔的辐射场并不完全对称,即球函数简化为勒让德多项式也还有奇数阶项<sup>[18,19]</sup>,这也是诊断和二维模拟程序所要稍加注意的。

若近似将黑腔辐射场看作沿腔轴轴对称且两

个半腔对称,内爆靶丸的三维变形情况用二维指标即可描述.如图 1 和图 3 所示,将 XFC 获得的内爆靶丸芯部自发射二维图像用椭圆近似拟和靶丸内爆压缩图像半高线,设拟和的椭圆相对于腔的径向长度为  $a$ ,轴向长度为  $b$ ,即可得靶丸芯部的最基本变形指标即椭圆度  $a/b$ .

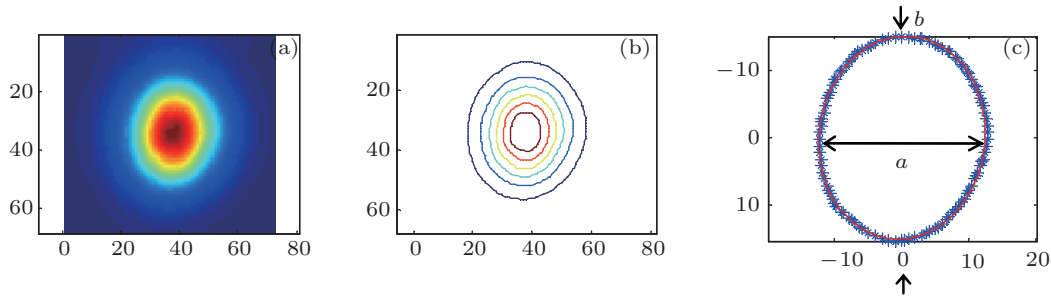


图 3 内爆靶丸变形椭圆度  $a/b$  的提取 (a) 原始图; (b) 等高线图; (c) 椭圆拟合

进而考察原型实验  $a/b$  随时间和腔长变化的规律.如图 4 所示,短腔的  $a/b$  稳定地小于 1; 中腔的  $a/b$  从 1 变至大于 1,又跌落至小于 1; 长腔的  $a/b$  与中腔的变化趋势相似且变化幅度更大,而在 0.7 ns 附近有反弹回 1 的趋势. 根据最佳腔长的判据<sup>[1-3]</sup>——压缩过程中芯区偏离球形的相对形变小于 1/4,最强发射时刻  $a/b$  近似为 1 以实现球形内爆——长腔相对形变较大,短腔最强发射时刻  $a/b$  很难回到 1,从而初步判断原型上腔长 1700  $\mu\text{m}$  的中腔较接近该要求。

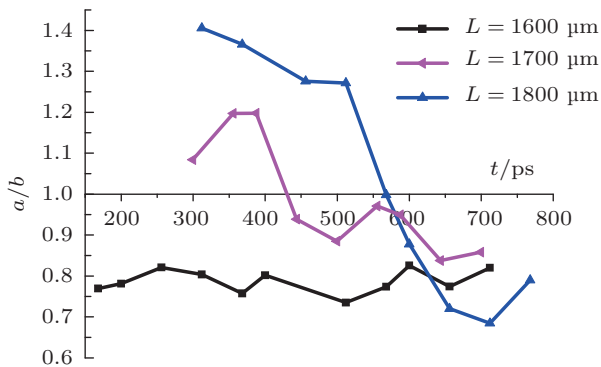


图 4 内爆靶丸变形实验椭圆度  $a/b$  随腔长和时间变化过程

Hauer 等<sup>[5-7]</sup>研究了压缩过程中的内爆对称性,给出了靶丸感受到的轴向和径向的辐射流差异随时间变化情况和不同壳厚经历了不同辐射驱动时长的内爆靶丸变形结果.内爆不对称性是由黑腔辐射场不均匀性决定,辐射场不均匀性主要由黑腔长径比、腔壁反照率、腔壁等离子体运动(打击点

随之移动)、腔球比例(随靶丸压缩而改变)、光斑排布、腔壁开孔和激光等离子体相互作用等因素决定,用视角因子计算模型<sup>[19-23]</sup>可以近似考虑以上大多数非理想因素,将原型实验的参数代入视角因子程序,可计算得靶丸感受到的轴向和径向的辐射流差异随时间变化情况。

而在加速阶段某一时刻的形变量是该时刻前的辐射驱动的累积结果,因此可由轴向和径向的辐射流差异进行时间积分大致推导出  $a/b$  随时间变化过程.定义  $F_{ax}$ ,  $F_{ra}$  和  $F_{av}$  分别为靶丸感受到的轴向、径向和平均辐射流强度,内爆速度  $v$  与辐射流强度  $F$  大致满足  $v \propto F^\gamma$ ,  $\gamma = \frac{1}{8}$ <sup>[1-3]</sup>,因此有

$$\begin{aligned} & \int_0^{t'} (F_{ax}^\gamma - F_{ra}^\gamma) dt \\ & \propto \int_0^{t'} (v_{ax} - v_{ra}) dt \\ & = (R - b) - (R - a) \\ & = \left(\frac{a}{b} - 1\right) b, \end{aligned} \quad (1)$$

$v_{ax}$  和  $v_{ra}$  分别为轴向和径向的内爆速度,  $R$  为初始靶丸半径。

另一方面,定义  $H(t) \equiv F_{ax} - F_{ra}/F_{av}$  来表征轴向和径向的辐射流差异.  $F_{ax}$ ,  $F_{ra}$  和  $F_{av}$  间的辐射流差异较小,  $F_{ra} \approx F_{ra} \approx F_{av}$ ,  $H \ll 1$ ,从而可推导出

$$\int_0^{t'} (F_{ax}^\gamma - F_{ra}^\gamma) dt \approx \int_0^{t'} \gamma \frac{H(t) F_{av}}{F_{ra}} F_{ra}^\gamma dt, \quad (2)$$

$F_{ra} = F_{av} + \Delta F$ , 对小量  $\Delta F$  展开.同时,平均辐射流强度  $F_{av}$  随时间  $t$  的变化过程可由斯特藩-玻耳兹

曼公式  $F = \sigma T^4$  和黑腔辐射温度时间过程定标率  $T = T_{\text{peak}} t^{0.15[1-3]}$  描述,  $\sigma$  为斯特藩 - 玻耳兹曼常数,  $T$  为黑腔辐射温度,  $T_{\text{peak}}$  为峰值辐射温度. 从而 (2) 式进一步近似推导得

$$\int_0^{t'} \gamma \frac{H(t) F_{\text{av}}}{F_{\text{ra}}} F_{\text{ra}}^\gamma dt \propto \int_0^{t'} H(t) dt, \quad (3)$$

对比 (1) 式和 (3) 式, 可得

$$\int_0^{t'} H(t) dt \propto \left(\frac{a}{b} - 1\right)b, \quad (4)$$

从而建立了辐射流差异与  $a/b$  的关系.

如图 5 所示, 视角因子程序计算得到中腔的靶丸感受到的轴向和径向的辐射流差异随时间变化情况, 利用该计算结果进一步由 (3) 式推导出中腔  $a/b$  随时间变化过程, 与原型实验测得的中腔和长腔的  $a/b$  大致符合, 与 Hauer 等 [5-7] 给出的辐射流差异和  $a/b$  结果也定性一致.

图 5 中内爆靶丸随时间变形是因为间接驱动 ICF 黑腔辐射场不均匀性的演化: 0—0.25 ns 的前期轴向驱动强是因为激光打击点处的温度远高于其他黑腔壁, 打击点处的初次发射 X 光主导轴向驱动; 0.25—0.65 ns 的中期径向驱动强是因为随着

黑腔温度上升反照率上升, 整体黑腔壁的再发射 X 光主导径向驱动, LEH 的辐射漏也削弱了轴向驱动; 0.65—1 ns 的后期轴向驱动强是因为等离子体聚心运动, 等离子体聚心运动主要是由辐射烧蚀而非激光烧蚀引起, 这也意味着可以认为整个腔以相同速度向内运动 [1-2], 同时打击点随着聚心的临界密度面和激光光路逐渐向中心腔轴和 LEH 两端运动, 改变了相对于靶丸的角位置, 相当于腔变长, 如图 6 所示.

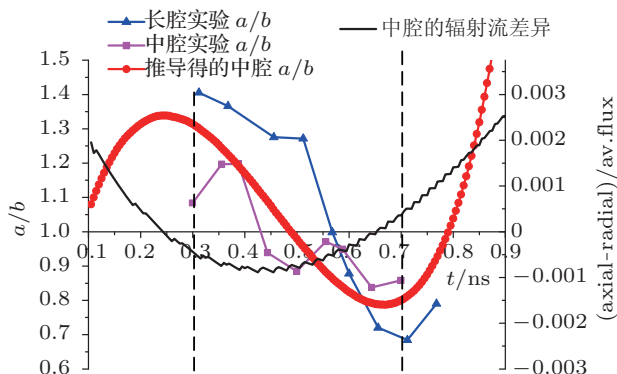


图 5 中腔的轴向和径向的辐射流差异及推导和实验得的椭圆度  $a/b$  随时间变化过程

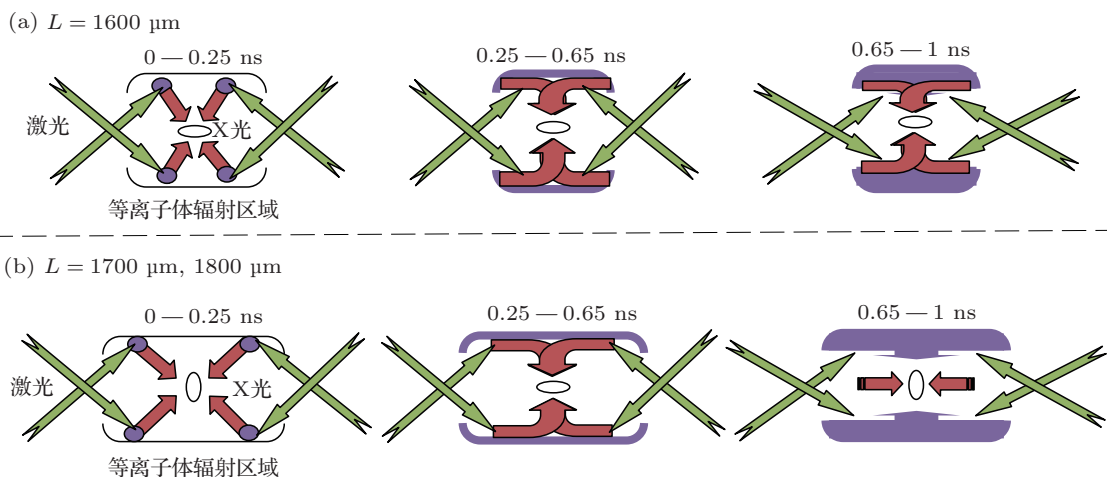


图 6 黑腔辐射场不均匀性的演化导致内爆靶丸随时间的变形 (a) 长 1600  $\mu\text{m}$  的短腔; (b) 长 1700  $\mu\text{m}$  的中腔和长 1800  $\mu\text{m}$  的长腔

据此可分析图 4 的结果: 在激光脉冲前沿的 0 时刻靶丸尚未受辐射烧蚀驱动,  $a/b$  应等于 1; 短腔的  $a/b$  稳定地小于 1, 说明始终径向驱动强, 激光打击点初次发射和腔壁再发射基本都在径向主导; 中腔和长腔的  $a/b$  从 1 变至大于 1, 又跌落至小于 1, 说明前期激光打击点初次发射主导轴向驱动, 后期腔壁再发射主导径向驱动; 长腔与中腔变化趋势类似, 但不对称性更大, 初次发射主导的轴向驱动明显使得靶丸形变更大, 再发射将  $a/b$  第一次校正回

1 的时间更长, 0.7 ns 附近有一个反弹回 1 的趋势, 可能是由等离子体聚心运动所致.

## 4 结论

在神光 III 原型激光装置上用三种不同腔长的黑腔产生的辐射场辐射驱动内爆靶丸, 用 XFC 观测了靶丸燃料区自发光, 获得了压缩变形过程和椭圆度变化规律, 初步判断在三种腔型中中腔较优.

根据视角因子程序计算得到的时变辐射流不对称性, 通过一个简化的解析模型推导出内爆形变不对称性随时间的变化过程, 与原型实验的结果与文献 [5—7] 的结果大致符合. 进一步分析了黑腔长径比、激光打击点初次发射、腔壁再发射和等离子体运动等黑腔辐射场不均匀性因素的变化导致内爆不对称性随腔长和时间变化的物理机制.

本文只是初步探讨, 还有很多问题, 如更高阶的不对称性, 推导的火箭模型只适用于中前期的加速阶段, 内爆后期的实验验证需更厚的壳等问题, 需实验、模拟和解析模型进一步深入分析; 内爆不对称性实验避开了 XFC 强度响应曲线定标、增益

不稳定等问题<sup>[24–26]</sup>, 但为诊断高压压缩比和更细致的靶丸变形过程, XFC 还需提高时空分辨, 优化能段; 需在其他时间段进一步实验探寻压缩变形过程和椭圆度变化规律, 验证黑腔辐射场不均匀性的演化导致内爆不对称性随时间变化的机制; 控制辐射场涨落幅度, 使经过一个完整的驱动过程后能达到球形内爆, 探寻到最佳的腔靶设计以最终实现点火.

感谢激光聚变研究中心神光 III 原型激光装置运行和靶制备的同事为实验提供的帮助. 感谢北京应用物理与计算数学研究所的吴畅书、赵益清、谷建法、康洞国等在物理方面的讨论.

- [1] Lindl J D 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [2] 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
- [3] Atzeni S, Meyer-ter-Vehn J 2003 *Inertial Fusion* (Oxford: Clarendon Press) p45
- [4] Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y, Liu S Y, Zheng Z J, Zhang B H, Huang T X, Li S W, Chen J B, Jiang X H, Yi R Q, Yang G H, Yang J M, Hu X, Cao Z R, Huang Y X 2009 *Sci. China G* **39** 1571 (in Chinese) [江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 刘慎业, 郑志坚, 张保汉, 黄天暉, 李三伟, 陈家斌, 蒋小华, 易荣清, 杨国洪, 杨家敏, 胡昕, 曹柱荣, 黄翼翔 2009 中国科学 G 辑 **39** 1571]
- [5] Hauer A, Delamater N, Ress D, Hsing W, Suter L, Powers L, Landen O, Harris D, Thiessen R, Magelssen G, Lindman E, Phillion D, Amendt P, Watt R, Hammel B 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 672
- [6] Hauer A, Suter L, Delamater N, Ress D, Powers L, Magelssen G, Harris D, Landen O, Lindmann E, Hsing W, Wilson D, Amendt P, Thiessen R, Kopp R, Phillion D, Hammel B, Baker D, Wallace J, Turner R, Cray M, Watt R, Kilkenny J, Mack J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 2488
- [7] Turner R E, Amendt P, Landen O L, Glendinning S G, Bell P, Decker C, Hammel B A, Kalantar D, Lee D, Wallace R, Bradley D, Cable M, Craxton R S, Kremens R, Seka W, Schnittman J, Thorp K, Murphy T J, Delamater N, Barnes C W, Hauer A, Magelssen G, Wallace J 2000 *Phys. Plasmas* **7** 333
- [8] Glenzer S H, MacGowan B J, Michel P, Meezan N B, Suter L J, Dixit S N, Kline J L, Kyrala G A, Bradley D K, Callahan D A, Dewald E L, Divol L, Dzenitis E, Edwards M J, Hamza A V, Haynam C A, Hinkel D E, Kalantar D H, Kilkenny J D, Landen O L, Lindl J D, LePape S, Moody J D, Nikroo A, Parham T, Schneider M B, Town R P J, Wegner P, Widmann K, Whitman P, Young B K F, van Wousterghem B, Atherton L J, Moses E I 2010 *Science* **327** 1228
- [9] Kilkenny J D 1991 *Laser Part. Beams* **9** 49
- [10] Eberhardt E H 1979 *Appl. Opt.* **18** 1418
- [11] Cheng J X, Chang Z H 1996 *High Power Laser Part. Beams* **8** 73 (in Chinese) [成金秀, 常增虎 1996 强激光与粒子束 **8** 73]
- [12] Cheng J X, Zheng Z J, Chen H S, Miao W Y, Chen B, Wang Y M, Hu X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3419 (in Chinese) [成金秀, 郑志坚, 陈红素, 缪文勇, 陈波, 王耀梅, 胡昕 2004 物理学报 **53** 3419]
- [13] Li H, Li S W, Zhou J Y, Zhang H Y, Cao Z R, Yi R Q, Liu S Y, Ding Y K 2009 *High Power Laser Part. Beams* **21** 699 (in Chinese) [黎航, 李三伟, 周近宇, 张海鹰, 曹柱荣, 易荣清, 刘慎业, 丁永坤 2009 强激光与粒子束 **21** 699]
- [14] Sun J W 2003 *High Temperature Plasma X-Ray Spectroscopy* (Beijing: National Defense Industry Press) p72 (in Chinese) [孙景文 2003 高温等离子体 X 射线谱学 (北京: 国防工业出版社) 第 72 页]
- [15] Rochau G A, Bailey J E, Chandler G A, Nash T J, Nielsen D S, Dunham G S, Garcia O F, Joseph N R, Keister J W, Madlener M J, Morgan D V, Moy K J, Wu M 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 4
- [16] Yuan Z, Liu S Y, Xiao S L, Cao Z R, Li H, Wang L W 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 2495 (in Chinese) [袁铮, 刘慎业, 肖沙里, 曹柱荣, 黎航, 王丽伟 2009 光子学报 **38** 2495]
- [17] Li H, Yang J M, Zhang H Y, Yu R Z, Wu S C, Zheng J H, Pu Y D, Lin Z W, Zhu T, Cao Z R, Miao W Y, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K 2012 *High Power Laser Part. Beams* **24** 2355 (in Chinese) [黎航, 杨家敏, 张海鹰, 于瑞珍, 巫顺超, 郑建华, 蒲昱东, 林雄伟, 朱托, 曹柱荣, 缪文勇, 刘慎业, 江少恩, 丁永坤 2012 强激光与粒子束 **24** 2355]
- [18] Zhou J Y, Huang T X, Meng L, Jiang W, Li H, Zhang H Y, Zhao Z Q, Yang D 2008 *High Power Laser Part. Beams* **20** 1658 (in Chinese) [周近宇, 黄天暉, 蒙林, 蒋炜, 黎航, 张海鹰, 赵宗清, 杨冬 2008 强激光与粒子束 **20** 1658]
- [19] Zhou J Y, Huang T X, Meng L, Jiang W, Li H, Zhang H Y 2010 *High Power Laser Part. Beams* **22** 1053 (in Chinese) [周近宇, 黄天暉, 蒙林, 蒋炜, 黎航, 张海鹰 2010 强激光与粒子束 **22** 1053]
- [20] Zhou J Y, Huang T X, Meng L, Jiang W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1913 (in Chinese) [周近宇, 黄天暉, 蒙林, 蒋炜 2010 物理学报 **59** 1913]
- [21] Jing L F, Huang T X, Jiang S E, Chen B L, Pu Y D, Hu F, Chen S B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 105205 (in Chinese) [景龙飞, 黄天暉, 江少恩, 陈伯伦, 蒲昱东, 胡峰, 程书博 2012 物理学报 **61** 105205]
- [22] Jing L F, Huang T X, Chen B L, Su M, Yu B, Jiang W, Pu Y D, Yan J 2011 *High Power Laser Part. Beams* **23** 2409 (in Chinese) [景龙飞, 黄天暉, 陈伯伦, 苏明, 余波, 蒋炜, 蒲昱东, 晏骥 2011 强激光与粒子束 **23** 2409]
- [23] Pu Y D, Huang T X, Li H, Zhan X Y, Peng X S, Tang Q, Song Z F, Chen J B, Song T M, Chen M, Yu R Z, He X A, Li C G, Zhang L, Zheng J H, Jing L F, Chen B L, Su M, Jiang W, Yu B, Yan J, Li P, Lei H L, Jiang S E, Ding Y K 2012 *Phys. Plasmas* **19** 072708
- [24] Yuan Z, Liu S Y, Cao Z R, Xiao S L, Li H, Zhang H Y, Wang L W 2009 *High Power Laser Part. Beams* **21** 704 (in Chinese) [袁铮, 刘慎业, 曹柱荣, 肖沙里, 黎航, 张海鹰, 王丽伟 2009 强激光与粒子束 **21** 704]
- [25] McCarville T, Fulkerson S, Booth R, Emig J, Young B, Anderson S, Heeter B 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 103501
- [26] Horsfield C J, Parker K W, Rothman S D, Fincke J, Lanier N E 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3947

# Variations of implosion asymmetry with hohlraum length and time in indirect-drive inertial confinement fusion

Li Hang<sup>1)2)</sup> Pu Yu-Dong<sup>2)</sup> Jing Long-Fei<sup>2)</sup> Lin Zhi-Wei<sup>2)</sup> Chen Bo-Lun<sup>2)</sup>  
Jiang Wei<sup>1)2)</sup> Zhou Jin-Yu<sup>2)</sup> Huang Tian-Xuan<sup>2)†</sup> Zhang Hai-Ying<sup>2)</sup> Yu Rui-Zhen<sup>2)</sup>  
Zhang Ji-Yan<sup>2)</sup> Miao Wen-Yong<sup>2)</sup> Zheng Zhi-Jian<sup>2)</sup> Cao Zhu-Rong<sup>2)</sup>  
Yang Jia-Min<sup>2)</sup> Liu Shen-Ye<sup>2)</sup> Jiang Shao-En<sup>2)</sup> Ding Yong-Kun<sup>1)2)</sup>  
Kuang Long-Yu<sup>1)2)</sup> Hu Guang-Yue<sup>1)</sup> Zheng Jian<sup>1)</sup>

1) (CAS Key Laboratory of Basic Plasma Physics and Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

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

(Received 30 March 2013; revised manuscript received 30 June 2013)

## Abstract

In order to achieve the high density compression in laser indirect-drive inertial confinement fusion, the implosion symmetry and hohlraum radiation uniformity are strictly required. To study the variations of implosion asymmetry with hohlraum length and time, three kinds of hohlraum lengths are adopted in experiment. X-ray emission from capsule fuel is measured by an X-ray framing camera. Based on measured capsule compression process and ellipticity variation, it is preliminarily judged that the medium hohlraum of 1700  $\mu\text{m}$  long is the closest to implosion symmetry demand of Shengguang III prototype laser facility. Time-resolved implosion asymmetry is derived from a simplified analytic model, in which used is the time-resolved hohlraum radiation nonuniformity derived from a view-factor code. The derived results of the time-resolved implosion asymmetry are basically in agreement with experimental results. The physical mechanism for how hohlraum radiation nonuniformity evolution induces the variations of implosion asymmetry with hohlraum length and time is analyzed.

**Keywords:** implosion asymmetry, hohlraum radiation nonuniformity, hohlraum length, view-factor code

**PACS:** 52.57.Fg, 52.70.La, 52.50.Jm

**DOI:** 10.7498/aps.62.225204

† Corresponding author. E-mail: huangtx2002@yahoo.com.cn