

神光 III 主机极向驱动靶丸表面辐照均匀性

余波 丁永坤 蒋炜 黄天暄 陈伯伦 蒲昱东 晏骥 陈忠靖 张兴 杨家敏 江少恩 郑坚

Laser irradiation uniformity for polar direct drive on ShenGuang III facility

Yu Bo Ding Yong-Kun Jiang Wei Huang Tian-Xuan Chen Bo-Lun Pu Yu-Dong Yan Ji Chen Zhong-Jing Zhang Xing Yang Jia-Min Jiang Shao-En Zheng Jian

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), **66**, 145202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.145202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.145202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2017/V66/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光束参量优化实现直接驱动靶丸均匀辐照

[Uniform irradiation of a direct drive target by optimizing the beam parameters](#)

物理学报.2017, 66(10): 105202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.105202>

气相沉积法制备聚酰亚胺薄膜不同单体配比的表征及其性能影响

[Characterization and properties of polyimide films prepared in different monomer ratios by vapor deposited polymerization](#)

物理学报.2016, 65(3): 035203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.035203>

黑腔冷冻靶传热与自然对流的数值模拟研究

[Numerical simulation of heat transfer and natural convection of the indirect-driven cryogenic target](#)

物理学报.2015, 64(21): 215201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.215201>

甚多束激光直接驱动靶面辐照均匀性研究

[Capsule illumination uniformity illuminated by direct laser-driven irradiation from several tens of directions](#)

物理学报.2015, 64(19): 195203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.195203>

球形黑腔辐射输运问题的蒙特卡罗模拟

[Monte Carlo simulation of the radiation transport of spherical holraum](#)

物理学报.2015, 64(14): 145203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.145203>

神光III主机极向驱动靶丸表面辐照均匀性

余波^{1)2)†} 丁永坤¹⁾³⁾ 蒋炜¹⁾²⁾ 黄天暄²⁾ 陈伯伦²⁾ 蒲昱东²⁾ 晏骥²⁾
陈忠靖²⁾ 张兴²⁾ 杨家敏²⁾ 江少恩²⁾ 郑坚¹⁾

1)(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

2)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

3)(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2017年3月26日收到; 2017年5月2日收到修改稿)

极向驱动是在间接驱动构型的激光装置中, 通过重瞄各束激光的位置, 实现较均匀的靶丸表面激光辐照, 以研究直接驱动惯性约束聚变的关键物理问题. 介绍了神光III主机装置的激光排布和焦斑特点, 以及激光束重瞄方法和靶丸表面激光辐照均匀性优化原则. 给出了三阶和五阶超高斯近似下的激光焦斑强度分布, $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸在能量沉积满足 $\cos^2 \gamma$ 和 $\cos \gamma$ 假设时靶丸表面最均匀辐照的移束参数, 以及二维辐射流体程序模拟最优移束时的内爆对称性结果. 二维模拟结果表明, 按 $\cos \gamma$ 假设移束的热斑更对称. 分析了激光的束间功率不平衡、激光束重瞄精度和靶丸定位精度对靶丸表面辐照均匀性的影响. 模拟结果表明, 为了不显著降低靶丸表面辐照均匀性, 需要将束间功率不平衡控制在5%以内, 激光束重瞄精度和靶丸定位精度控制在 $7 \mu\text{m}$ 以内.

关键词: 极向驱动, 辐照均匀性, 激光重瞄

PACS: 52.57.-z, 52.57.Fg, 02.60.Pn

DOI: 10.7498/aps.66.145202

1 引言

惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)利用强激光等提供的能量驱动靶丸聚心压缩, 使靶丸内氘氚燃料在中心区域形成聚变点火所需的高温高密度等离子体条件, 实现热核点火, 并产生自持热核聚变反应, 释放聚变能^[1,2]. 激光ICF包括间接驱动^[3,4]和直接驱动^[5,6]两种方式. 间接驱动通过黑腔将激光能量转换成X射线, 辐射烧蚀驱动靶丸内爆, 其对流体力学不稳定性有较好的抑制; 直接驱动则使用激光均匀地辐照靶丸, 电子烧蚀驱动靶丸内爆, 其流体力学不稳定性严重.

间接驱动方式是目前ICF研究的重点, 实验上取得一系列重要进展, 但点火实验受挫^[7], 未能按期实现点火. 主要原因为内环激光等离子体相互作用严重, 致使驱动对称性和能量耦合效率较差, 且

靶丸压缩存在较大的低阶模不对称性和严重的热斑混合. 作为备选的点火方式, 直接驱动靶结构简单, 激光靶能量耦合效率高, 诊断更为方便, 调控更加容易. 近年来, 多束组大型激光装置的建设 and 束匀滑技术的提升给直接驱动方式带来了新的机遇, 有助于解决间接驱动内爆中存在的一些关键问题.

直接驱动需要抑制流体力学不稳定性, 对激光束辐照均匀性有很高的要求, 需要驱动源多束、同步、对称. 为了在已建成的间接驱动构型激光装置上开展直接驱动研究, 提出了极向驱动^[8-10]方案. 部分光束通过重瞄, 指向更靠近赤道, 以弥补激光大入射角度(激光束与靶面法向的夹角, 文中定义为 γ)下的低吸收效率, 获得均匀的辐照驱动. Craxton等^[11-14]利用Omega装置60束中的40束(极角 $\theta = 21^\circ, 42^\circ, 59^\circ$)模拟国家点火装置^[15](National Ignition Facility, NIF)的激光排布, 开展了极向驱动靶丸、激光脉冲及重瞄参数设计, 实验

† 通信作者. E-mail: yubobnu@163.com

验证极向驱动原理和校验数值程序. NIF在专用相位板等硬件未加工安装前,开展了激光靶耦合、对称性调控、激光等离子体相互作用等研究^[16-19],还计划开展流体力学不稳定性、束间能量转移、双等离子体衰变等实验. Temporal等^[20]和 Ramis等^[21]对兆焦耳激光装置(Laser Megajoule, LMJ)直接驱动的辐照均匀性进行了数值优化. 邓学伟等^[22]使用球谐模分析方法,从纯光学角度对神光III主机装置^[23]靶面辐照均匀性进行了初步优化.

本文介绍了神光III主机装置^[23]极向驱动下的靶丸辐照均匀性设计. 介绍了神光III主机装置的激光排布和焦斑特点,以及极向驱动的激光束重瞄方法和靶丸表面激光辐照均匀性优化原则. 给出了三阶和五阶超高斯近似下的激光焦斑强度分布,以及 $\Phi 540\ \mu\text{m}$ 靶丸在能量沉积满足 $\cos^2\gamma$ ^[24]和 $\cos\gamma$ 假设时靶丸最均匀辐照的移束参数,并使用二维辐射流体程序对移束参数进行验证. 最后分析了激光的束间功率不平衡、激光束重瞄精度和靶丸定位精度对靶丸辐照均匀性的影响.

2 激光束重瞄方法

直接驱动是使用激光直接辐照聚变靶丸,对激光辐照均匀性要求很高. 在间接驱动构型的激光装置上开展直接驱动实验,首先需要考虑的是激光辐照驱动的均匀性. 间接驱动为了在黑腔内高效地产生均匀辐射场,选择从黑腔两端的注入口注入激光,所以激光的注入角度(光束与腔轴夹角)较窄(一般为 $20^\circ\text{--}60^\circ$),缺少直接驱动赤道区要求的大角度入射激光. 因此,极向驱动需要重瞄激光光束,特别是增强赤道区的驱动,以获得较为均匀的激光辐照驱动.

神光III主机装置^[23]是铷玻璃激光装置,共48束激光,输出的三倍频激光能量为 $180\ \text{kJ}/10\ \text{ns}$,具备脉冲时间波形整形能力,目前的输出规模仅次于NIF^[15]($1.8\ \text{MJ}/192\ \text{束}$). 神光III主机装置的48束激光分别从上下半球的四个环入射($\theta = 28.5^\circ, 35^\circ, 49.5^\circ, 55^\circ$),各环对应的激光束为4, 4, 8, 8. 相邻入射角度的激光错开 45° 或 22.5° ,上下半球的激光错开 22.5° ,如图1所示.

神光III主机装置的48束激光均设计使用连续相位板(continuous phase plate, CPP)^[25]进行光束匀滑,匀滑后的激光在间接驱动黑腔注入口的焦

斑形状为圆形,焦斑尺寸为 $\Phi 500\ \mu\text{m}$. 由投影关系图2可知,在注入口平面为圆形的激光,其光束截面为椭圆,意味着当神光III主机装置的激光用于直接驱动实验时,辐照在靶丸表面的激光焦斑为椭圆,椭圆焦斑的半长轴为 $250\ \mu\text{m}$,半短轴由激光入射角度决定.

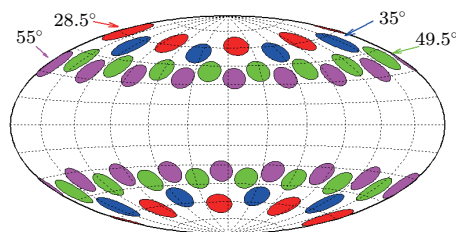


图1 (网刊彩色) 神光III主机装置的激光排布

Fig. 1. (color online) The beam port positions of the SGIII.

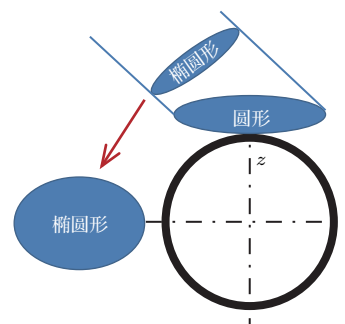


图2 激光焦斑形状

Fig. 2. The shape of laser spot.

不考虑激光束重瞄时,激光全部瞄准至靶室中心,致使靶丸极区和赤道区辐照较弱,靶丸的辐照均匀性较差. 为了改善靶丸表面的辐照驱动均匀性,必须进行激光重瞄. 激光束重瞄时,激光瞄准点的偏移为百微米量级,远小于靶室半径(3 m),重瞄过程可等效于激光束平移. 四环激光的平移距离用 $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3, \Delta r_4$ 表示,正号表示激光往赤道区移动,负号表示激光往极区移动,如图3所示. 为了避免奇数阶的不对称性,上下半球同环激光的移束方向和大小一致.

激光束重瞄能够补偿赤道区的辐照驱动不足,改善靶丸表面辐照均匀性,但也可能出现其他问题:比如平移可能会造成光束边缘能量丢失;靶球的几何形状使得光束中每根射线到达靶面的光程不同,即产生时变的辐照不均匀性;赤道区的大量光束交叉使得束间能量转移效应比较严重;初期形成的等离子体会偏转光束,使激光能量沉积在远烧蚀面的位置,不能有效地沉积在临界密度面等.

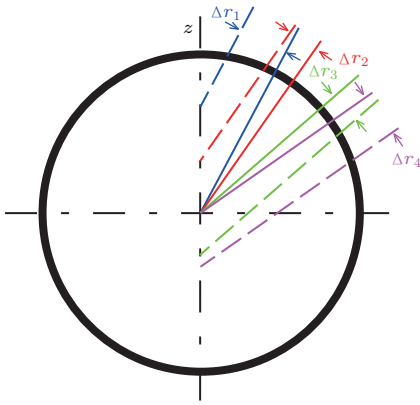


图3 (网刊彩色) 激光束重瞄示意图

Fig. 3. (color online) The laser beam repointing strategy.

3 靶丸辐照均匀性优化

3.1 优化原则

为了优化激光束重瞄位置, 得到最优的辐照均匀性, 使用三维视角因子方法^[26]计算到达靶丸表面的激光强度分布, 也即靶丸辐照均匀性. 由于靶丸对激光的能量吸收与激光的入射角度有关, 进行靶丸表面辐照均匀性分析时, 假设靶丸能量吸收与 $\cos \gamma$ 有关, 以补偿斜入射造成的吸收降低. 文献^[24]的研究结果表明, 激光能量沉积满足 $\cos^2 \gamma$ 分布, 本文同时计算了满足 $\cos \gamma$ 分布时的情况.

在靶丸辐照均匀性优化中, 为了最大化地利用激光装置的输出能力, 优化只涉及激光束重瞄, 不调整各环的激光功率; 为了减小激光束交叉引起的束间能量转移效应, 激光束的移束范围仅限于对应的入射半球, 并限制各环激光的交叉. 此外, 模拟时不考虑焦斑本身的不均匀性和激光的束间能量转移.

靶丸表面激光辐照均匀性由均方根 (root mean square, RMS) 进行评估^[20]:

$$f_{\text{RMS}} = \frac{1}{\langle I \rangle} \times \left\{ \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} [I(\theta, \phi) - \langle I \rangle]^2 \sin \theta d\theta d\phi \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中 $I(\theta, \phi)$ 为靶丸表面激光强度, $\langle I \rangle$ 为靶丸表面的平均强度. 理论上, 靶丸表面均匀性越差, RMS 越大.

Omega 的实验结果表明^[27], 激光焦斑半径小于靶丸半径的 $4/5$ 时, 辐照均匀性会显著变差, 致使内爆中子产额急剧降低. 综合考虑制靶技术和神

光 III 主机装置的焦斑尺寸, 选择 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸作为辐照均匀性研究对象, 为极向驱动爆推靶实验做准备.

与靶丸辐照均匀性密切相关的还有激光焦斑的强度分布. 使用 CPP 时神光 III 主机装置的激光焦斑强度可近似为超高斯分布^[12], 且在间接驱动黑腔注入入口平面为圆形, 所以神光 III 主机装置的激光焦斑横截面强度分布为

$$I(x, y) = I_0 \exp \left\{ - \left[\left(\frac{r_x}{\delta} \right)^2 + \left(\frac{r_y}{\delta \cos \theta} \right)^2 \right]^n \right\}, \quad (2)$$

式中 n 为阶数, 对于神光 III 主机装置可近似为 3 或 5; δ 为激光焦斑的 $1/e$ 半径; r_x 和 r_y 分别为椭圆焦斑的半长轴和半短轴. 已知激光焦斑直径和阶数 n , 可得参数 δ , 即可确定各环激光焦斑的光强分布.

3.2 三阶超高斯焦斑

在单束激光的能量为 $1 \text{ kJ}/1 \text{ ns}$ 时, 三阶超高斯近似下的激光焦斑形状和强度分布如图 4 所示. 焦斑的长轴不受激光入射角度的影响, 半长轴为 $250 \mu\text{m}$, 而短轴与激光入射角度有关, 入射角度越大, 短轴越短. 因此, 激光焦斑强度也与激光入射角度有关, 入射角度越大, 激光焦斑的短轴越短 (长轴不变), 在每束激光功率相同时, 焦斑功率密度也就越高, 最高可达 $1.8 \times 10^{15} \text{ W}/\text{cm}^2$.

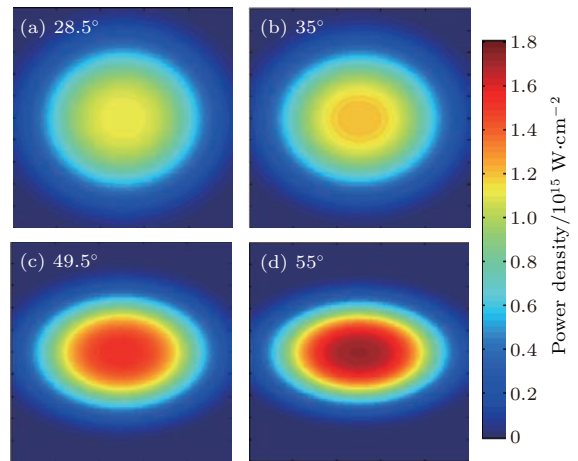


图4 (网刊彩色) 不同激光入射角度下三阶超高斯焦斑的光强分布

Fig. 4. (color online) The laser intensity distribution of third-order super-Gaussian spot at various incidence angles.

图 5 所示为三阶超高斯近似下优化得到的 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸表面最均匀激光辐照, 图中的靶面

光强进行了归一. 为了最大程度地利用激光能量, 优化时假定每束激光的功率相同. 当能量沉积满足 $\cos^2 \gamma$ 分布时, 优化得到的 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸最优辐照对应的四环激光分别移束 $-48, -4, 42, 127 \mu\text{m}$, 靶丸表面 RMS 为 2.88%. 当能量沉积满足 $\cos \gamma$ 分布时, 优化得到的 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸最优辐照对应的四环激光分别移束 $-48, -13, 27, 119 \mu\text{m}$, 靶丸表面 RMS 为 2.70%.

在三阶超高斯近似下优化 $\Phi 510\text{--}570 \mu\text{m}$ 靶丸的激光辐照, 得到的最优移束参数如图 6 所示.

28.5° 和 35° 激光移束参数主要受靶丸边缘的限制, 且靶丸直径的变化对激光入射角度基本无影响, 所以两种假设的移束值几乎相同. 55° 激光移束参数也主要受靶丸边缘的限制, 靶丸直径较小时两种假设的移束值几乎相同. 能量沉积满足 $\cos \gamma$ 假设时, 赤道区大角度入射激光的能量吸收效率会高于 $\cos^2 \gamma$ 假设, 所以 49.5° 激光对 55° 激光的补偿减少, 即 $\cos \gamma$ 假设时 49.5° 激光往赤道区的移束参数小. $\cos^2 \gamma$ 假设对靶丸 $\Phi 535 \mu\text{m}$ 有明显 RMS 谷值, 而 $\cos \gamma$ 假设无此现象.

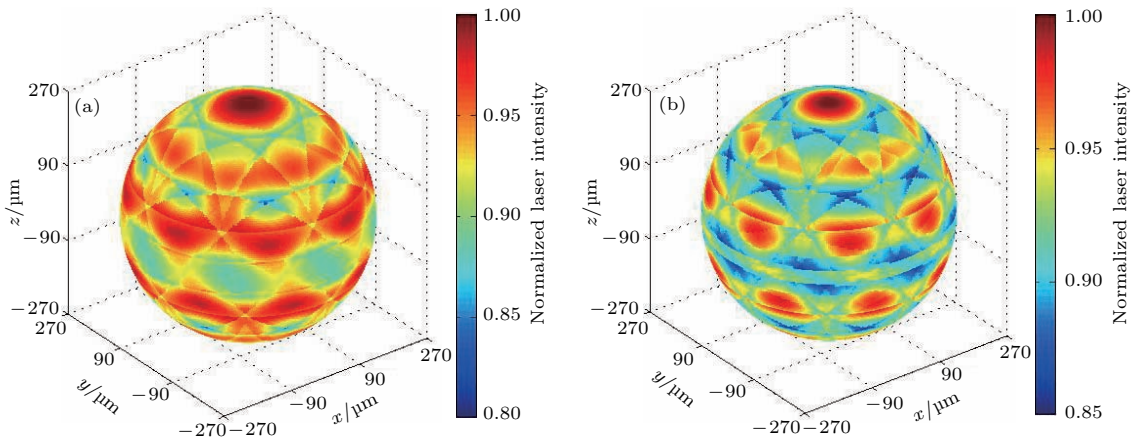


图 5 (网刊彩色) 三阶超高斯近似下 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸的最均匀辐照 (a) 满足 $\cos^2 \gamma$ 分布; (b) 满足 $\cos \gamma$ 分布
Fig. 5. (color online) The irradiation uniformity on $\Phi 540 \mu\text{m}$ capsule when $n = 3$: (a) Conforming to $\cos^2 \gamma$ distribution; (b) conforming to $\cos \gamma$ distribution.

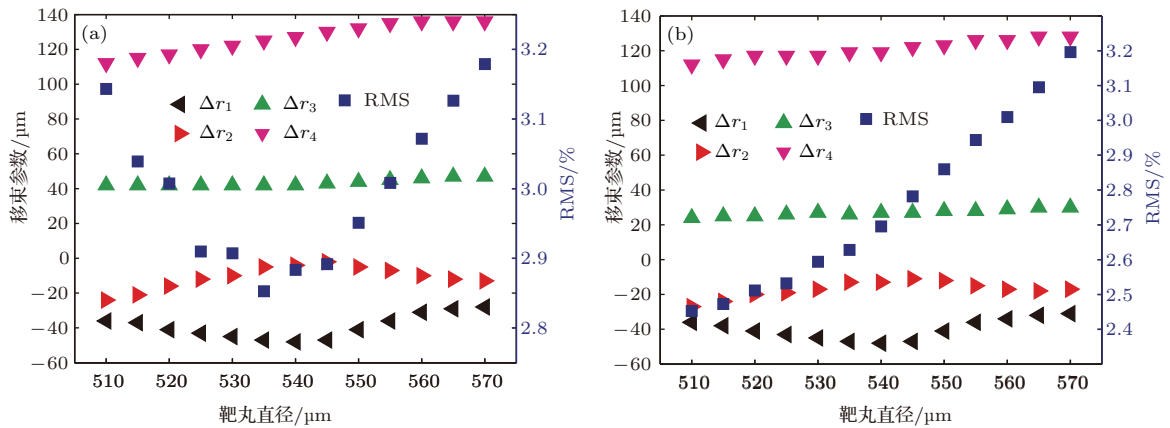


图 6 (网刊彩色) 三阶超高斯近似下不同直径靶丸的移束参数 (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$
Fig. 6. (color online) Repointing parameters of capsules with different diameters when $n = 3$: (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$.

3.3 五阶超高斯焦斑

神光 III 主机装置的实际焦斑光强分布更接近于五阶超高斯分布. 单束激光的能量为 $1 \text{ kJ}/1 \text{ ns}$ 时, 五阶超高斯近似下的激光焦斑尺寸和强度分布如图 7 所示. 与三阶超高斯近似相同, 椭圆焦

斑的长轴不受入射角度的影响, 半长轴为 $250 \mu\text{m}$; 短轴与激光入射角度有关, 入射角度越大, 短轴越短, 焦斑越小, 其功率密度也就越高, 最高可达 $1.4 \times 10^{15} \text{ W}/\text{cm}^2$. 由于五阶超高斯近似时的光强分布更分散, 其焦斑的整体功率密度小于三阶超高斯近似.

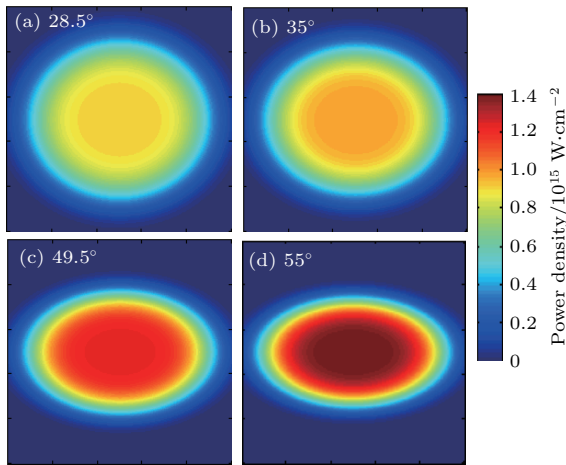


图7 (网刊彩色) 五阶超高斯焦斑的光强分布
Fig. 7. (color online) The laser intensity distribution of fifth-order super-Gaussian spot.

图8为五阶超高斯近似下, 优化得到的 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸最均匀的激光辐照, 图中的靶面光强进行了归一化处理. 当能量沉积满足 $\cos^2\gamma$ 分布时, 优化得到的 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸最均匀辐照对应的四

环激光分别移束 $-51, -29, 47, 116 \mu\text{m}$, 靶丸表面RMS为4.30%. 当能量沉积满足 $\cos\gamma$ 分布时, 优化得到的 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸最均匀辐照对应的四环激光分别移束 $-51, -36, 35, 99 \mu\text{m}$, 靶丸表面RMS为3.49%. 对比三阶超高斯近似的结果, 五阶超高斯近似的靶丸表面RMS变差, 主要是因为五阶超高斯焦斑的高强度部分较大, 重叠区变大.

在五阶超高斯近似下优化 $\Phi 510\text{--}570 \mu\text{m}$ 靶丸表面的最优激光辐照, 得到的移束参数如图9所示. 五阶超高斯近似时变化规律和三阶超高斯近似时类似: 28.5° 和 35° 激光移束距离主要受靶丸边缘的限制, 两种假设的移束值几乎相同; 55° 激光移束也主要受靶丸边缘的限制, 靶丸直径较小时两种假设的移束值几乎相同; 49.5° 激光主要受 55° 激光移束参数的影响, $\cos\gamma$ 假设对赤道区的补偿比 $\cos^2\gamma$ 假设小, 所以 49.5° 激光往赤道区的移束距离减小.

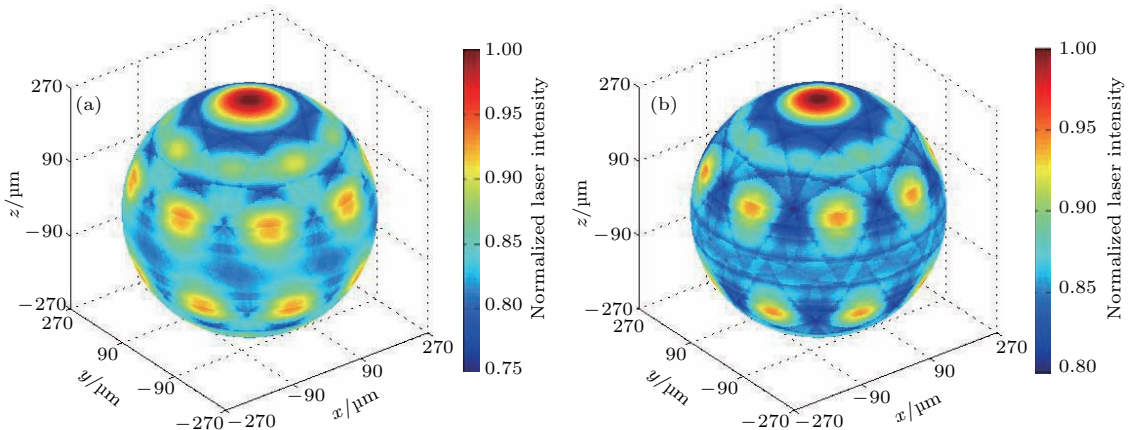


图8 (网刊彩色) 五阶超高斯近似下 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸的最均匀辐照 (a) $\cos^2\gamma$; (b) $\cos\gamma$

Fig. 8. (color online) The irradiation uniformity on $\Phi 540 \mu\text{m}$ capsule when $n = 5$: (a) $\cos^2\gamma$; (b) $\cos\gamma$.

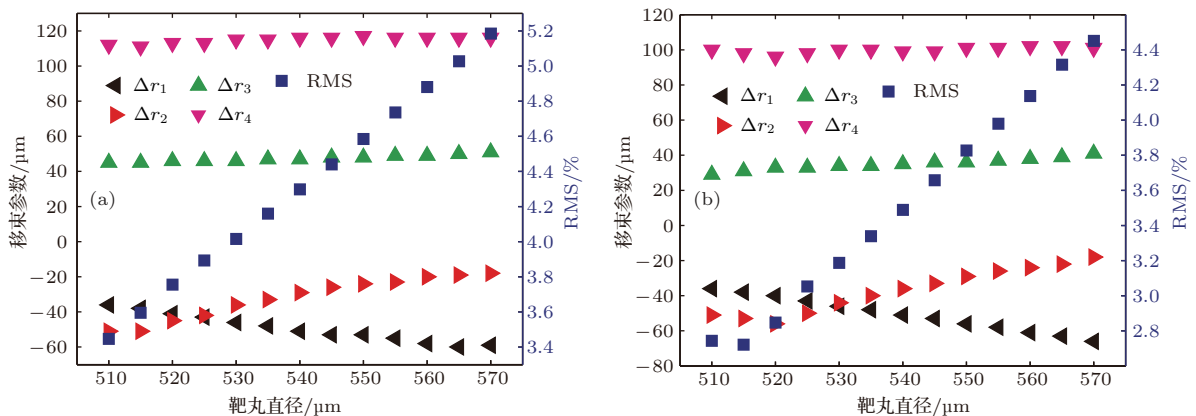


图9 (网刊彩色) 五阶超高斯近似下不同直径靶丸的移束参数 (a) $\cos^2\gamma$; (b) $\cos\gamma$

Fig. 9. (color online) Repointing parameters of capsules with different diameters when $n = 5$: (a) $\cos^2\gamma$; (b) $\cos\gamma$.

3.4 二维对称性分析

三维视角因子方法计算靶丸表面辐照均匀性是一种解析方法, 激光的吸收效率用与入射激光和靶面法线夹角有关的经验函数近似, 此方法的优点是计算速度快, 但与激光在靶丸表面的真实吸收过程有较大差异. 为此, 我们使用 Multi2D^[28] 对靶丸压缩的最终状态进行模拟. Multi2D 包含三维光线追踪和二维辐射流体模拟, 激光通过逆韧致吸收在靶丸临界密度面沉积能量, 但不包括束间能量转移过程.

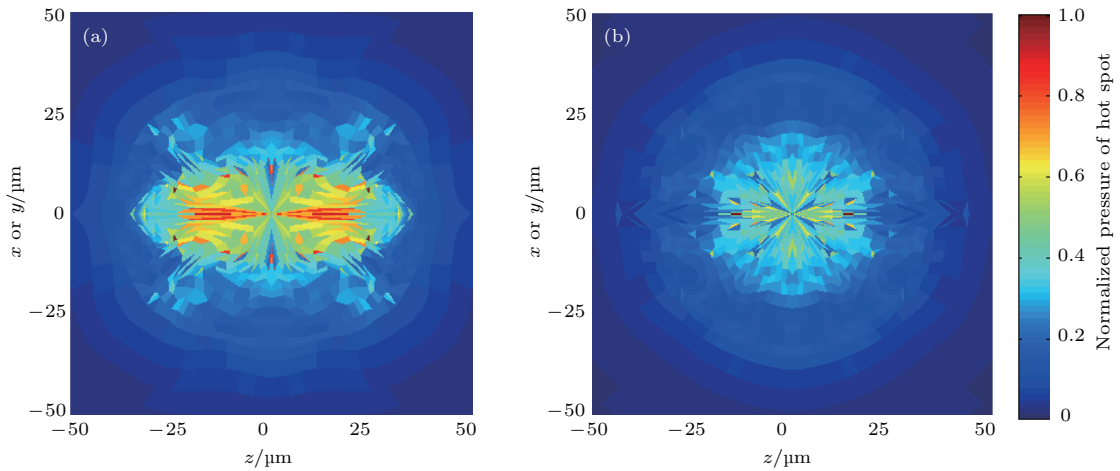


图 10 (网刊彩色) 热斑压力的二维分布 (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$

Fig. 10. (color online) Pressure distribution of the hot spot: (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$.

图 10 所示为模拟 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸在五阶超高斯焦斑移束参数下, 靶丸峰值反应时刻的热斑压力分布, 其中横向为靶室 z 轴. $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸的玻璃壳层厚 $2.6 \mu\text{m}$, CH 层厚 $1 \mu\text{m}$, 充 40 atm ($1 \text{ atm} = 1.0125 \times 10^5 \text{ Pa}$) DT 燃料. 驱动激光的移束参数选用靶丸最均匀辐照时的移束参数, 如图 8 所示. 二维辐射流体模拟结果表明, 按 $\cos^2 \gamma$ 假设移束时的热斑被压缩为香肠型, 而按 $\cos \gamma$ 假设移束时的热斑更对称, 能量沉积更满足 $\cos \gamma$ 分布.

4 激光和靶定位的影响

前文中靶丸表面激光辐照均匀性优化仅仅针对激光束的重瞄位置, 没有考虑激光的束间功率不平衡, 以及激光束重瞄和靶丸定位误差对靶丸辐照均匀性的影响. 实际上, 由于工程技术水平的限制, 每束激光的输出功率和重瞄位置、靶丸定位均会有偏差, 会对靶丸表面辐照均匀性产生较大影响, 这可以使用蒙特卡罗方法进行模拟分析. 模拟时, 分别对每束激光的功率和重瞄位置、靶丸定位位置添加随机扰动, 统计各扰动量与靶丸表面 RMS 的关系, 即可得到激光和靶丸定位精度对靶丸表面辐照均匀性的影响. 模拟使用 $\Phi 540 \mu\text{m}$ 靶丸, 激光焦斑采用五阶超高斯近似, 并基于最优移束参数.

单束激光从毫焦增益至千焦增益是一个复杂的非线性过程, 必然造成每束激光能量的抖动, 即束间功率不平衡. 进行蒙特卡罗模拟时, 对每束激

光的功率添加随机扰动(即束间功率不平衡), 然后在最优移束参数下计算靶丸表面辐照均匀性, 即 RMS. 统计计算结果, 得到激光束间功率不平衡对靶丸辐照均匀性的影响, 如图 11 所示. 从模拟结果可知, 束间功率平衡越差, 越可能造成靶丸表面的辐照不均匀. 为了不对靶丸表面的辐照均匀性造成显著影响 (RMS 变差 20%), 需要将激光的束间功率不平衡控制在 5% 以内.

神光 III 主机的靶室直径为 6 m , 激光束聚焦透镜的焦距较大, 激光束重瞄通过改变终端光学组件中反射镜的角度来实现, 反射镜微小的角度误差会造成激光束重瞄的巨大偏差. 图 12 所示为模拟最优移束参数下, 激光束重瞄精度对靶丸辐照均匀性的影响. 重瞄精度通过对每束激光的移束参数微扰控制. 从模拟结果可知, 激光束重瞄精度越低, 越可能造成靶丸表面的辐照不均匀. 为了不会显著降低靶丸表面的辐照均匀性, 激光束重瞄精度需要控制在 $7 \mu\text{m}$ 以内.

神光III主机直接驱动内爆使用的靶丸直径在百微米量级,靶丸通过外轮廓实现在靶室中心的定位,外轮廓提取误差和靶室基准误差都会影响靶丸表面辐照均匀性.图13所示为模拟最优移束参数下,靶丸定位精度对靶丸辐照均匀性的影响.靶丸定位精度通过靶丸球心坐标微扰控制.从模拟

结果可知,靶丸定位精度越低,靶丸表面的辐照均匀性越差.与激光束重瞄精度的单束效应不同,靶丸定位误差会影响所有激光束的瞄准,无法通过激光束之间相互补偿.为了不使靶丸表面的辐照均匀性显著变差,靶丸定位精度需要控制在7 μm以内.

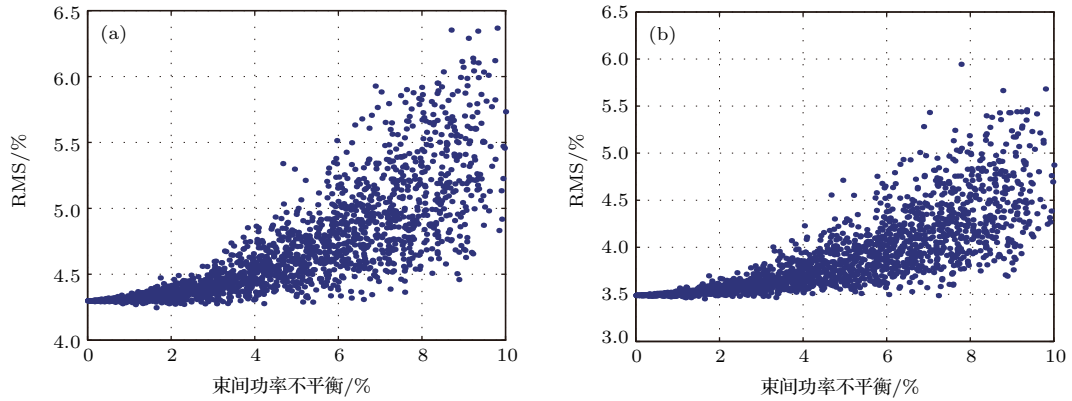


图11 激光的束间功率不平衡对靶丸辐照均匀性的影响 (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$

Fig. 11. The effect of the power imbalance on irradiation uniformity: (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$.

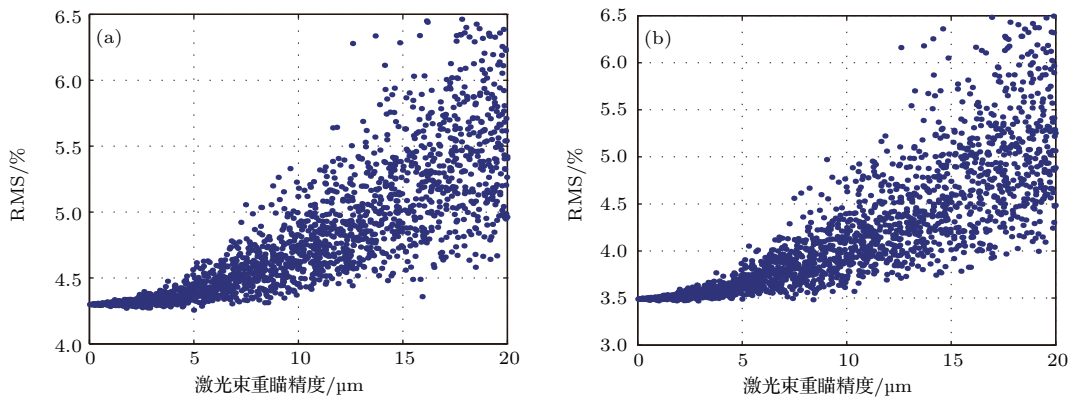


图12 激光束的重瞄精度对靶丸辐照均匀性的影响 (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$

Fig. 12. The effect of the repointing error on irradiation uniformity: (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$.

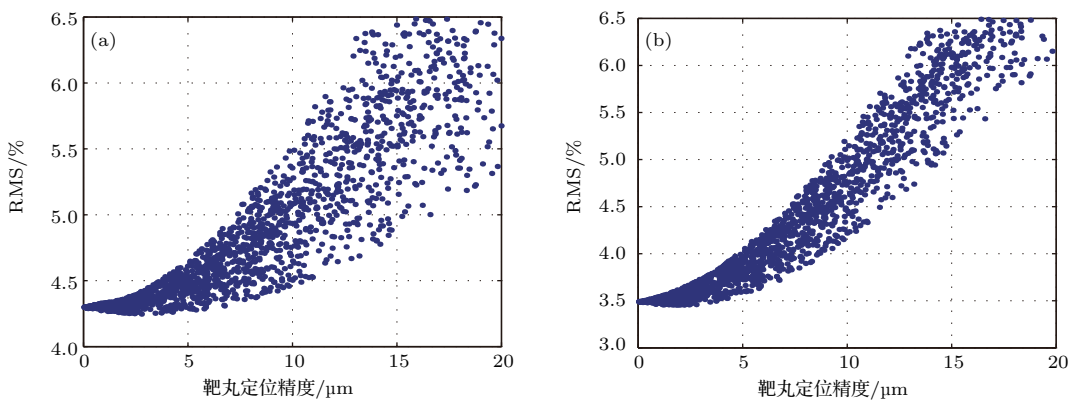


图13 靶丸定位精度对靶丸辐照均匀性的影响 (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$

Fig. 13. The effect of the target pointing error on irradiation uniformity: (a) $\cos^2 \gamma$; (b) $\cos \gamma$.

5 结 论

直接驱动是ICF的点火方式之一,具有靶简单、能量耦合效率高等优点.为了在间接驱动构型的激光装置中开展直接驱动研究,通过重瞄各束激光位置而不改变激光器构型的极向驱动方式开始用于研究直接驱动中的一些关键问题,比如对称性调控、束间能量转移、激光等离子体相互作用等.

为了在神光III主机开展直接驱动内爆实验,使用三维视角因子程序对 $\Phi 540\ \mu\text{m}$ 靶丸的激光重瞄参数进行了优化.模拟了三阶和五阶超高斯近似的两种焦斑,对比了能量沉积满足 $\cos^2\gamma$ 和 $\cos\gamma$ 的两种分布,并用二维辐射流体程序对两种移束参数进行验证.模拟结果表明,五阶超高斯近似焦斑按 $\cos\gamma$ 假设移束时的热斑更对称,四环的移束值分别为 $-51, -36, 35, 99\ \mu\text{m}$,靶丸表面的RMS为3.49%.此外,激光的束间功率不平衡、激光束重瞄精度和靶丸定位精度对靶丸辐照均匀性有直接影响.分析结果表明,为了不显著降低靶丸表面的辐照均匀性,需要将激光的束间功率不平衡控制在5%以内,激光束重瞄精度和靶丸定位精度需要控制在 $7\ \mu\text{m}$ 以内.

模拟使用的三维视角因子程序较为简单方便,计算速度快,但不能真实再现激光吸收过程,也无法考虑束间能量转移,对辐照均匀性的模拟结果需经过实验校验.另外, CPP虽能匀滑激光焦斑,但其效果有限,模拟未考虑焦斑的不均匀性.此外,靶丸球形度、靶支撑杆等缺陷对辐照均匀性的影响也需进一步考虑.

参考文献

- [1] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, Zimmerman G 1972 *Nature* **239** 129
- [2] Atzeni S, Meyer-ter-Vehn J 2004 *The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter* (Oxford: Clarendon Press) p32
- [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] Bodner S E, Colombant D G, Gardner J H, Lehmberg R H, Obenshain S P, Phillips L, Schmitt A J, Sethian J D, McCrory R L, Seka W, Verdon C P, Knauer J P, Afeyan B B, Powell H T 1998 *Phys. Plasmas* **5** 1901
- [6] Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, Goncharov V N, Harding D R, Knauer J P, McCrory R L, McKenty P W, Meyerhofer D D, Myatt J F, Schmitt A J, Sethian J D, Short R W, Skupsky S, Theobald W, Kruer W L, Tanaka K, Betti R, Collins T J B, Delettrez J A, Hu S X, Marozas J A, Maximov A V, Michel D T, Radha P B, Regan S P, Sangster T C, Seka W, Solodov A A, Soures J M, Stoeckl C, Zuegel J D 2015 *Phys. Plasmas* **22** 110501
- [7] Lindl J, Landen O, Edwards J, Moses E D, NIC Team 2014 *Phys. Plasmas* **21** 020501
- [8] Skupsky S, Marozas J A, Craxton R S, Betti R, Collins T J B, Delettrez J A, Goncharov V N, McKenty P W, Radha P B, Boehly T R, Knauer J P, Marshall F J, Harding D R, Kilkenny J D, Meyerhofer D D, Sangster T C, McCrory R L 2004 *Phys. Plasmas* **11** 2763
- [9] Cok A M, Craxton R S, McKenty P W 2008 *Phys. Plasmas* **15** 082705
- [10] Collins T J B, Marozas J A, Anderson K S, Betti R, Craxton R S, Delettrez J A, Goncharov V N, Harding D R, Marshall F J, McCrory R L, Meyerhofer D D, McKenty P W, Radha P B, Shvydky A, Skupsky S, Zuegel J D 2012 *Phys. Plasmas* **19** 056308
- [11] Craxton R S, Marshall F J, Bonino M J, Epstein R, McKenty P W, Skupsky S, Delettrez J A, Igumenshchev I V, Jacobs-Perkins D W, Knauer J P, Marozas J A, Radha P B, Seka W 2005 *Phys. Plasmas* **12** 056304
- [12] Radha P B, Marozas J A, Marshall F J, Shvydky A, Collins T J B, Goncharov V N, McCrory R L, McKenty P W, Meyerhofer D D, Sangster T C, Skupsky S 2012 *Phys. Plasmas* **19** 082704
- [13] Krasheninnikova N S, Cobble J A, Murphy T J, Tregillis I L, Bradley P A, Hakel P, Hsu S C, Kyrala G A, Obrey K A, Schmitt M J, Baumgaertel J A, Batha S H 2014 *Phys. Plasmas* **21** 042703
- [14] Radha P B, Marshall F J, Marozas J A, Shvydky A, Gabalski I, Boehly T R, Collins T J B, Craxton R S, Edgell D H, Epstein R, Frenje R A, Froula D H, Goncharov V N, Hohenberger M, McCrory R L, McKenty P W, Meyerhofer D D, Petrasso R D, Sangster T C, Skupsky S 2013 *Phys. Plasmas* **20** 056306
- [15] Moses E I 2008 *Fusion Sci. Technol.* **54** 361
- [16] Schmitt M J, Bradley P A, Cobble J A, Fincke J R, Hakel P, Hsu S C, Krasheninnikova N S, Kyrala G A, Magelssen G R, Montgomery D S, Murphy T J, Obrey K A, Shah R C, Tregillis I L, Baumgaertel J A, Wysocki F J, Batha S H, Craxton R S, McKenty P W, Fitzsimmons P, Nikroo A, Wallace R 2013 *Phys. Plasmas* **20** 056310
- [17] Hohenberger M, Radha P B, Myatt J F, LePape S, Marozas J A, Marshall F J, Michel D T, Regan S P, Seka W, Shvydky A, Sangster T C, Bates J W, Betti R, Boehly T R, Bonino M J, Casey D T, Collins T J B, Craxton R S, Delettrez J A, Edgell D H, Epstein R, Fiksel G, Fitzsimmons P, Frenje J A, Froula D H, Goncharov V N, Harding D R, Kalantar D H, Karasik M, Kessler T J, Kilkenny J D, Knauer J P, Kurz C, Lafon

- M, LaFortune K N, MacGowan B J, Mackinnon A J, MacPhee A G, McCrory R L, McKenty P W, Meeker J F, Meyerhofer D D, Nagel S R, Nikroo A, Obenschain S, Petrasso R D, Ralph J E, Rinderknecht H G, Rosenberg M J, Schmitt A J, Wallace R J, Weaver J, Widmayer W, Skupsky S, Solodov A A, Stoeckl C, Yaakobi B, Zuegel J D 2015 *Phys. Plasmas* **22** 056308
- [18] Murphy T J, Krasheninnikova N S, Kyrala G A, Bradley P A, Baumgaertel J A, Cobble J A, Hakel P, Hsu S C, Kline J L, Montgomery D S, Obrey K A D, Shah R C, Tregillis I L, Schmitt M J, Kanzleiter R J, Batha S H, Wallace R J, Bhandarkar S D, Fitzsimmons P, Hoppe M L, Nikroo A, Hohenberger M, McKenty P W, Rinderknecht H G, Rosenberg M J, Petrasso R D 2015 *Phys. Plasmas* **22** 092707
- [19] Weilacher F, Radha P B, Collins T J B, Marozas J A 2015 *Phys. Plasmas* **22** 032701
- [20] Temporal M, Canaud B, Garbett W J, Ramis R 2014 *Phys. Plasmas* **21** 012710
- [21] Ramis R, Temporal M, Canaud B, Brandon V 2014 *Phys. Plasmas* **21** 082710
- [22] Deng X W, Zhou W, Yuan Q, Dai W J, Hu D X, Zhu Q H, Jing F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 195203 (in Chinese) [邓学伟, 周维, 袁强, 代万俊, 胡东霞, 朱启华, 景峰 2015 物理学报 **64** 195203]
- [23] Deng X W, Zhu Q H, Zheng W G, Wei X F, Jing F, Hu D X, Zhou W, Feng B, Wang J J, Peng Z T, Liu L Q, Chen Y B, Ding L, Lin D H, Guo L F, Dang Z 2014 *Proc. of SPIE* **9266** 926607
- [24] Schmitt A J 1984 *Appl. Phys. Lett.* **44** 399
- [25] Yang C L, Zhang R Z, Xu Q, Ma P 2008 *Appl. Opt.* **47** 1465
- [26] Basko M 1996 *Phys. Plasmas* **3** 4148
- [27] Froula D H, Igumenshchev I V, Michel D T, Edgell D H, Follett R, Glebov V Y, Goncharov V N, Kwiatkowski J, Marshall F J, Radha P B, Seka W, Sorce C, Stagnitto S, Stoeckl C, Sangster T C 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 125003
- [28] Ramis R, Meyer-ter-Vehn J, Ramirez J 2009 *Comput. Phys. Commun.* **180** 977

Laser irradiation uniformity for polar direct drive on ShenGuang III facility

Yu Bo^{1)2)†} Ding Yong-Kun¹⁾³⁾ Jiang Wei¹⁾²⁾ Huang Tian-Xuan²⁾ Chen Bo-Lun²⁾
 Pu Yu-Dong²⁾ Yan Ji²⁾ Chen Zhong-Jing²⁾ Zhang Xing²⁾ Yang Jia-Min²⁾
 Jiang Shao-En²⁾ Zheng Jian¹⁾

1) (*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*)

3) (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

(Received 26 March 2017; revised manuscript received 2 May 2017)

Abstract

Inertial confinement fusion utilizes sufficient laser beams to directly illuminate a spherical capsule, or convert the laser into thermal X-rays inside a high Z hohlraum to drive capsule implosion. The direct drive implosion is one of ways toward central ignition and similar to the indirect drive implosion, but has higher laser energy coupling efficiency and the potential for higher-gain implosion than indirect drive, and needs stringent laser condition. In order to develop and execute the direct drive experiment on the laser facility, which is configured initially for indirect drive, the polar direct drive has been proposed and validated on the Omega laser facility and the National Ignition Facility. The polar direct drive repoints some of the beams toward the polar and equator of the target, thus increasing the drive energy on the polar and equator of capsule and achieving the most uniform irradiation. The present article focuses on the laser irradiation uniformity of the target in polar direct drive on ShenGuangIII (SGIII) facility. Firstly, the laser beam configuration of the SGIII, the characteristics of laser spots, the laser beam repointing strategy and the principle of optimization are introduced. The 48 laser beams are distributed over four cones per hemisphere and the beam centerlines are repointed in polar direct drive. The continuous phase plates (CPPs) of the SGIII are designed to have unique shape to make the laser beam with a 250 μm -radius circular section at the laser entrance hole in indirect drive, and thus the laser beams have ellipse cross sections with fixed major axis and different minor axes in different cones. Then, the irradiation uniformity of $\Phi 540 \mu\text{m}$ target is optimized by the three-dimensional (3D) view factor method on the assumption that the laser intensity distribution is super-Gaussian with three and five orders, and the energy deposition distributions are expressed as $\cos^2 \gamma$ and $\cos \gamma$. The irradiation nonuniformity of less than 5% on the polar direct drive capsule of 540 μm in diameter is achieved. The pressure distribution of the hot spot at the neutron bang time with the optimized parameter is also simulated by Multi2D, and the results of 2D hydrodynamics simulation indicate that the hot spot under the assumption of $\cos \gamma$ distribution is more symmetric. Finally, the effects on irradiation uniformity of the beam-to-beam power imbalance, the repointing error and the target pointing error are estimated by the Monte Carlo method. According to the simulation results, the laser root mean square nonuniformity on the target will not become worse observably when the maximal beam-to-beam power imbalance is limited to a value of 5%, and the repointing error and the target pointing error are better than 7 μm .

Keywords: polar drive, irradiation uniformity, laser repointing

PACS: 52.57.-z, 52.57.Fg, 02.60.Pn

DOI: 10.7498/aps.66.145202

† Corresponding author. E-mail: yubobnu@163.com