

激光直接驱动聚变球靶的完全均匀辐照*

肖 峻^{a, b} 吕百达^a 张 彬^a

(^a 四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)(^b 西南民族学院物理系, 成都, 610041)

摘要: 通过分析球形靶面辐照不均匀度的球谐模, 提出了用有限束光实现球靶完全均匀辐照的一般条件, 为优化设计多光束辐照系统和评估球靶的辐照不均匀度提供了依据。文中还例举了能实现靶面完全均匀辐照的多光束系统。

关键词: 激光直接驱动聚变 均匀辐照 球谐模

Perfectly uniform irradiation of spherical targets for laser direct driven fusion

Xiao Jun^{a, b}, Lü Baida^a, Zhang Bin^a

(^a Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064)

(^b Department of Physics, Southwest Nationalities College, Chengdu 610041)

Abstract By analyzing the spherical-harmonic modes of irradiation nonuniformity, the general conditions are acquired for perfectly uniform irradiation of spherical targets for direct driven laser fusion from a finite number of laser beams. The results provide the theory for optimum designing practical multibeam irradiation systems and evaluating irradiation nonuniformity of spherical targets. Some typical examples that satisfy the conditions are presented.

Key words: laser direct driven fusion uniform irradiation spherical-harmonic mode

引 言

激光直接驱动的惯性约束聚变(ICF)将多束高功率激光直接聚焦在填有氘氚燃料的球靶上,烧蚀靶壳,产生等离子体喷射,利用其反冲作用驱动靶丸内爆,使燃料在惯性约束下发生聚变。为实现球对称内爆和高增益,靶面辐照必须具有高度的均匀性。在设计多光束辐照系统中,一个主要任务就是要把靶面的辐照不均匀度控制在1%以下^[1]。影响靶面辐照均匀性的因素很多,如光束数、光束的空间排布、光束间的功率平衡和光束的光强分布、聚焦位置、靶面的完善程度等等,作者通过分析靶面辐照不均匀度的球谐模,得知在一定的条件下,用有限束光可以实现完全均匀的靶面辐照,并给出了实现靶面完全均匀辐照所需的光束数、单光束的光强分布和光束的空间排布,为优化设计多光束辐照系统和评估球靶的辐照不均匀度提供了依据。

1 靶面辐照不均匀度的球谐模分解

在激光直接驱动聚变的多光束辐照系统中,当靶丸具有球对称性,光束间的能量或功率平

* 国家高技术惯性约束聚变主题资助。

衡,各光束的光强具有相同的轴对称分布,且各光束的光轴通过靶丸中心时,靶面辐照不均匀度的均方根偏差 σ_{rms} 可用球谐模 σ_n 表示^[2]

$$\sigma_{rms} = \left(\sum_{n=1}^{\infty} \sigma_n^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

而各阶球谐模可表示为单光束因子和几何因子的乘积,即 $\sigma_n = B_n G_n$

单光束因子 B_n 为

$$B_n = \frac{2n+1}{2} \int_{-1}^1 [I_k(\hat{r})/I_k] P_n(\cos \gamma) d(\cos \gamma) \quad (3)$$

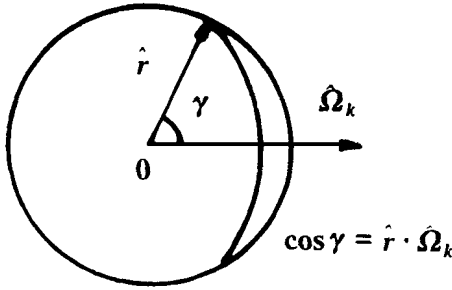


Fig. 1 The intensity profile of the laser beam with azimuthal symmetry on the spherically symmetric target depends only on the angle γ

式中, $P_n(x)$ 为 n 阶勒让德多项式, $I_k(\hat{r})$ 和 I_k 分别为第 k 束光在靶面上的光强分布和平均光强, $\cos \gamma = \hat{r} \cdot \Omega_k$, \hat{r} 和 Ω_k 如图 1 所示, 分别为靶面上任意观察点的单位矢量和第 k 束光光轴的单位矢量。即 B_n 由单光束在靶面上的光强分布确定。几何因子 G_n 由下式给出

$$G_n = \frac{1}{N_b} \left[\sum_{k=1}^{N_b} \sum_{k'=1}^{N_b} P_n(\Omega_k \cdot \Omega_{k'}) \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中, N_b 为光束数, Ω_k 和 $\Omega_{k'}$ 分别为第 k 束和第 k' 束光光轴的单位矢量。用 (θ_k, φ_k) 和 $(\theta_{k'}, \varphi_{k'})$

分别表示第 k 束和第 k' 束光的光轴指向, 则有 $\Omega_k \cdot \Omega_{k'} = \cos \theta_k \cos \theta_{k'} + \sin \theta_k \sin \theta_{k'} \cos(\varphi_k - \varphi_{k'})$ 。即 G_n 由光束数和光束的空间排布确定。

将球谐模分解为几何因子和单光束因子, 可以分别分析单光束的光强分布和光束排布对辐照不均匀性的影响。由于各阶球谐模是两个因子的乘积, 只要其中任一因子为零时, 该阶球谐模便消失。如果单光束的光强分布能完全控制, 且光束指向能准确定位, 则通过选择适当的光强分布和光束排布的组合可以消除所有阶的球谐模, 从而实现靶面的完全均匀辐照 ($\sigma_{rms} = 0$)。

2 完全均匀辐照对光强分布和光束排布的要求

由靶面辐照不均匀度的球谐模分解, 可以导出实现球靶完全均匀辐照对光强分布和光束排布的要求。

2.1 消除所有奇数阶几何因子

当光束数 N_b 为偶数且即对于指向为 (θ_k, φ_k) 的任一光束有指向为 $(\pi - \theta_k, \pi + \varphi_k)$ 的另一光束与之相对排布, 根据勒让德多项式的性质 $P_n(-x) = (-1)^n P_n(x)$, 可将(4)式中对 k' 的求和表示为只对 N_b 中的一半光束求和, 即

$$\sum_{k=1}^{N_b} P_n(\Omega_k \cdot \Omega_{k'}) = \sum_{k=1}^{N_b/2} [1 + (-1)^n] P_n(\Omega_k \cdot \Omega_{k'})$$

由此式可知: 当光束间两两反向排布时, 所有奇数阶几何因子 $G_{2l+1} (l \geq 0)$ 为零, 从而导致所有奇数阶球谐模 σ_{2l+1} 为零。

2.2 消除全部或部分偶数阶单光束因子

根据关系式 $\int_0^1 x^{2m} P_{2l}(x) dx = 0$, 式中, m 和 l ($0 \leq m < l$) 为任一整数, 可知: 如果我们选择单光束在靶面上的光强分布具有如下的形式

$$I_k(\gamma) = \sum_{m=0}^M I_{0m} \cos^{2m} \gamma, \quad (0 \leq \gamma \leq \pi/2, 1 \leq k \leq N_b) \quad (5)$$

式中, I_{0m} 为常数, $\sum_{m=0}^M I_{0m}$ 为在靶面上光束中心的光强, 则(3)式给出的偶数阶单光束因子 $B_{2l} (l > M)$ 为零, 相应的偶数阶球谐模 $\sigma_{2l} (l > M)$ 为零。

特别是当(5)式中的 $M=0$ 时, 所有偶数阶单光束因子 B_{2l} 为零。但是当(5)式中的 $M > 0$ 时, 部分低偶数阶单光束因子 $B_{2l} (1 \leq l \leq M)$ 不为零, 在这种情况下, 为实现靶面的完全均匀辐照, 必须消除剩下的偶数阶球谐模 $\sigma_{2l} (1 \leq l \leq M)$, 这时, 只能借助于选择适当的光束排布使偶数阶几何因子 $G_{2l} (1 \leq l \leq M)$ 为零。

2.3 消除部分低偶数阶几何因子

为使偶数阶几何因子 $G_{2l}=0 (1 \leq l \leq M)$, 如图2所示, 在光束间两两反向排布的前提下, 将光束按对称于靶赤道的同轴且同顶点的锥面排布, 锥面顶点在球靶中心 O 点, 各锥面内的光束在旋转方向上对称分布。为保证光束间两两反向排布, 分布在靶赤道平面这一特殊锥面内的光束数应为偶数。各锥面内光束的方位角为 $\varphi_{ij} = \varphi_{i0} + 2\pi j / N_i (1 \leq j \leq N_i, 1 \leq i \leq L, \sum_{i=1}^L N_i = N_b)$, L 为锥面数, N_i 为各锥面内的光束数(当 $\theta_i = 0$ 和 $\theta_i = \pi$ 时, $N_i = 1$; 当 $\theta_i = \pi/2$ 时, N_i 为偶数), φ_{i0} 为各锥面内光束的方位偏置角。由文献[3]可知, 使 $G_{2l}=0 (1 \leq l \leq M)$ 的条件是: 各锥面内的光束数 N_i 和锥面顶角 θ_i 应满足

$$\sum_{i=1}^L N_i [(2l+1)\cos^{2l}\theta_i - 1] = 0 \quad (1 \leq l \leq M) \quad (6)$$

当分布在 $\theta_i \neq 0$ 和 $\theta_i \neq \pi$ 的各锥面内的最小光束数 $N_0 \leq 2M$ 时, 除各锥面内的光束数 N_i 和锥面顶角 θ_i 应满足上式外, 各锥面内光束的方位偏置角 φ_{i0} 还应满足

$$\sum_{i=1}^L P_{2l}^m(\cos\theta_i) e^{-im\varphi_{i0}} N_i = 0 \quad (N_0 \leq 2l \leq 2M, N_0 \leq m \leq 2l) \quad (7)$$

式中, 求和只包括 $m \neq N_i = \text{整数}$ 的项 ($1 \leq i \leq L$)。通过选择适当的方位偏置角 φ_{i0} , 可以在光束数较小的情况下使 $G_{2l}=0 (1 \leq l \leq M)$ 。

3 能实现完全均匀辐照的多光束系统实例

由上述我们知道, 当单光束在靶面上的光强分布为 $I_k(\gamma) = \sum_{m=0}^M I_{0m} \cos^{2m} \gamma (0 \leq \gamma \leq \pi/2, 1 \leq k \leq N_b)$ 时, 按(6)式的解 (N_i, θ_i) 或(6)式和(7)式的解 ($N_i, \theta_i, \varphi_{i0}$) 排布的多光束辐照系统可实现球形靶面的完全均匀辐照。这些解包括非完全对称的光束排布和基于正多面体面或顶角对称性的光束排布。表1和表2中给出了一些典型的光束排布实例。由于光束都是按靶赤道对称排布的, 表中只列出了球靶赤道平面和上半球靶的光束指向。

表1给出了满足(6)式的解。除 $M=0$ 的排布外, 当 $N_0 > 2M$, 各锥面的光束间不需要引入方位偏置角, 但当 M 值较大时, 所需的光束一般较多。当 $M=0$ 时, $I_k(\gamma) = I_0 (0 \leq \gamma \leq \pi/2)$,

Fig. 2 The beams are arranged in concentric cones symmetrically disposed about the target equator, and the beams within each cone are arranged uniformly in azimuth

即单光束完全均匀地辐照半个球靶,所有的偶数阶球谐模 $\sigma_{2l}(l > 0)$ 为零。在此情形下,

Table 1 The configurations for perfectly uniform irradiation ($N_0 > 2M$)

M	N_b	L	N_i	θ_i / deg
0	2	2	1	0.00
1	6	2	3	54.74
2	12	4	1 5	0.00 63.43
3	46	4	8 15	30.55 70.12
4	190	8	10 20 30 35	16.76 37.05 57.73 79.30

任一偶数束光组成的多光束辐照系统,只要两两光束相对排布即可实现球靶的完全均匀辐照($\sigma_{ms} = 0$)。因而实现球靶完全均匀辐照所需的最小光束数为 2。当 $M = 1$ 时,即单光束的光强分布为 $I_k(\gamma) = I_{00} + I_{01} \cos^2 \gamma$, ($0 \leq \gamma \leq \pi/2$, I_{00} , I_{01} 为常数),除 B_2 以外所有的偶数模 $B_{2l}(l > 1)$ 为零,为获得完全的均匀辐照,必须选择适当的光束排布来消除 G_2 ,若 $N_0 > 2$,使 $G_2 = 0$ 的条件为 $\sum_{i=1}^L N_i (3 \cos^2 \theta_i - 1) = 0$,使此式有解的最小光束数 N_b 为 6,基于正六面体面对称性的光束排布即可满足这样的条件。这与文献[4]的结果一致。表 1 中 12 束光排布已用于 Gekko XII 激光系统中^[5]。

表 2 给出了满足(6)式和(7)式的解($N_i, \theta_i, \varphi_{i0}$),由于其 $N_0 \leq 2M$,各锥面内的光束间需引入了特定的方位角偏置。由于各锥面内的光束间引入了特定的方位角偏置,可用较少的光束实现靶面的完全均匀辐照。表 2 中的 24 束光排布已用于 Omega 激光系统^[5],48 束光排布和 60 束光排布将分别用于 NIF 的直接驱动系统^[6]和 Omega 升级系统^[5]。

Table 2 The configurations for perfectly uniform irradiation ($N_0 \leq 2M$)

M	N_b	L	N_i	θ_i / deg	φ_i / deg
2	24	6	4	29.67	0.00
			8(4+4)	69.51	± 23.06
3	48	12	4	21.24	0.00
			8(4+4)	47.03	± 23.37
			12(4+4+4)	74.96	0.00, 29.83
4	60	12	5	21.45	0.00
			5	41.99	0.00
			10(5+5)	58.85	± 23.97
			10(5+5)	81.28	± 12.56

4 结 论

综上所述,在一定的条件下,用有限束光可以实现完全均匀的球形靶面辐照。能实现球靶完全均匀辐照的多光束系统,除靶丸具有完全球对称性,光束间的功率或能量完全平衡外,单光束的光强应具有轴对称性分布: $I_k(\gamma) = \sum_{m=0}^M I_{0m} \cos^{2m} \gamma$, ($0 \leq \gamma \leq \pi/2$);光束在两两反向排布的前提下,按对称于球靶赤道的同顶点同轴锥面排布,各锥面内的光束在旋转方向上对称分布,各锥面内的光束数 N_i 和锥面顶角 θ_i 满足 $\sum_{i=1}^L N_i [(2l+1) \cos^{2l} \theta_i - 1] = 0$ ($1 \leq l \leq M$, 当 $\theta_i = 0$ 和 $\theta_i = \pi$ 时, $N_i = 1$; 当 $\theta_i = \pi/2$ 时, N_i 为偶数, $\sum_{i=1}^L N_i = N_b$)。当 $N_0 \leq 2M$ 时(N_0 为分布在 $\theta_i \neq 0$ 和 $\theta_i \neq \pi$ 的各锥面内的最小光束数),各锥面内的光束方位偏置角 φ_{i0} 还必须满足 $\sum_{i=1}^L P_{2l}^m(\cos \theta_i) e^{-im\varphi_{i0}} N_i = 0$ ($N_0 \leq 2l \leq 2M$, $N_0 \leq m \leq 2l$, $m/N_i =$ 整数)。

对于激光在等离子体中能量沉积的均匀性可按同样的方法讨论,设等离子体对激光的吸收系数为 $\eta(\gamma)$,只要单光束的能量沉积 $I_k(\gamma) \eta(\gamma)$ 可表示为 $\sum_{m=0}^M E_{0m} \cos^{2m} \gamma$ ($0 \leq \gamma \leq \pi/2$) 形式,光束按上述方法排布,也同样可实现完全均匀的能量沉积。在实际的多光束辐照系统中,

光束偏移量对金刚石锯片激光焊接质量的影响

夏锦华* 殷 声

(北京科技大学, 北京, 100083)

叶宏煜 胡恩良

(深圳森达超硬材料有限公司, 深圳, 518000)

摘要: 光束偏移量是金刚石锯片激光焊接的一个重要的工艺参数, 它直接影响焊缝中的气孔、成分及其分布和组织。

关键词: 激光焊接 金刚石工具 光束偏移量

Effect of beam alignment on laser welding quality of diamond saw blade

Xia Jinhua, Yin Sheng

(Beijing University of Science and Technology, Beijing, 100083)

Yie Hongyu, Hu Enliang

(Shenzhen Shenda Superhard Material Co. Ltd., Shenzhen, 518000)

Abstract The diamond impregnated segments and steel core were welded by a high power laser in horizontal arrangement to achieve the very high bond strength. The theoretical and experimental study show that the beam alignment or beam shift will significantly effect the welding quality, such as the pore density in seams, microstructure, composition distribution of the seams. It is proved that the 0.1mm beam shift to steel substrate is the best to obtain the high bond strength.

Key words: laser welding, diamond tool, beam alignment

* 现在北京市电加工研究所工作。

用相位信息板(KPP)等束匀化技术可控制单光束的光强分布, 随着光束间能量或功率不平衡、光束指向误差、球靶不完善程度的降低, 球靶的辐照均匀性不断提高, 实现激光直接驱动聚变所要求的辐照均匀性是有希望的。

参 考 文 献

- 1 McCrory R, Verdon C. Inertial Confinement Fusion. Compositori, Italy; Bologna, 1989; 183
- 2 Skupsky S, Lee K. J A P, 1983; 54(7); 3662~3671
- 3 肖 峻, 吕百达, 袁晓东 *et al.* 强激光与粒子束 1998; 10(2); 234~238
- 4 Schmitt A J. A P L, 1984; 44(4); 399~401
- 5 Murakami M, Nishara K, Azechi H. J A P, 1993; 74(2); 802~808
- 6 Eimerl D, Rothenberg J, Key M *et al.* SPIE 1995; 2633; 170~182

作者简介: 肖峻, 男, 1958 年出生。副教授, 在职博士生。现主要从事光束的传输变换研究和教学工作。

收稿日期: 1998-05-07