

间接驱动装置中球形腔内激光束传输特性

侯鹏程 文 萍 钟哲强 张 彬*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 针对间接驱动装置中球形腔结构及其光路排布,并基于光谱角色散、连续相位板(CPP)和偏振控制板联用的束匀滑方案,建立了球形腔内激光束的传输模型。由于球形腔和光路排布的高度球对称性,在对激光束经过注入孔的传输特性进行分析时,选取注入孔所在平面作为观察面,并主要对其“堵孔”问题进行分析;在对腔内的传输及腔壁的辐照特性进行分析时,选取了一系列同心球面作为观察面,以分析其均匀性。计算结果表明当不同入射角度的激光集束采用相同的CPP设计时,随集束入射角度的增大,在注入孔处,激光的注入率降低,更易导致“堵孔”现象,但激光集束在腔内的交叉重叠会逐渐减少,其在腔壁上的光斑均匀性有所改善,且整体光斑的占空比较有所提高,更利于靶丸均匀辐照。当不同入射角度的激光集束采用不同的CPP来优化光斑时,在注入孔的“堵孔”问题得到改善,而腔壁的占空比有所降低。在实际工作中,应综合考虑注入孔的注入率和堵孔问题、腔内的交叉、腔壁上的光斑均匀性及占空比,对球形腔中集束的入射角度进行合理设计。

关键词 激光光学; 激光束特性; 间接驱动; 球形腔; 均匀性; 入射角度

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1202006

Propagation Characteristics of Laser Quad in Spherical Hohraum for Indirect Drive Facility

Hou Pengcheng Wen Ping Zhong Zheqiang Zhang Bin

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract In indirect-drive inertial confinement fusion facilities, aimed at the spherical hohraum structure and the laser quads configuration, and based on the beam smoothing scheme implemented by the combined use of smoothing by spectral dispersion, continuous phase plate (CPP) and polarization control plate, the propagation model of laser quads in the spherical hohraum has been built up. Because of the high spherical symmetry of spherical hohraum and laser quads configuration, the plane of the laser entrance hole (LEH) is taken as the observation plane for analyzing the characteristics of laser quads propagating through the LEH, and the LEH closure problem is mainly analyzed. A series of concentric spherical surfaces have been taken as the observation surfaces for analyzing the propagation characteristics of laser quads in spherical hohraum and the illumination characteristics on hohraum wall. Simulation results indicate that, When different incident angles of the laser quads are used with the same CPP, with the increasing of the laser quads incident angle, the laser energy injection rate at LEH decreases and it is easier to bring about the LEH closure, while the cross and overlap of laser quads reduce gradually, the illumination uniformity on the hohraum wall slightly improves and the duty ratio of all laser quads on the hohraum wall is also improved, which is helpful for achieving the irradiation uniformity of the target. As different incident angles of the laser quads using the different CPP, the LEH closure problem is improved, While the duty ratio of the hohraum wall decreased. In practical applications, it is required to design the laser quads incident angle

收稿日期: 2015-06-09; 收到修改稿日期: 2015-08-14

基金项目: 国家重大专项应用基础项目(JG2013102)、四川省教育厅创新团队计划(13Td0048)

作者简介: 侯鹏程(1991—),男,硕士研究生,主要从事强激光的传输与控制方面的研究。E-mail: 1107166491@qq.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事强激光的传输与控制方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com

*通信联系人。E-mail: zhangbinff@sohu.com

appropriately by taking the LEH injection rate and the LEH closure problem, the overlap and uniformity of laser quads in hohlraum, as well as the irradiation uniformity of all quads and the duty ratio on hohlraum wall into consideration.

Key words laser optics; laser beam characterization; indirect-drive; spherical hohlraum; uniformity; incident angle
OCIS codes 140.3295; 140.3298; 140.3300

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)装置中,为实现对聚变靶丸的可靠压缩并最终点火成功,提高靶面辐照均匀性和抑制压缩过程中的不稳定性尤为重要^[1-2]。以美国国家点火装置(NIF)为代表的间接驱动装置^[3],针对黑腔参数选取和光路排布优化设计,采取了一系列措施来提高靶面辐照的均匀性^[4]。黑体辐射腔的结构设计不仅会影响靶面辐照的均匀性,还将对激光束排布以及靶场激光装置的几何构型产生影响^[5-6]。为此,相继提出了多种不同形状的黑腔用于点火实验方案设计,例如,柱形腔、橄榄球状腔、椭圆体腔以及球形腔^[7]。然而,柱形腔中由于复杂的光路排布及激光等离子体相互作用,导致交叉光束能量转移等问题,严重影响了靶面辐照均匀性和激光束能量注入效率,因而亟需新的解决方案^[8]。与柱形腔、橄榄球状腔等两端注入的腔体相比,球形腔在相同注入条件下,能达到更高的内爆压缩均匀性和更低的背向散射,且在光路排布复杂程度上有所降低,因而再次受到关注^[8]。另一方面,采用束匀滑技术可以有效提升靶面辐照的均匀性,为实现靶丸的可靠压缩提供条件^[9]。为此,已发展了多种束匀滑技术,包括空域束匀滑技术和时域束匀滑技术^[9-10]。其中,空域匀滑技术包括随机相位板(RPP)、连续相位板(CPP)^[11]、透镜列阵(LA)、偏振控制板(PCP)等,而时域束匀滑技术则包括诱导空间非相干(ISI)、光谱角色散匀滑(SSD)等。为了尽可能地提高靶面辐照均匀性,在实际应用中,通常采用多种束匀滑技术相结合的方案^[12],如SSD、CPP与PCP联用的束匀滑方案。

目前,针对柱形腔结构的光束传输模型及理论相对比较成熟,也有不少文献对其靶壁辐照特性进行了分析^[13-14],然而,目前尚未见有关球形腔内激光束传输及靶壁辐照特性研究的报道。本文针对球形腔结构,基于典型的“SSD+CPP+PCP”束匀滑方案,建立了激光束经过注入孔、腔内以及最终到达腔壁的传输模型,数值模拟和分析了激光束在注入孔、腔内以及腔壁的传输特性。在此基础上,初步探讨了激光集束以特定角度入射时,在球形腔内的传输特性及其在腔壁的辐照特性,从而可为球形腔结构在ICF间接驱动装置中的方案设计提供有用参考。

2 球形腔结构及理论模型

2.1 球形腔结构描述

对于典型的六端注入球形腔^[15],激光束分别从6个注入孔注入,其中两极各有一个激光注入孔,另外4个激光注入孔平均分布在赤道上,如图1(a)所示。每一个激光注入孔的注入光为8路呈环形排布的激光集束,每一集束中均包含 2×2 阵列的4个子束。图1(a)中给出了激光束以 35° 注入到球形腔中的传输路径示意图,而图1(b)则给出了赤道横截面内每个注入孔两个集束的传输路径和每个注入孔的8路集束的近场光路排布示意图,其中, θ 为入射角度, φ 为方位角。

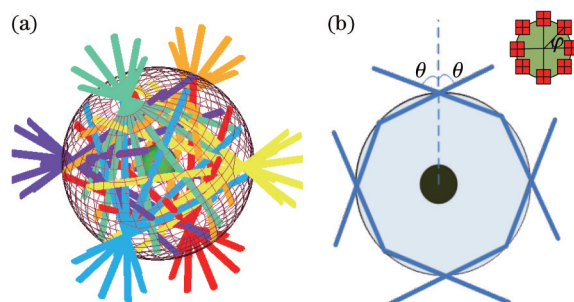


图1 球形腔结构示意图。(a) 激光以 35° 入射到球形腔;(b) 赤道横截面光路传输及单注入孔8路集束的近场光路排布

Fig.1 Illustration of spherical hohlraum structure. (a) Incident laser in spherical hohlraum by 35° ;
 (b) propagation of quads on equatorial plane, and 8 quads configuration in near field at single LEH

在球形腔中,注入角度的改变对激光束在腔内的传输特性及对腔壁辐照特性均会产生极大的影响。球形腔的每一个激光注入孔只有一环激光,且所有的激光束均以相同的入射角 θ 入射,如图1(b)所示。当入射角 θ 大于某个角度时,激光束在腔内不会产生交叉,而当入射角 θ 小于某个角度时,则激光束在腔内将产生交叉重叠,且其复杂程度随入射角度的改变而变化。此外,激光束在腔内的交叉及在腔壁的光斑分布特性还受到方位角 φ 的影响^[17,15]。因此,在实际应用中需要合理选取入射角和方位角。

由于球腔注入孔和激光束排布的高度对称性,激光束在球形腔的分布具有高度的对称性,从而对提高靶面的均匀辐照,实现靶丸的有效压缩极为有利。

2.2 激光束腔内传输模型

球形腔因其球对称性,在分析激光束在腔内传输和腔壁辐照特性时,可沿用相同的坐标系。图2给出了单激光集束从透镜前焦面传输到球形腔内的示意图,透镜的后焦面 Σ 位于图中注入孔处,入射集束所在的坐标系为 $X_0Y_0Z_0$,球形腔的坐标系为 XYZ 。为简便起见,在激光束传输至注入孔时,选取注入孔所在平面作为观察面,以对激光束是否引起“堵孔”问题进行分析^[16];而在对激光束在腔内的传输特性及腔壁的辐照特性进行分析时,可选取一系列同心球面作为观察面,如图3所示。

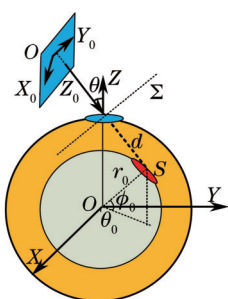


图2 入射集束及球形腔坐标系的转换关系示意图

Fig.2 Illustration of conversion relation of laser quads and spherical hohlraum coordinates

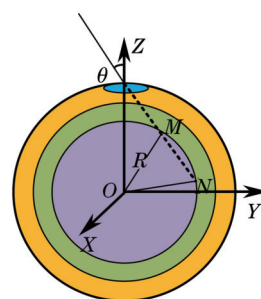


图3 腔内观察面示意图

Fig.3 Illustration of observation surfaces in spherical hohlraum

根据坐标变换理论^[17],可得出入射激光集束所在坐标系 (X_0, Y_0, Z_0) 和球形腔所在坐标系 (X, Y, Z) 的变换关系为:

$$X_0 = X \cos \varphi + Y \sin \varphi, \quad (1)$$

$$Y_0 = -X \cos \theta \sin \varphi + Y \cos \theta \cos \varphi + Z \sin \theta - r \sin \theta, \quad (2)$$

$$Z_0 = -X \sin \theta \sin \varphi + Y \sin \theta \cos \varphi - Z \cos \theta + r \cos \theta, \quad (3)$$

式中 φ 为图1(b)所示集束所在注入孔的方位角, θ 为激光束入射到腔内的角度, r 为球腔的半径。

在实际计算中,为了便于讨论,可以利用几何关系估算出激光集束在观察球面上的弹着点,利用球坐标系 $(\theta_0, \varphi_0, r_0)$ 来描述弹着点所在的部分球面 S ;然后,再利用球形腔自身的球坐标 $(\theta_0, \varphi_0, r_0)$ 与球的直角坐标 (X, Y, Z) 之间的变换关系,以及(1)~(3)式中所给出的变换关系,将目标曲面 S 变换到激光集束所在的坐标系下,进而利用衍射积分方法对光场传输特性进行计算和分析^[18]。

利用上述坐标变换关系及Collins公式^[19],激光束从聚焦透镜前焦面传输至球形腔腔内的光场分布可表示为:

$$E(x, y, 0) = \left(-\frac{i}{\lambda_0 B} \right) \exp(ikL) \iint_{\Sigma} E(x_0, y_0, 0) \exp \left\{ \frac{ik}{2B} \left[A(x_0^2 + y_0^2) + D(x^2 + y^2) - 2(xx_0 + yy_0) \right] \right\} dx_0 dy_0, \quad (4)$$

式中 (x_0, y_0) 是入射激光束所在的平面坐标, (x, y) 是目标曲面 S 在 $X_0Y_0Z_0$ 坐标系下的坐标, $E(x_0, y_0, 0)$ 为透镜前焦面的光场分布, $ABCD$ 为传输变换矩阵,对于透镜聚焦, $A = -dlf, B = f, C = -1/f, D = 0, f$ 为透镜焦距, λ_0 为中心波长, $k = 2\pi/\lambda_0$ 为光波失, L 为透镜前焦面到出射光场面的距离, $L = 2f + d, d$ 为腔内目标曲面 S 到透镜后焦面的距离。值得指出的是,由于观察面 S 不是平面,因而曲面 S 上任意一点到透镜后焦面的距离 d 会有所不同。因此,可先在球腔坐标系 XYZ 下得到平面 Σ 方程: $-x_1 \sin \theta \sin \varphi + y_1 \sin \theta \cos \varphi - z_1 \cos \theta + r \cos \theta = 0$,再利用点到平面间的距离公式得到距离 d 。将激光束初始光场分布、传输距离 L 以及相应的 $ABCD$ 矩阵元代入

(4)式,即可得到激光束传输到腔内任意位置的光场分布。

文中激光集束由2×2子束组成。为了讨论方便,假设每一子束采用“1D-SSD+CPP+PCP”的束匀滑方案^[20-21],如图4所示。各子束在传输过程中,分别经过时间正弦位相调制,且每一子束只在一个方向色散而互不干扰,但相邻子束色散方向则刚好垂直,而后经CPP和PCP,进一步对其空间位相和偏振态进行调制,最后再经楔形透镜组聚焦。由于每个子束分别经过单独的楔形透镜进行聚焦,因此,4个子束经过楔形透镜聚焦后的光场可直接进行叠加。

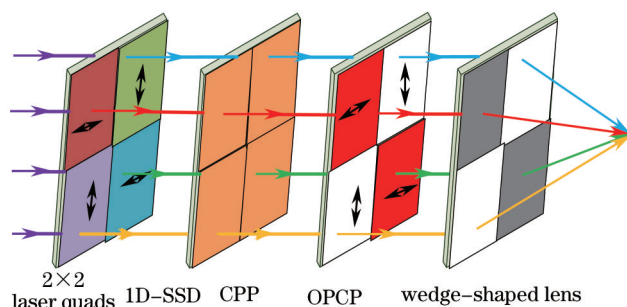


图4 “1D-SSD+CPP+PCP”束匀滑方案示意图

Fig.4 Illustration of beam smoothing scheme by “1D-SSD+CPP+PCP”

在图4中,以光栅沿x方向色散为例,任一子束经过SSD和CPP后的光场分布可表示为:

$$E_1(x_0 - x_j, y_0 - y_j, t) = A_0 \exp \left\{ - \left[\frac{(x_0 - x_j)^2}{w_x^2} \right]^M - \left[\frac{(y_0 - y_j)^2}{w_y^2} \right]^M - \left(\frac{t^2}{\tau^2} \right)^N \right\} \exp [i3\omega_0 t + i3\delta \sin \omega_m [t + \xi_x (x_0 - x_j)] + i\Phi_{CPP}], \quad (5)$$

式中 w_x, w_y 分别为 x_0, y_0 方向的束腰半径, x_j, y_j 为子束偏离集束坐标系坐标轴的距离,此时 $x_j=y_j=D_1, D_1$ 为子束光束直径, τ 为子光束脉宽, M, N 分别子光束在空间和时间上的超高斯阶数, ω_0 为中心角频率, δ, ω_m 分别为时间相位调制深度和调制频率, $\xi_x = d\theta/d\lambda \cdot \lambda_0/c, d\theta/d\lambda$ 为光栅色散系数, λ_0 为子光束中心波长, c 为光速, Φ_{CPP} 为激光束经过CPP后的附加相位^[22]。

在本文方案中采用2×2单元的正交偏振板,每个单元出射的光束为 x_0 或 y_0 偏振方向的线偏光:位于对角线的子束通过偏振方向相同的单元,而相邻两个子束通过的偏振单元偏振方向互相垂直。因此,激光束通过正交偏振板后形成偏振方向相互垂直,且在空间相互分离的线偏振光^[21]。假设子束经过正交偏振控制板后为 x_0 方向的偏振光,其光场分布可描述为:

$$E_x(x_0 - x_j, y_0 - y_j, t) = E_1(x_0 - x_j, y_0 - y_j, t) T_x \exp(i\varphi_1) e_x, \quad (6)$$

式中 T_x 为偏振控制板单元 x_0 方向的振幅透射率, φ_1 为附加相位。类似地,可获得与之正交的 y_0 方向线偏光的光场分布。

将(5)、(6)式代入(4)式中,即可对激光集束在球形腔内的光场传输特性进行数值模拟,从而计算得到在以 R 为半径的同心球面上的光场分布,且这一模型适用于任一集束以任意角度入射的情况。下面以激光集束以 35° 和 55° 角入射的情况为典型例,分析激光集束在注入孔、腔内的传输及腔壁的辐照特性。

3 数值模拟和分析

数值计算时采用如下参数^[15,20,22-23]:束腰半径 $w_x=w_y=186$ mm,空间超高斯阶数 $M=6$,时间超高斯阶数 $N=6$;脉冲宽度 $\tau=10$ ns,中心角频率 $\omega_0=1.78 \times 10^{15}$ Hz,调制频率 $\omega_m=17$ GHz,调制深度 $\delta=2.38$,激光调制带宽 $\Delta\lambda=0.3$ nm,光栅色散系数 $d\theta/d\lambda=4.4976 \times 10^4$ $\mu\text{rad}/\text{nm}$,SSD积分时间为10 ps;激光基频光中心波长 $\lambda_0=1053$ nm,三倍频光中心波长为351 nm,每一子束的光束直径 $D_1=180$ mm,初始相位畸变为30倍衍射极限光束,并采用随机高斯位相屏模型构建,聚焦透镜焦距 $f=7.7$ m;球形腔半径 $r=5.14$ mm,注入孔半径 $r_1=1$ mm,六端注入192路光束的总能量为 $P=1.5$ MJ。

3.1 注入孔处

在激光束经注入孔进入球形腔时,如果注入孔相对于入射激光焦斑尺寸不够大或者入射激光焦斑质量不够高时,总有一部分激光能量会作用于注入孔的边缘上。当这一部分能量足够高时,激光与靶孔边缘物质相

相互作用将导致等离子体喷射现象^[24],且由于流体力学运动,这部分等离子体迅速向注入孔中心汇聚;与此同时,腔内也会向注入孔处喷射等离子体。当注入孔处的等离子体密度过高时,入射激光将被全反射,从而形成“堵孔”^[16]。因此,在分析注入孔处激光束的传输特性时,应特别关注“堵孔”问题。为此,数值模拟了单激光集束分别以35°和55°角入射,SSD积分时间为10 ps,通过相同的CPP,到达球形腔注入孔时的光场分布,如图5所示,

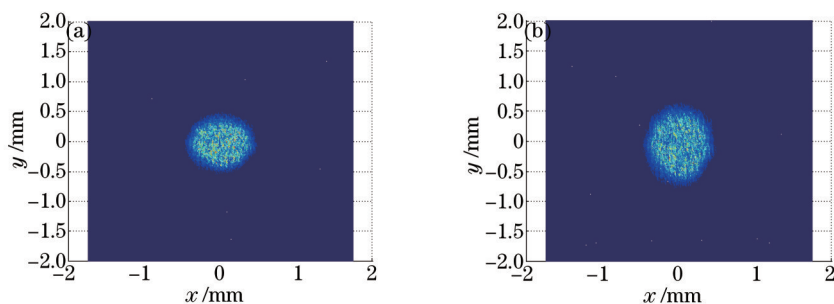


图5 单集束在注入孔的光场分布。(a) 35°; (b) 55°

Fig.5 Intensity distribution of single laser quad at LEH. (a) 35°; (b) 55°

由图5可知,随着注入角度增大,激光集束在注入孔处的光斑增大,能量分布更分散。当集束的入射角度由35°变为55°时,在注入孔处的激光束过孔效率(通过激光注入孔的能量占总能量的百分比)由93.21%减小为89.04%,即有更多的能量分布在注入孔边缘外,从而更容易导致“堵孔”现象。

图5中给出的是激光集束以不同角度入射但CPP相同时,在注入孔处的光场分布。由于可以改变CPP以控制焦斑的大小,因此,可以对激光集束在不同角度入射时分别对CPP进行优化。例如,在图6中,选取以过孔率较高的35°入射激光集束在注入孔处的焦斑大小作为参考,通过改变CPP的参数使55°入射的激光集束在注入孔处的光斑大小与之相当,如图6所示。此时,55°入射激光集束的过孔效率为92.36%。

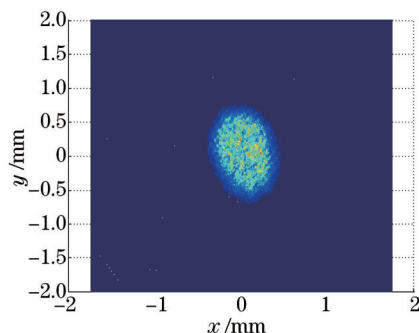


图6 CPP优化后的55°入射单集束在注入孔的光场分布

Fig.6 Intensity distribution of single laser quad by optimum CPP at LEH

通过上述分析可知,在实际应用中,一方面需要选取合适的注入角度,另一方面还需要通过改善CPP及入射激光束的质量,提高注入孔处激光束的能量集中度^[25],以避免“堵孔”问题。

3.2 集束在腔内的传输特性

在分析集束在腔内传输时,可选取一系列的同心观察面,如图3所示,由于同一集束在传输到某一观察面上时,可能两次经过观察面,如图3的M、N点。因此,统一选取传输距离较远(即N点)时的观察面区域进行分析,此时,集束的传输距离随观察面的半径增大而增大。图7选取半径R=3.5 mm的同心球面为观察面,数值模拟了激光束以35°角入射到腔内时的光强分布。

从图7中可以看出,在该观察球面上,光斑呈椭圆形,且其强度分布保持相对均匀。由于集束在腔内传输时,当集束内部峰值强度足够高时,就会导致激光与等离子体的相互作用,为此可采用FOPAI(Fractional Power Above Intensity)^[26]来描述光场内部热斑所占的比例。FOPAI表征的是超过焦斑特定强度 I_0 的不同峰值热斑占

焦斑总功率的份额,其表达式为: $F_{\text{OPAI}}(I_0) = \frac{\int_A I(x,y) dx dy}{\int_A I(x,y) dx dy}$ [其中 $I(x,y)$ 为远场光斑某点的光强值]。图8给

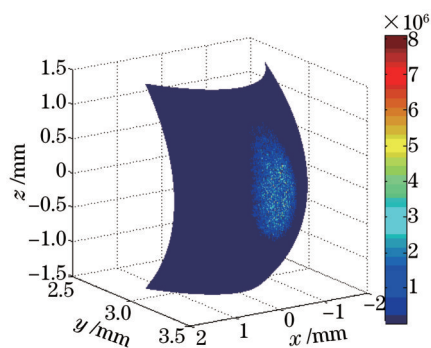


图7 $R=3.5$ mm腔内光强分布
Fig.7 Intensity distribution at $R=3.5$ mm in spherical hohlraum

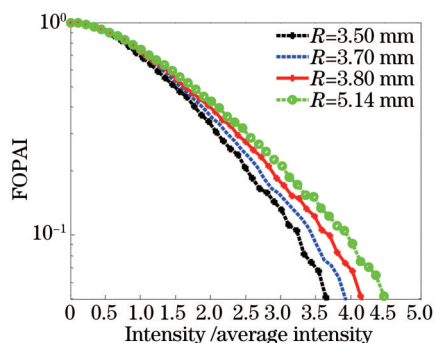


图8 腔内不同观察面光斑的FOPAI曲线
Fig.8 FOPAI curves of different observation surfaces in spherical hohlraum

出了选取不同半径的同心球面作为观察面时,观察面上的光斑FOPAI曲线。从图8可以看出,当激光传输到腔内时,随着观察面的半径增加,即集束在腔内传输距离增加时,观察面上的热斑所占的比例略有增加。

在六端注入球形腔结构中,当集束以不同角度入射时,其在腔内的交叉情况有所不同^[15]。例如,当集束以 35° 入射时,交叉情况复杂,如图9(a)所示;而集束以 55° 入射时,腔内集束没有交叉,如图9(b)所示。已有的研究表明,腔内集束的交叉重叠会导致能量交叉转移等有害的非线性效应,进而严重影响靶丸的辐照均匀性。因此,在实际应用中,需要综合考虑腔内集束的交叉重叠及其光场热斑的比例,以及注入孔处的“堵孔”问题,选取合适的入射角度。

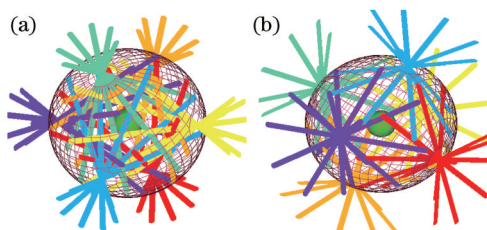


图9 不同角度入射的腔内交叉仿真图。(a) 35° ; (b) 55°

Fig.9 Cross and overlap of incident laser quads with different angles in spherical hohlraum. (a) 35° ; (b) 55°

3.3 集束在腔壁的辐照特性

在间接驱动中,激光集束在腔壁上的光斑自身均匀性,以及光斑分布均匀性对靶丸的均匀辐照有着至关重要的影响,因而需要分别对腔壁光斑自身的均匀性和光斑分布的均匀性进行分析。在不考虑腔内激光集束交叠传输引起的复杂非线性效应的前提下,对激光集束在腔壁的辐照特性进行模拟,可为开展靶腔壁上不同区域激光等离子体相互作用研究提供更加准确的初始边界条件。

3.3.1 单集束在腔壁的辐照特性

图10中给出了激光束以 35° 角入射时,单集束和单端集束在球形腔壁的光强分布。

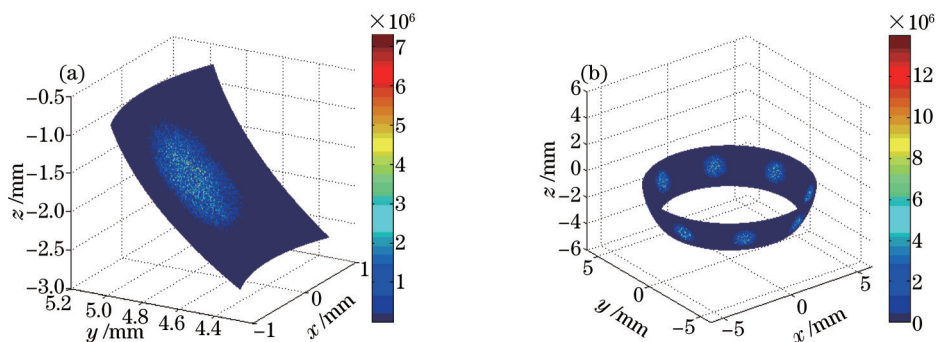


图10 集束 35° 角入射到腔壁的光斑。(a) 单集束在腔壁的光斑; (b) 单端集束在腔壁的光斑

Fig.10 Spots of laser quads achieving hohlraum wall with incident angle 35° . (a) Single laser quad; (b) single cone of laser quads

从图 10 可以看出,由于每个集束在近场均匀排布且以相同的角度入射,因而单端集束在腔壁的光斑呈环形分布,且各光斑之间相隔的距离相等。采用光通量对比度 C 以及 FOPAI 来对腔壁的光斑均匀性进行评价,且对其中占光斑总能量 86.5% 的区域进行分析。光通量对比度 C 的表达式为

$$C_{\text{contrast}} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{I(x_i, y_j) - \bar{I}}{\bar{I}} \right)^2} \quad [\text{式中 } I(x, y) \text{ 为远场光斑某点的光强值}]。$$

图 11 中给出了不同入射角度时,单集束在腔壁光斑的光通量对比度及 FOPAI 曲线。

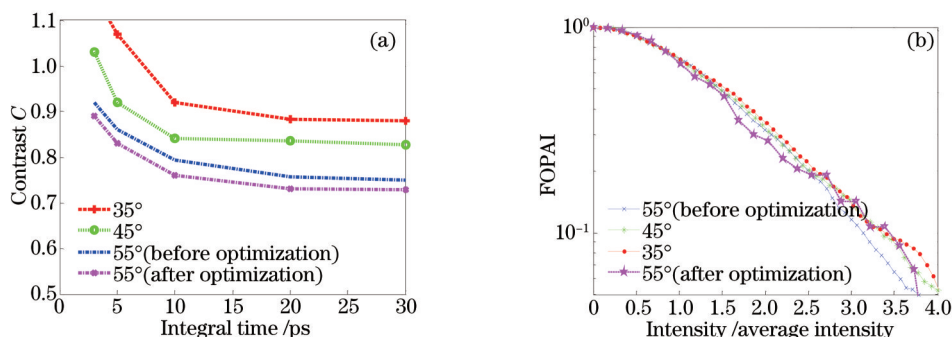


图 11 不同入射角度时腔壁上的光斑质量。(a) 不同入射角度的光通量对比度 C 变化; (b) FOPAI 随入射角度变化
Fig.11 Quality of the spots on the hohlraum wall with different incident angles. (a) Contrast C with different incident angles;
(b) FOPAI with different incident angles

从图 11(a)中可看出,对于初始相位畸变为 30 倍衍射极限的入射激光,在采用束匀滑技术后初始光斑均匀性仍然较差,但随着积分时间增加光斑均匀性迅速改善。且当不同角度入射的集束通过相同 CPP 时,由于针对 CCP 的设计是以注入孔处的光斑均匀性为目标进行优化的,因此随着入射角度的增加,集束在腔内的传输距离减小,腔壁上光斑的光通量对比度略有减小,光斑均匀性有所改善。当以 55° 入射的集束采用优化后的 CPP 时,光通量对比度相对优化前有所下降,即优化的光斑均匀性略有变好。分析图 11(b)可知,随着入射角度的增加,FOPAI 曲线几乎不变,表明入射角度增大时,腔壁光斑的热斑比例并不会明显增加。

3.3.2 所有集束在腔壁的辐照特性

为了观察所有集束在球形腔壁排布的均匀性,数值模拟了入射角度分别为 35° 和 55° 时,六端注入集束在腔壁上的光斑分布,如图 12 所示。

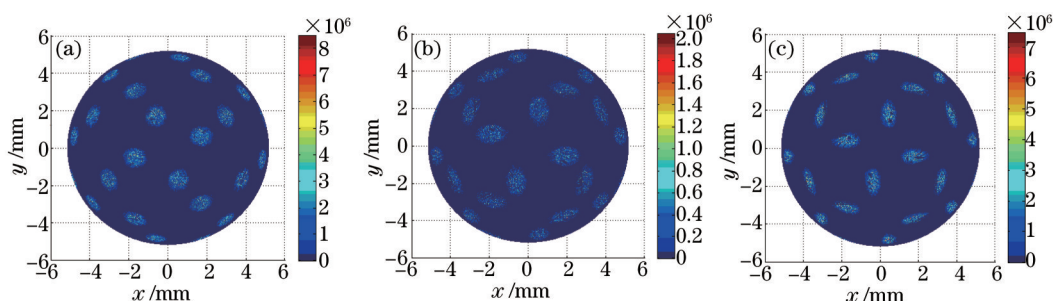


图 12 全部集束在球腔壁的光斑分布。(a) 35° ; (b) 55° (优化前); (c) 55° (优化后)
Fig.12 Spot distributions of the whole laser quads on spherical hohlraum wall. (a) 35° ; (b) 55° (before optimization);
(c) 55° (after optimization)

为了对腔壁的光斑整体排布均匀性进行评价,采用光斑在腔壁上的占空比(所有光斑面积占球腔壁总面积的比值)和离散度来定量分析。光斑在腔壁上的离散度表达式为^[27]:

$$\sigma = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (l_i - \bar{l})^2}{\bar{l}^2}, \quad (7)$$

式中 l_i 为球腔壁上某一光斑质心与注入孔中心所对应的弧长, N 为邻近的光斑个数, \bar{l} 为邻近光斑质心与注入孔中心之间弧长的平均值。由于球形腔结构及光路排布的特殊性,以任意一个注入孔为中心,周边都有 8

个邻近的光斑。因此,可以选取任意一个注入孔作为中心,计算得到其周边8个邻近光斑与该注入孔之间的离散度。参数 σ 主要表征注入孔处的8个光斑的重叠程度,离散度越小,光斑重叠度越高,越不利于均匀辐照。参数 \bar{l} 主要表征注入孔周围8个光斑距离注入孔中心的偏移量。 \bar{l} 越小,则光斑越靠近注入孔。当光斑靠近注入孔时,会有更多的能量从注入孔溢出,这对于靶丸的内爆压缩是不利的。

图12中给出了当激光集束以不同角度入射时,在球腔壁上的光斑分布。采用上述评价方法,比较了腔壁光斑辐照特性,如表1所示。

表1 腔壁光斑整体排布均匀性
Tabel 1 Distribution uniformity of all spots on hohlraum wall

Incident angle $l(^{\circ})$	35	55 (before optimization)	55 (after optimization)
Dispersion degree	0.37	0.37	0.37
\bar{l} /mm	2.92	2.92	2.92
Spot size /mm ²	0.86	1.26	1.10
Duty ratio /%	13.18	19.42	15.95

由表1可知,当集束的入射角度分别35°和55°时且采用相同的CPP时,光斑在腔壁上的离散度相同,腔壁上的光斑排布均匀性均较好,但后者的占空比比前者更高。当入射角度从35°改变为55°时,单集束在球腔壁上的光斑则有所变大。由于光斑的大小决定光斑在腔壁的占空比,当光斑较小时,所有光斑在腔壁所占区域较小,不利于整体光斑在腔壁的均匀分布[如图12(a)所示];当光斑较大时,整体光斑在腔壁的占空比较大,意味着光斑在腔壁的整体分布更均匀[如图12(b)所示]^[8,15]。而当激光集束以55°入射且采用优化后的CPP时,光斑在腔壁上的离散度并不改变,说明光斑的离散程度只与激光集束的入射角度有关;与CPP优化前相比,激光集束在腔壁光斑变小,占空比也有所降低。因此,在实际工程应用设计中,需要针对不同角度入射的激光集束,分别设计优化CPP来进一步控制腔壁上焦斑的大小和形态。例如,适当增大腔壁上的光斑尺寸,以提高整体光斑在腔壁上的占空比,从而获得更高的靶面辐照均匀性,但还需要综合考虑集束在注入孔的注入率及“堵孔”问题。

4 结 论

在惯性约束聚变间接驱动装置中,实现靶丸的均匀辐照是点火成功的关键。针对激光集束在球形腔腔内的传输问题,建立了球形腔内激光束传输模型,并对光场分布的均匀性及光场热斑比例进行评价。由于球腔及其光路排布的特殊性,集束以不同角度入射时,集束在腔内的交叉情况和腔壁的辐照特性也不尽相同,同时在注入孔处还可能存在着“堵孔”现象。为此,利用建立的球形腔内光束传输模型,对集束以典型的35°和55°角入射情况为例进行了数值模拟和分析。计算结果表明:当采用相同的CPP设计时,随集束入射角度的增大,在注入孔处,激光的注入率降低,更易导致“堵孔”现象,但激光集束在腔内的交叉重叠会逐渐减少,同时,腔壁上光斑的光通量对比度略有减小,光斑均匀性有所改善,而FOPAI曲线几乎不变,热斑比例并不会明显增加,即其在腔壁上的光斑自身均匀性有所改善,且整体光斑的占空比较有所提高,更利于靶丸均匀辐照。当对不同入射角度的激光集束采用不同的CPP来优化光斑时,在注入孔的“堵孔”问题得到改善,而腔壁的占空比有所降低。因此,在球形腔光路设计中,应对入射角度合理选取并对激光的焦斑进行针对性的优化。总体而言,以55°入射的激光集束更利于靶丸的均匀辐照。文中的理论分析结果可为球形腔结构在ICF间接驱动装置中的方案设计提供有用参考。

参 考 文 献

- 1 Zhang Rui. The Study of Smoothing by Spectral Dispersion Based Upon Frequency Modulation[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2006.
张 锐. 基于调频脉冲的光谱色散平滑技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2006.
- 2 Fu Sizu, Sun Yuqin, Huang Xiugunag, et al.. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of “shenguang- II ” facility [J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(1): 130-132.
傅思祖, 孙玉琴, 黄秀光, 等. “神光- II ”装置靶面均匀辐照系统的优化设计[J]. 中国激光, 2003, 30(1): 130-132.

- 3 Nagel S R, Haan S W, Rygg J R, *et al.*. Effect of the mounting membrane on shape in inertial confinement fusion implosions[J]. *Physics of Plasmas* (1994–present), 2015, 22(20): 022704.
- 4 Zhu Yongxiang, Zhao Xueqing, Hu Yun, *et al.*. Research on focus zooming by oscillator XeCl excimer laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0502010.
朱永祥, 赵学庆, 胡云, 等. 基于振荡源XeCl准分子激光的变焦辐照技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0502010.
- 5 Lindl J D, Amendt P, Berger R L, *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility[J]. *Physics of Plasmas* (1994–present), 2004, 11(2): 339–491.
- 6 Cheng Ningbo, Li Fuquan, Feng Bin, *et al.*. Research on route optimization for laser beam alignment at target area of an ICF laser facility [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0202005.
程宁波, 李富全, 冯斌, 等. ICF激光装置靶场光束引导路径的优化研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0202005.
- 7 Lan K, Zheng W D. Novel spherical hohlraum with cylindrical laser entrance holes and shields[J]. *Physics of Plasmas* (1994–present), 2014, 21(1): 090704.
- 8 Lan K, Liu J, Lai D, *et al.*. High flux symmetry of the spherical hohlraum with octahedral 6 LEHs at the hohlraum-to-capsule radius ratio of 5.14[J]. *Physics of Plasmas* (1994–present), 2014, 21(1): 010704.
- 9 Jiang Xiujuan, Lin Zunqi. Research progress of beam smoothing in high power laser driver[J]. *Laser and Optronics Progress*, 2010, 47(9): 091407.
江秀娟, 林尊琪. 高功率激光驱动器光束匀滑技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(9): 091407.
- 10 Zhou Shenlei, Zhu Jian, Li Xuechun, *et al.*. Experimental study of smoothing by spectral dispersion[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(1): 321–323.
周申蕾, 朱俭, 李学春, 等. 光谱色散平滑的实验研究[J]. *中国激光*, 2006, 33(1): 321–323.
- 11 Wen Shenglin, Yan Hao, Zhang Yuanhang, *et al.*. Calculation and experiment of the focal spot caused by continuous phase plate with incident wave front distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314001.
温圣林, 颜浩, 张远航, 等. 波前畸变下连续相位板焦斑的计算与实验[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314001.
- 12 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqing, *et al.*. Analysis of laser optimized spectrum for smoothing the focused spot by temporal and special method [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(4): 534–538.
李平, 马驰, 粟敬钦, 等. 时域与空域结合实现光束匀滑的光谱优化分析[J]. *中国激光*, 2008, 35(4): 534–538.
- 13 Zhang Bin, Lü Baida, Xiao Jun. Study of beam uniformity methods in indirect-driven laser fusion[J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, 47(12): 2000–2004.
张彬, 吕百达, 肖俊. 激光间接驱动聚变的光束均匀化方案研究[J]. *物理学报*, 1998, 47(12): 2000–2004.
- 14 Xiao Jun, Lü Baida, Zhai Qun. Calculation of laser spot parameters on wall of cylindrical hohlraum for laser indirect driven fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(1): 62–65.
肖俊, 吕百达, 翟群. 激光间接驱动聚变柱形腔靶内壁光斑参数计算[J]. *强激光与粒子束*, 1998, 10(1): 62–65.
- 15 Lan K, He X T, Liu J, *et al.*. Octahedral spherical hohlraum and its laser arrangement for inertial fusion[J]. *Physics of Plasmas* (1994–present), 2014, 21(5): 052704.
- 16 Li Jincan. Study on Focuseproperties of High Power Laser Beam[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2008.
李锦灿. 高功率激光驱动器光束聚焦特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.
- 17 Wu Jiade. Coordinate System and Coordinate Conversion[M]. Hubei: Hubei Education Press, 1985.
伍家德. 坐标系与坐标变换[M]. 湖北: 湖北教育出版社, 1985.
- 18 Lü Baida. Propagation and Control of Intense Laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- 19 Hu Liyun, Zhou Nanrun, Tao Xiangyang, *et al.*. Close-form equation for Flattened-Gaussian beam[J]. *Journal of Jiangxi Normal University* (Natural Sciences Edition), 2003, 27(2): 99–101.
胡利云, 周南润, 陶向阳, 等. 平顶高斯光束的解析传输公式[J]. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2003, 27(2): 99–101.
- 20 Zhong Zheqiang, Zhou Bingjie, Zhang Bin, *et al.*. Analysis of depolarizing characteristics on focal spot using a polarisation control plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1214002.
钟哲强, 周冰洁, 张彬, 等. 偏振控制板对焦斑消偏振特性的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1214002.
- 21 Wen Shenglin, Hou Jing, Yang Chunlin, *et al.*. Uniformity of near-field caused by continuous phase plates for beam smoothing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1544–1545.

- 温圣林, 侯 晶, 杨春林, 等. 用于光束匀滑的连续相位板近场均匀性[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1544–1545.
- 22 Li Zelong, Zhong Zheqiang, Zhang Bin, *et al.*. Study on multi-beam superposition using complementary polarization control plates[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(9): 095204.
- 李泽龙, 钟哲强, 张 彬, 等. 基于互补型偏振控制板的多光束叠加特性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 095204.
- 23 Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. App Opt, 2007, 46(16): 3276–3303.
- 24 Zhang Xingqiang, Lu Jianye. Preliminary analysis of laser sustained plasma propulsion mechanism[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0802008.
- 张兴强, 鲁建业. 激光等离子体推进机理的初步分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802008.
- 25 Lü Chen, Zhang Dazhi, Zhang Rongzhu, *et al.*. Analysis of beam smoothing tolerance ability of conynuous phase plate[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 629–631.
- 吕 晨, 张大志, 张蓉竹, 等. 连续相位板束匀滑容差能力分析[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 629–631.
- 26 Jiang X, Li J. An evaluation of target irradiation uniformity based on spatial-spectrum analysis[J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(16): 1411–1414.
- 27 Mathematics Handbook[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979.
- 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.

栏目编辑: 张浩佳