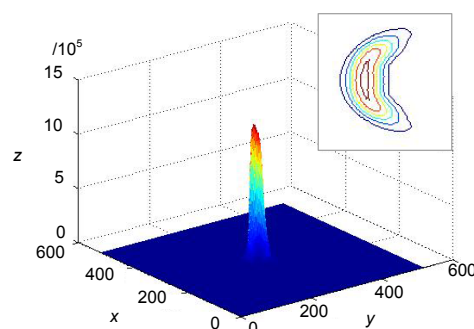




DOI: 10.12086/oe.2018.170620

## 不同强度分布激光水平传输 稳态热晕效应的数值模拟

吴书云<sup>1,2,3</sup>, 李新阳<sup>1,2\*</sup>, 罗曦<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 采用数值模拟的方法, 以高斯光束、平顶光束、有中心遮拦的平顶光束为例, 研究了激光在均匀大气传输过程中产生的稳态热晕效应。详细分析了发射功率、传输距离、光束直径、横向风速四种参数对热晕效应的影响, 得到了以上三种光束的斯特列尔比和峰值偏移量随广义热畸变参数  $N$  的变化关系。数值仿真结果表明, 在其他参数一致的情况下, 发射功率越大、传输距离越长, 热晕效应越强; 而光束直径和横向风速的增加会减小热晕效应; 不同激光强度分布对热晕效应的影响不同。在同样广义热畸变参数  $N$  的条件下, 高斯光束的热晕效应最严重, 平顶光束次之, 空心光束的热晕效应最小。

**关键词:** 激光传输; 稳态热晕; 强度分布; 数值模拟

**中图分类号:** TN249

**文献标志码:** A

**引用格式:** 吴书云, 李新阳, 罗曦. 不同强度分布激光水平传输稳态热晕效应的数值模拟[J]. 光电工程, 2018, 45(2): 170620

## Numerical simulation of horizontal propagation steady-state thermal blooming effect on laser beam with different intensity distribution

Wu Shuyun<sup>1,2,3</sup>, Li Xinyang<sup>1,2\*</sup>, Luo Xi<sup>1,2</sup><sup>1</sup>The Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The horizontal propagation steady-state thermal blooming effects of laser beams with different intensity distributions, such as Gaussian beam, flat-top beam, and flat-top beam with center obscuration, have been investigated by numerical simulation. The impacts of the output power, the propagation distance, the beam diameter, and the wind velocity vertical to the propagation direction on the steady-state thermal blooming have been discussed for the above mentioned three kinds of beams. Furthermore, the steady-state thermal blooming induced Strehl ratio degradation and peak intensity offset versus the generalized thermal distortion parameter  $N$  after long-path horizontal propagation of laser beams with above mentioned three types of intensity distributions have been derived. The simulation results show that, for certain other parameters, the greater output power or longer propagation dis-

收稿日期: 2017-11-12; 收到修改稿日期: 2018-01-16

基金项目: 中国科学院创新基金项目(CXJJ-16S022)

作者简介: 吴书云(1993-), 女, 博士研究生, 主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: wushuyun1993@hotmail.com

通信作者: 李新阳(1971-), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学相关技术方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

tance will induce the stronger thermal blooming, and the increment of the launch diameter or the convection wind velocity vertical to the propagation direction will weaken the thermal blooming oppositely. Furthermore, for laser beams with different intensity distributions, the impacts of the thermal blooming on the propagation are so different. Under the same generalized thermal distortion parameter  $N$ , the thermal blooming effect on the Gaussian beam is the most serious, followed by the flat-top beam, and flat-top beam with center obscuration is the smallest.

**Keywords:** laser propagation; steady-state thermal blooming; intensity distribution; numerical simulation

**Citation:** Wu S Y, Li X Y, Luo X. Numerical simulation of horizontal propagation steady-state thermal blooming effect on laser beam with different intensity distribution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(2): 170620

## 1 引言

激光在大气中传输时会与大气分子和大气中的微小颗粒发生相互作用,产生一系列线性和非线性效应。非线性效应内容十分广泛,只要激光功率达到一定程度时,激光就会和大气介质相互作用,而产生非线性光学效应。由于在所有的非线性效应中,热晕效应是一种非常重要的现象,因而分析热晕效应在激光大气传输中的作用具有重要意义。当激光在大气中传播时,大气中的分子和气溶胶粒子吸收激光的能量而使空气被加热,导致局部空气受热膨胀,密度减小,最终导致空气局部折射率变小,相当于在大气中形成一个负透镜,使光束发散,严重影响了光束质量和到达靶面的激光功率密度,从而无法达到激光传输的目的。因此研究热晕效应是非常有必要的<sup>[1-4]</sup>。

为了对稳态热晕问题进行研究,本文采用相屏法数值模拟了某特定短波红外波长的高斯光束、平顶光束、遮拦比为 40% 的平顶光束在大气中传输的热晕效应,并且得到了一系列有规律的结果。

## 2 原理

本文在数值模拟中采用相屏法,即光束的传输路径由真空和散布其间的若干相位屏所构成。激光每传输到一个相屏时即把对应的相位扰动叠加到光波前上,然后在真空中传输至下一个相屏处叠加此相屏对应的相位扰动,再在真空中传输,如此迭进直至终点。对于准直光束传输而言,可由近场光束的相位畸变来分析热晕效应对光束传输到远场时的光强分布影响。等压条件下,其稳态热晕效应对应的光束相位畸变为

$$\varphi_B(x, y) = kn_T \left( \frac{\alpha \cdot z}{\rho \cdot C_p \cdot v} \right) \int_{-\infty}^x I(x', y') dx'. \quad (1)$$

对初始光束为高斯光束而言,其强度分布为

$$I = \frac{P}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right),$$

其中:  $P$  为发射光束功率,  $a$  为  $1/e$  峰值功率点光束半径,畸变后的相位分布为

$$\begin{aligned} \varphi_{BG}(x, y, z) &= -\frac{\Delta\varphi_G}{2} \exp\left(-\left(\frac{y}{a}\right)^2\right) \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x}{a}\right)\right) \\ &\cong -\frac{\Delta\varphi_G}{2} \left\{ 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{x}{a}\right) - \left(\frac{y}{a}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{1}{3} \left(\frac{x}{a}\right)^3 + \left(\frac{x}{a}\right) \left(\frac{y}{a}\right)^2 \right] + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{a}\right)^4 \right\} \Lambda, \quad (2) \end{aligned}$$

$\Delta\varphi_G$  为光束的横向最大相移,且满足如下关系:

$$\Delta\varphi_G = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} N_D, \quad (3)$$

其中  $N_D$  为 Bradley-Hermann 热畸变参数<sup>[5]</sup>,通常用以量度热晕位相畸变的强度,且  $N_D$  越大,热晕效应越明显,计算公式如下:

$$N_D = \frac{4\sqrt{2}(-n_T) \cdot k \cdot \alpha \cdot P \cdot z}{\rho \cdot C_p \cdot v \cdot D}, \quad (4)$$

其中:  $n_T = dn/dT$ ,  $k$  为波数,  $\alpha$  为吸收系数,  $P$  为激光发射功率,  $z$  为传输距离,  $\rho$  为流体的密度,  $C_p$  为等压比热容,  $v$  为垂直于光束传输方向的风速矢量,  $D$  为光束直径,  $D = 2\sqrt{2}a$ 。

当激光通过非均匀介质后,其光强传输方程为

$$I(x, y, z) = I_0(x, y, z) \cdot \exp\left\{-\int_0^z \left(\nabla + \frac{\nabla I}{I}\right) \cdot \int_0^{z'} \frac{\nabla n}{n_0} dz'' dz'\right\}, \quad (5)$$

其中  $I_0$  是理想状态时的光强。

$$\begin{aligned} \frac{I(x, y, z)}{I_0} &= \exp\left\{-N_C \left[ 2\left(\frac{x}{a}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a^2}\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \exp\left(-\frac{y^2}{a^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{4y^2}{a^2}\right) \cdot \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x}{a}\right)\right) \right]\right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

其中  $N_C$  为广义无量纲热畸变参数:

$$N_C = \frac{16\sqrt{2}(-n_T) \cdot \alpha \cdot P \cdot z^2}{\pi \cdot n_0 \cdot \rho \cdot C_p \cdot v \cdot D^3}. \quad (7)$$

对于聚焦光束传输而言,在分别考虑光束扫描、聚焦光束和大气吸收情况下,通常引入广义热畸变参数  $N$  定标参量来描述热晕效应的强弱,其表示为

$$N = N_C f(N_E) q(N_F) s(N_\omega), \quad (8)$$

其中:  $f(N_E)$ ,  $q(N_F)$ ,  $s(N_\omega)$  分别为大气消光、光束聚焦和光束扫描因子:

$$f(N_E) = \frac{2}{N_E^2} (N_E - 1 + \exp(-N_E)), \quad (9)$$

$$q(N_F) = \frac{2N_F^2}{N_F - 1} \left( 1 - \ln \frac{N_F}{N_F - 1} \right), \quad (10)$$

$$s(N_\omega) = \frac{2}{N_\omega^2} ((N_\omega + 1) \ln(N_\omega + 1) - N_\omega). \quad (11)$$

通过式(7)可以看出,热畸变强度与激光功率、传输距离、光束直径,以及对流速率有直接的关系,因此以下将采用数值仿真的方法,分别讨论上述参数对热晕的影响。

### 3 计算参量及评价手段

本文利用 EasyLaser 软件仿真研究不同强度分布光束的稳态热晕效应<sup>[6]</sup>。数值模拟时,选取的参数为:激光波长  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ; 传输条件为水平均匀大气,大

气压  $P_{Pa} = 1.0237 \times 10^5$ ; 大气吸收系数  $\alpha = 0.07 \text{ km}^{-1}$ 。

在激光大气传输仿真模拟时,光束质量通常用峰值偏移量  $\Delta x/a$ 、斯特列尔比来评价。峰值偏移量  $\Delta x/a$  定义为焦平面处光斑峰值光强位置相比于真空传输条件下峰值光强位置的偏移量与  $a$  的比值。斯特列尔比  $S_R$  定义为焦平面位置处,光斑峰值光强与真空传输条件下峰值光强之比<sup>[7]</sup>。

### 4 连续激光热晕效应的数值模拟及分析

入射光为高斯光、平顶光、遮拦比为 40% 的平顶光。对于直径为 0.4 m 的三种光束的强度立体分布及其等强分布如图 1 所示。

采用上述三种光束,利用数值模拟方法计算得到如下结果。

#### 4.1 发射功率对热晕效应的影响

图 2 是高斯光束在传输距离为 5000 m, 风速为 3 m/s, 光束直径为 0.4 m 时,分别计算了激光发射功率为 1000 W, 2000 W, 3000 W 几种情况下的稳态热晕效应的强度立体分布((a1) (b1) (c1))和等强分布((a2),

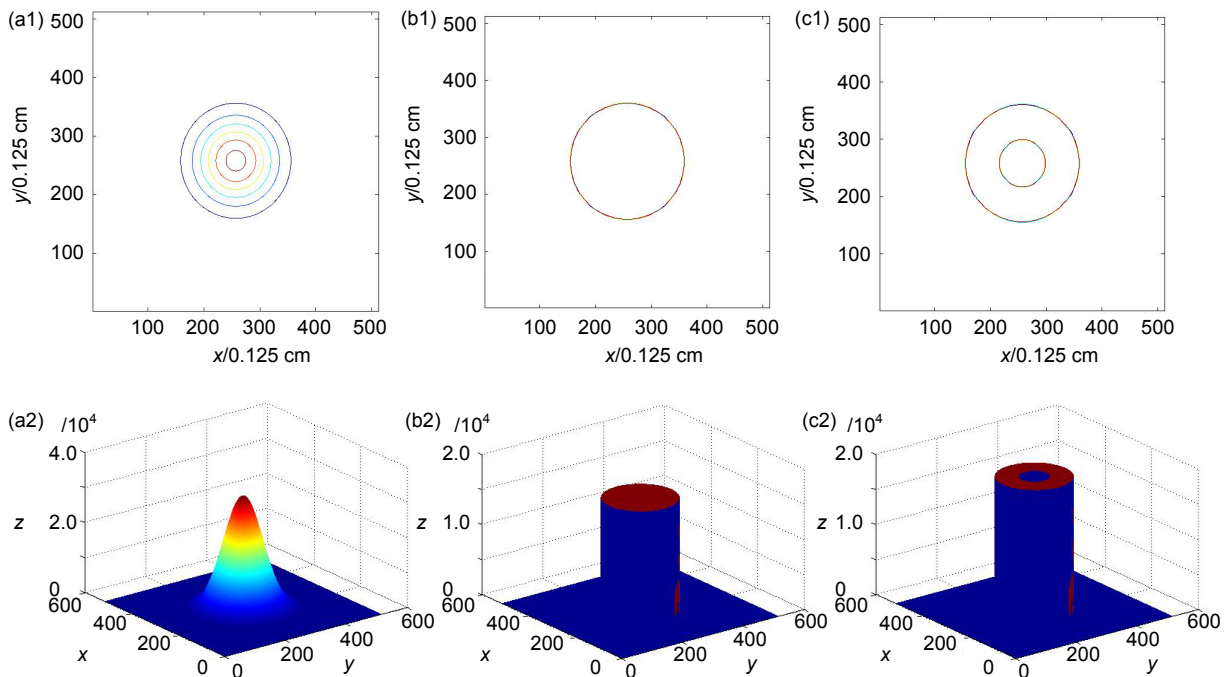


图 1 初始光束的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强度分布((a2), (b2), (c2))。(a1), (a2) 高斯光束; (b1), (b2) 平顶光束; (c1), (c2) 平顶光束遮拦比 40%

Fig. 1 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different beam. (a1), (a2) Gaussian beam; (b1), (b2) Flat-top beam; (c1), (c2) Flat beam obscuration ratio is 40%

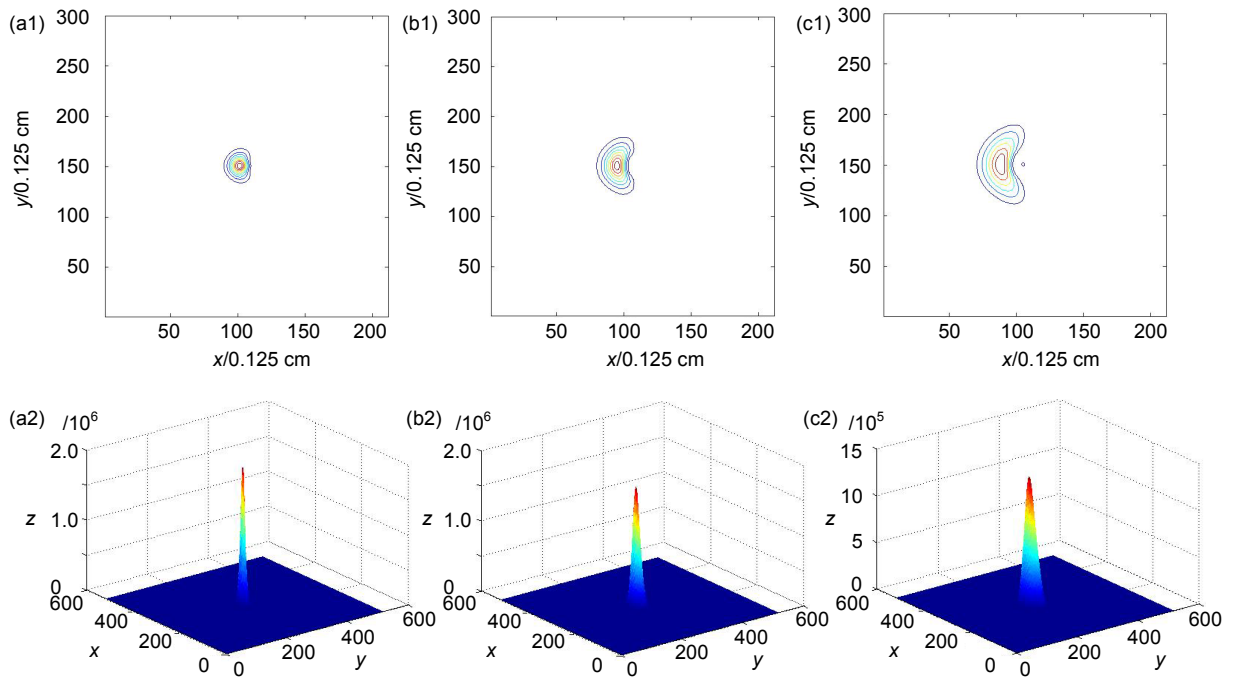


图 2 不同初始功率情况下激光到达靶面的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2)) (高斯光束)。(a1), (a2) 发射功率为 1000 W; (b1), (b2) 发射功率为 2000 W; (c1), (c2) 发射功率为 3000 W  
 Fig. 2 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different laser power (Gaussian beam). (a1), (a2) Power is 1000 W; (b1), (b2) Power is 2000 W; (c1), (c2) Power is 3000 W

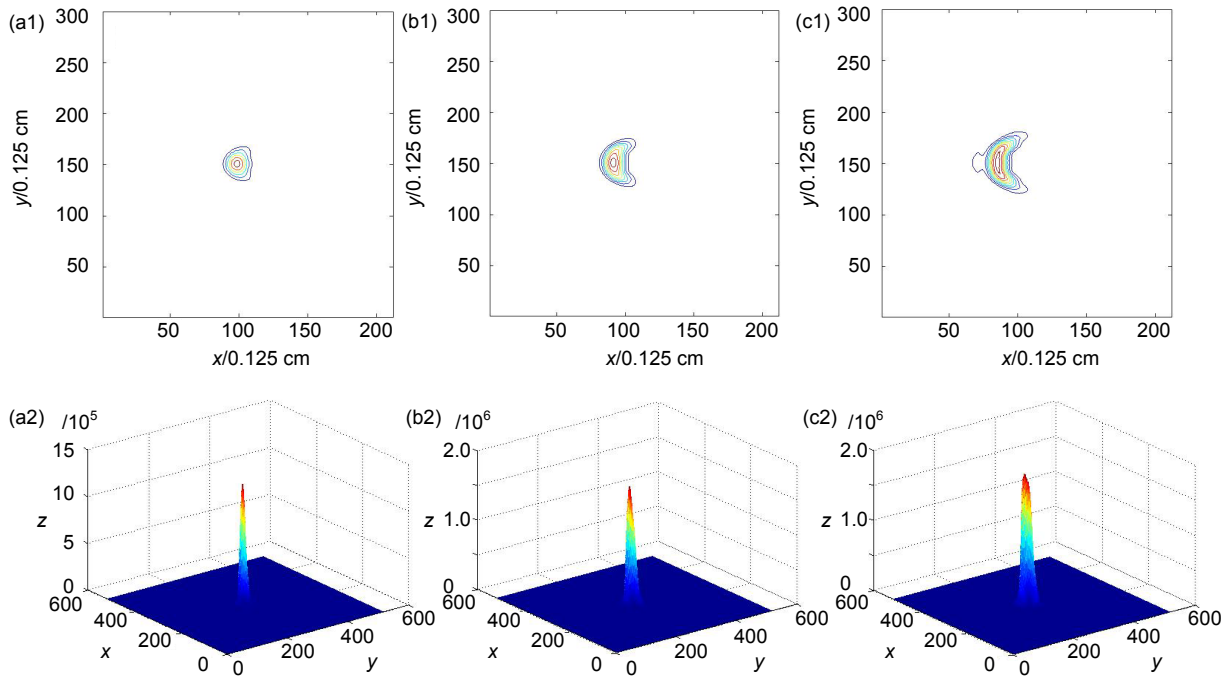


图 3 不同初始功率情况下激光到达靶面的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2)) (平顶光束)。(a1), (a2) 发射功率为 1000 W; (b1), (b2) 发射功率为 2000 W; (c1), (c2) 发射功率为 3000 W  
 Fig. 3 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different laser power. (flat-top beam). (a1), (a2) Power is 1000 W; (b1), (b2) Power is 2000 W; (c1), (c2) Power is 3000 W

(b2), (c2))。图 2(a)、2(b)、2(c)的计算网格点数为 512, 横向抽样间隔均为 0.125 cm。由数值模拟结果可知, 高斯光束传到 5000 m 处峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 0.053、0.106、0.168, 峰值斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.483、0.209、0.112。对应的广义热畸变参数  $N$  分别为 1.682、3.364、5.046。

图 3 为平顶光束, 其余参数均与图 2 相同。由数值模拟结果可知, 平顶光束传到 5000 m 处峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 0.080、0.141、0.194, 峰值斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.634、0.418、0.309。对应的广义热畸变参数  $N$  与图 2 相同, 但光束质量比图 2 的高斯光束略好。

图 4 光源是中心遮拦为 40%的平顶光束, 其余参数均与图 2 相同。由数值模拟结果可知, 中心遮拦为 40%的平顶光束传到 5000 m 处峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 0.053、0.115、0.159, 峰值斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.744、0.468、0.369。对应的广义热畸变参数  $N$  与图 2 相同, 但光束质量比图 3 的平顶光束略好, 比图 2 的高斯光束好很多。

结果表明, 随着发射功率的增加, 峰值偏移量变大, 激光能量的发散就越大。从图中可以看出, 光束在沿风向发生畸变, 光强的峰值发生漂移, 垂直于风

向发生对称性的扩展。在广义热畸变参数  $N$  相同条件下, 高斯光束的热晕效应最严重, 平顶光束略好, 环形光束好得多。

#### 4.2 传输距离对热晕效应的影响

图 5 给出光源为高斯光束, 功率为 4000 W, 风速为 3 m/s, 光束直径为 0.4 m 时, 分别计算了传输距离为 2000 m、3000 m、4000 m 时稳态热晕效应的强度立体分布和等强分布。图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)的计算网格点数为 512, 横向抽样间隔分别为 0.050 cm、0.075 cm、0.100 cm。高斯光束达到不同截面时峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 0.035、0.095、0.163, 斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.215、0.115、0.085。对应的广义热畸变参数  $N$  分别为 3.053、4.379、5.600。

图 6 的光源为平顶光束, 其余参数均与图 5 相同。平顶光达到不同截面时峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 0.039、0.101、0.170, 斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.729、0.476、0.333。对应的广义热畸变参数  $N$  与图 5 相同, 但光束质量比高斯光束好。

图 7 的光源为遮拦比为 40%平顶光束, 其余参数均与图 5 相同。平顶光束达到不同截面时峰值偏移量

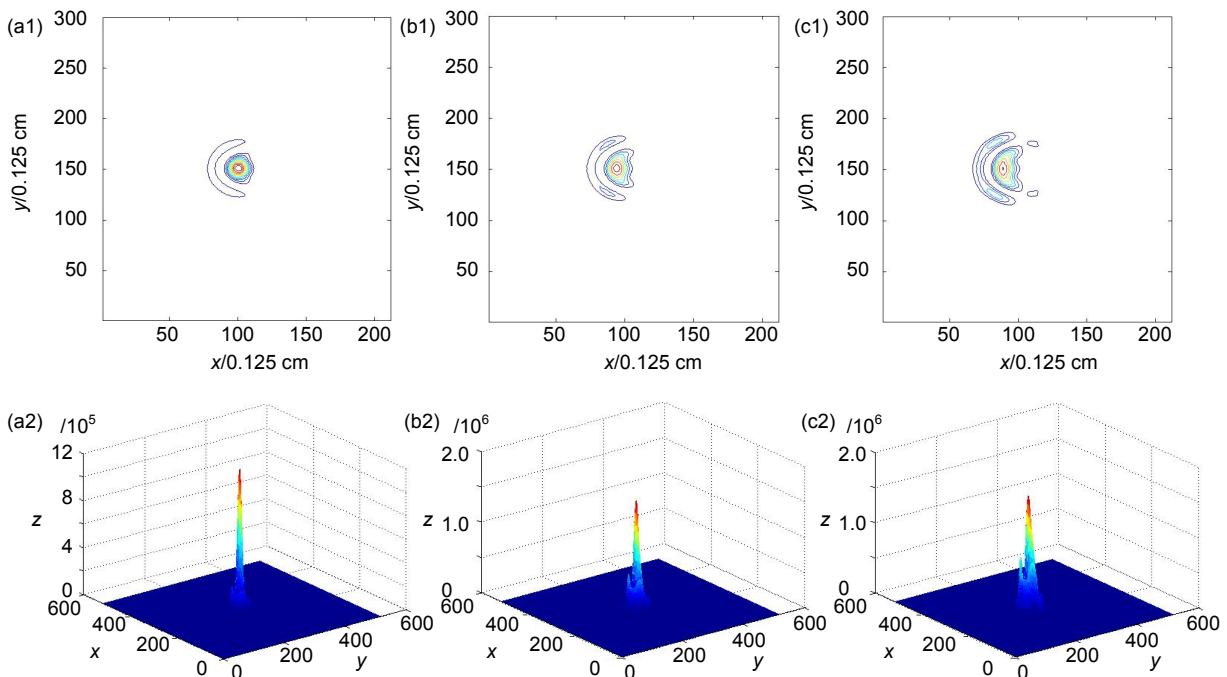


图 4 不同初始功率情况下激光到达靶面的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2))(平顶光束遮拦比 40%)。 (a1), (a2) 发射功率为 1000 W; (b1), (b2) 发射功率为 2000 W; (c1), (c2) 发射功率为 3000 W

Fig. 4 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different laser power (flat-top beam obscuration ratio is 40%). (a1), (a2) Power is 1000 W; (b1), (b2) Power is 2000 W; (c1), (c2) Power is 3000 W



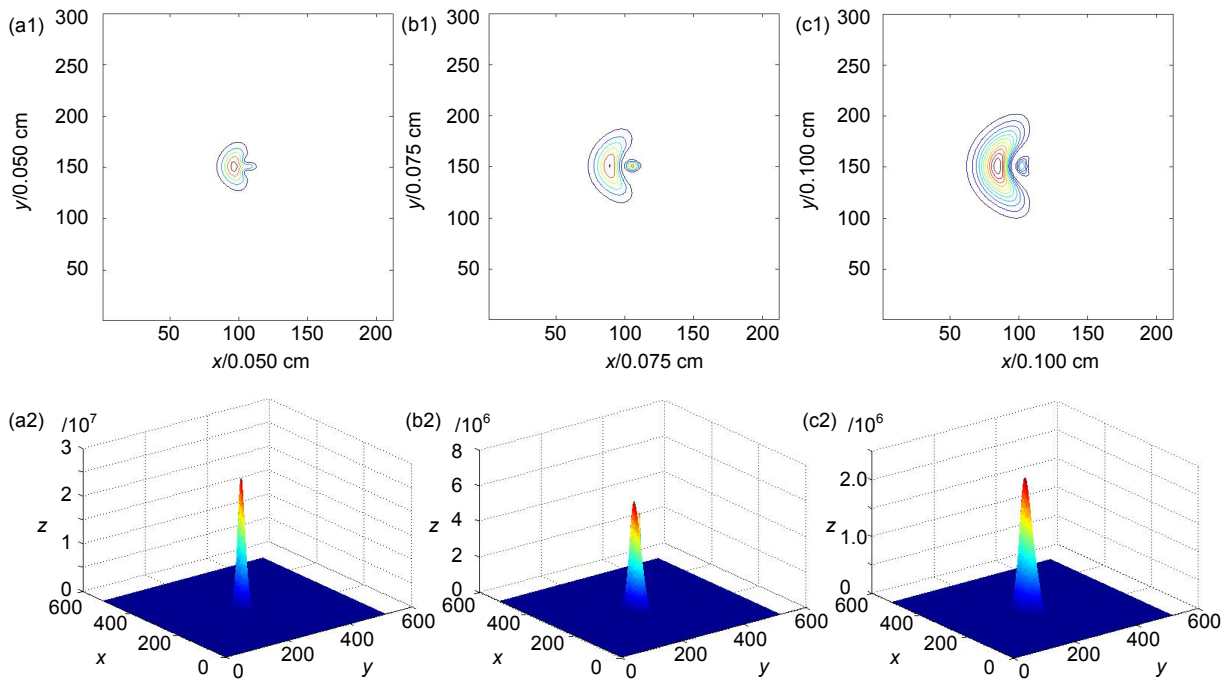


图 5 传输距离不同时激光达到靶面的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2))(高斯光束)。(a1), (a2) 传输距离为 2000 m; (b1), (b2) 传输距离为 3000 m; (c1), (c2) 传输距离为 4000 m  
 Fig. 5 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different distance (Gaussian beam). (a1), (a2) 2000 m; (b1), (b2) 3000 m; (c1), (c2) 4000 m

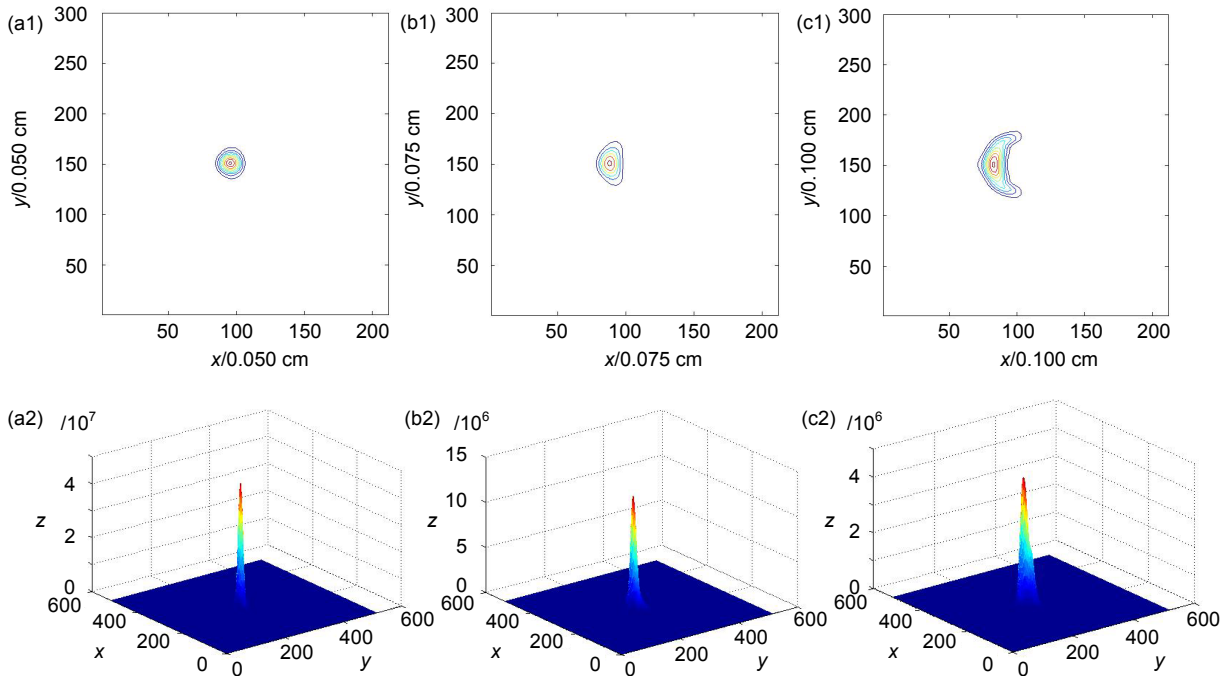


图 6 传输距离不同时激光达到靶面的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2))(平顶光束)。(a1), (a2) 传输距离为 2000 m; (b1), (b2) 传输距离为 3000 m; (c1), (c2) 传输距离为 4000 m  
 Fig. 6 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different distance (flat-top beam). (a1), (a2) 2000 m; (b1), (b2) 3000 m; (c1), (c2) 4000 m

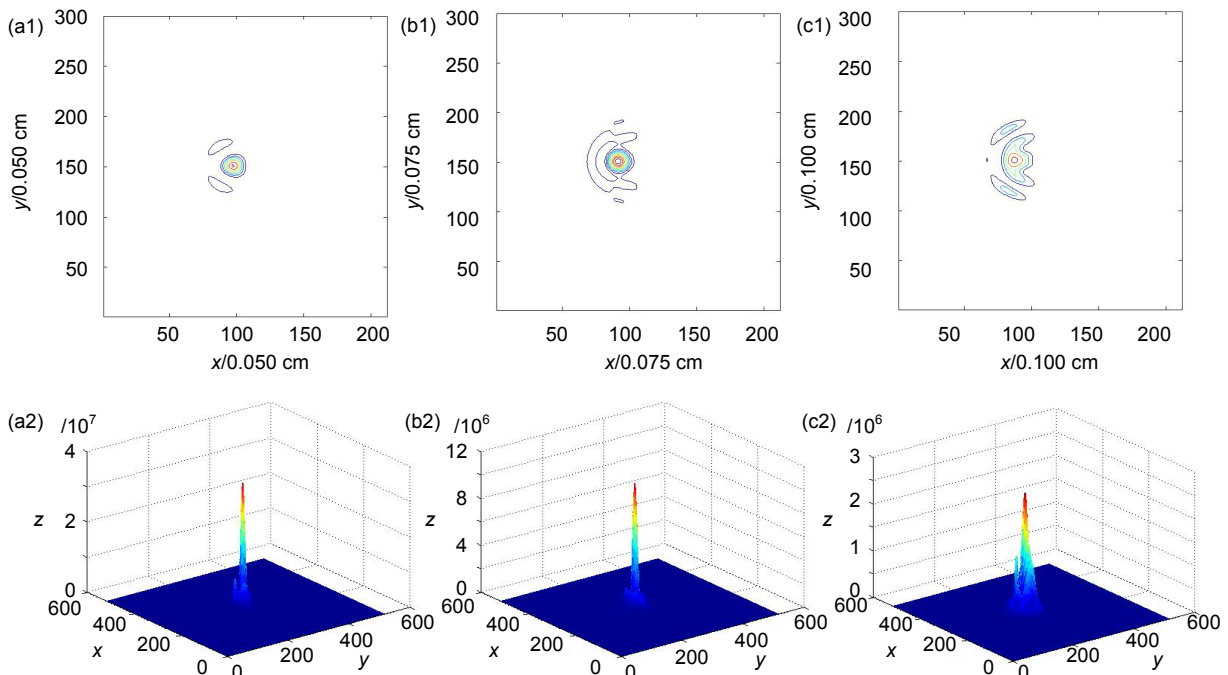


图7 传输距离不同时激光达到靶面的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2))(平顶光束遮挡比40%)。(a1), (a2) 传输距离为2000 m; (b1), (b2) 传输距离为3000 m; (c1), (c2) 传输距离为4000 m

Fig. 7 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different distance (flat-top beam obscuration ratio is 40%). (a1), (a2) 2000 m; (b1), (b2) 3000 m; (c1), (c2) 4000 m

$\Delta x/a$  分别为 0.032、0.085、0.141，斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.678、0.489、0.226。对应的广义热畸变参数  $N$  与图 5 相同，光束质量与平顶光束相当，比高斯光束好。

从结果可看出：随着传输距离的增加，激光的峰值偏移量在增大，热畸变参数同样也在增大；畸变从类似椭圆形过渡到胖月牙形，再到瘦月牙形，并逐渐出现光斑分裂和光斑能量弥散等现象。在广义热畸变参数  $N$  相同条件下，高斯光束的热晕效应最严重，平顶光束略好，环形光束最好。

#### 4.3 光束直径对热晕效应的影响

图 8 给出了光源为高斯光束，功率为 1000 W，风速为 3 m/s，传输距离为 5000 m，光束直径分别为 0.1 m、0.2 m、0.6 m 时稳态热晕效应的强度立体分布和等强分布。图 8(a)、8(b)、8(c) 的计算网格点数为 512，横向抽样间隔分别为 0.094 cm、0.047 cm、0.016 cm。不同直径的高斯光束到达靶面时峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 1.275、0.261、0.016，峰值斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.364、0.371、0.656。对应的广义热畸变参数  $N$  分别为 4.033、2.822、1.183。

图 9 的光源为平顶光束，其余参数均与图 8 相同。

不同直径的平顶光束到达靶面时峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 1.559、0.358、0.024，斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.504、0.537、0.837。对应的广义热畸变参数  $N$  与图 8 相同，但光束质量比高斯光束好。

图 10 的光源为遮挡比为 40% 平顶光束，其余参数均与图 8 相同。不同直径的遮挡比为 40% 平顶光束到达靶面时峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 1.275、0.293、0.020，斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.568、0.603、0.888。对应的广义热畸变参数  $N$  与图 8 相同，光束质量比平顶光束略好，比高斯光束好很多。

从图中可以看出，在其它参数不变情况下，光束的直径越大，热畸变参数越小，从而产生的热晕效应越弱。在广义热畸变参数  $N$  相同条件下，高斯光束的热晕效应最严重，平顶光束略好，环形光束最好。

#### 4.4 横向风对热晕效应的影响

图 11 给出了高斯光传输距离为 5000 m，功率为 2000 W， $D=0.4$  m 时，风速分别为 2 m/s、4 m/s、6 m/s 时稳态热晕效应的强度立体分布和等强分布。图 11(a)、11(b)、11(c) 的计算网格点数为 512，横向抽样间隔均为 0.125 cm。由数值模拟结果可知，高斯光束传到 5000 m 处峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 0.170、0.080、

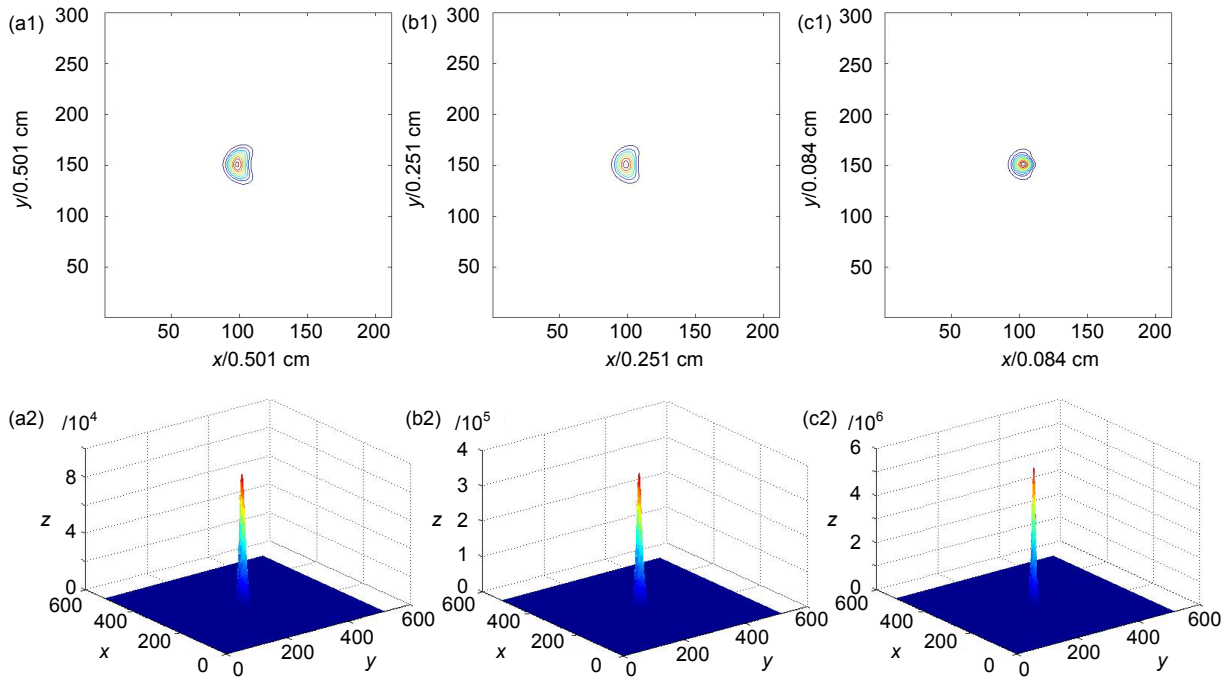


图 8 光束直径不同时激光达到靶面的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2))(高斯光束)。 (a1), (a2) 光束直径为 0.1 m; (b1), (b2) 光束直径为 0.2 m; (c1), (c2) 光束直径为 0.6 m  
 Fig. 8 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different beam diameter (Gaussian beam). (a1), (a2) Beam diameter is 0.1 m; (b1), (b2) Beam diameter is 0.2 m; (c1), (c2) Beam diameter is 0.6 m

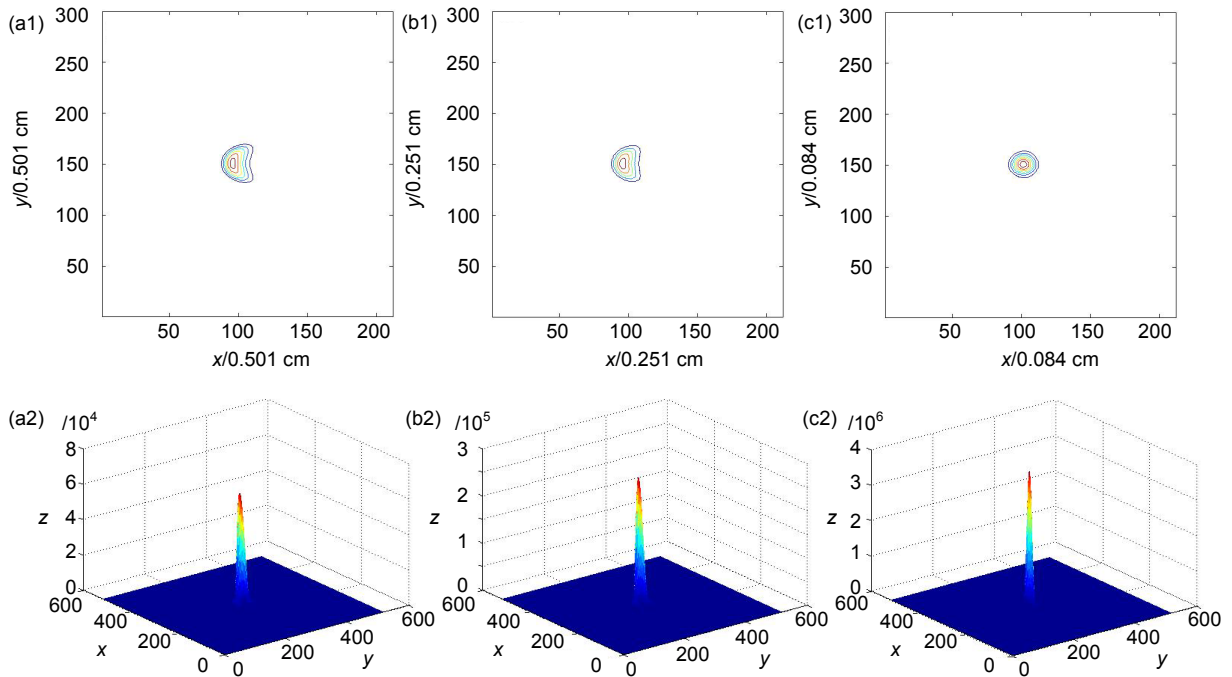


图 9 光束直径不同时激光达到靶面的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2))(平顶光束)。 (a1), (a2) 光束直径为 0.1 m; (b1), (b2) 光束直径为 0.2 m; (c1), (c2) 光束直径为 0.6 m  
 Fig. 9 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different beam diameter (flat-top beam). (a1), (a2) Beam diameter is 0.1 m; (b1), (b2) Beam diameter is 0.2 m; (c1), (c2) Beam diameter is 0.6 m



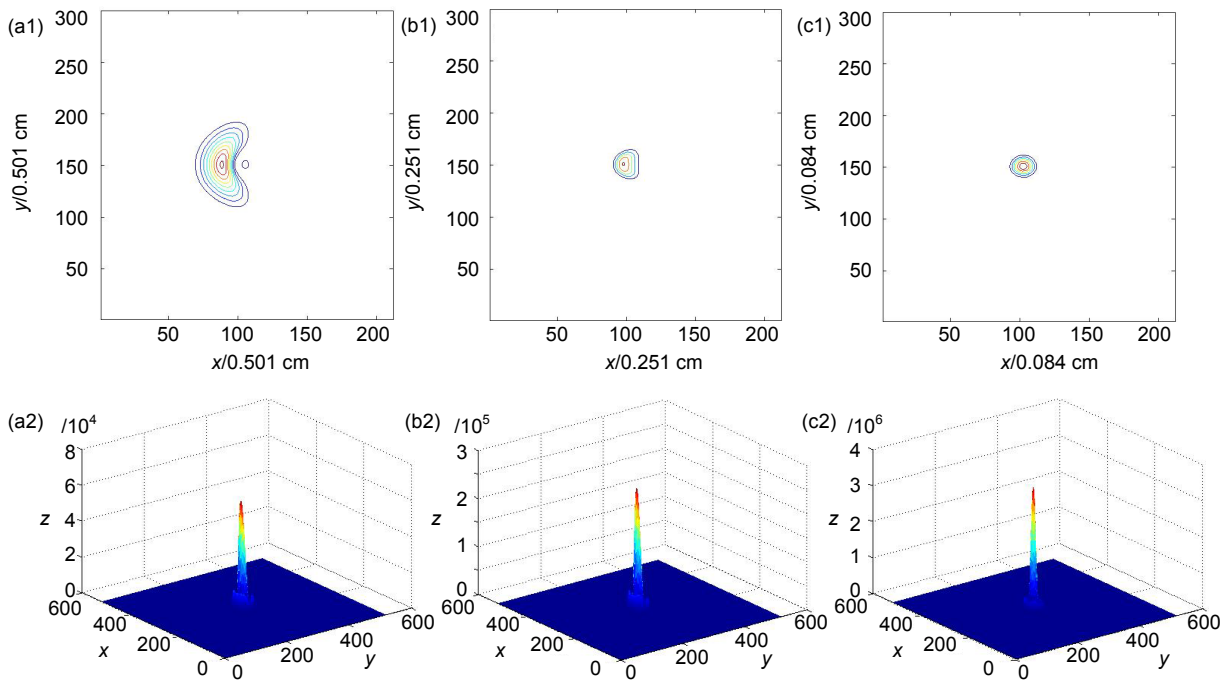


图 10 光束直径不同时激光达到靶面的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2))(平顶光束遮挡比 40%)。 (a1), (a2) 光束直径为 0.1 m; (b1), (b2) 光束直径为 0.2 m; (c1), (c2) 光束直径为 0.6 m

Fig. 10 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours((a2), (b2), (c2)) for different beam diameter (flat-top beam obscuration ratio is 40%). (a1), (a2) Beam diameter is 0.1 m; (b1), (b2) Beam diameter is 0.2 m; (c1), (c2) Beam diameter is 0.6 m

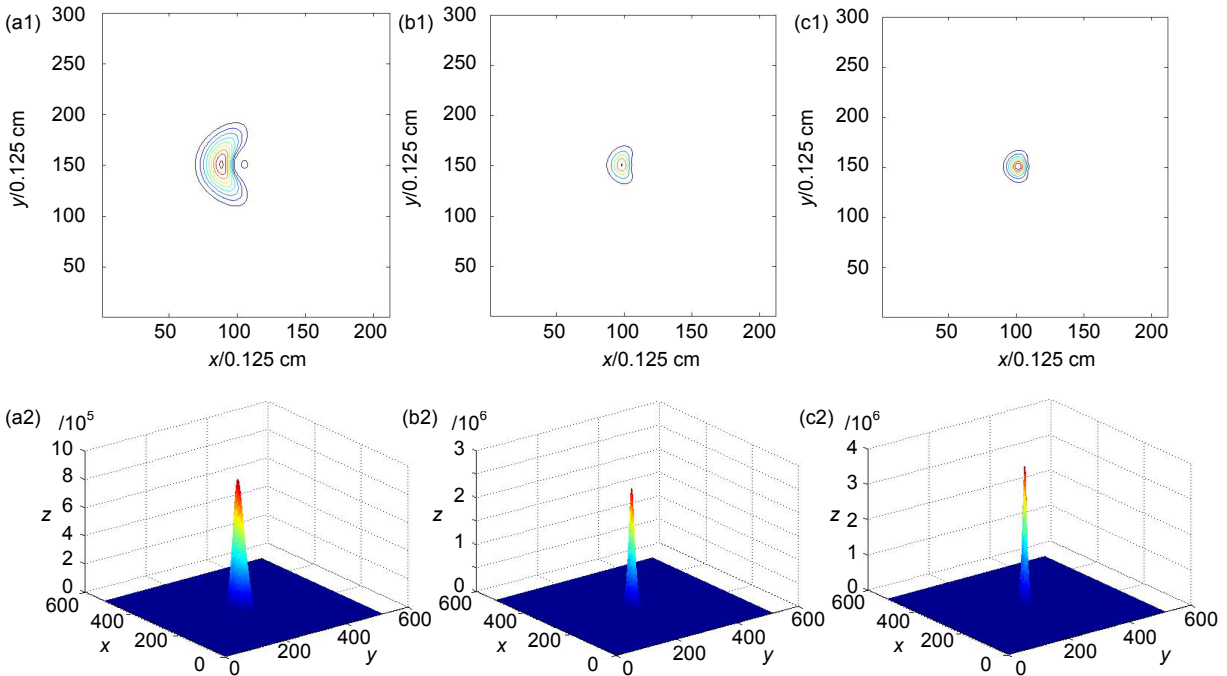


图 11 横向风风速不同时激光到达靶面时的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2))(高斯光束)。 (a1), (a2) 风速为 2 m/s; (b1), (b2) 风速为 4 m/s; (c1), (c2) 风速为 6 m/s

Fig. 11 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours((a2), (b2), (c2)) for different wind velocity (Gaussian beam). (a1), (a2) Wind velocity is 2 m/s; (b1), (b2) Wind velocity is 4 m/s; (c1), (c2) Wind velocity is 6 m/s

0.053, 斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.112、0.309、0.483。对应的广义热畸变参数  $N$  分别为 5.046、2.523、1.682。

图 12 的光源为平顶光束, 其余参数均与图 11 相同。由数值模拟结果可知, 平顶光束传到 5000 m 处峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 0.194、0.106、0.080, 斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.309、0.507、0.634。对应的广义热畸变参数  $N$  与图 11 相同, 但光束质量比高斯光束略好。

图 13 的光源为遮拦比为 40% 平顶光束, 其余参数均与图 11 相同。由数值模拟结果可知, 平顶光束传到 5000 m 处峰值偏移量  $\Delta x/a$  分别为 0.159、0.088、0.053, 斯特列尔比  $S_R$  分别为 0.315、0.555、0.701。对应的广义热畸变参数  $N$  与图 8 相同, 光束质量比平顶光束和高斯光束都好。

结果表明, 风速对激光大气传输的热晕效应有较大的影响, 风速越大热晕效应相对越小。热畸变系数与风速成反比, 表明横向风有抑制热晕效应的作用。

根据以上的仿真结果, 拟合出高斯光束、平顶光束、遮拦比为 40% 的平顶光束的光束质量随广义热畸变参数  $N$  变化的曲线。对于高斯光束, Gebhardt 根据数值计算和实验值与用广义热畸变参数  $N$  表示相对

峰值光强  $I_{REL}$  的经验公式为<sup>[5]</sup>

$$I_{REL} = (1 + 0.0625N^2)^{-1},$$

平顶光束  $I_{REL}$  与  $N$  的定标关系为<sup>[8]</sup>

$$I_{REL} = (1 + 0.09N)^{-1}.$$

本文拟合的关于高斯光束和平顶光束的光束质量随  $N$  变化的曲线与以上两个经验公式比较吻合, 这也证明了本文应用的仿真模型的正确性。

由式(7)可知, 决定热畸变参数  $N$  大小的因子有激光器初始发射功率、传输距离、光束半径、对流风速、空气吸收系数和激光波长, 此外还有气体折射率随温度的变化率等。

从图 14 可以看出, 在给定的几种不同波形波束(高斯光束、平顶光束、遮拦比为 40% 的平顶光束)为光源的传输条件下, 斯特列尔比  $S_R$ 、 $x$  轴方向的峰值偏移量  $\Delta x/a$  随热畸变参数  $N$  的变化趋势都较为一致, 即随着热畸变参数的增大, 斯特列尔比  $S_R$  越小,  $x$  轴方向的峰值偏移量  $\Delta x/a$  越大, 光束质量越来越差。由图 14(a)可知, 在广义热畸变参数  $N$  相同的情况下, 高斯光束的斯特列尔比相比于平顶光束和遮拦比为 40% 的平顶光束要小。当广义热畸变参数大于 5 之

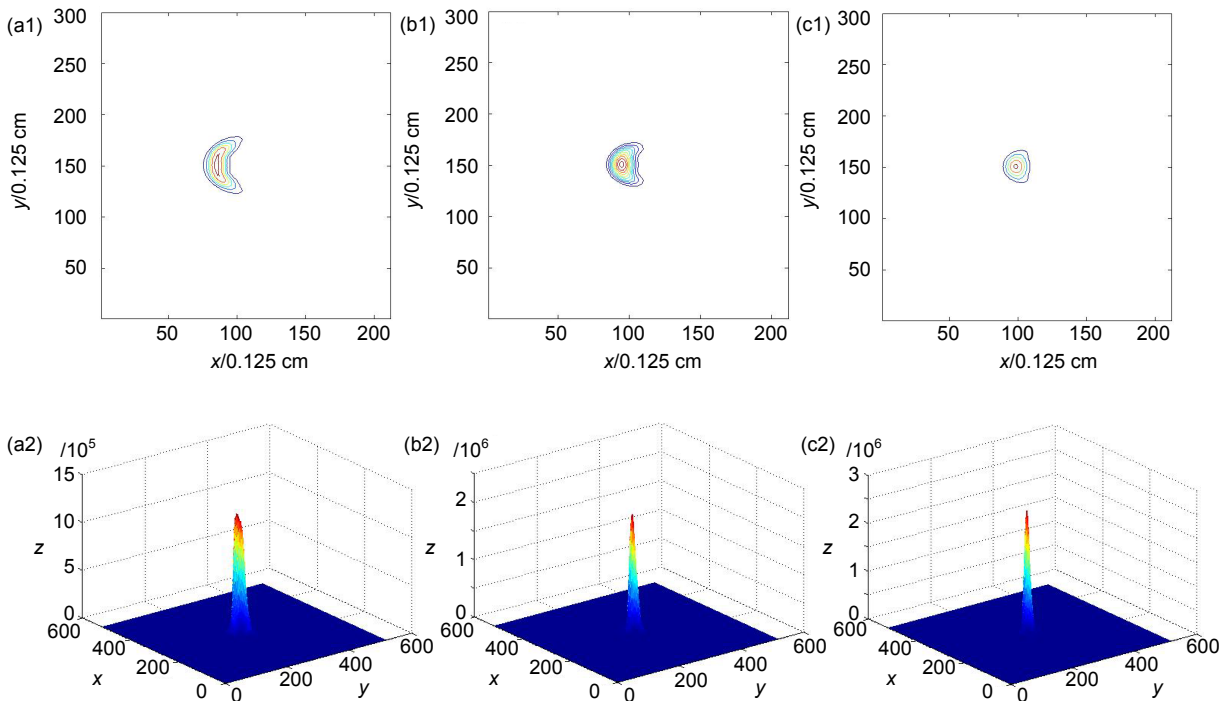


图 12 横向风速不同时激光到达靶面时的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强度分布((a2), (b2), (c2)) (平顶光束)。(a1), (a2) 风速为 2 m/s; (b1), (b2) 风速为 4 m/s; (c1), (c2) 风速为 6 m/s

Fig. 12 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours ((a2), (b2), (c2)) for different wind velocity (flat-top beam). (a1), (a2) Wind velocity is 2 m/s; (b1), (b2) Wind velocity is 4 m/s; (c1), (c2) Wind velocity is 6 m/s

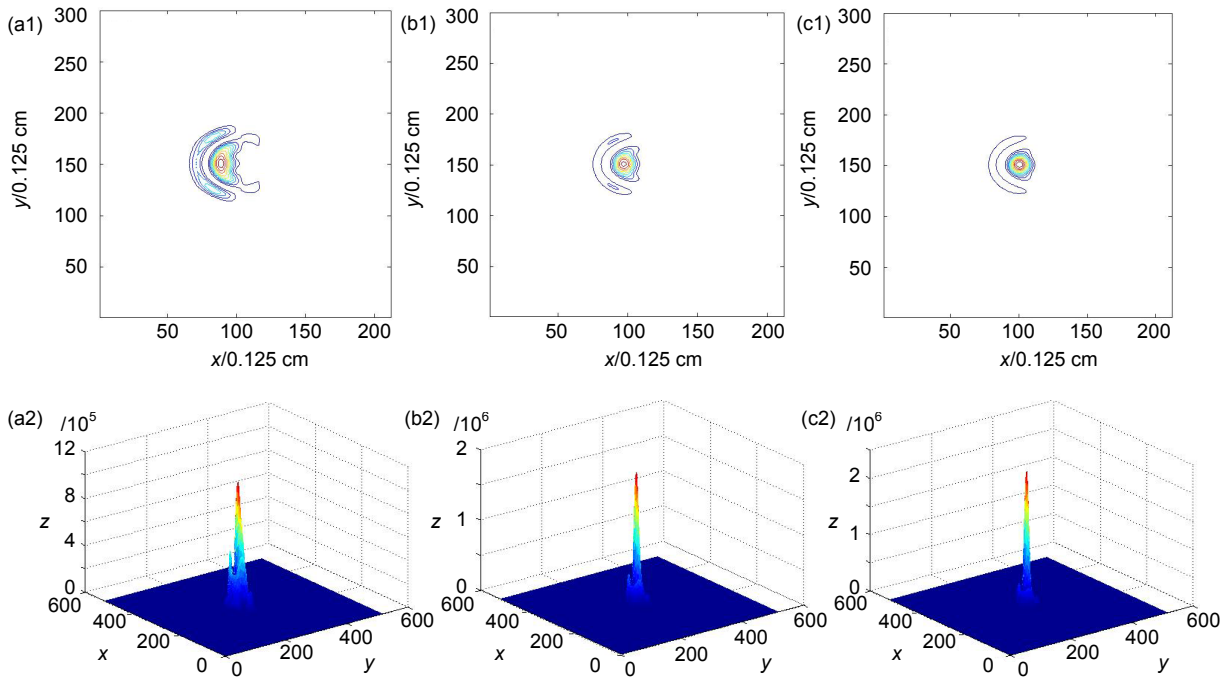


图 13 横向风风速不同时激光到达靶面时的强度立体分布((a1), (b1), (c1))和等强分布((a2), (b2), (c2)) (平顶光束遮拦比 40%)。 (a1), (a2) 风速为 2 m/s; (b1), (b2) 风速为 4 m/s; (c1), (c2) 风速为 6 m/s

Fig. 13 Three-dimensional plots of intensity ((a1), (b1), (c1)) and isointensity contours((a2), (b2), (c2)) for different wind velocity (flat-top beam obscuration ratio is 40%). (a1), (a2) Wind velocity is 2 m/s; (b1), (b2) Wind velocity is 4 m/s; (c1), (c2) Wind velocity is 6 m/s

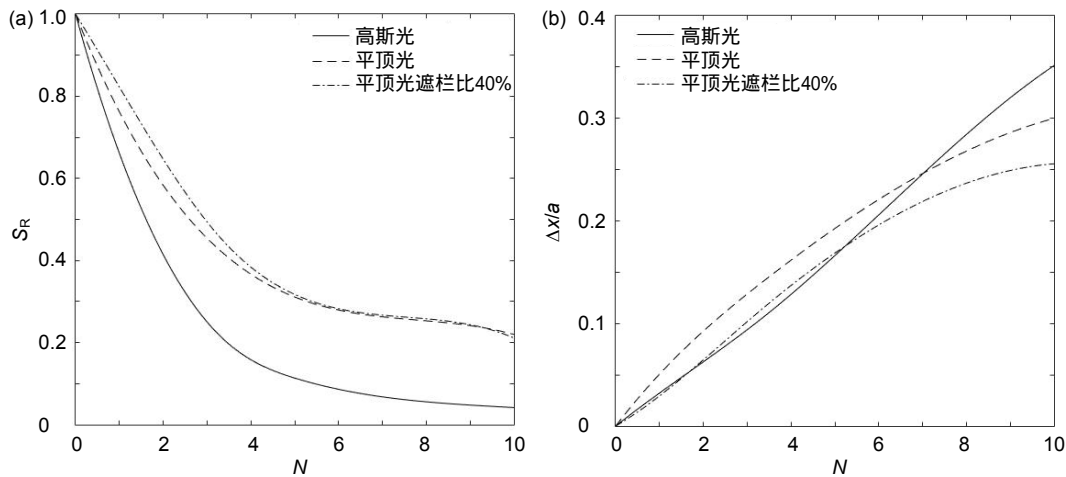


图 14 不同光束形状下, (a) 斯特列尔比随广义热畸变参数的变化, (b) 峰值偏移量随广义热畸变参数的变化  
Fig. 14 Different beam shape (a) Strehl ratio versus thermal distortion parameter and (b) peak deflection versus thermal distortion parameter

后, 平顶光束与遮拦比为 40% 的平顶光束的斯特列尔比趋近于相同。由图 14(b) 可知, 当广义热畸变参数  $N$  大于 7 时高斯光束在  $x$  轴的峰值偏移量开始大于另外两种光束。

由于高斯光束光强的分布特性, 在广义热畸变参数

$N$  相同的情况下, 相比于平顶光和遮拦比为 40% 的平顶光, 高斯光束受热晕效应影响更严重。平顶光束光强分布均匀, 遮拦比为 40% 的平顶光中心有一定的缓冲区, 因此这两种光束受热晕效应的影响相比于高斯光束要弱。

## 5 结论

通过数值模拟,研究了激光传输参数对稳态热晕效应的影响。计算结果验证了热晕理论:当传输距离、光束直径、风速一定时,发射功率越大,热畸变参数  $N$  越大;当发射功率、光束直径,风速一定时,传输距离越远,热畸变参数  $N$  越大;当发射功率、传输距离、风速一定时,光束直径越小,热畸变参数  $N$  越大;当发射功率、传输距离,光束半径一定时,风速越小,热畸变参数  $N$  越大。

通过对比靶面光强的立体分布和等强分布图的数值模拟结果,可以发现,热畸变参数  $N$  越大,热晕效应越明显,有横向风时,横向风使大气垂直于激光束传输方向运动,上风处空气压缩、变冷,折射率变大,下风空气密度降低,折射率减小,形成特有的弯向上风的月牙形光束能量分布,造成激光束的畸变、弯曲和发散。

仿真结果表明,不同激光强度分布对热晕效应的影响不同。同样热畸变参数  $N$  条件下,高斯光束的热晕效应最严重,平顶光束次之,空心平顶光束的热晕效应最小。本文的研究结果为下一步将要开展的等比热晕效应模拟实验奠定了理论基础。

## 参考文献

- [1] Shui Q. Thermal blooming due to aerosol particles[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007: 28–35.
- [2] Chen D Q, Li Y K, Xu X S, et al. Numerical Simulation of thermal blooming in atmospheric laser propagation[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 1993, 5(2): 243–252.  
陈栋泉, 李有宽, 徐锡申, 等. 激光大气传输中热晕的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 1993, 5(2): 243–252.
- [3] Yu Y, Niu Y X, Wang X S, et al. Numerical simulation of steady-state thermal blooming about high power laser[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 182–184.  
禹焯, 牛燕雄, 王秀生, 等. 强激光稳态热晕效应的数值模拟研究[J]. *激光技术*, 2007, 31(2): 182–184.
- [4] Feng X, Huang Y B, Fan C Y, et al. Numerical model for high energy laser indoor transmission[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(9): 1123–1126.  
冯绚, 黄印博, 范承玉, 等. 高能激光室内传输热晕效应的数值分析[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(9): 1123–1126.
- [5] Gebhardt F G. Twenty-five years of thermal blooming: an overview[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1221: 2–25.
- [6] Xie X G, Zhang J Z, Yue Y F, et al. EasyLaser: component-based laser system simulation software[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2536–2540.  
谢晓钢, 张建柱, 岳玉芳, 等. 激光系统组件化仿真软件 EasyLaser[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(10): 2536–2540.
- [7] Du X W. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(4): 327–332.  
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. *中国激光*, 1997, 24(4): 327–332.
- [8] Qiao C H. Simulation research of high energy laser propagation in the atmosphere and its phase compensation[D]. Hefei: Hefei Institute of Material Science, Chinese Academy of Sciences, 2009: 17.  
乔春红. 高能激光大气传输及其相位补偿的仿真研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2009: 17.

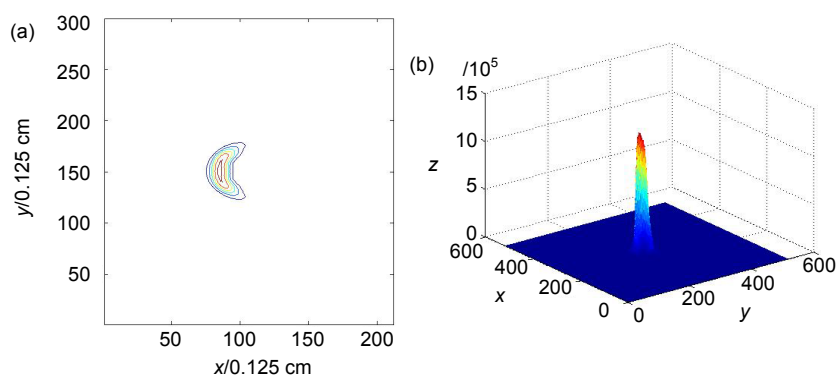
# Numerical simulation of horizontal propagation steady-state thermal blooming effect on laser beam with different intensity distribution

Wu Shuyun<sup>1,2,3</sup>, Li Xinyang<sup>1,2\*</sup>, Luo Xi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>The Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Three-dimensional plots of intensity (a) and isointensity contours (b) for power is 1000 W Gaussian beam

**Overview:** With the development of laser technology, the laser plays an increasingly important role in military and civilian fields. A series of linear and nonlinear effects can be produced when laser propagated in the atmosphere. Among them, the thermal blooming is one of the important nonlinear effects. It also limits the power and brings adverse effects to many engineering applications of laser. Thermal blooming effect is a phenomenon that the atmospheric molecular and aerosol particles of atmosphere will absorb laser energy which accordingly causes heating expansion and the decrease of the local refractive index when laser propagates in atmosphere. Eventually, the energy of this laser beam will be reduced, the spot of this laser beam will be larger and the wave-front of this laser beam will be distorted. Thus, the study of propagation rules for laser beams through the atmosphere is of great significance for the effective application of the laser. In this paper equation for paraxial beams was deduced, which is foundation of numerical algorithms to solve thermal blooming problems. Bradley-Hermann thermal distortion parameter which is important to thermal blooming was given subsequently. The horizontal propagation steady-state thermal blooming effects of laser beams with different intensity distributions, such as Gaussian beam, flat-top beam, and flat-top beam with center obscuration, have been investigated by numerical simulation. The impacts of the output power, the propagation distance, the beam diameter, and the wind velocity vertical to the propagation direction on the steady-state thermal blooming have been discussed for the above mentioned three kinds of beams. Furthermore, the steady-state thermal blooming induced Strehl ratio degradation and peak intensity offset versus the generalized thermal distortion parameter  $N$  after long-path horizontal propagation of laser beams with above mentioned three types of intensity distributions have been derived. The simulation results show that, for certain other parameters, the greater output power or longer propagation distance will induce the stronger thermal blooming, and the increment of the launch diameter or the convection wind velocity vertical to the propagation direction will weaken the thermal blooming oppositely. Furthermore, for laser beams with different intensity distributions, the impacts of the thermal blooming on the propagation are so different. Under the same generalized thermal distortion parameter  $N$ , the thermal blooming effect on the Gaussian beam is the most serious, followed by the flat-top beam, and flat-top beam with center obscuration is the smallest. This research work can provide somewhat guidance for the engineering application of lasers.

**Citation:** Wu S Y, Li X Y, Luo X. Numerical simulation of horizontal propagation steady-state thermal blooming effect on laser beam with different intensity distribution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170620

Supported by Chinese Academy of Sciences Innovation Fund(CXJJ-16S022)

\* E-mail: xyli@ioe.ac.cn