

激光直接驱动聚变球靶初始辐照 均匀性分析*

肖 峻 吕百达 冯国英 袁晓东

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

摘 要 采用 Skupshy-Lee(S-L) 球谐模分解方法, 按一个简化的物理模型, 对激光直接驱动聚变中不同束-靶条件下的靶面初始辐照不均匀度的均方根偏差进行了数值计算, 由此分析了在光束完全对称排布的多光束辐照系统中, 光束截面光强分布、聚焦透镜 F 数、离焦参数(靶心离焦距离与靶丸半径之比)、光束数这几个主要因素对辐照均匀性的影响。

关键词 激光直接驱动聚变, 辐照不均匀度, 球谐模。

1 引 言

在激光直接驱动的惯性约束聚变(ICF)中, 靶面辐照均匀性是一个关键性问题。同间接驱动相比, 直接驱动能更有效地将驱动能量耦合到聚变靶丸, 从而对驱动能量要求较低, 因此受到重视。但是, 由于其内爆对辐照的空间分布极为敏感, 因而直接驱动对辐照的均匀性要求很高。为实现有效的对称内爆和高增益, 辐照不均匀性必须控制到百分之一以下^[1]。

在内爆过程的不同阶段, 对辐照均匀性的要求不一样。在加热初期, 由于围绕靶丸的等离子体“大气层”还未形成, 热传导效应和折射效应的平滑作用还不明显, 辐照不均匀性会直接烙印在靶面上, 造成靶面缺陷。即使小尺度的靶面变形在内爆加速阶段也会因流体力学不稳定性(如瑞利-泰勒不稳定性等)而成指数放大, 从而破坏靶的对称压缩, 降低靶的内爆效率, 甚至使内爆失败。因而, 实现均匀的初始辐照是极为重要的。

本文采用 S-L 球谐模分解方法, 按一个简化的物理模型, 计算不同束-靶条件下的多光束辐照系统的靶面初始辐照不均匀度, 分析了光束数、光束的排布、离焦参数(靶心离焦距离与靶丸半径之比)、光束截面光强分布等因素对辐照均匀性的影响, 为优化设计多光束辐照系统和评价束均匀化技术对辐照均匀性的改善效果提供依据。

2 物理模型

在多光束辐照系统中, 影响靶面初始辐照均匀性的因素很多, 如光束数、光束的空间排

* 中国工程物理研究院高温高密度等离子体物理重点实验室基金和国家高技术惯性约束聚变主题资助项目。

收稿日期: 1997-07-01; 收到修改稿日期: 1997-12-22

布、光束间的能量平衡和光束截面光强分布、离焦位置、靶面的完善程度等等。本文并不追求精确计算, 仅期望能通过一个简化的物理模型, 对几个主要因素对不均匀性的影响有一定的认识。假设: 靶丸具有球对称性; 各光束的光轴通过靶心, 且其指向能准确定位; 各光束的光强轴对称分布, 分布轮廓相同, 且光束间的能量完全平衡。在这样的条件下, Skupshy 和 Lee 得到靶面辐照不均匀度的均方根偏差 σ_{rms} 与各阶球谐模 σ_l 的关系为^[2]:

$$\sigma_{rms} = \left[\sum_{l \neq 0} \sigma_l^2 \right]^{1/2} \tag{1}$$

而球谐模 σ_l 可分解为单光束因子和几何因子的乘积, 即:

$$\sigma_l = B_l G_l \tag{2}$$

其中几何因子 G_l 由下式给出:

$$G_l = \frac{\sqrt{2l+1}}{N_b} \left[\sum_{k=1}^{N_b} \sum_{k'=1}^{N_b} P_l(\Omega_k \cdot \Omega_{k'}) \right]^{1/2} \tag{3}$$

式中 $\Omega_k \cdot \Omega_{k'} = \cos \theta_k \cos \theta_{k'} + \sin \theta_k \sin \theta_{k'} \cos(\phi_k - \phi_{k'})$, (θ_k, ϕ_k) 和 $(\theta_{k'}, \phi_{k'})$ 分别为第 k 束和第 k' 束光的光轴指向。 N_b 为光束数。几何因子由光束数和光束排布决定。当各光束间两两反向排布时, 由(3) 式给出的所有奇数阶 G_l 为零。单光束因子 B_l 由下式给出:

$$B_l = |E_l/E_0| \tag{4}$$

而 E_l 为 l 阶球谐模的振幅, 由下式给出:

$$E_l = W_k^{-1} \int_{-1}^1 E_k(\alpha) P_l(\cos \alpha) d(\cos \alpha) \tag{5}$$

式中 $E_k(\alpha)$ 为第 k 束光在靶面上的光强分布, W_k 为第 k 束光在靶面上的总能量。即单光束因子由单光束在靶面上的光强分布确定。

图1给出了多光束辐照系统中第 k 束光辐照球靶的几何图形。设靶半径为 R , 最后聚焦透镜为一理想透镜, 其 F 数为 N , 离焦参数为 D (其值为球靶中心距聚焦透镜焦点的距离 d 与靶半径 R 之比), 入射到透镜上的光强分布为 $I(\rho)$, 由图中的几何关系, 可得到平行的单光束经透镜聚焦后投射到球靶上的光强分布为:

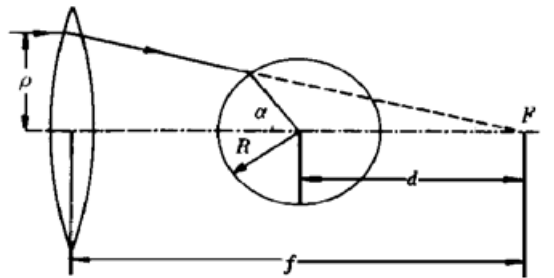


Fig. 1 The schematic drawing of a laser beam irradiating spherical target

$$E_k(\alpha) = I(\rho) \left(\frac{f}{R} \right)^2 \frac{1 + D \cos \alpha}{(D + \cos \alpha)^3} \tag{6}$$

式中 $\rho = f \sin \alpha / (D + \cos \alpha)$, 当 $D \leq 2N$ 时, $0 \leq \alpha \leq \arcsin(D / \sqrt{1 + 4N^2}) + \arctan(1/2N)$; 当 $D > 2N$

时, $0 \leq \alpha \leq \pi/2 + \arcsin(1/D)$ 。 $D = 2N$ 时称为切聚焦。可见单光束因子取决于聚焦透镜的 F 数、离焦参数和单光束截面光强分布。对各阶球谐模, 只要几何因子和单光束因子中任一因子为零时, 该阶球谐模便消失。理论上, 选择适当的靶面光强分布和光束空间排布, 用有限束光可实现靶面的完全均匀辐照^[3, 4]。将球谐模分解为几何因子和单光束因子, 可以很方便地分析各因素对辐照不均匀性的影响。

3 计算结果及分析

根据前面的理论计算公式, 作者编制了一个程序来计算靶面辐照不均匀度, 并通过对基于正多面体对称性排布的多束系统靶面辐照不均匀度的数值计算, 来分析各因素对辐照不均匀度的影响。

在光束间的能量或功率完全平衡的情况下，几何因子决定于光束数和光束的空间排布。采用基于正多面体对称性的排布方式(当光束数较大时，也可采用非完全对称的排布^[3-5])，有限束光可获得较高的辐照均匀度。表1给出正十二面体或正二十面体(数学上这两种正多面体的面对称性与顶点对称性互易)的 N_b 等于 12、20 和 32 的多光束系统的各光束指向。表中只给出了球靶上半部分光束的指向，下半部分反方向光束的指向由 $(\pi - \theta, \pi + \phi)$ 确定。

根据(3)式，由各光束指向计算出多光束系统的几何因子。表2给出了各多光束系统的前十项偶数阶几何因子。这里由于光束间两两相对排布，已使所有的奇数阶几何因子为零。而且由于光束的完全对称排布，还消除了一些低偶数阶几何因子。表2中的2、4和8阶为零，14阶几何因子接近为零，这对有效地降低辐照不均匀度起着非常重要的作用。随着光束数增多，不仅靶面辐照强度增大，而且各阶几何因子(特别是不为零的最低阶几何因子，即所谓的主控模 G_6) 的幅度明显降低。

Table 1. Orientation of beams for three multibeam irradiation systems

# beam	12-beam system		20-beam system		32 beam system	
	$\theta/(^\circ)$	$\phi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)_g$	$\phi/(^\circ)_g$	$\theta/(^\circ)$	$\phi/(^\circ)$
1	0.00	—	37.38	0.00	0.00	—
2	63.43	0.00	37.38	72.00	37.38	0.00
3	63.43	72.00	37.38	144.00	37.38	72.00
4	63.43	144.00	37.38	216.00	37.38	144.00
5	63.43	216.00	37.38	288.00	37.38	216.00
6	63.43	288.00	79.19	0.00	37.38	288.00
7			79.19	72.00	63.43	36.00
8			79.19	144.00	63.43	108.00
9			79.19	216.00	63.43	180.00
10			79.19	288.00	63.43	252.00
11					63.43	324.00
12					79.19	0.00
13					79.19	72.00
14					79.19	144.00
15					79.19	216.00
16					79.19	288.00

Table 2. The geometrical factors for three multibeam irradiation systems

# mode (l)	G_l		
	12 beams	20 beams	32 beams
2	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000
6	2.392	1.329	0.066
8	0.001	0.000	0.000
10	1.663	2.567	2.228
12	2.927	0.100	1.035
14	0.002	0.001	0.001
16	2.576	2.650	0.690
18	3.191	1.398	2.071
20	0.700	2.734	1.971

由聚焦透镜的 F 数、离焦参数 D 、单光束截面光强分布 $I(\rho)$ ，按(4)式、(5)式和(6)式，可计算出单光束因子 B_l 。表3给出了按二次方分布光强 $\{I(\rho) = I_0[1 - (\rho/\rho_0)^2]\}$ 经 $F/20$ 透镜聚焦后，靶丸在三个不同离焦参数位置的前十阶单光束因子。可见，单光束因子随阶数增大而急剧减小。结合表2中32束光系统的几何因子，按(2)式计算了各阶球谐模和按(1)式计算出的辐照不均匀度的均方根偏差(以前四十阶模计算)，其结果在表4中给出。由表4可看到，辐照不均匀度对离焦参数 D 的变化较敏感，在 D 等于 40 和 45 时，此系统的均方根偏差低于 1%。但是，当 $D > 40$ 时，有一部分光没投射到靶丸上，会造成一定的能量损失。

控制单光束光强分布轮廓是用有限束光实现靶面均匀辐照所必须的。图2给出三十二束光系统分别以三种不同的光束强度分布辐照时，按前四十阶模计算出的靶面辐照不均匀度均

Table 3. The single beam factor for different defocusing parameters

$$\{I(\rho) = I_0[1 - (\rho/\rho_0)^2], F/20\}$$

l	$B_l(\times 100)$			l	$B_l(\times 100)$		
	$D = 35$	$D = 40$	$D = 45$		$D = 35$	$D = 40$	$D = 45$
1	84.8534	79.1692	74.5002	6	2.2942	0.6071	0.1367
2	60.0228	48.3015	39.7200	7	1.5327	0.0724	0.0251
3	33.7205	21.0197	13.4820	8	0.1447	0.1521	0.1660
4	13.0873	5.0309	1.9364	9	0.8303	0.0251	0.0302
5	1.4097	0.4271	0.1304	10	0.4437	0.0541	0.1180

Table 4. Spherical harmonic modes and rms deviation of irradiation nonuniformity for different defocusing parameters $\{N_b = 32, I(\rho) = I_0[1 - (\rho/\rho_0)^2], F/20\}$

l	σ_l			l	σ_l		
	$D = 35$	$D = 40$	$D = 45$		$D = 35$	$D = 40$	$D = 45$
2	0.0001	0.0001	0.0001	12	0.0042	0.0002	0.0009
4	0.0000	0.0000	0.0000	14	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0015	0.0004	0.0001	16	0.0004	0.0000	0.0003
8	0.0000	0.0000	0.0000	18	0.0028	0.0001	0.0007
10	0.0099	0.0012	0.0026	20	0.0017	0.0000	0.0005
σ_{rms}	1.1451%	0.1301%	0.2955%				

方根偏差随离焦参数(靶丸半径或靶心离焦距离)的变化情况。三种光强分布分别为二次方分布 $I(\rho) = I_0[1 - (\rho/\rho_0)^2]$ 、平顶分布 $I(\rho) = I_0$ 和高斯分布 $I(\rho) = I_0 \exp[-(\rho/\rho_0)^2]$ 。聚焦透镜 F 数为 4, $D = 8$ 对应切聚焦。这三种光强分布在一定的离焦范围内均方根偏差都可以低于 1%, 其中二次方光强分布在切聚焦位置可获得最好的辐照均匀度, 而且, 其均方根偏差低于 1% 的允许离焦范围最大。这有利于降低对聚焦准确度的限制, 而且还有利于在内爆压缩过程(靶丸半径变小)中保持辐照均匀性。因此, 这三种光强分布中, 二次方光强分布是一种较为理想的光强分布轮廓。由图 2 还可得知当离焦距离很大或者靶丸半径很小时, 均方根偏差对光束强度分布变得不敏感。这是由于在此情形下投射到靶面的只是光束中心部分, 光强分布轮廓的区别也就表现不出来。

图 3 给出了单光束光强按二次方分布的三十二束光系统分别经三种 F 数(4、10 和 20)透镜聚焦后, 靶面辐照不均匀度均方根偏差随离焦参数变化的情况, 横坐标值按相对离焦参数 (D/D_{tan}) 给出, $D_{tan} = 2N$ 。可见, 相比之下, $N = 4$ 时在切聚焦位置可获得最好的辐照均匀度。但聚变靶室需要大 F 数透镜。随着 F 数增大, 辐照均匀度在切聚焦位置附近稍有降低, 但允许离焦范围增大; 当 F 数大于 10 时, 辐照不均匀度均方根偏差对 F 数的变化不敏感, 这是由于在此情形下光束能高度平行地投射到靶面。图 4 给出了三种多光束辐照系统以二次方光强分布辐照的靶面辐照不均匀度均方根偏差随离焦参数的变化情况。可见, 在一定的离焦参数范围内, 三种多光束系统都可将靶面辐照不均匀度均方根偏差控制到百分之一以下。但随着光束数增大, 辐照均匀度提高, 允许离焦范围也增大。三种多光束系统中, 32 束光系统的辐照均匀度最好, 这是由于光束排布高度几何对称分布的结果。

图 2、图 3、图 4 都表明离焦参数对靶面辐照不均匀度均方根偏差的影响很明显, 改变离焦参数, 可调整各光束在靶面的重迭情况。辐照不均匀度均方根偏差随离焦参数的变化有一个

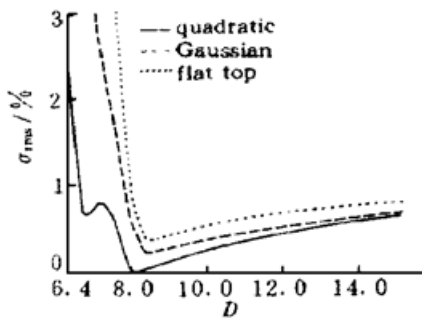


Fig. 2 Effect of laser beam intensity profile on irradiation nonuniformity for $N_b = 32$, $F/4$

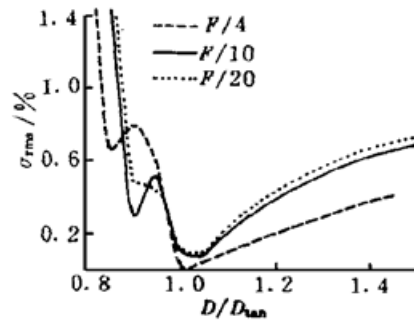


Fig. 3 Effect of lens F -number on irradiation nonuniformity for $N_b = 32$, $I(\rho) = I_0[1 - (\rho/\rho_0)^2]$

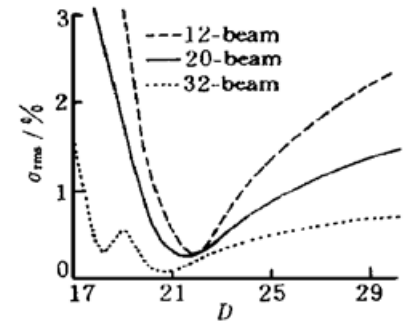


Fig. 4 Effect of the number of laser beams on irradiation nonuniformity for $N_b = 32$, $I(\rho) = I_0[1 - (\rho/\rho_0)^2]$, $F/10$

最小值，即存在一最佳离焦位置。由前面的分析可知，最佳离焦位置在切聚焦位置附近。在切聚焦位置以内，整个光束都投射到靶面上，能量利用率最大。

结 论 本文在靶丸具有球对称性；辐照光束指向能准确定位；各光束的光强有相同的轴对称分布轮廓，且光束间的能量完全平衡的理想条件下，计算了多光束辐照系统的靶面初始辐照不均匀度；分析了光束数、光束的排布、离焦参数(靶心离焦距离与靶丸半径之比)、光束截面光强分布等因素对辐照均匀性的影响；为优化设计多光束辐照系统和评价束均匀化技术对辐照均匀性的改善效果提供依据。结果表明：在光束完全对称排布下，二次方光强分布是一种较为理想的光强分布轮廓，在切聚焦位置附近可获得较好的辐照均匀度。随着光束数增大，辐照均匀度提高，允许离焦范围增大。随着 F 数增大，辐照均匀度稍有降低，但允许离焦范围增大。当 F 数大于 10 时，辐照不均匀度均方根偏差对 F 数的变化不敏感。通过优化光束截面光强分布、聚焦透镜的 F 数、离焦参数、光束数这些参数，可将不均匀度降低到可允许的范围内。实际上，由于光束间的能量不平衡和光束指向定位不准确将出现奇数阶模，光束分布轮廓不光滑还将产生一些高阶模，再加上靶面的不完善等因素的影响，将不均匀度控制到 1% 以内还存在一定困难。但以上结论对优化设计多光束辐照系统和评价束均匀化技术对辐照均匀性的改善效果仍是有意义的。

最后，需说明的是以上对辐照均匀性的分析仅限于激光加热的初始阶段，要全面分析辐照不均匀性与对称内爆的关系，还必须考虑激光与等离子体的相互作用过程中靶面能量沉积分布以及产生的驱动压力分布等问题。这还需要作进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] R. Mccrory, C. Verdon, *Inertial Confinement Fusion*, A. Caruso, E. Sindoni, Bologna, Italy, 1989 ·183
- [2] S. Skupsky, K. Lee, Uniformity of energy deposition for laser driven fusion. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(7) ·3662~ 3671
- [3] A. J. Schmitt, Absolutely uniform illumination of laser fusion pellets. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44** (4) ·399~ 401
- [4] W. W. Simmons, Simple analytic solutions for uniform irradiation of spherical targets. *Proc. SPIE*,

1995, 2633-249~ 254

- [5] M. Murakami, Irradiation system based on dodecahedron for inertial confinement fusion. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 66(13) :1587~ 1589

Analysis of Initial Irradiation Uniformity on Spherical Target in Direct Drive Laser Fusion

Xiao Jun Lü Baida Feng Guoying Yuan Xiaodong
(*Institute of laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064*)
(Received 1 July 1997; revised 22 December 1997)

Abstract The initial irradiation nonuniformity of spherical target is calculated for different laser-target conditions, to analyze the influence of different parameters such as the beam intensity profile, lens F -number, defocusing parameter and the number of laser beams on irradiation uniformity of spherical target in perfectly symmetric multi-beam irradiation system.

Key words direct drive laser fusion, irradiation nonuniformity, spherical-harmonic modes.

中国光学学会第八届全国基础光学暨中国物理学会 第二届全国光物理学术报告会在贵阳举行

由中国科学院物理研究所光物理实验室承办的中国光学学会第八届全国基础光学暨中国物理学会第二届全国光物理学术报告会于1998年10月10日至14日在贵州省贵阳市举行。来自全国各地31个单位的86位代表出席了会议。

会议开幕式由基础光学委员会副主任林福成研究员主持,专业委员会主任徐积仁研究员致开幕词。会议安排了15个大会特邀报告和59个分会场报告,其分会场报告分三个分会场进行。会议共录用了98篇论文,包括1) 量子光学、2) 激光光谱学、3) 非线性光学、4) 超短脉冲激光与超快现象、5) 激光物理、激光化学、激光生物学与激光医学、6) 光学信息处理、7) 生理光学、8) 近场光学及衍射光学、9) 导波光学、10) 新型光电子器件、11) 新型激光器、12) 大气光学与海洋光学、13) 新型激光材料与纳米材料等方面的内容。代表们的这些论文反映了两个专业委员会学术领域的当前国内外研究状况和国内研究水平,具有前沿性、新颖性、系统性和综合性。不少报告的内容涉及的不仅是一个具体的科学问题,且反映了作者及其实验室一个时期以来研究成果的总结,例如特邀报告中的大功率全固化 Nd:YVO₄ 激光器研究、神光 II 主放大器的进展、空间光调制器物理和大屏幕投影电视产业等反映了我国在这方面研究的最高水平,在国际上也具有一定影响。代表们反映,此次学术会议开得很成功,学术水平也较高。

会议期间,还召开了与会专业委员会,对专业委员会开展的工作和明年的学术活动进行了讨论。