

最小空间周期对连续相位板加工和性能的影响

温圣林 唐才学 张远航 颜浩 侯晶 罗子健

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 最小空间周期是连续相位板(CPP)设计和加工过程中的重要特征参数。根据惯性约束聚变大型激光驱动装置的需求,建立不同空间周期的CPP设计与分析方法,研究了不同最小空间周期对磁流变加工和焦斑性能的影响。结果表明,磁流变加工的去函数尺寸直接与CPP的最小空间周期成线性关系,而加工去除量与最小空间周期的平方根成线性关系,最小周期越大,加工越容易,但加工量越大;焦斑整形性能受最小空间周期的影响小,能量集中度差异小于0.2%,但焦斑顶部均匀性随着最小空间周期变小而变好,5 mm最小周期CPP的焦斑顶部不均匀比15 mm的CPP小3.5%。因此,设计时应尽量减小最小空间周期,但选取的最小空间周期不能大于加工设备的约束条件。

关键词 光学器件; 连续相位板; 焦斑; 最小空间周期; 光束匀滑; 惯性约束聚变

中图分类号 O435.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0908001

Effects of Least Spatial Period on the Fabrication and Performance of Continuous Phase Plate

Wen Shenglin Tang Caixue Zhang Yuanhang Yan Hao Hou Jing Luo Zijian

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Least spatial period is an important parameter for the design and fabrication of continuous phase plate (CPP). Based on the requirement of laser facility for inertial confinement fusion, a method of design and analysis for CPP with different least spatial periods is built up. The effects of least spatial period on the fabrication and performance of continuous phase plate have been studied. The results show that the removal function size is linearly correlated to the least spatial period, and the relationship between the removal and the square root of least spatial period is about linear, so the fabrication with larger least spatial period should be easier because the CPP has more medium-high frequency, but it has more material to be removed. Moreover, the beam shaping performance of CPP is rarely influenced by the least spatial period, the difference of capacity usage ratio caused by different CPP is smaller than 0.2%. But the uniformity of top focal spot caused by CPP becomes more excellent when the least spatial period is minimized, the nonuniformity of least spatial period CPP of 5 mm is 3.5% less than that of 15 mm. So the selected least spatial period should be minimized, while it can't exceed the ability of the fabricating equipment.

Key words optical devices; continuous phase plate; focal spot; least spatial period; beam smoothing; inertial confinement fusion

OCIS codes 050.1940; 120.4820; 140.3300; 230.1950; 220.4840

1 引言

连续相位板(CPP)是惯性约束聚变(ICF)激光驱动装置中的一种重要光束匀滑元件^[1-2],它已被广泛应用到美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳激光装置(LMJ)、中国神光III等大型激光装置中^[3-4]。为了满足特定的焦斑分布,通常所设计CPP具有小周期、大梯度的类自由曲面结构^[5-6],美国NIF报道采用数控磁流变抛光已实现空间周期大于1 mm的CPP制作,而国内已采用数控化学和数控磁流变方法实现了最小空间周期为10 mm

收稿日期: 2015-03-18; 收到修改稿日期: 2015-04-15

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项课题(2013ZX04006011-101)

作者简介: 温圣林(1980—),男,硕士,副研究员,主要从事衍射光学、强激光传输与控制方面的研究。

E-mail: shenglinwen@163.com

的 CPP 研制^[7-9]。

最小空间周期是 CPP 的重要结构参数,反映了 CPP 图案的精细程度。最小空间周期在 CPP 设计过程中限制了频谱范围,最小空间周期越小, CPP 设计自由度越大,这有利于提高 CPP 设计性能^[5,10]。美国 NIF 研究人员实验验证了磁流变抛光加工的最小空间周期由设备的去除斑尺寸决定,并通过小口径样机实验验证了最小空间周期为 1 mm 的加工能力^[11],从而确定了 NIF 装置 CPP 设计的最小空间周期为 5 mm。国内 CPP 的工艺及设备研制启动较晚,中国工程物理研究院等单位从元件性能优化设计^[6,10]、工艺改进^[8]分别开展了研究,研制了最小空间周期为 10 mm 的 CPP^[5],但与美国制作能力尚存在差距。进一步提高最小空间周期的加工能力将涉及到 CPP 相关设计优化、设备升级、工艺改进。可见目前 CPP 的最小周期的选取主要根据经验或实验判断来选取,缺乏 CPP 最小空间周期对加工和性能影响的系统研究。因此,研究最小空间周期的影响对于 CPP 设计、加工工艺、设备改造具有指导意义。

本文首先建立针对不同最小空间周期的设计和分析方法,获得不同最小空间周期的 CPP 设计,然后分析不同最小空间周期的 CPP 对加工和焦斑性能两方面的影响,从而得出 CPP 设计最小空间周期的选取方法。

2 基于不同最小空间周期的 CPP 设计与分析

CPP 设计的常用方法为改进 G-S 算法,为提高焦斑性能及结构的连续性, CPP 设计在传统 G-S 衍射设计方法基础上改进了初相选取、相位低通滤波、焦斑频域带通滤波等方法。在相位低通滤波过程中通过改变滤波频率可获得不同最小空间周期的 CPP 设计,采用的低通相位滤波函数为^[6]:

$$\Phi_i(f_x, f_y) = \exp \left\{ - \left[\frac{(f_x^2 + f_y^2)}{f_{\min}^2} \right]^{10} \right\}, \quad (1)$$

式中 Φ_i 为滤波函数, f_x, f_y 是 CPP 的频域坐标, f_{\min} 表示相位滤波的截止频率, f_{\min} 的倒数就是 CPP 的最小空间周期 T_{\min} 。

针对大型激光装置的输入条件和输出需求^[12-14],设计的输出目标为椭圆焦斑,长轴为 600 μm ,长短轴比为 1.414,使用波长为 351 nm,焦距为 2200 mm,通光口径为 290 mm \times 290 mm。通过改变(1)式中的 f_{\min} 参数,分别获得不同最小空间周期的 CPP 结构。CPP 加工采用数控磁流变抛光技术^[15],设备采用中国工程物理研究院自主研制的磁流变加工设备 MRF1200,抛光斑尺寸约为 10 mm \times 5 mm,能加工的最小空间周期在 10 mm 左右。根据现有加工条件,将 T_{\min} 参数设定在 10 mm 附近,取 f_{\min} 分别为 1/5 mm⁻¹、1/10 mm⁻¹、1/15 mm⁻¹ 设计的 CPP 透射波前如图 1 所示,采用标量衍射模拟计算分别得到焦斑如图 2 所示,它们均产生 600 μm 椭圆形焦斑。

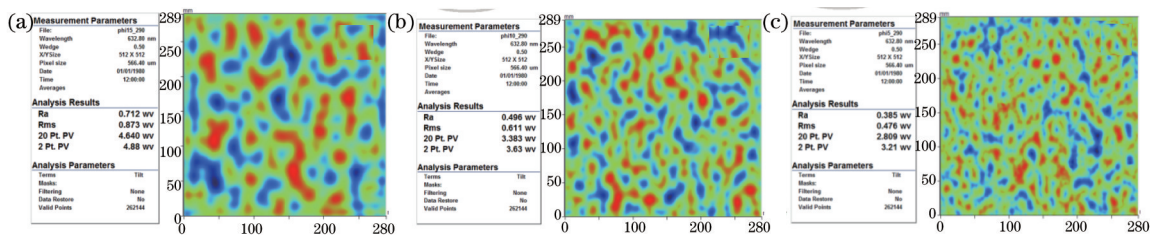


图 1 设计的不同最小空间周期 CPP 透射波前。(a) $T_{\min}=15$ mm; (b) $T_{\min}=10$ mm; (c) $T_{\min}=5$ mm

Fig.1 Designed CPP's wavefront with different least spatial periods. (a) $T_{\min}=15$ mm; (b) $T_{\min}=10$ mm; (c) $T_{\min}=5$ mm

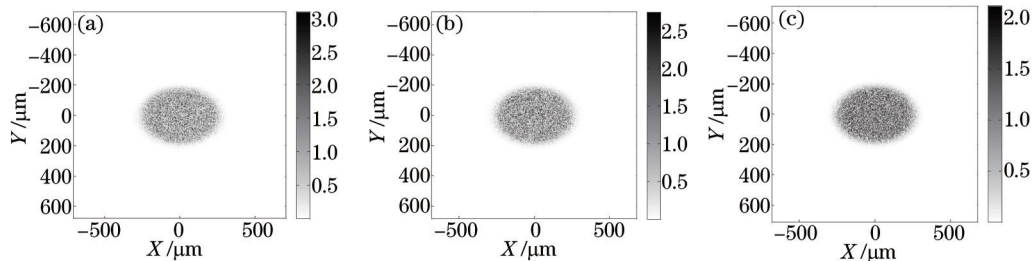


图 2 设计的不同最小空间周期 CPP 产生的焦斑。(a) $T_{\min}=15$ mm; (b) $T_{\min}=10$ mm; (c) $T_{\min}=5$ mm

Fig.2 Focal spot caused by designed CPP with different least spatial periods. (a) $T_{\min}=15$ mm; (b) $T_{\min}=10$ mm; (c) $T_{\min}=5$ mm

不同最小周期对加工的影响可通过分析透射波前结构得出,参数包括波前峰值(PV)、均方根值(RMS)、梯度均方根值(GRMS)。对性能的影响则主要通过比较 CPP 产生的焦斑差异而得出,由于其焦斑为散斑分布,无法直观比较它们的差异,为了分析和评价 CPP 焦斑的整形和匀滑性能,根据束匀滑需求,选用主要评价参数包括能量集中度 η 、整形半径(R_{80} 、 R_{90} 、 R_{95})超过平均强度的功率份额(FOPAI)、光强顶部不均匀性 δ_{RMS} ,具体计算公式定义如下^[16]:

$$\eta = \frac{\iint_{S_g} I_o(x_o, y_o) dx_o dy_o}{\iint_{S_s} I_o(x_o, y_o) dx_o dy_o} \times 100\% , \quad (2)$$

$$F_{\text{FOPAI}}(I) = \frac{\iint_{S_1} I_o(x_o, y_o) dx_o dy_o}{\iint_{S_s} I_o(x_o, y_o) dx_o dy_o} \times 100\% , \quad (3)$$

$$\delta_{\text{RMS}} = \left\{ \frac{\iint_{S_1} [I_o(x_o, y_o) - \bar{I}_o(x_o, y_o)]^2 dx_o dy_o}{\iint_{S_s} [\bar{I}_o(x_o, y_o)]^2 dx_o dy_o} \right\}^{1/2} \times 100\% , \quad (4)$$

式中: S_s 、 S_g 、 S_1 、 S_t 分别表示焦斑全区域、设计目标、超过阈值强度、顶部对应的区域。通常实验要求 η 大于95%, R_{80} 、 R_{90} 、 R_{95} 分别指 η 为80%、90%、95%时焦斑半径。FOPAI和 δ_{RMS} 反映焦斑的均匀性,一般要求超过5倍平均光强的功率份额[FOPAI($5I_0$),通常用FOPAI5表示]小于10%,因为CPP与光谱色散匀滑(SSD)联用,SSD能匀滑10~40 μm 中高频,因此计算 δ_{RMS} 时先对焦斑进行30 μm 滤波。其中 η 、 R_{80} 、 R_{90} 、 R_{95} 反映元件的整形性能,FOPAI5、 δ_{RMS} 反映元件的匀滑性能。

3 最小空间周期对 CPP 加工和性能的影响分析

3.1 对 CPP 加工的影响

对3种CPP功率谱进行分析,计算得到功率谱密度(PSD)曲线如图3所示。3种CPP中 T_{min} 越小,波前分布越复杂,中高频成分越多,精细结构越多,加工质量越难控制,根据文献[11]的“最小周期需要大于加工去除函数的1.5倍”结论, $T_{\text{min}}=15$ mm CPP所需的去除函数尺寸将是 $T_{\text{min}}=5$ mm CPP的3倍。进一步计算波前参数如表1所示,3种设计的GRMS差异很小,分别为0.419 λ/cm 、0.425 λ/cm 、0.432 λ/cm ;但PV值和RMS值均随着 T_{min} 的减小而减小,PV分别为4.88 λ 、3.63 λ 、3.21 λ ,RMS分别为0.873 λ 、0.611 λ 、0.476 λ ,由于PV和RMS在加工过程中分别反映了需加工的深度和去除总量, $T_{\text{min}}=15$ mm、 $T_{\text{min}}=10$ mm、 $T_{\text{min}}=5$ mm CPP的去除量比值分别为1.8:1.3:1,即去除量与最小周期的平方根(1.7:1.4:1)近似呈线性关系。因此, CPP 元件的加工质量

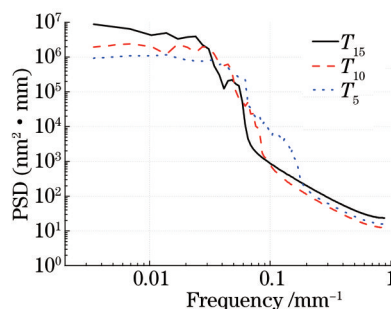


图3 不同最小周期 CPP 的波前一维 PSD 分布对比

Fig.3 1D PSD of wavefront caused by CPP with different least spatial periods

表1 不同最小周期 CPP 的波前参数对比

Table 1 Comparison of wavefront parameters of CPP with different least spatial periods

Conditions	PV / λ	RMS / λ	GRMS /(λ/cm)
$T_{\text{min}}=15$ mm	4.88	0.873	0.432
$T_{\text{min}}=10$ mm	3.63	0.611	0.425
$T_{\text{min}}=5$ mm	3.21	0.476	0.419

控制难度将随着最小周期的变小而增大,所需去除函数尺寸与最小周期呈线性关系,而加工去除量与最小周期的平方根呈线性关系,在选择 T_{\min} 进行设计和加工时,应权衡加工的质量和效率,在满足加工质量控制要求的前提下选取尽可能小 T_{\min} 的进行设计和加工。

3.2 对 CPP 远场性能的影响

采用前述焦斑参数定义及计算方法分别计算3种CPP的焦斑参数如表2所示,图4为整形和匀滑结果对比图,其中(a)为能量随半径的分布曲线,(b)为焦斑中心整形轮廓曲线,(c)为FOPAI曲线。3种CPP的 η 差异小于0.2%,整形半径 R_{80} 、 R_{90} 、 R_{95} 的差异在2 μm 以内,三者的能量分布曲线基本重合,焦斑轮廓线基本重合,但顶部起伏略有差异。可见,不同最小周期的CPP在焦斑整形性能方面差异非常小。在匀滑参数方面,最小周期为15 mm、10 mm、5 mm的3种CPP的FOPAI5值分别为6.99%、5.26%、3.75%, δ_{RMS} 分别为7.51%、5.40%、4.00%,最小空间周期越小,焦斑强峰值毛刺越少,焦斑顶部均匀性越好。这从图4(c)和30 μm 滤波后强度分布图(如图5所示)也可较直观看出其差异。当然设计时选取的最小空间周期还应不小于设备工艺能力,否则这些小周期结构加工无法实现,加工性能可能会更差。假如上述设计中加工只能实现10 mm以上结构的制作,如果按照5 mm的最小空间周期进行设计和加工,由于结构中的10 mm以下周期无法制作,采用10 mm低通滤波近似模拟得到其加工结果,模拟得到其焦斑如图6所示,其焦斑性能还不如最小周期为10 mm的CPP。

综上所述,焦斑整形性能几乎不受最小空间周期的影响,能量集中度的差异小于0.2%,但焦斑顶部均匀性随着最小空间周期变小而变好,最小空间周期5 mm的CPP不均匀性比15 mm CPP更小3.5%,设计时应尽量减小最小空间周期,但选取的最小空间周期不能大于加工设备的约束条件。

表2 不同最小周期 CPP 的焦斑参数对比

Table 2 Comparison of focal spot parameters of CPP with different least spatial periods

Conditions	$\eta / \%$	$R_{80} / \mu\text{m}$	$R_{90} / \mu\text{m}$	$R_{95} / \mu\text{m}$	FOPAI5 / %	$\delta_{\text{RMS}} / \%$
$T_{\min} = 15 \text{ mm}$	99.17	231.5	251.5	266.7	6.99	7.51
$T_{\min} = 10 \text{ mm}$	99.09	231.4	251.8	267.5	5.26	5.40
$T_{\min} = 5 \text{ mm}$	99.00	232.2	253.0	268.9	3.75	4.00

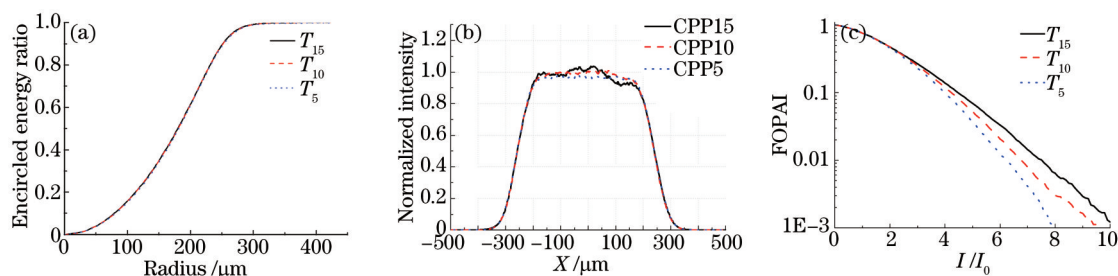


图4 不同最小空间周期 CPP 的焦斑整形和匀滑结果对比。(a) 能量分布; (b) 中心包络; (c) FOPAI

Fig.4 Calculated and measured focal spot intensity caused by CPP with and without wavefront distortion. (a) Encircled energy ratio;

(b) center intensity envelope; (c) FOPAI

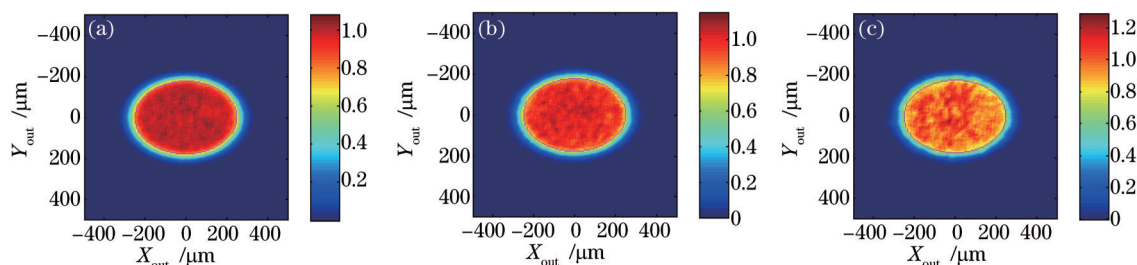


图5 不同最小空间周期 CPP 的焦斑对比(30 μm 滤波)。(a) $T_{\min} = 15 \text{ mm}$; (b) $T_{\min} = 10 \text{ mm}$; (c) $T_{\min} = 5 \text{ mm}$

Fig.5 30 μm low-filter focal spot of CPP with different least spatial periods. (a) $T_{\min} = 15 \text{ mm}$; (b) $T_{\min} = 10 \text{ mm}$; (c) $T_{\min} = 5 \text{ mm}$

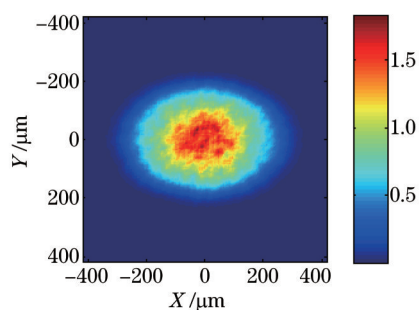


图6 受到10 mm最小空间周期的工艺约束限制时5 mm CPP产生的焦斑(30 μm 滤波)

Fig.6 30 μm low-filter focal spot caused by the CPP with $T_{\text{min}}=5$ mm while the process is restricted by $T_{\text{min}}=10$ mm

4 结 论

根据ICF大型激光驱动装置的需求,建立针对不同空间周期的CPP设计与分析方法,分析了不同最小空间周期对磁流变加工和焦斑性能的影响,得出了一些对CPP设计、设备改造、CPP性能提升有益的结论:

1) 最小空间周期与CPP加工所需去除函数尺寸成线性关系,而最小周期的平方根与元件加工去除量呈线性关系,如最小周期为15 mm周期CPP的去除量将是最小周期为5 mm周期CPP的1.8倍,在选择 T_{min} 时,应权衡加工的质量和效率,在满足加工质量控制要求的前提下选取尽可能小 T_{min} 的进行设计和加工;

2) 焦斑整形性能几乎不受最小空间周期的影响,其中能量集中度的差异小于0.2%,但焦斑顶部均匀性随着最小空间周期变小而变好,最小空间周期5 mm的CPP不均匀性比15 mm CPP更小3.5%,设计时应尽量减小最小空间周期,但选取的最小空间周期不能大于加工设备的约束条件。

参 考 文 献

- 1 P Wegner, J Auerbach, T Biesiada, *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]. SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- 2 Ji Lailin, Liu Cong, Zhu Baoqiang, *et al.*. Analysis of influence of beam smoothing on third harmonic generation in SG II update[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1219002.
季来林, 刘 崇, 朱宝强, 等. 神光II升级系统中束匀滑对三倍频的影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1219002.
- 3 J Neauport, X Ribeyre, J Daurios, *et al.*. Design and optical characterization of a large continuous phase plate for laser integration line and laser megajoule facilities[J]. Appl Opt, 2003, 42(13): 2377-2382.
- 4 Zhang Rui, Li Ping, Su Jingqin, *et al.*. Experiment research of target uniform illumination using smoothing by spectral dispersion and continuous phase plate[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(5): 054204.
张 锐, 李 平, 粟敬钦, 等. 采用光谱色散平滑和连续相位板实现靶面均匀辐照的实验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 054204.
- 5 J A Marozas. Fourier transform-based continuous phase-plate design technique: a high-pass phase-plate design as an application for OMEGA and the national ignition facility[J]. J Opt Soc Am A, 2007, 24(1): 74-83.
- 6 Wen Shenglin, Xu Qiao, Ma Ping, *et al.*. Process-based design of continuous phase plates[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3179-3182.
温圣林, 许 乔, 马 平, 等. 基于工艺连续相位板设计[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3179-3182.
- 7 J A Menapace, P J Davis, W A Steele, *et al.*. MRF applications: on the road to making large-aperture ultraviolet laser resistant continuous phase plates for high-power lasers[C]. SPIE, 2006, 6403: 64030N.
- 8 Wen Shenglin, Hou Jing, Yang Chunlin, *et al.*. Design and fabrication of large-aperture continuous phase plates for back lighting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(5): 052201.
温圣林, 侯 晶, 杨春林, 等. 用于背光照明的口径连续相位板设计和制作[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(5): 052201.
- 9 Ji Jianwei, Wei Chaoyang, Hu Chen, *et al.*. A comparison and analysis of removal function based on edge effect with different pressure distribution models[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1216002.
吉建伟, 魏朝阳, 胡 晨, 等. 不同压力模型下边缘去除函数对比分析[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1216002.
- 10 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin, *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.
- 11 J A Menapace, S N Dixit, F Y Genin, *et al.*. Magnetorheological finishing for imprinting continuous phase plate structure onto optical surfaces[C]. SPIE, 2003, 5273: 220.
- 12 J D Lindl, P Amendt, R L Berger, *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility[J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(2): 339-491.
- 13 D H Froula, L Divol, R A London, *et al.*. Experimental basis for laser-plasma interactions in ignition hohlraums at the national ignition facility[J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(5): 056302.
- 14 C A Haynam, P J Wegner, J M Auerbach, *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. Appl Opt, 2007, 46(16): 3276-3233.
- 15 Zhang Feng. Combined type polishing of silicon modification layer on silicon carbide mirror for space camera[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0716001.
- 张 峰. 空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层的组合式抛光[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0716001.
- 16 Wen Shenglin, Yan Hao, Zhang Yuanhang, *et al.*. Calculation and experiment of the focal spot caused by continuous phase plate with incident wavefront 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.

栏目编辑: 韩 峰