

激光间接驱动球形腔新型光路排布方案

侯鹏程 钟哲强 文萍 张彬

A novel arrangement scheme of laser quads for spherical hohlraum in laser indirect-driven facility

Hou Peng-Cheng Zhong Zhe-Qiang Wen Ping Zhang Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024202 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于弹光调制的高灵敏旋光测量

[High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation](#)

物理学报.2015, 64(18): 184206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184206>

负折射平板透镜景深特性仿真分析

[Simulation analysis of the depth of field characteristic of negative refraction flat lens](#)

物理学报.2014, 63(13): 134202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134202>

光波导微环谐振器用于二进制格式变换研究

[Study of data format transform with optical waveguide resonators](#)

物理学报.2013, 62(19): 194201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194201>

可调谐型金属线栅偏振器的特性研究

[Research on the characteristics of tunable structure nanowire-grid polarizer](#)

物理学报.2013, 62(14): 144214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144214>

光束运动特性对焦斑束匀滑效果的影响

[Influence of beam moving characteristics on smoothing effect of focal spot](#)

物理学报.2012, 61(21): 214202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.214202>

激光间接驱动球形腔新型光路排布方案*

侯鹏程 钟哲强 文萍 张彬†

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2015年7月30日收到; 2015年10月12日收到修改稿)

针对激光间接驱动装置中的六端注入球形靶腔结构, 提出了新型光路排布方案, 即单端集束分两环注入(内环注入角度为 35° 、外环注入角度为 55°). 为了对激光集束在球形腔壁上的辐照特性进行评价, 提出了利用光通量对比度和FOPAI来评价单集束在球形腔壁上光斑的均匀性, 以及利用离散度和占空比来评价全部集束在球形腔壁上光斑分布的均匀性. 结果表明, 新型光路排布方案与传统光路排布方案相比, 集束在腔壁上的辐照特性保持一致, 不仅可缓解在激光注入孔处的“堵孔”问题, 而且还可避免传统光路排布方案中集束以小角度入射时在腔内传输所导致的复杂交叉重叠问题. 新型光路排布方案可为球形腔结构在激光间接驱动装置中的方案设计提供有用参考.

关键词: 球形腔, 光路排布, 评价参数, 传输特性

PACS: 42.30.Lr, 42.55.-f, 42.60.-v, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.65.024202

1 引言

在惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)装置^[1-3]中, 提高靶面辐照均匀性是实现对靶丸可靠压缩并最终点火成功的关键^[4]. 对于间接驱动方案而言, 优化设计光路排布和合理选取黑腔参数, 对于提高靶面辐照的均匀性极其重要^[5]. 为了获得足够高的能量以满足点火需求, 通常采用多束激光同步打靶^[6]. 美国的国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)总共有192路激光束, 可输出1.8 MJ的能量; 法国兆焦耳装置(The Laser Mégajoule, LMJ), 采用240路激光束打靶, 总输出能量为2.4 MJ; 我国自主建造的神光III主机装置采用48路激光束打靶, 装置输出能量约为 10^5 J^[7]. 由于ICF装置中的激光束路数较多, 而靶室空间相对有限, 靶场光路的合理排布对于实现靶丸的均匀辐照尤为重要^[8].

目前, 在广泛应用于点火实验的柱形靶腔结构中, 由于复杂的光路排布及腔内激光等离子体相互

作用等问题, 严重制约了靶面辐照均匀性和激光束能量注入效率的提高, 因而亟需新的解决方案^[9]. 根据文献^[10]报道, NIF装置中利用交叉光束能量转移来调节腔内集束间的能量平衡以获得较高的内爆压缩均匀性. 而我国相关领域学者则针对改善激光在远场的光束质量提出了“多频、多色光谱角色散束匀滑方案”等多种束匀滑技术方案^[11,12]. 同时, 由于与柱形靶腔相比, 球形靶腔在相同的注入条件下, 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^[13,14]. 为此, 北京应用物理与计算数学研究所提出了六端注入球形腔结构^[14], 其光路排布方案为每个注入孔含单环共8束激光集束(每个集束由 2×2 子束组成), 且各集束以相同的角度入射到球形腔内. 为了进一步降低六端注入能量需求和缓解腔内激光等离子体相互作用, 又进一步提出了激光注入孔为圆柱形且腔内带挡板的球形腔结构^[15,16]. 已有的研究表明, 该光路排布方案在激光束参数以及束匀滑方案相同的情况下, 入射角度为 35° 和 55° 时的排布方案效果相对较佳^[13,14]. 当

* 国家重大专项应用基础项目(批准号: JG2013102)、四川省教育厅创新团队计划项目(批准号: 13Td0048)和四川大学优秀青年学者计划(批准号: 2011-2-B17)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangbinff@sohu.com

激光集束以 35° 或 55° 入射时,全部激光集束在腔壁的排布均近似呈球对称分布^[13].然而,激光集束在注入孔以及腔内的传输过程中,当集束以 55° 入射时,可能会出现“堵孔”,且存在腔壁上光斑过于靠近注入孔等问题;而以 35° 入射时,集束在腔内存在复杂的交叉重叠,致使激光等离子体相互作用加剧^[17].此外,由于靶室空间有限,靶场光路排布的难度也将随着激光集束入射角度的增大而提高^[10,15–17].因此,有必要对球形靶腔的光路排布方案进行优化设计.

针对六端注入球形腔的传统光路排布方案存在的不足,并基于对优化后的光路排布方案的分析,提出了一种新型的球形腔光路排布方案,即每个注入孔含两环共8束激光集束,其中,4束以 35° 入射,而另外4束则以 55° 入射,并穿插在以 35° 入射的集束中间.这一新型光路排布方案在保持腔壁辐照特性基本不变的前提下,不仅能有效地降低光路空间排布难度,改善激光注入孔的“堵孔”问题^[7],而且还可避免腔内光束复杂的交叉重叠.此外,在激光间接驱动球形腔方案中,激光集束在球腔壁上的辐照特性,包括单集束光斑的均匀性以及全部集束在腔壁上光斑分布的均匀性,对于实现靶丸的均匀辐照具有重要影响.为了对球形腔方案中激光集束在腔壁的辐照特性进行评价,还提出了球形靶腔激光集束辐照特性的评价方法.

2 分析模型

2.1 球形腔新型光路排布方案

对于典型的六端注入球形腔^[14–16](如图1(a)所示),激光束分别从六个注入孔注入,其中,两极各有一个激光注入孔,而另外四个激光注入孔则均匀分布在赤道面上.每一个注入孔含8路激光集束,每一集束均由 2×2 个子束组成.传统光路排布方案多为每个注入孔含单环激光集束,且各集束以相同入射角度(35° 或 55°)注入到球形腔内,如图1(b)所示.在这一光路排布方案中,为了保证所有集束在球腔壁的光斑呈相同尺寸、球对称的分布,所有集束均采用相同的连续相位板^[18](continuous phase plate, CPP).

针对六端注入球形腔的传统光路排布方案存在的不足,提出了一种新型光路排布方案,如图2所示.在新型光路排布方案中,每个注入孔含两环共8束激光集束,其中,外环注入角度为 55° ,

内环注入角度为 35° ,且内外环光束交错排布,如图2(b)所示.在新型光路排布方案中,为了保证所有集束在球腔壁的光斑呈相同尺寸、球对称的分布,因而需要对内环(35°)、外环(55°)集束的CPP分别进行优化设计,使其在球腔壁上的光斑大小、均匀性保持一致.与传统光路排布方式相比,新型光路排布可在保持腔壁辐照特性基本不变的前提下,有效地降低光路空间排布难度,改善激光注入孔的“堵孔”问题,并避免腔内光束复杂的交叉重叠.

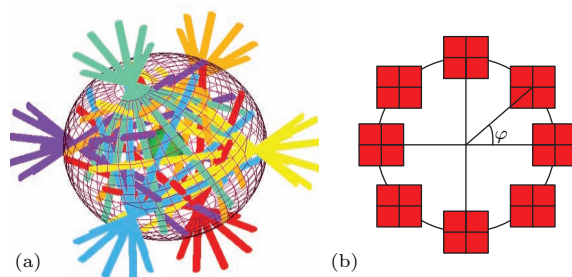


图1 (网刊彩色) 传统光路排布方案的球形腔结构 (a) 球形腔整体光路排布; (b) 注入孔近场光路排布

Fig. 1. (color online) Spherical hohlraum structure in the traditional arrangement scheme of laser quads: (a) All laser quads configuration of spherical hohlraum; (b) laser quads configuration in near field at single LEH.

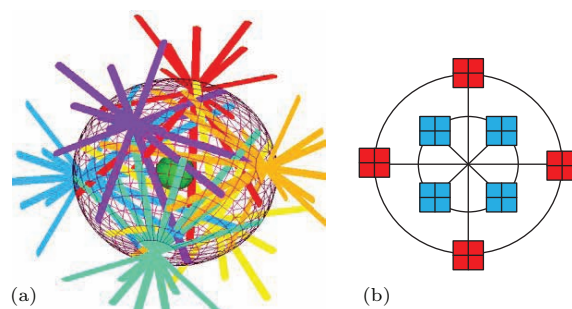


图2 (网刊彩色) 新型光路排布方案的球形腔结构 (a) 球形腔整体光路排布; (b) 注入孔近场光路排布

Fig. 2. (color online) Novel arrangement scheme of laser quads in spherical hohlraum structure: (a) All laser quads configuration of spherical hohlraum; (b) laser quads configuration in near field at single LEH.

2.2 腔壁辐照特性评价方法

在间接驱动球形靶腔结构中,激光集束在腔壁上单集束的光斑均匀性以及所有集束的光斑分布均匀性对于实现靶丸的均匀辐照至关重要^[19].为了对新型光路排布方案下的腔壁辐照均匀性进行评价,并与传统光路排布方案进行比较和分析,提出了球形靶腔腔壁辐照均匀性的评价方法.

在对激光集束在腔壁上的单集束光斑均匀性进行评价时,可采用FOPAI^[20](fractional power

above intensity, FOPAI) 以及光通量对比度 (contrast, C) [7]. 当集束内部峰值强度足够高时, 会导致激光与等离子体的相互作用, 为此, 可采用 FOPAI 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

$$\text{FOPAI}(I_0) = \frac{\int_{\text{where } I(x,y) > I_0} I(x,y) dx dy}{\int_A I(x,y) dx dy},$$

其中, $I(x, y)$ 为远场光斑某点的光强值, 例如, I_0 超过 10^{15} W/cm^2 时, 会形成激光束成丝, 进而产生明显参量不稳定性的阈值 [13]. 此外, 还可采用光通量对比度 C 来描述光场均匀性, 其表达式为

$$C = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{I(x_i, y_j) - \bar{I}}{\bar{I}} \right)^2},$$

其中, $I(x, y)$ 为远场光斑某点的光强值, $\bar{I}$ 为远场光斑平均光强. 在数值计算时, 对其中占光斑总能量 86.5% 的区域进行分析.

在激光集束在腔壁上所有集束的光斑分布均匀性进行评价时, 提出了利用腔壁上光斑的离散度和占空比进行定量分析. 腔壁上光斑的离散度可表示为 [21]

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

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的偏移量. 值得注意的是, 由于球形腔结构及光路排布的球对称性, 以任意一个注入孔为中心, 周边均有 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.

腔壁上光斑的占空比定义为: $\gamma = \text{全部光斑面积} / \text{球腔壁总面积}$, 表征的是所有集束与球腔壁作用区域的大小. 在一定程度上, 占空比越高越有利于激光束能量转化为 X 射线.

2.3 球形腔光传输模型

为了对激光集束在球形腔内的光传输特性进行数值模拟和分析, 建立了球形腔光传输模型. 由于球形腔的球对称性, 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 3 给出

了单激光集束从聚焦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 .

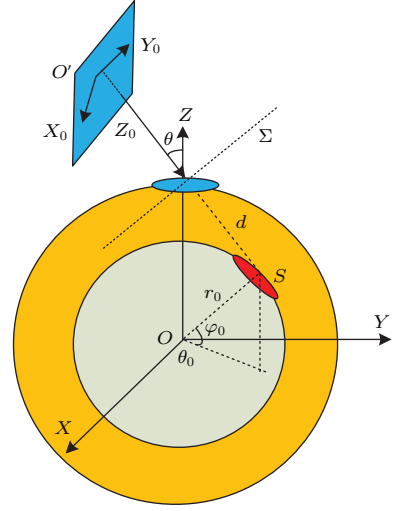


图 3 (网刊彩色) 入射集束及球形腔坐标系的转换关系示意图

Fig. 3. (color online) Illustration of conversion relationship of coordinates of laser quads and spherical hohlraum.

根据坐标变换理论 [22], 可得到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

$$X_0 = X \cos \varphi + Y \sin \varphi, \quad (2)$$

$$Y_0 = -X \cos \theta \sin \varphi + Y \cos \theta \cos \varphi + Z \sin \theta - r \sin \theta, \quad (3)$$

$$Z_0 = -X \sin \theta \sin \varphi + Y \sin \theta \cos \varphi - Z \cos \theta + r \cos \theta, \quad (4)$$

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.

利用上述坐标变换关系及 Collins 公式 [23,24], 可将激光束从聚焦透镜前焦面传输至球形腔腔内的光场分布表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, y, L) = & \left(-\frac{i}{\lambda_0 B} \right) \exp(ikL) \iint_{s_1} \mathbf{E}(x_0, y_0, 0) \\ & \times \exp \left\{ \frac{ik}{2B} [A(x_0^2 + y_0^2) + D(x^2 + y^2) \right. \\ & \left. - 2(xx_0 + yy_0)] \right\} dx_0 dy_0, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, (x_0, y_0) 是入射激光束所在的平面坐标; (x, y) 是目标表面 S 在 $X_0Y_0Z_0$ 坐标系下的坐标; $\mathbf{E}(x_0, y_0, 0)$ 为透镜前焦面的光场分布; $\mathbf{ABCD}$ 为传输变换矩阵, 对于透镜聚焦, $\mathbf{A} = -d/f$,

$B = f$, $C = -1/f$, $D = 0$, f 为透镜焦距; λ_0 为中心波长, $k = 2\pi/\lambda_0$ 为光波矢; 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. 为此, 可先在球腔坐标系 XYZ 下得到平面 $\sum$ 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 (5) 式, 即可得到激光束传输到腔内任意位置的光场分布.

在本文中, 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“一维光谱角色散 (1D-smoothing by spectral dispersion, 1D-SSD)+连续相位板 (CPP) + 偏振控制板 (polarization control plate, PCP)”联用的束匀滑方案 [25,26], 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.

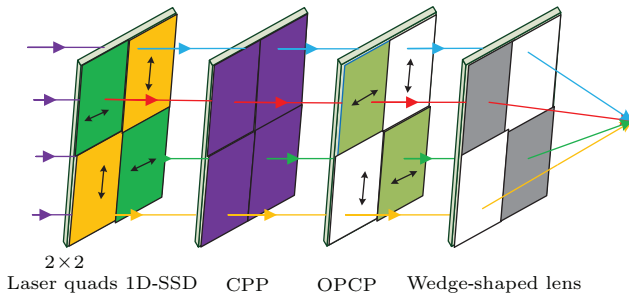


图 4 (网刊彩色) “1D-SSD+CPP+PCP” 束匀滑方案示意图

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

在图 4 中, 激光集束经过 SSD, CPP 和正交偏振控制板后的光场分布可表示为

$$\begin{aligned} & \mathbf{E}(x_0, y_0, 0) \\ &= \sum_{p=1, -1} \sum_{q=1, -1} \mathbf{E}_{pq}(x_0, y_0, 0) \\ &= \sum_{p=1, -1} \sum_{q=1, -1} A(x_0 - pw, y_0 - qw, t) \\ & \quad \times \exp[i\Phi(x_0 - pw, y_0 - qw)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \exp \left\{ i \left[\omega_0 t + \delta \sin \omega_m \right. \right. \\ & \times \left(t + \left| \frac{p+q}{2} \right| \xi(x_0 - pw) \right) \\ & \left. \left. + \delta \sin \omega_m \left(t + \left| \frac{p-q}{2} \right| \xi(y_0 - qw) \right) \right] \right\} \\ & \times \left(\left| \frac{p+q}{2} \right| \mathbf{e}_X + \left| \frac{p-q}{2} \right| \mathbf{e}_Y \right), \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{E}_{pq}$ 表示各子束的近场光场; $p, q = -1, 1$ 表示不同的子束; 且

$$\begin{aligned} & A(x_0 - pw, y_0 - qw, t) \\ &= \exp \left\{ -[(x_0 - pw)/w]^{2N} - [(y_0 - qw)/w]^{2N} \right\} \\ & \quad \times \exp \left\{ -(t/\tau)^{2M} \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

为光场的时空振幅分布, w 为束腰半径, τ 为脉宽, N, M 为超高斯的阶数; ω_0 为中心角频率; δ, ω_m 分别为调制深度、调制频率; $\xi = d\theta/d\lambda \cdot \lambda_0/c$, $d\theta/d\lambda$ 为光栅色散系数, λ_0 为中心波长, c 为光速; Φ 为 CPP 对激光束的附加位相; $\mathbf{e}_{X,Y}$ 表示子束偏振方向, 由该子束所经过的 PCP 子单元决定.

将 (6) 和 (7) 式代入 (5) 式中, 即可对激光集束在球形腔注入孔和腔壁的光场传输特性进行数值模拟, 从而计算得到注入孔及腔壁的光场分布, 且这一模型适用于任一集束以任意角度入射的情况.

3 数值模拟和分析

利用上述建立的球形腔光传输模型, 数值模拟和分析了新型光路排布方案下, 激光集束在腔壁的辐照特性及其在注入孔、腔内的传输特性. 计算采用参数为 [11,13-16,25,26]: 束腰半径 $w = 186$ 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.

在新型光路排布方案中, 为了保证全体集束在球形腔壁的光斑呈等大小、球对称的分布, 因而采用

不同的CPP使内环(35°)、外环(55°)集束在球腔壁上的光斑大小、均匀性一致. 而在传统光路排布方案中, 全部集束采用相同的CPP. 在此基础上, 开展新型光路排布方案与传统光路排布方案在球腔壁上辐照特性的比较和分析. 此外, 还需要对激光集束在注入孔、腔内的传输特性进行分析.

3.1 集束在腔壁的辐照特性

在激光间接驱动球形腔方案中, 激光集束在腔壁的辐照特性对于实现靶丸均匀压缩至关重要. 在不考虑腔内激光束与等离子体相互作用产生复杂非线性效应的前提下(即真空腔中), 对激光集束在腔壁的辐照特性进行定量分析, 可为进一步开展靶腔内不同区域的激光等离子相互作用研究提供更加准确的初始边界条件.

3.1.1 单集束在腔壁的辐照特性

图5中分别给出了单集束以35°和55°入射且分别对其CPP进行优化设计后, 在球形腔壁的光强分布及其光通量对比度 C . 图6中则进一步给出了对应的FOPAI曲线.

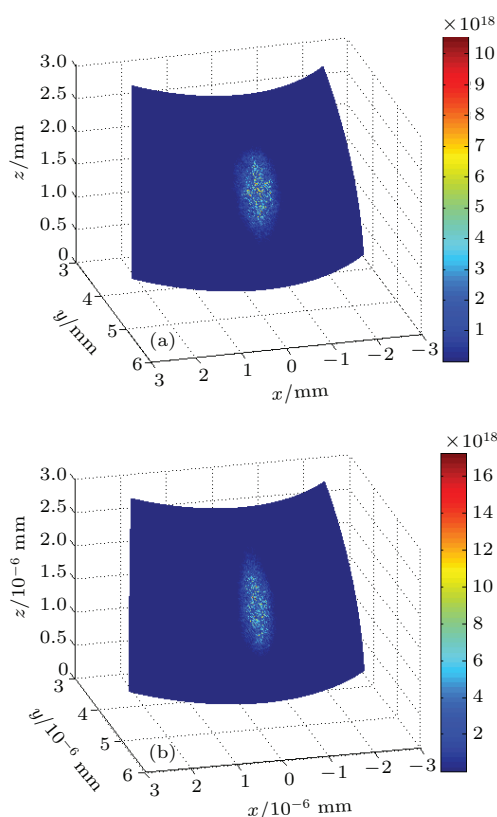


图5 (网刊彩色) 不同入射角度时, 单集束在腔壁的光强分布 (a) 35°, $C = 0.63$; (b) 55°, $C = 0.69$

Fig. 5. (color online) Intensity distribution of single laser quad with different incident angles on the hohlraum wall: (a) 35°, $C = 0.63$; (b) 55°, $C = 0.69$.

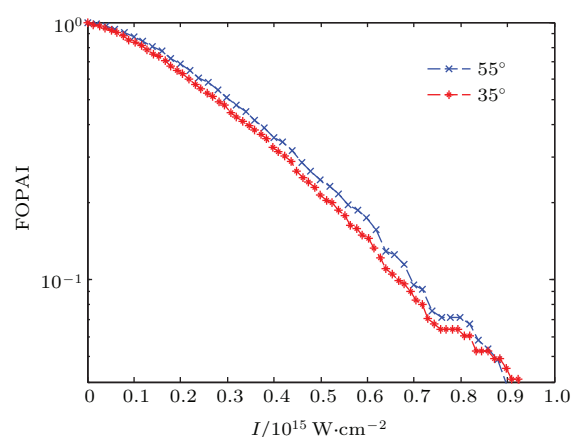


图6 不同入射角度时, 单集束在腔壁光斑的FOPAI曲线

Fig. 6. FOPAI of spots of single laser quads with different incident angles on hohlraum wall.

从图5中可以看出, 集束分别以35°入射和55°入射时, 到达腔壁的光斑大小基本一致, 且光通量对比度相近, 光斑均匀性相当. 进一步分析图6可知, 由于内环(35°)、外环(55°)在球腔壁的光斑大小基本一致且注入能量相同, 因而其FOPAI曲线也相似, 即单集束在腔壁光斑的热斑占比并不会因入射角度的改变而明显变化. 值得指出的是, 在传统光路排布方案中, 所有集束的注入能量相同且采用相同的CPP, 因而在球腔壁上的光斑大小和热斑均相同. 新型光路排布方案与之相比, 尽管采用了两环注入的方式, 但仍能使集束以不同角度入射时在腔壁上的光斑在均匀性和热斑比例上保持一致.

3.1.2 所有激光集束在腔壁的辐照特性

针对传统光路排布方案(单环, 入射角分别为35°或55°)与新型光路排布方案(内环入射角度35°, 外环入射角度55°), 模拟了所有激光集束在球形腔壁上的光斑分布, 并利用提出的评价参数(离散度和占空比)对靶壁上光斑分布的均匀性进行了评价, 其典型结果如图7所示. 为便于讨论而不失一般性, 在计算时通过参数调整尽量使传统光路排布方案和新型光路排布方案中激光集束在球腔壁上的光斑大小相同.

从图7中可以看出, 传统光路排布方案和新型光路排布方案中激光集束在球腔壁上的光斑大小相同, 其光斑尺寸^[7]均为0.85 mm², 所有光斑在腔壁的占空比相同, 且为 $\gamma = 12.3\%$. 在图7(a), (b)所示的传统光路排布方案中, 即激光集束采用单环、以35°或55°入射时, 腔壁光斑分布离散度均为 $\sigma = 0.37$, 偏移量 $\bar{l} = 2.92$ mm; 而图7(c)中新型光路排布方案中, 离散度亦为 $\sigma' = 0.37$, 偏移量

$\bar{l}' = 2.92$ mm. 由此可知, 新型光路排布方案中所有集束在球腔壁光斑分布的均匀性一致, 且与传统光路排布方案相当. 在实际工程应用设计中, 还可以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.

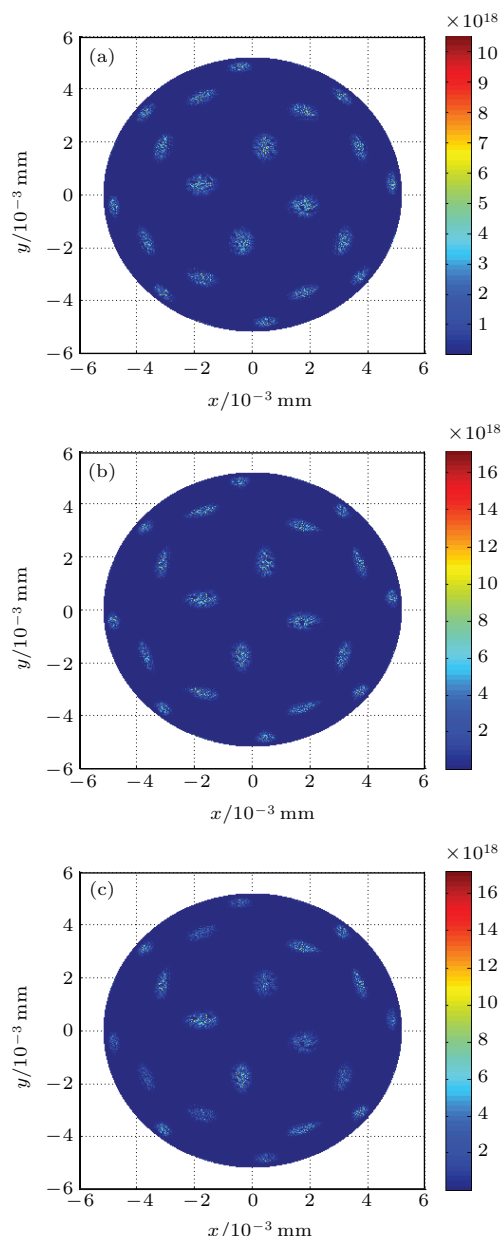


图7 (网刊彩色) 所有集束在球腔壁的光斑分布 (a) 单环, 入射角度 35° ; (b) 单环, 入射角度 55° ; (c) 内环入射角度 35° , 外环入射角度 55°

Fig. 7. (color online) Distribution of spots of all the laser quads on spherical hohlraum wall: (a) Single cone, the incident angle is 35° ; (b) single cone, the incident angle is 55° ; (c) the incident angle of inner cone is 35° , the incident angle of outer cone is 55° .

3.2 集束在激光注入孔处及腔内的传输特性

在对激光集束在注入孔、腔内的传输特性进行分析时, 主要对集束在注入孔的“堵孔”问题、以及腔内集束交叉重叠问题进行讨论.

3.2.1 在激光注入孔处的传输特性

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互作用将导致等离子体喷射现象, 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. 于是, 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”^[27]. 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, 数值模拟了传统光路排布方案及新型光路排布方案下, 单端注入孔内所有激光集束的光斑分布 (如图8所示), 并进一步给出了单端集束在注入孔的过孔率以及在注入孔边缘的光强, 如表1所示.

表1 不同光路排布方案, 注入孔处的集束传输特性

Table 1. Propagation characteristics of laser quads at single LEH, with different laser quads arrangement scheme.

参数	集束结构		
	传统排布, 入射角度 35°	传统排布, 入射角度 55°	新型排布
能量过孔率/%	86.0	82.5	84.8
注入孔边缘光强 $/10^{12} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$	8.2	9.4	8.7

分析图8可知, 对于传统光路排布方案, 随着入射角度的增大, 激光集束在注入孔处的光斑增大; 而新型光路排布方案中, 激光集束在注入孔处的光斑尺寸居于两者之间. 进一步根据表1可知, 对于传统光路排布方案, 当集束的入射角度由 35° 变为 55° 时, 在注入孔处的能量过孔率 (通过激光注入孔的能量占总能量的百分比) 有所降低, 在注入孔边缘的光强增大. 这意味着注入孔边缘光强随着入射角度的增大而有所增长, 从而更容易导致“堵孔”现象. 对于新型光路排布方案, 过孔率和注入孔边缘强度均居于两者之间, 而且, 还可通过优化 CPP 及改善入射激光束质量, 以进一步提高注入孔处激光束的能量集中度^[18], 以避免“堵孔”问题.

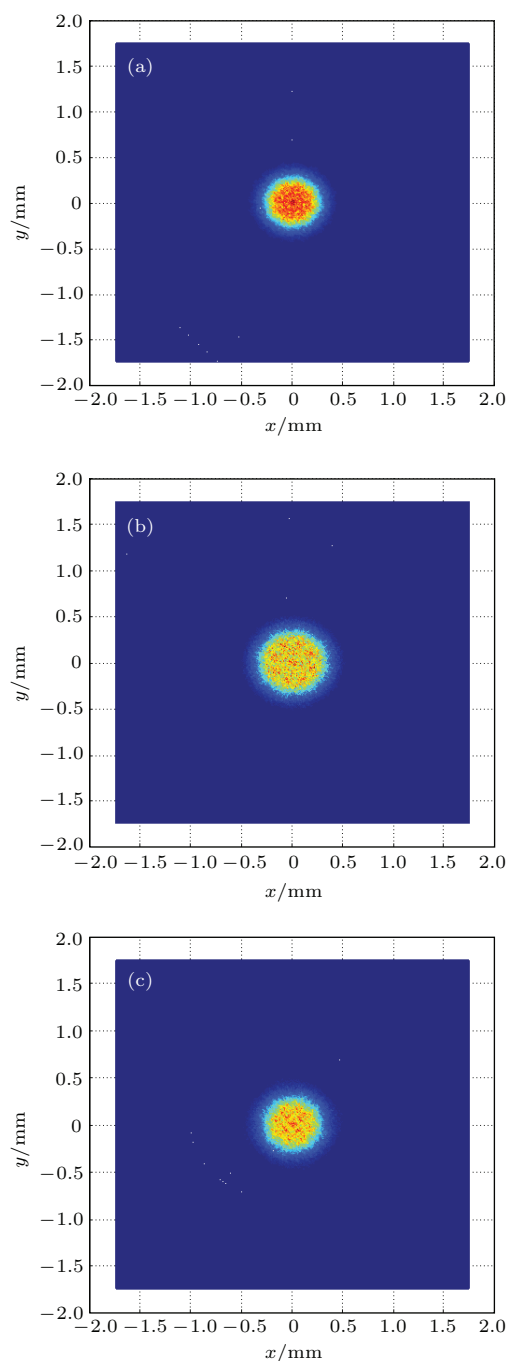


图8 (网刊彩色) 单端所有集束在注入孔的光斑分布 (a) 单环, 入射角度 35° ; (b) 单环, 入射角度 55° ; (c) 内环入射角度 35° , 外环入射角度 55°

Fig. 8. (color online) Distributions of spot of all the incident laser quads at single LEH: (a) Single cone, the incident angle is 35° ; (b) single cone, the incident angle is 55° ; (c) the incident angle of inner cone is 35° , the incident angle of outer cone is 55° .

3.2.2 集束在腔内的传输特性

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, 选取合适的光路排布方案.

进一步根据针对美国NIF装置柱形腔结构报道的相关文献[10, 13, 28]可知, 由于光路排布的原因, 当内外环集束经过激光注入孔传输到腔内的过程中的交叉叠加区域较大, 而交叉后重叠区域光场的强度特性和偏振特性均对光束能量转移、激光与等离子体效应产生极大影响. 因此, 明确相邻集束在腔内分离的位置对于分析其在腔内的传输特性极为重要. 为此, 针对球形腔结构不同光路排布方案下交叉重叠区域分离的位置进行了仿真, 结果如表2所示.

表2 不同排布方案集束在腔内的分离位置

Table 2. Separation plane of laser quads inside the spherical hohlraum in different laser quads arrangement schemes.

参数	集束结构		
	传统排布, 入射角度 35°	传统排布, 入射角度 55°	新型 排布
分离位置/mm	3.7	1.8	2.7

由表2可知, 新型排布方案中单端注入孔激光集束从注入孔到腔内的分离位置介于传统光路排布 35° 入射和 55° 入射方案之间.

在传统光路排布方案中, 当集束以不同角度入射时, 不同注入孔的激光集束在腔内的交叉情况有所不同[14–16]. 激光集束以 35° 入射时, 每一个集束都与其他注入孔的三个集束交叉, 交叉重叠情况极其复杂, 如图9(a)所示; 而以 55° 入射时, 不同注入孔之间入射的集束在腔内虽不存在交叉重叠, 如图9(b)所示, 但在注入孔处更易产生“堵孔”现象, 且由于靶室空间受限, 其光路排布较难实现. 对于新型光路排布方案, 即内环集束以 35° 入射、外环集束以 55° 入射, 此时, 腔内集束不存在交叉重叠, 如图9(c)所示. 值得指出的是, 根据参考文献[10, 28]可知, 激光集束在腔内的交叉重叠将导致集束间的能量转移, 并且能量转移的复杂程度与集束间的交叉重叠程度有着密切关系. 集束间能量转移将改变集束的激光功率密度, 从而改变激光在腔内由于激光等离子体相互作用引起的激光能量再分配, 反过来再造成腔内等离子体状态分布发生变化, 从而进一步改变激光集束的激光功率密度. 由此可见, 新型光路排布方案作为以 35° 入射和以 55° 入射的两种传统光路排布方案的合理折中, 具有其独特的优势.

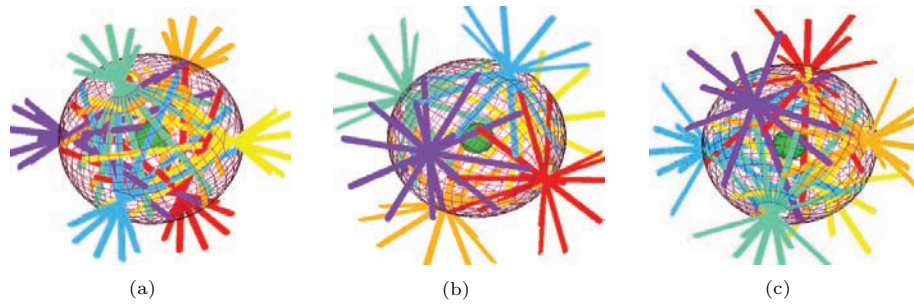


图9 (网刊彩色) 不同光路排布方案的腔内传输示意图 (a) 单环, 入射角度 35° ; (b) 单环, 入射角度 55° ; (c) 内环入射角度 35° , 外环入射角度 55°

Fig. 9. (color online) Illustration of propagation of laser quads inside spherical hohlraum with different laser quads arrangement scheme: (a) Single cone, the incident angle is 35° ; (b) single cone, the incident angle is 55° ; (c) the incident angle of inner cone is 35° , the incident angle of outer cone is 55° .

4 结 论

在惯性约束聚变间接驱动装置中, 与柱形腔相比, 球形腔具有更高的对称性、内爆均匀性和更低的背向散射, 因而近期再次备受关注. 针对六端注入球形腔的传统光路排布方案存在明显不足的问题, 提出了一种新型的六端注入球形腔光路排布方案, 即每个注入孔含两环共8束激光集束, 其中, 内环(4束)入射角度为 35° , 外环(4束)入射角度为 55° . 此外, 球形腔方案中激光集束在腔壁的辐照特性, 包括单集束光斑的均匀性以及全部集束分布的均匀性, 对于实现靶丸的均匀辐照有着至关重要的影响. 为此, 还提出了球形靶腔激光集束辐照均匀性的评价方法, 并分别针对传统光路排布方案及新型光路排布方案, 对集束在腔壁的辐照均匀性、集束在激光注入孔处及腔内的传输特性进行了比较和分析. 结果表明, 与传统光路排布方案相比, 新型光路排布方案的球腔壁上辐照特性基本一致, 但其不仅在注入孔处可缓解“堵孔”问题, 而且在腔内还可避免传统光路排布方案中集束以小角度入射时腔内复杂的光束交叉重叠问题. 由此可见, 新型光路排布方案相对传统光路排布方案而言具有更为明显的优势.

参考文献

- [1] Yang C L, Zhang R Z, Xu Q, Ma P 2008 *Appl. Opt.* **47** 1465
- [2] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Craxton R S, Letzring S, Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456
- [3] Dixit S N, Lawson J K, Manes K R, Powell H T 1994 *Opt. Lett.* **19** 417
- [4] Fu S Z, Sun Y Q, Huang X G, Wu J, Zhou G L, Gu Y 2003 *Chin. J. Lasers* **30** 129 (in Chinese) [傅思祖, 孙玉琴, 黄秀光, 吴江, 周关林, 顾援 2003 中国激光 **30** 129]
- [5] Nagel S R, Haan S W, Rygg J R, Barrios M, Benedetti L R, Bradley D K, Field J E, Hammel B A, Izumi N, Jones O S, Khan S F, Ma T, Pak A E, Tommasini R, Town R P J 2015 *Phys. Plasmas* **22** 022704
- [6] Cheng N B, Li F Q, Feng B, Jia H T, Xiang Y, Wei X F 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 0202005 (in Chinese) [程宁波, 李富全, 冯斌, 贾怀庭, 向勇, 魏晓峰 2015 中国激光 **42** 0202005]
- [7] Zhang R 2006 *Ph. D. Dissertation* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [张锐 2006 博士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [8] Wang M C, Zhu M Z, Chen G, Wu W K, Fu X N 2013 *Laser Optoelectron. Prog.* **50** 011403 (in Chinese) [王美聪, 朱明智, 陈刚, 吴文凯, 傅学农 2013 激光与光电子学进展 **50** 011403]
- [9] Li H, Pu Y D, Jing L F, Lin Z W, Chen B L, Jiang W, Zhou J Y, Huang T X, Zhang H Y, Yu R Z, Zhang J Y, Miao W Y, Zheng Z J, Cao Z R, Yang J M, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K, Kuang L Y, Hu G Y, Zheng J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 225204 (in Chinese) [黎航, 蒲昱东, 景龙飞, 林雄伟, 陈伯伦, 蒋炜, 周近宇, 黄天珣, 张海鹰, 于瑞珍, 张继彦, 缪文勇, 郑志坚, 曹柱荣, 杨家敏, 刘慎业, 江少恩, 丁永坤, 况龙钰, 胡广月, 郑坚 2013 物理学报 **62** 225204]
- [10] Moody J D, Michel P, Divol L, Berger R L, Bond E, Bradley D K, Callahan D. A, Dewald E L, Dixit S, Edwards M J, Glenn S, Hamza A, Haynam C, Hinkel D E, Izumi N, Jones O, Kilkenney J D, Kirkwood R K, Kline J L, Kruer W L, Kyrala G A, Landen O L, Pape S L, Lindl J D, Gowan B J, Meezan N B, Nikroo A, Rosen M D, Schneider M B, Strozzi D J, Suter L J, Thomas C A, Town R P J, Widmann K, Williams E A, Atherton L J, Glenzer S H, Moses E I 2012 *Nat. Phys.* **8** 334
- [11] Zhong Z Q, Zhou B J, Ye R, Zhang B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 035201 (in Chinese) [钟哲强, 周冰洁, 叶荣, 张彬 2014 物理学报 **63** 035201]
- [12] Fan X M, Lv Z W, Lin D Y, Wang Y L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 104210

- [13] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Siegfried H G, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [14] Lan K, He X T, Liu J 2014 *Phys. Plasmas* **21** 052704
- [15] Lan K, Zheng W D 2014 *Phys. Plasmas* **21** 090704
- [16] Lan K, Liu J, Lai D 2014 *Phys. Plasmas* **21** 010704
- [17] Michel P, Divol L, Williams E A, Thomas C A, Callahan D A, Weber S, Haan S W, Salmonson J D, Meezan N B, Landen O L, Dixit S, Hinkel D E, Edwards M J, MacGowan B J, Lindl J D, Glenzer S H, Suter L J 2009 *Phys. Plasmas* **16** 042702
- [18] Feng Y J, Wang Z 2015 *Laser Optoelectron. Prog.* **52** 072204 (in Chinese) [冯友君, 王忠 2015 激光与光电子学进展 **52** 072204]
- [19] Zhang R, Su J Q, Hu D X, Ping L, Yuan H Y, Zhou W, Yuan Q, Wang Y C, Tian X C, Xu D P, Dong J, Zhu Q H 2015 *XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications* Chengdu, August 25, 201492554B-1
- [20] Jiang X J, Li J H 2012 *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* **123** 1411
- [21] Higher Education Press 1979 *Mathematics Handbook* (Beijing: Higher Education Press) pp789–790 (in Chinese) [(北京: 高等教育出版社) 1979 数学手册第 789—790 页]
- [22] Wu J D 1985 *Coordinate System and Coordinate Conversion* (Wuhan: Hubei Education Press) pp200–230 (in Chinese) [伍家德 1985 坐标系与坐标变换 (武汉: 湖北教育出版社) 第 200—230 页]
- [23] Lü B D 1999 *Propagation and control of intense laser* (Beijing: National Defence Industry Press) pp3–20 (in Chinese) [吕百达 1999 强激光的传输与控制 (北京: 国防工业出版社) 第 3—20 页]
- [24] Zhang B, Lü B D 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1998 (in Chinese) [张彬, 吕百达, 肖峻 1998 物理学报 **47** 1998]
- [25] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M 2007 *App Opt.* **46** 3276
- [26] Kalantar D H 2000 *Nasa Sti/Recon Technical Report N* **3** 12615
- [27] Li J C 2008 *Ph. D. Dissertation* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [李锦灿 2008 博士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [28] Michel P, Rozmus W, Williams E A, Divol L, Berger R L, Town R P J, Glenzer S H, Callahan D A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 195004

A novel arrangement scheme of laser quads for spherical hohlraum in laser indirect-driven facility^{*}

Hou Peng-Cheng Zhong Zhe-Qiang Wen Ping Zhang Bin[†]

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

(Received 30 July 2015; revised manuscript received 12 October 2015)

Abstract

In traditional laser quads arrangement schemes for spherical hohlraum in indirect-driven laser facilities, the laser quads to bring about the laser entrance hole (LEH) to close when they are incident at a large angle (55°), while the complicated cross and overlap of laser quads inside the spherical hohlraum may be generated when they are incident at a small angle (35°). To overcome these problems, a novel laser quads arrangement scheme for spherical hohlraum is proposed. The laser quads injected into the single LEH are divided into two cones (the incident angle of the inner cone is 35° , and that of the outer cone is 55°). Furthermore, the contrast and the fractional power above the intensity have been proposed to evaluate the irradiation uniformity of single laser quad, while the dispersion degree and the duty ratio are proposed to evaluate the distribution uniformity of all laser quads on the spherical hohlraum wall. Based on the beam smoothing scheme implemented by the combination of one-dimensional smoothing by spectral dispersion, the continuous phase plate and polarization control plate, the propagation model of laser quads in the spherical hohlraum has been built up, and further used to analyze the irradiation uniformity of single laser quad and all the laser quads on the spherical hohlraum wall. On this basis, the irradiation characteristics on the LEHs and the spherical hohlraum wall, and the propagation characteristic of laser quads in the novel and traditional laser quads arrangement schemes have been analyzed and compared. Results indicate that, compared with the traditional arrangement scheme of laser quads, the novel laser quads arrangement scheme has following advantages: the irradiation uniformity on the spherical hohlraum wall of single laser quad and all laser quads remains unchanged. Not only the LEH closure problem can be alleviated, but also the complicated cross and overlap of laser quads inside the spherical hohlraum in the traditional scheme could be avoided. The novel scheme may provide useful reference for the design of spherical hohlraum structure in laser indirect-driven facilities due to its obvious advantages over the traditional scheme.

Keywords: spherical hohlraum, laser quads arrangement, evaluation parameters, propagation characteristics

PACS: 42.30.Lr, 42.55.-f, 42.60.-v, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.65.024202

^{*} Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. JG2013102), the Scientific Research Foundation of the Education Department of Sichuan Province, China (Grant No. 13Td0048), and the Research Award Fund for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions, China (Grant No. 2011-2-B17).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangbinff@sohu.com