

## 激光间接驱动柱形腔壁辐照特性

侯鹏程, 钟哲强, 文萍, 张彬

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要:** 在惯性约束聚变间接驱动装置中, 针对柱形腔两端注入结构及其光路排布方案, 建立了基于束匀滑技术的激光束传输模型。在此基础上, 分析了激光集束在真空柱形腔腔壁上的辐照特性, 并根据柱形腔整体腔壁光斑排布特性, 对激光集束光路排布进行了初步优化。结果表明, 随着入射角度的增加, 激光集束在腔壁的光斑尺寸逐渐变小, 而其在腔壁上的热斑比例无明显变化, 偏振特性也基本保持一致。通过进一步分析所有激光集束在腔壁上的强度分布和热斑比例可知, 内、外环激光集束在腔壁上的交叠区域将增大局部峰值强度, 提高热斑比例。可以通过适当调节内环激光集束的焦面位置和入射角度来改善所有激光集束在腔壁上的辐照特性。

**关键词:** 间接驱动; 柱形腔; 腔壁辐照特性; 光路排布

中图分类号: TN24 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1106001

## Irradiation characteristics of laser quads on cylindrical hohlraum wall in indirect-drive facility

Hou Pengcheng, Zhong Zheqiang, Wen Ping, Zhang Bin

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

**Abstract:** In indirect-drive inertial confinement fusion facilities, aimed at the cylindrical hohlraum with two cones of laser quads and the laser quads configuration, the propagation model of laser quads in the cylindrical hohlraum was built up based on the beam smoothing schemes. On the basis, the irradiation characteristics of laser quads on vacuum cylindrical hohlraum wall were analyzed, and the laser quads arrangement was optimized preliminarily according to all the spots arrangement on hohlraum wall. Results indicate that, with the increasing of the incident angle of laser quads, the spot size of laser quads on hohlraum wall decreases, while the fractional hot spot has no significant change, and the polarization characteristics also remain almost unchanged. By further analysis of the intensity distribution and fractional hot spot of all the laser quads on hohlraum wall, it indicates that the overlap of the inner and outer cones on the hohlraum wall increases the peak intensity and raises the proportion of the hot spot in relevant area. By appropriate adjustment of the location of the focal plane and the incident angle of the inner cone laser quads, the irradiation characteristics of all the laser quads on hohlraum wall may be improved.

**Key words:** indirect drive; cylindrical hohlraum; irradiation characteristics on hohlraum wall; laser quads arrangement

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-03

基金项目: 国家重大专项应用基础项目(JG2015032)

作者简介: 侯鹏程(1991-), 男, 硕士生, 主要从事强激光的传输与控制方面的研究。Email: 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。Email: zhangbinff@sohu.com

## 0 引言

在激光间接驱动惯性约束聚变装置中,靶面辐照均匀性是实现均匀内爆压缩的关键<sup>[1]</sup>。高均匀度的初始辐照是均匀内爆压缩的前提,而初始辐照均匀性由靶腔腔壁光强分布所决定<sup>[2]</sup>,因而有必要对靶腔腔壁的初始辐照均匀性进行研究。为了获得高的腔壁初始辐照均匀性,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<sup>[3]</sup>。其中,空域匀滑技术包括随机位相板(Random Phase Plate, RPP)、连续相位板(Continuous Phase Plate, CPP)、透镜列阵(Lens Array, LA)、相息相位板(Kinoform Phase Plate, KPP)、偏振控制板(Polarization Control Plate, PCP)等;而时域束匀滑技术则包括诱导空间非相干(Induced Spatial Incoherence, ISI)、光谱角色散匀滑(Smoothing by Spectral Dispersion, 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<sup>[4-5]</sup>,如美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)采用了一维 SSD、CPP 与 PCP 联用的束匀滑方案,法国兆焦耳装置(Laser Magajoule, LMJ)则采用了三倍频光栅透镜加 CPP 的纵向光谱色散方法,而我国研究人员提出一种通过增大带宽来提高系统负载能力、改善靶面辐照均匀性的束匀滑新方案——多频、多色光谱角色散束匀滑方案<sup>[6]</sup>。

在惯性约束聚变过程中,由于激光与等离子体相互作用会极大地影响靶面辐照均匀性,降低束靶耦合效率<sup>[7]</sup>。因此,在激光与等离子体相互作用条件下,分析腔壁的辐照特性(辐照均匀性、偏振特性等)是十分有意义的。然而,伴随着随时空演变的等离子体相互作用过程,集束在腔壁的辐照特性也将随时空发生变化且极为复杂。文中分析了多集束在真空靶腔腔壁上的初始辐照特性,可为进一步开展靶腔内不同区域激光等离子相互作用研究提供更加准确的初始边界条件。

目前,针对激光束在柱形腔腔壁辐照特性的研究,尚缺乏在柱形腔结构和复杂光路排布情况下对多集束激光在腔壁的辐照特性分析<sup>[8]</sup>。文中以 NIF 装置为例,在采用 SSD、CPP 和 PCP 联用的束匀滑方案的基础上,建立了集束在真空腔内的传输模型,进而

对激光集束在腔壁的辐照特性进行了分析。同时,开展了现有的集束光路排布的初步优化分析,从而为以后间接驱动柱形腔光路优化设计以及开展腔内激光等离子体相互作用的研究提供有用参考。

## 1 理论模型

图 1(a)中给出了 NIF 在 2010 年实验中所采用的柱形腔结构参数<sup>[4]</sup>,其中,XYZ 为入射激光束坐标系,xy 为腔壁坐标系, $\alpha$  为入射光束与腔轴夹角。在图 1(b)中则给出了单端注入激光束入射角度及其光路排布示意图。

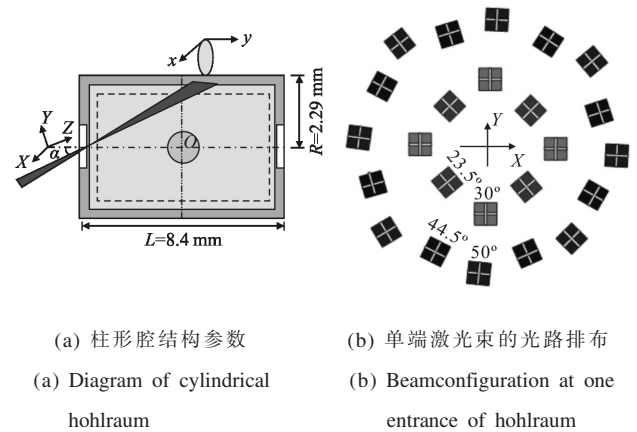


图 1 柱形腔结构示意图

Fig.1 Illustration of cylindrical hohlraum structure

从图 1(b)可知,单端注入激光束分为内、外环激光束:其中,内环激光束分为以 23.5°和 30°入射间隔排布的 8 个集束,而外环激光束则分为以 44.5°和 50°入射间隔排布的 16 个集束。此外,为了改善单集束在靶面上的辐照均匀性,NIF 的单束采用了“1D-SSD+CPP+PCP”联用的束匀滑方案<sup>[4-5]</sup>,如图 2 所示。

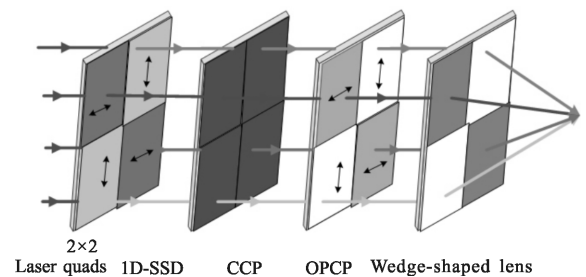


图 2 “1D-SSD+CPP+PCP”束匀滑方案示意图

Fig.2 Illustration of beam smoothing scheme by "1D-SSD+CPP+PCP"

在图 2 中,各子束分别经过色散方向相互垂直

的单方向色散后,再依次分别由 CPP 和偏振单元进行位相和偏振控制,最后经楔形透镜聚焦。集束经 SSD 和 PCP 后的光场可表示为:

$$\vec{E}(x_0, y_0, 0) = \sum_{p=1,-1} \sum_{q=1,-1} \vec{E}_{pq}(x_0, y_0, 0) = \sum_{p=1,-1} \sum_{q=1,-1} A_0(x_0-pw, y_0-qw, t) \times \exp[i\Phi(x_0-pw, y_0-qw)] \times \exp\left\{i\left[3\omega_0 t + 3\delta \sin\omega_m \left(t + \left|\frac{p+q}{2}\right| \xi(x_0-pw)\right) + 3\delta \sin\omega_m \left(t + \left|\frac{p-q}{2}\right| \xi(y_0-qw)\right)\right]\right\} \times \left(\left|\frac{p+q}{2}\right| \vec{e}_x + \left|\frac{p-q}{2}\right| \vec{e}_y\right) \quad (1)$$

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

$$A_0(x_0-pw, y_0-qw, t) = \exp\left\{-\left[\frac{(x_0-pw)^2}{w^2} + \frac{(y_0-qw)^2}{w^2} - (t/\tau)^{2M}\right]\right\} \quad (2)$$

为光场的时空振幅分布;  $w$  为束腰半径;  $\tau$  为脉宽;  $N, M$  为超高斯的阶数;  $\omega_0$  为中心角频率;  $\delta, \omega_m$  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,  $\lambda_0$  为中心波长,  $c$  为光速;  $\Phi$  为 CPP 对激光束的附加位相;  $\vec{e}_{xy}$  表示子束偏振方向, 由该子束所经过的 PCP 子单元决定。

针对图 1(a) 所示的柱形腔结构, 由于该子束的入射角度为  $\alpha$ , 则激光束所在的坐标系  $XYZ$  与腔壁坐标系  $xy$  的关系为<sup>[2]</sup>:

$$\begin{aligned} x &= R \arcsin(X/R) \\ y &= \frac{[\cos(X/R) - 1]R \cos\alpha - Y}{\sin\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

激光束从楔形透镜前焦面到柱形腔的传输可用 Collins 公式<sup>[9-10]</sup>描述, 以其中一个子束为例, 其远场光场为:

$$\vec{E}_{pq}' = \left(-\frac{i}{\lambda_0 B}\right) \exp(ikL) \times \iint_{S_i} \vec{E}_{pq}(X, Y, 0) \cdot \exp\left[\frac{ik}{2B}[A(X^2+Y^2)+D(x^2+y^2)-2(Xx+Yy)]\right] dXdY \quad (4)$$

式中:  $A = -d/f, B = f, C = -1/f, D = 0; k = 2\pi/\lambda_0$  为光波矢;  $L = 2f + d, f$  为楔形透镜焦距;  $d$  为集束从焦面传输到腔壁的距离, 可表示为:

$$d = R/\sin\alpha + y\cos\alpha + (R - \sqrt{R^2 - X^2})/\sin\alpha \quad (5)$$

对于一个集束而言, 总光强为各子束经楔形透镜聚焦后的叠加, 即:

$$I = \sum_{p=1,-1} \sum_{q=1,-1} [\vec{E}_{pq} \times \text{conj}(\vec{E}_{pq})] \quad (6)$$

## 2 数值模拟及分析

针对如图 1(a) 所示 NIF 装置的内外环光路排布, 根据公式(1)~(6)对不同角度入射的集束在腔壁上的光强分布进行数值计算。计算时所采用的参数<sup>[5,7]</sup>:  $w = 186 \text{ mm}; \tau = 10 \text{ ns}; N = 6; M = 6; \omega_0 = 1.79 \times 10^{15} \text{ Hz}; \delta = 2.33; \omega_m = 17 \text{ GHz}; d\theta/d\lambda = 4.4976 \times 10^4 \mu\text{rad/nm}$ ; SSD 积分时间为  $10 \text{ ps}; \lambda_0 = 1053 \text{ nm}$ ; 三倍频后的波长为  $\lambda = 351 \text{ nm}$ ; 激光调制带宽  $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}; f = 7.7 \text{ m}; n$  为每环激光的束数(内环  $n = 8$ ; 外环  $n = 16$ ); 两端注入 192 路光束的总能量为  $1.8 \text{ MJ}$ 。

### 2.1 集束以不同角度入射到腔壁的辐照特性分析

#### 2.1.1 单集束以不同角度入射到腔壁的辐照特性分析

图 3 给出了不同角度集束入射到腔壁的光强分布。

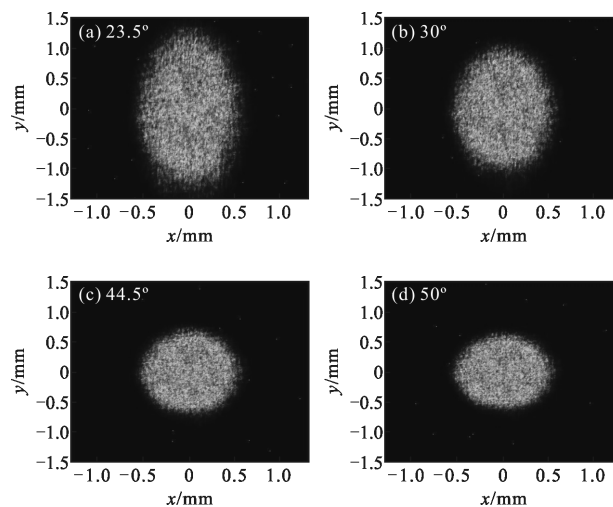


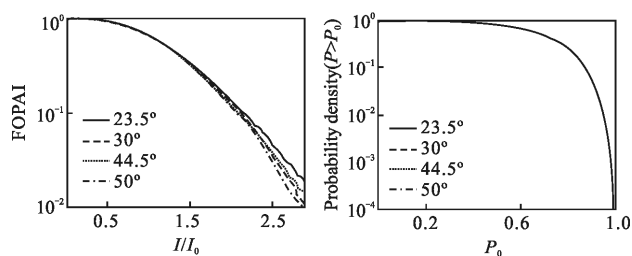
图 3 不同角度集束在腔壁光强分布

Fig.3 Intensity distribution of laser quads achieving hohlraum wall with different incident angles

由图 3 可知, 各集束随着入射角度的减小, 其在腔壁上的整体光斑增大。并且, 内环集束入射角度较小, 其离焦传输距离较长, 因而其光斑随离焦量的增大而增大。

文中采用 FOPAI<sup>[11]</sup>和偏振度的统计曲线 PD<sup>[11]</sup>对图 3 中集束以不同角度入射到腔壁的辐照特性进行定量分析。其中 FOPAI 表征超过阈值强度的峰值热斑所占焦斑总功率的份额, PD 曲线表示超过某一

偏振度的光在整体光场中所占的份额。腔壁光斑的 FOPAI 曲线和 PD 曲线如图 4 所示。



(a) 不同角度集束在腔壁的 FOPAI 分布 (b) 不同角度集束在腔壁的 PD 曲线  
(a) FOPAI curves (b) PD curves

图 4 集束以不同角度入射到腔壁的光斑均匀性评价

Fig.4 Evaluation of laser-quads uniformity on hohlraum wall with different incident angles

在图 4(a)中,由于内外环集束在腔内的传输距离不同,故内外环集束的热斑比例大致相当但略有不同,但由于 CPP 具有一定的离焦容限,在所选取的腔参数下,光斑均匀性并不会变得太差。图 4(b)说明以不同角度入射的集束在腔壁上的光斑的偏振度基本不变。同时,腔内光场偏振度值不再为 1,即腔内光场不再是完全偏振光,而是由注入时的完全偏振光变成了部分偏振光,且偏振度在 0 和 1 之间变化。

### 2.1.2 内外环集束入射到腔壁的辐照特性分析

图 5 给出了内外环集束入射到腔壁上的光斑排布。

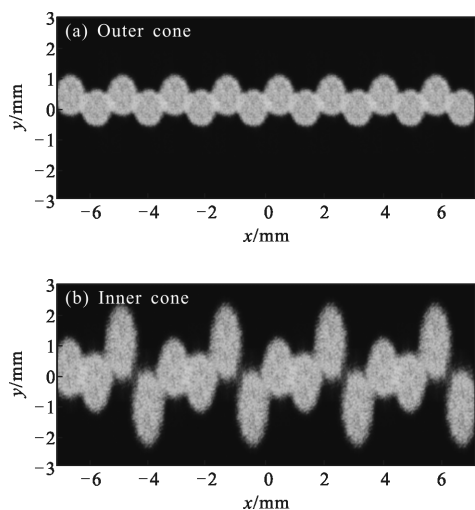


图 5 内外环激光集束在腔壁的光斑叠加

Fig.5 Overlap of the inner and outer cones on hohlraum wall

由图 5 可知,内外环集束在腔壁上均存在光斑重

叠的现象。由于不同集束光斑在腔壁上的叠加会引起腔壁热斑的增加,而热斑比例的增加更易产生各种有害的非线性效应<sup>[10]</sup>。因此,有必要对内外环集束腔壁的热斑比例进行分析,图 6 给出了内外环集束在腔壁的光斑的热斑比例曲线。

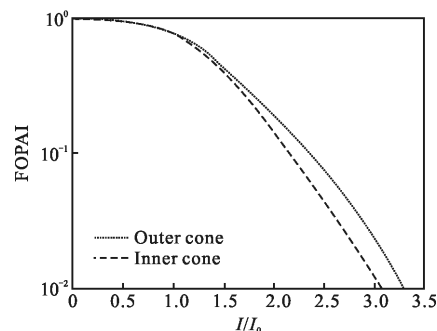


图 6 内外环激光集束在腔壁的热斑比例分布

Fig.6 Proportion of hot spot for the inner and outer cones on hohlraum wall

根据图 5 的内外环在腔壁的光斑分布,并结合图 6 中内外环集束腔壁光斑的热斑比例可知,由于内环单集束与外环单集束的能量相同,而内环集束传输距离较长,其光斑相对较大,因而单位面积的能量相对较低。同时,由于外环集束的光斑重叠更多,因此,外环集束的腔壁光斑的热斑比例比内环集束的热斑比例略高。

### 2.2 内外环所有集束入射到腔壁的辐照特性分析

由于在腔壁集束的辐照特性对产生均匀的 X 射线<sup>[12]</sup>存在极大影响,而偏振特性的影响则并不大。因此,重点对内外环所有集束在腔壁光场分布进行模拟,其结果如图 7 所示。

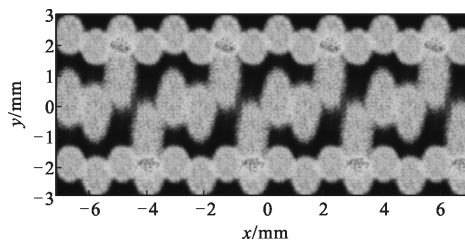


图 7 所有集束在腔壁的光斑叠加

Fig.7 Overlap of all the laser quads on hohlraum wall

从图 7 可见,当以不同角度入射的集束的焦面均设置于黑腔注入入口处时,腔壁内外环的强度均匀性不一定最佳,且内环集束与外环集束之间在腔壁

上存在交叠。为了使内外环集束在腔壁上分离,以降低由于集束间交叠引起的热斑比例增加,故可考虑将内环 23.5°集束的焦面位置从黑腔注入口处向外移一段距离,或者改变内环集束的入射角度,以达到集束在腔壁叠加后对称性和均匀性更好。

### 2.3 光路排布对腔壁光场的影响

结合上述对腔壁辐照均匀性的优化思路,对内外环集束的光路排布进行了适当调整,仿真结果如图 8 所示。图 8 给出了将内环 23.5°集束的焦面沿柱形腔轴外移 0.6 mm 后,所有集束在腔壁上的强度分布,图 9 所示为将内环 23.5°集束入射角度调整为 26°后,所有集束在腔壁上的强度分布。

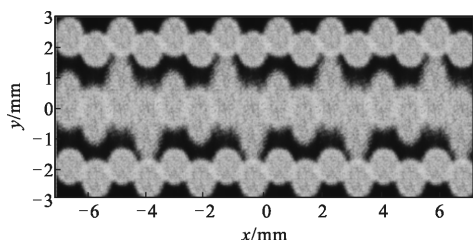


图 8 内环集束焦面位置调整后,所有集束在腔壁的光斑叠加  
Fig.8 Overlap of all the laser quads on hohlraum wall after adjustment the location of the focal plane

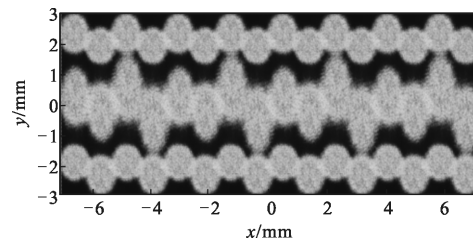


图 9 内环集束入射角度调整后,所有集束在腔壁的光斑叠加  
Fig.9 Overlap of all the laser quads on hohlraum wall after adjustment the incident angle of the inner cone laser quads

分析图 8 和图 9 可知,适当调整内环集束后,内外环集束在腔壁上分离,可有效降低光斑叠加带来腔壁热斑比例增加,且腔壁上光场强度分布和对称性更好。然而,将 23.5°集束轴向外移后,由于集束在注入孔的光斑变大,可能会引发“堵孔”问题;而将 23.5°集束角度调整为 26°后,内环对称性更好,且可以避免堵孔问题,但其腔壁光斑会变小。值得指出的是,在采用 NIF 装置的典型腔参数和激光参数的条件下,将内环 23.5°集束的焦面沿柱形腔轴外移 0.6 mm 或将内环 23.5°集束入射角度调整为 26°是

对光路排布进行初步优化的结果。当腔参数和激光参数改变后,优化调整的集束焦面位置及入射角度将随之而改变。因此,在对内外环集束光路排布优化的过程中,针对内、外环集束外移的距离或角度调整的大小应根据实际的光场焦斑和腔参数综合选取最佳的光路排布方案。

## 3 结论

针对典型柱形腔结构及复杂的光路排布,即集束(2×2子束)按内环(内环集束的入射角分别为 23.5°和 30°)和外环(外环集束入射角分别 44.5°和 50°)分别从柱形腔的两端注入靶腔,建立了基于“SSD+CPP+PCP”束匀滑技术的激光束传输模型,进而模拟和分析了集束在真空柱形腔腔壁的辐照特性。同时,根据柱形腔整体腔壁光斑排布的特点,为改善其腔壁光斑的对称性和均匀性,对内外环集束的光路排布提供了优化的思路。研究表明,随着入射角度的增加,集束在腔壁的光斑尺寸逐渐变小,其在腔壁上热斑的比例以及峰值强度略有降低,且不同角度入射的集束在腔壁上的偏振特性变化并不明显。进一步对内外环集束在腔壁上的强度分布和热斑比例分析可知,外环相对内环而言交叠区域略多,因而其热斑比例相对较高。为了避免内外环集束在腔壁上的交叠,可通过移动内环集束焦面位置和微调入射角度来有效改善内外环集束在腔壁的辐照均匀性。

### 参考文献:

[1] Fu Sizu, Sun Yuqin, Huang Xiuguang, et al. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of "Shenguang - II" facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30: 130-132. (in Chinese)  
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: 130-132.

[2] Yan Yadong, He Junhua, Wang Feng, et al. Optical system for full aperture back scatter diagnosis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3191-3198. (in Chinese)  
闫亚东, 何俊华, 王峰, 等. 全孔径背向散射诊断光学系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3191-3198.

[3] Zhang Donglai, Li Xiaojiang, Yang Yewei. Numerical simulation of three-dimensional temperature field of flying target irradiated by laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*,

- 2014, 43(9): 2883–2888. (in Chinese)  
张东来, 李小将, 杨业伟. 激光辐照飞行靶三维温度场数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2883–2888.
- [4] Jiang Xiujuan, Lin Zunqi. Research progress of beam smoothing in high power laser driver [J]. *Laser and Optronics Progress*, 2010, 47: 091407. (in Chinese)  
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: 091407.
- [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]. *Phys Plasma*, 2004, 11(2): 339–491.
- [6] Nagel S R, Haan S W, Rygg J R, et al. Effect of the mounting membrane on shape in inertial confinement fusion implosions[J]. *Phys Plasma*, 2015, 12: 022704.
- [7] Zhong Zheqiang, Zhou Bingjie, Ye Rong, et al. A novel scheme of beam smoothing using multi-central frequency and multi-color smoothing by spectral dispersion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(3): 035201. (in Chinese)  
钟哲强, 周冰洁, 叶荣, 等. 多频多色光谱角色散束匀滑新方案[J]. 物理学报, 2014, 63(3): 035201.
- [8] Froula D H, Igumenshchev I V, Michel D T, et al. Increasing hydrodynamic efficiency by reducing cross-beam energy transfer in direct-drive-implosion experiments [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(12): 125003.
- [9] Huang Dequan, Yao Xin, Zhao Xi, et al. Light intensity distribution calculation of curved surface diffraction patterns applied in ICF [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(1): 69–74. (in Chinese)  
黄德权, 姚欣, 赵曦, 等. ICF 靶腔曲面光场计算[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 69–74.
- [10] MacGowan B J, Afeyan B B, Back C A, et al. Laser-plasma interactions in ignition-scale hohlraum plasmas [J]. *Phys Plasma*, 1996, 3(5): 2029–2040.
- [11] Meng Qinglong, Zhong Zheqiang, Li Zelong, et al. Influence of depolarized superposition of multi-beams on characteristics of focal spot [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 80–84. (in Chinese)  
孟庆龙, 钟哲强, 李泽龙, 等. 多光束消偏振叠加对焦斑特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 80–84.
- [12] Wang Ruirong, Wang Wei. X-ray line profile measurements in laser produced plasma [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1737–1742. (in Chinese)  
王瑞荣, 王伟. 激光等离子体 X 射线特征谱轮廓诊断[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1737–1742.