

# 基于光场分布特性分析的高功率激光吸收体设计方法研究

郑天然, 王 方\*, 孙喜博, 胡东霞

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 高功率激光装置需要利用激光吸收体实现对杂散光的有效管控。然而吸收体受光面交界处极易发生激光损伤, 可能导致激光装置内部的洁净环境受到污染。为了解决这一问题, 基于有限元分析方法, 模拟了高功率激光吸收体受光面交界处在包括无过渡、圆弧过渡和平面过渡等不同过渡条件下介质内部的光场分布, 分析了吸收玻璃界面对光场的影响, 得到了介质内部光场峰值强度及峰值位置的变化规律。结果显示: 吸收体的损伤可能是由于过渡面为曲面导致的。研究工作为吸收玻璃的激光损伤研究和吸收体设计提供参考。

**关键词:** 激光吸收体; 光场分布; 激光损伤; 高功率激光

**中图分类号:** TN241 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1005010

## Designing method research of high-power laser absorber based on analysis of light field distribution characteristics

Zheng Tianran, Wang Fang\*, Sun Xibo, Hu Dongxia

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

**Abstract:** Laser absorbers are necessary for high power laser facilities to achieve effective control of the stray lights. However, the boundaries of the absorber light receiving surfaces are easily to be damaged by the laser, which may cause the pollution of the clean environment inside the facility. To solve this problem, based on methods of finite element analysis, light field distribution in medium of high-power laser absorber with its boundary of light receiving surface under conditions of no-transition, plan transition and curved surface transition were simulated. Effects of absorption glass boundary on light field were analyzed. Transformation regularity of the intensity and position of light field peak inside the medium were obtained. The results indicate that the damage of the absorber may be caused by the curved surface transition of the boundary. This research provides a reference for research of laser damage and absorber designing.

**Key words:** laser absorber; light field distribution; laser damage; high-power laser

收稿日期: 2019-06-11; 修订日期: 2019-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61775199, 11704352)

作者简介: 郑天然(1993-), 男, 研究实习员, 主要从事高功率激光技术方面的研究。Email: zhengtianranhit@163.com

通讯作者: 王方(1979-), 男, 副研究员, 主要从事高功率激光技术方面的研究。Email: shilan\_wang@126.com

## 0 引言

高功率激光驱动装置<sup>[1-4]</sup>通常采用红外激光经过三倍频后的紫外光进行打靶,因此三倍频光会聚焦在靶点。在频率转换过程中,基频光无法完全转换为三倍频<sup>[5-6]</sup>,剩余大量基频光需要设置光束吸收装置,以防止激光与靶室内壁的相互作用。为使光束尽可能被吸收而不会返回光路,吸收体的受光面通常为斜面,这就使得吸收玻璃两受光面交界处产生锐利的劈尖结构。然而,在使用过程中,这种劈尖结构在激光辐照下极易发生损伤从而产生喷溅,影响吸收效果,同时也给吸收玻璃的加工带来了困难。因此需要研究吸收玻璃受光面交界处在不同过渡条件下介质内部的光场分布,进而为损伤原因的分析 and 损伤情况的改善提供参考。

## 1 介质内部光场分布

描述光的传播的基本方程组为麦克斯韦方程组:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \varepsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\vec{E}$ 、 $\vec{B}$ 分别为电场强度和磁感强度; $\varepsilon$ 、 $\mu$ 分别为介电常数和磁导率。由公式(1)简单推导可得与时间无关的稳态方程:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \varepsilon_r \vec{E} = 0 \quad (2)$$

式中: $k_0$ 为真空中的波数; $\varepsilon_r$ 为相对介电常数。

基于公式(2),采用有限元分析方法模拟了吸收玻璃受光面交界处在不同过渡条件下介质内部的光场分布,选取的参数为:介质折射率为 $n_2=1.47$ ,吸收系数 $\alpha=115.53$ ,两界面夹角 $\theta=30^\circ$ ,激光在真空中的波长为 $\lambda_0=1\,053\,\text{nm}$ ,激光电场强度为平顶分布,宽度为 $1\,000\,\mu\text{m}$ ,功率为 $1\,\text{W}$ 。图1为吸收体结构示意图,其中 $x$ 为激光入射方向。

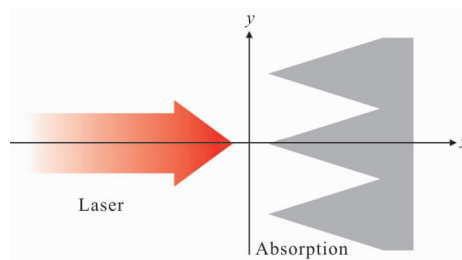
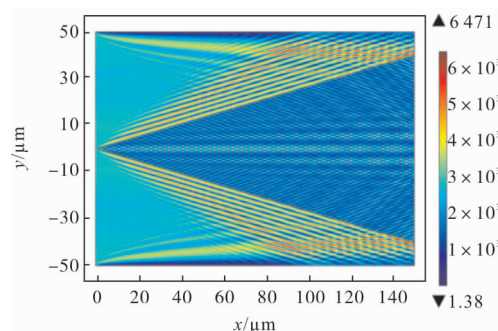


图1 吸收体结构示意图

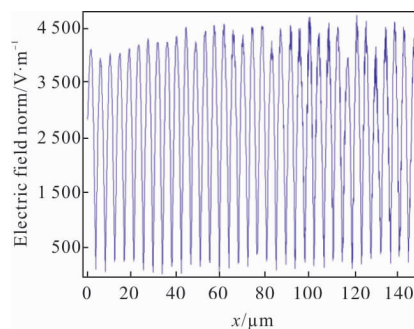
Fig.1 Schematic diagram of absorber structure

激光经劈尖界面后介质内的光场分布如图2所示,其中 $x$ 为入射激光传输方向,颜色表示归一化电场强度。如图2所示,介质的劈尖界面导致激光光场在介质内部产生复杂的调制,介质内部的光场分布不均匀,存在局部强区,高强度的光场调制主要集中在介质中心线上。介质中心线上的电场强度如图2(b)所示,强度峰值在中心线上基本保持相同。



(a) 二维分布

(a) 2-dimensional distribution



(b)  $y=0$  时的一维分布

(b) 1-dimensional distribution with  $y=0$

图2 激光经劈尖界面的光场分布

Fig.2 Light-field distribution of laser passed through wedge boundary

当界面交界处为不同宽度的平面时,激光经界

面后的光场分布如图 3 所示,其中图 3(a)~(e)分别为平面宽度为 5.36、10.72、16.08、21.44、26.80  $\mu\text{m}$  时

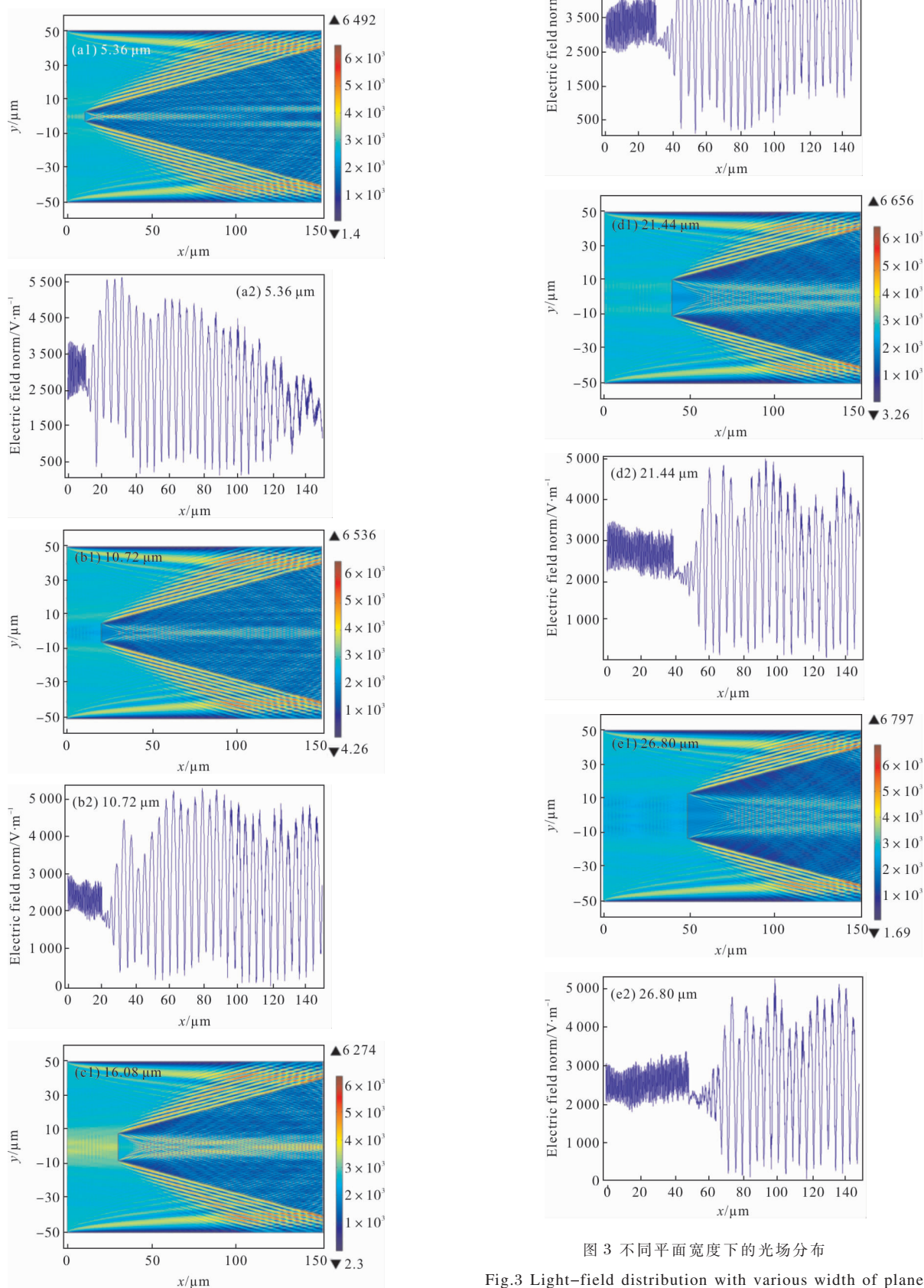


图 3 不同平面宽度下的光场分布

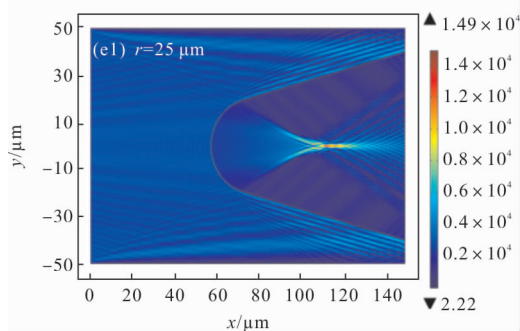
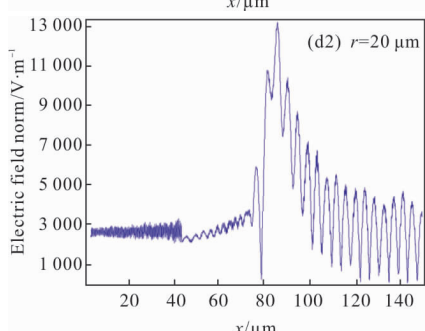
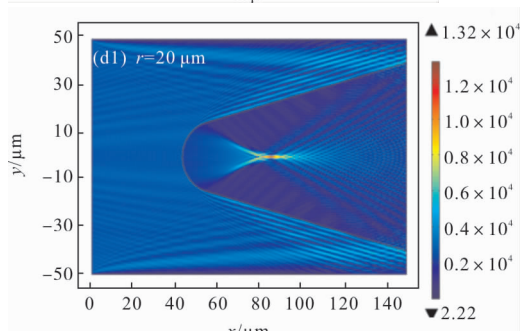
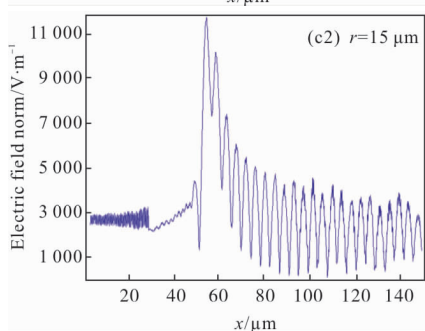
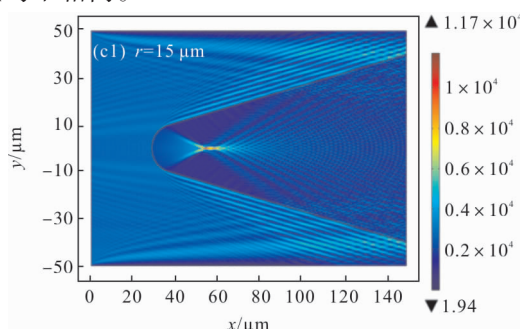
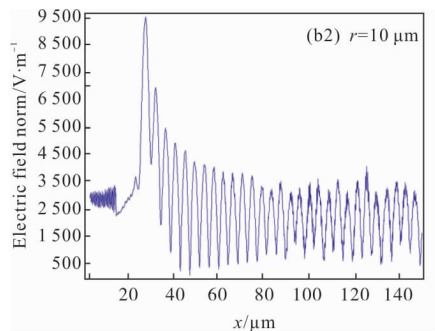
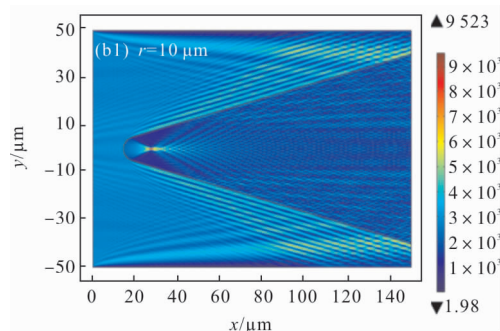
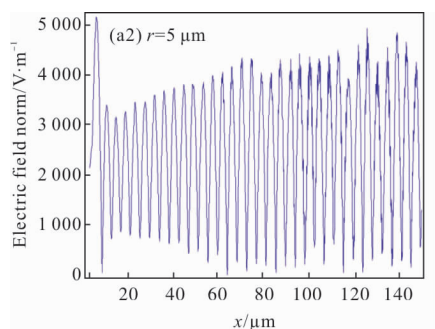
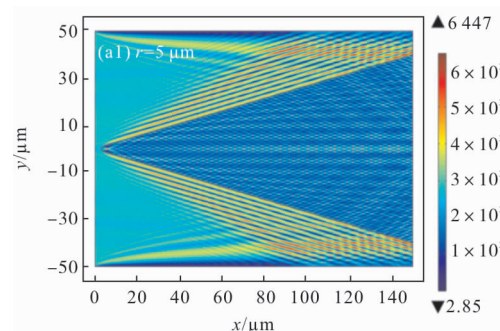
Fig.3 Light-field distribution with various width of plane



的电场强度分布。由图 3 可以看出,与劈尖界面不同的是,高强度的光场调制主要分布在关于介质中心线对称的一定宽度范围内,其尺度与平面宽度相当,强度峰值相比于劈尖界面的强度峰值更高。在平面宽度变化时,光场强度峰值没有明显的变化。

在介质界面存在不同曲率半径的倒角时,激光经界面后的光场分布如图 4 所示,其中图 4(a)~(e)分别为倒角曲率半径为 5、10、15、20、25  $\mu\text{m}$  时的电场强度分布。此时由于曲面的存在,介质内电场存在一

个“焦点”,介质内最大电场强度位于此“焦点”位置,在不同的曲率半径下,强度峰值大小及强度峰值的位置均不相同。



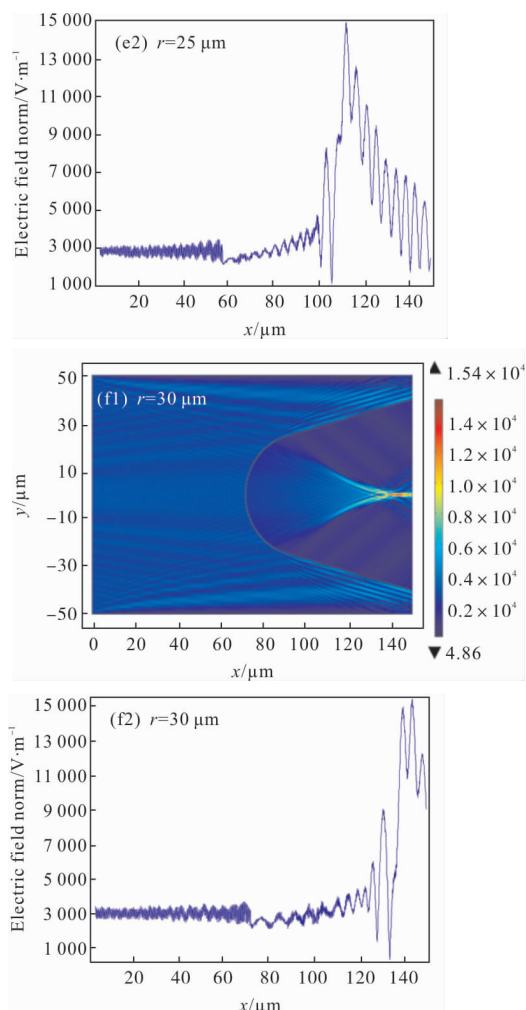
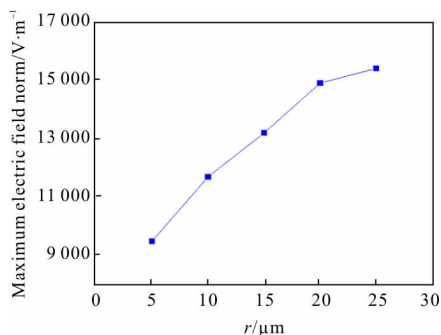


图 4 不同曲率半径下的光场分布

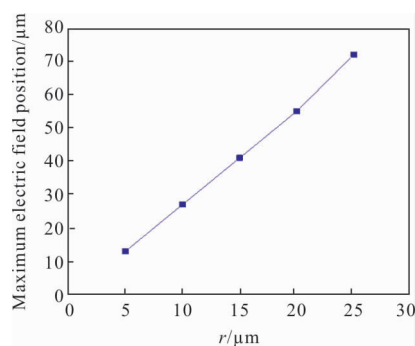
Fig.4 Light-field distribution with various radius of curvature

在不同曲率半径下, 光场峰值强度及光场峰值位置随曲率半径的变化如图 5 所示。由图 5(a)可以看出, 随着曲率半径的增大, 过渡界面面积增大, 因此会在“焦点”处汇聚更多的能量导致光场峰值强度不断增大, 同时可以看出随着曲率半径的增加, 峰值



(a) 峰值强度的变化

(a) Peak intensity



(b) 峰值位置的变化(距介质顶点的距离)

(b) Position of peak (distance from the vertex of the medium)

图 5 光场峰值强度和峰值位置随曲率半径的变化

Fig.5 Intensity and position of peak light-field as a function of radius

强度的增长速度逐渐降低, 这是由于介质的吸收抑制了峰值强度的增长。由图 5(b)可以看出, 随着曲率半径的增大, 光强峰值位置距界面顶点的距离随着曲率半径线性增长。

## 2 曲率半径与峰值强度关系分析

由于计算量的限制, 难以仿真进一步增加过渡面曲率半径的情况, 接下来从理论上分析“焦点”处强度随曲率半径的变化。在上下两介质界面夹角不变时, 可以将倒角界面的作用看做一个  $F$  数不变的透镜, 则光场“焦点”的特征尺度为  $\sim \lambda F$  保持不变, 此时倒角部分的激光功率与倒角处的受光面积成正比进而与曲率半径成正比, 即:

$$P \propto r \quad (3)$$

式中:  $P$  为激光功率;  $r$  为曲率半径。

焦点处的光强与焦点的特征尺度成正比, 因此也与曲率半径成正比, 即:

$$I \propto r \quad (4)$$

式中:  $I$  为无吸收时焦点处的光强。

考虑介质的吸收, 假设激光在介质中传输到焦点的距离相同, 且为焦距  $f$ , 则有:

$$I_{\alpha} \propto r \exp(-\alpha f) \quad (5)$$

式中:  $I_{\alpha}$  为有吸收时焦点处的光强。

在采取前文所述参数时, 焦点处光强的相对值与曲率半径的关系如图 6 所示, 其中焦距  $f$  由傍轴近似得到, 即:

$$f = \frac{n_2 r}{n_2 - n_1} \quad (6)$$

式中:  $n_2$  为介质折射率;  $n_1$  为真空折射率。

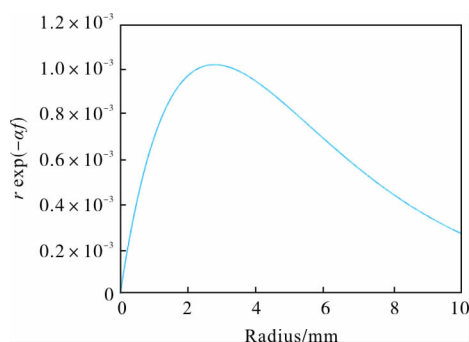


图 6 焦点处光强的相对值与曲率半径的关系

Fig.6 Relative intensity of the focal spot as a function of radius

从图 6 可以看出, 光强相对值随曲率半径的增加先增大后降低, 因此, 进一步增加曲率半径可以使介质内部峰值强度降低到吸收玻璃的损伤阈值以下, 从而降低吸收玻璃的损伤风险。

### 3 结束语

文中通过软件仿真研究了高功率激光装置吸收体界面在不同过渡条件下, 介质内部的光场分布。研究表明: 劈尖界面会使介质内部光场产生强度调制; 当过渡面为平面时, 光场强度调制发生改变, 介质内部峰值强度相比于劈尖界面有所增加, 但随过渡平面宽度的变化不明显; 当过渡面为曲面时, 介质内部光场发生聚焦, 强度峰值相比于劈尖界面和平面过渡明显增大, 吸收体的损伤可能是由于过渡

面为曲面导致的。理论分析了焦点处光强分布随曲率半径的变化, 给出了峰值强度与曲率半径的关系, 当曲率半径达到可控范围时(毫米量级), 可以通过增大曲率半径降低介质内部光场的峰值强度, 从而降低吸收体损伤风险。文中的研究作为高功率激光装置吸收体损伤研究和吸收体设计提供了参考。

### 参考文献:

- [1] Haynam C A, Wegner P J, Bowers M, et al. National ignition facility laser performance status [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
  - [2] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
  - [3] LSpath M, Manes K R, Bowers M, et al. National ignition facility laser system performance [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 366-394.
  - [4] Zheng Wanguo, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua, et al. Laser performance of the SG-III laser facility[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, 4(3): e21.
  - [5] Wegner P, Auerbach J, Biesiada T, et al. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]//SPIE, 2004, 5341: 180-189.
  - [6] Li Fuquan, Han Wei, Wang Fang, et al. Research status of final optics assembly in high-power laser facility[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50 (6): 060002. (in Chinese)
- 李富全, 韩伟, 王芳, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060002.