

## 封闭通道浮力对流下阵列光束热晕效应分析

刘万生<sup>1,2</sup>, 袁志军<sup>1</sup>, 王汉斌<sup>1,3</sup>, 咸昱桥<sup>1,2</sup>, 苏梦琪<sup>1,2</sup>, 何兵<sup>1\*</sup>, 周军<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;<sup>3</sup>哈尔滨工业大学物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150006

**摘要** 研究了高功率激光在封闭通道传输时, 空气吸收激光能量引发的浮力对流对热晕效应的影响。建立了浮力对流下热晕效应的物理模型, 采用数值计算方法分析了热传导和对流传热这两种影响光束质量的因素, 发现浮力对流对封闭通道内热晕效应有削弱作用, 并且会造成光束质心漂移。研究了不同排布方式下阵列光束的远场光斑形状、光束质量和光斑质心漂移。结果表明, 阵列光束间相互作用下的浮力对流更强, 对热晕效应的削弱作用更强, 不同排布方式下不同位置处光束的情况不同, 通过选择合适的排布方式可以找到优化的光束质量和质心漂移。验证了利用轴向风可以抑制热晕效应的方法, 结果表明浮力对流的存在会促进热晕效应的减弱, 当轴向风逐渐增大时, 热晕逐渐被抑制, 浮力对流的影响逐渐消失。

**关键词** 激光光学; 激光传输; 热晕; 浮力对流; 阵列光束

中图分类号 TN012

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0114001

## Thermal Blooming Effect of Array Beams Under Buoyancy Convection in Closed Channel

Liu Wansheng<sup>1,2</sup>, Yuan Zhijun<sup>1</sup>, Wang Hanbin<sup>1,3</sup>, Xian Yuqiao<sup>1,2</sup>,  
Su Mengqi<sup>1,2</sup>, He Bing<sup>1\*</sup>, Zhou Jun<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150006, China

**Abstract** This paper studies the influence of buoyancy convection caused by the laser energy absorbed by air during the propagation of high-power laser in a closed channel on the thermal blooming effect. A physical model of the thermal blooming effect under buoyancy convection is constructed. Two factors that affect beam quality, namely heat conduction and convection heat transfer, are analyzed by a numerical calculation method. It is found that buoyancy convection can reduce the thermal blooming effect in the closed channel and cause beam centroid drift. The far-field spot shape, beam quality, and spot centroid drift of array beams with different arrangements are studied. The results show that the buoyancy convection under the interaction among the array beams is greater, and the reduction of the thermal blooming effect is more severe. The conditions of beams at different positions with different arrangements are different. Beam quality and centroid shift can be optimized by choosing the appropriate arrangement. In addition, we verified that axial wind can be adopted to suppress the thermal blooming effect. The results show that buoyancy convection can promote the reduction of the thermal blooming effect. When the axial wind increases, the thermal blooming effect vanishes, and the influence of buoyancy convection gradually

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-05-27; 录用日期: 2021-07-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504500)、上海市自然科学基金(19ZR1464000, 19ZR1464200)

通信作者: \*bryanho@siom.ac.cn; \*\*junzhousd@siom.ac.cn

disappears.

**Key words** laser optics; laser propagation; thermal blooming; buoyancy convection; array beam

## 1 引言

高能激光在空气中传输时,空气吸收激光能量会产生热晕效应进而影响光束的传输和远场聚焦特性,目前研究人员对于大气中热晕效应的产生、计算、补偿以及大气与湍流的相互作用等均有了较多研究<sup>[1-4]</sup>,但在通过扩束发射系统发射前的封闭通道内传输的激光由于功率密度较高,且不同强度区域的光吸收程度不同,所产生的热效应对自身的影响可能较为严重<sup>[5-6]</sup>,附加的畸变会使光束质量变差,因此在远场无法获得理想的聚焦光斑<sup>[7-8]</sup>。由于没有外界风,一般认为封闭通道内热交换机制仅为热传导,但是当激光功率密度较高时,温度、空气密度变化导致的浮力对流对热交换的影响会变得明显,因此研究高功率激光封闭通道内热晕效应时应考虑浮力对流的作用。1977年,Thomson等<sup>[9]</sup>对热晕中停滞和跨音速效应进行了详细计算,证明了在光束形状缓慢变化的情况下,光束附近空气加热受到浮力对流的限制。2004年,冯绚等<sup>[10]</sup>考虑自然对流作用下封闭传输通道部分对整个激光大气传输过程的影响,采用数值计算方法证明封闭通道内的热效应会使发射光束产生附加相位畸变,降低焦平面的光斑质量。

随着高能激光武器、惯性约束聚变等应用对激光功率要求的进一步提高<sup>[11]</sup>,受限于单路激光功率的提升,基于多路高功率激光合束的阵列光束被广泛应用。发射前的高功率阵列光束通常需要在封闭通道内进行传输,因此,封闭通道内阵列光束的热晕情况和抑制成为一个值得关注的重要问题。同时通过利用不同光束间互为引导束的作用,可对光强分布和相位变化进行修整,因此多光束技术本身也是一种抑制热晕的方法。1976年 Yeh 等<sup>[12]</sup>对大气环境下三束相干光和非相干发射光进行了计算,发现目标位置处辐照度显著增加。1999年,强希文等<sup>[13]</sup>利用数值模拟分析了存在横向风时这种引导束的作用,多束强激光同时传输对光强起伏、光斑分裂、光束扩展等有较好的校正效果。2019年,李晓庆等<sup>[14]</sup>对热晕效应影响下列阵平顶光束在大气中的传输进行了研究,发现光束阶数越大的列阵平顶光束受热晕效应的影响越小。但是这些计算都是针对仅考虑热传导或者大气环境中存在横向风的情况,目前研

究人员对于封闭传输通道中浮力对流下阵列光束热晕效应的研究报道很少。另外,轴向管道通风作为一种常见的外部抑制热晕效应的方法<sup>[15]</sup>,在浮力对流存在时,也需要研究这种强迫对流对热晕效应的抑制效果。

本文建立了浮力对流下热晕效应的物理模型,利用数值模拟的方法,通过分析热传导和对流传热研究了封闭通道内浮力对流对热晕效应的削弱情况,以三光束阵列为例,通过改变阵列排布方式,探讨了在不同位置光束处这种削弱作用的改变情况及其对远场光束质量和质心漂移的影响,验证了利用轴向风抑制热晕的方法,并对浮力对流对轴向风抑制热晕的影响进行了研究。

## 2 物理模型及数值计算方法

热晕效应的两个基本方程是光束传播的傍轴波动方程以及流体力学方程<sup>[16]</sup>。傍轴近似下的标量波动方程为

$$\nabla_{\perp}^2 \psi + 2ik \frac{\partial \psi}{\partial x} + k^2 \left( \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) \psi = 0, \quad (1)$$

式中: $\psi$  是光场振幅;波数  $k = \frac{2\pi n_0}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为波长;激光传输下空气折射率  $n = n_0 + \Delta n$ ,  $n_0$  为空气初始折射率,  $\Delta n$  为热晕引起的折射率变化,激光沿  $x$  轴方向传播。

在等压近似下得到的流体力学方程为<sup>[17-18]</sup>

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho_1 - \frac{\kappa}{\rho_0 C_p} \nabla^2 \rho_1 = -\frac{\gamma - 1}{C_s^2} \alpha I, \quad (2)$$

式中: $\alpha$  为空气对激光的吸收系数; $I$  为光束光强分布;空气密度  $\rho = \rho_0 + \rho_1$ ,  $\rho_0$  是初始密度,  $\rho_1$  是相对于初始密度的变化量; $\kappa$  为热传导系数; $\gamma = C_p/C_v$ ,  $C_p$  为质量定压热容,  $C_v$  为质量定容热容;  $C_s$  为声速;  $v$  为空气流速。空气加热引起的自然对流速度主要取决于空气的惯性力与浮力的平衡关系,等压近似下的流速满足动量方程:

$$\rho_0 \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\rho_1 g, \quad (3)$$

式中: $\nabla v$  为速度的梯度;  $g$  为重力加速度。达到稳态时的对流速度<sup>[8]</sup>可近似估计为

$$v = \left( \frac{2\alpha P g}{\rho C_p T} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

式中: $P$  为大气压强;  $T$  为温度。根据(1)~(4)式

可对浮力对流下封闭通道内热晕情况进行近似求解。而轴向吹风作为抑制热晕的另一种方法,这种强迫对流( $x$  方向上风速  $v_x$ )相比于浮力对流引发的横向往流( $y$  方向上风速  $v_y$  或  $z$  方向上风速  $v_z$ )不会使远场光斑形状和质心发生改变,能有效抑制高能激光与空气相互作用产生的热效应。

本文借助有限元分析软件进行流体力学方程的计算,加载空气吸收产生的热源  $\alpha I$ <sup>[19]</sup>,空气吸收系数与光强的乘积为  $\alpha I = \frac{2\alpha p}{\pi a^2} \exp\left[-\frac{2(y^2+z^2)}{a^2}\right]$ ,其中  $p$  为激光功率, $a$  为光束束腰半径。由 Lorentz-Lornz 关系得到观察面上的折射率分布为

$$n - 1 = 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^2) \left(\frac{P}{T}\right) \cdot 10^{-8}. \quad (5)$$

封闭通道内热晕产生的波前相差可表示为

$$\Delta\varphi = k \int \Delta n dx. \quad (6)$$

假定传输路径上折射率分布相同,则(6)式可简化为

$$\Delta\varphi = k \Delta n L, \quad (7)$$

式中: $L$  为激光传输的距离。利用(7)式可以得到观察面上的相位畸变情况。远场光斑实质上是近场相

位的傅里叶变换,利用光波在均匀介质中的夫琅禾费衍射即可确定其远场光斑<sup>[20-21]</sup>。光束质量因子  $\beta$  定义为实际光束的远场发散角与同样尺度的理想光束的远场发散角之比<sup>[22]</sup>:

$$\beta = \frac{\theta}{\theta_0}, \quad (8)$$

式中: $\theta$  为实际光束的远场发散角; $\theta_0$  为理想光束的远场发散角。本文利用透镜对附加了畸变相位的高斯光束进行会聚,将得到的聚焦光斑与无热效应影响的理想光束的远场夫琅禾费衍射光斑进行比较,根据远场光斑半径的变化判定激光束的发散情况,进而研究光束质量因子  $\beta$  的改变和光斑质心的漂移情况<sup>[23]</sup>。

### 3 数值模拟及结果分析

#### 3.1 单光束热晕效应

考虑浮力对流影响下的热晕情况,高斯光束从封闭管道内通过,管道内空气分布均匀,运用已建立的仿真模型进行数值模拟,选择不可压缩模型、层流模型和热绝缘边界条件。假设入射的激光没有初始相差,初始光束质量  $\beta$  为 1,质心漂移量为 0,选取的参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟参数选取

Table 1 Parameter selection of numerical simulation

Laser wavelength	Laser power	Air pressure	Initial temperature	Absorption coefficient	Waist radius	Radius of channel	Observation distance	Focal length
$\lambda$ /nm	$p$ /W	$P$ /( $10^5$ Pa)	$T$ /K	$\alpha$ /( $10^{-5}$ m <sup>-1</sup> )	$a$ /mm	$d$ /mm	$z$ /m	$f$ /m
1064	10000	1.01	293.15	1.2	4	100	5	5

采用直圆柱形封闭通道,网格划分情况见表 2 和图 1。

表 2 用于有限元计算的网格划分

Table 2 Mesh division for finite element calculation

Distance from center area $R$	Mesh cell size $r$	
	Maximum	Minimum
20	0.5	0.5
50	6	2
100	30	10

取观察时间为 20 s,图 2(a)、(b)分别为仅考虑热传导和考虑浮力对流时光源附近 5 倍束腰半径区域内的温度分布,图 2(d)、(e)为两种情况下透镜焦点处的光强分布,如文献[7,18]所示,两种情况下光斑形状由高斯形变为草帽形以及新月形,在光束传输通道处叠加的相位畸变的影响凸显出来。在仅考



图 1 用于有限元计算的网格划分示意图

Fig. 1 Diagram of mesh division for finite element calculation

虑热传导的情况下,光斑质心位置的漂移可以忽略,光束质量  $\beta$  减小到 5.35,当考虑浮力对流时,光斑质心位置向重力方向即  $z$  轴负方向偏移了 0.709 mm,  $\beta$  减小到 3.74,比仅考虑热传导时减小了 1.61。将文献[24-25]中仿真参数代入本模型中,所得计算结果

与文献中结果相比相差不大,这验证了本模型的正确性。将浮力对流纳入考量时,光斑形状发生了很大变化,光束质量、质心漂移量也有了较大改变,可见封闭通道内浮力对流的影响不可忽略。

根据(4)式计算得到浮力对流速度约为 0.0183 m/s,图 2(c)是考虑浮力对流时光源附近 5

倍束腰半径区域的空气速度大小和方向,光源附近空气整体向  $z$  轴正方向流去,但存在  $y$  方向的分量,不同位置处对流速度大小有所差异,最大风速位置在光源上方,这符合文献[8-9]中的描述,对流风速与计算结果接近。

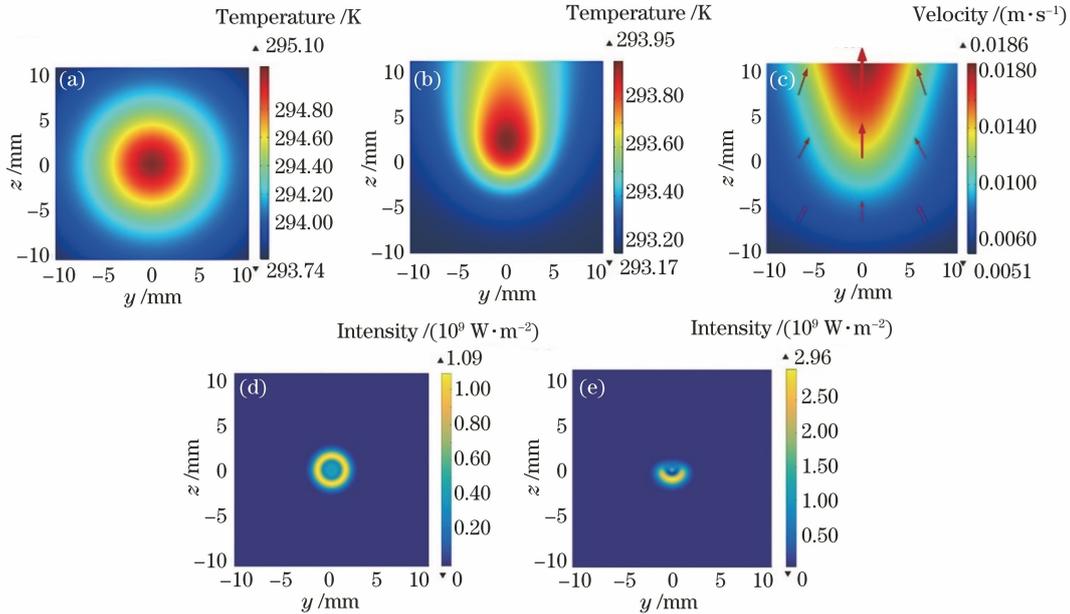


图 2 仅考虑热传导和浮力对流下光源附近温度分布、光源附近空气速度大小和方向、焦点处光强分布。

(a)(d)仅考虑热传导;(b)(c)(e)考虑浮力对流

Fig. 2 Temperature distribution, amplitude and direction of air velocity near laser source, and intensity distribution at focal point when only considering heat conduction and buoyancy convection. (a)(d) Only considering heat conduction; (b)(c)(e) considering buoyancy convection

### 3.2 阵列光束热晕效应

以三光束阵列为例对非相干合成中合成前的阵列光束的热晕效应进行研究。随着阵列光束单元排布方式的变化,光束间互相影响下的浮力对流流速、

流向发生变化,温度分布改变,光束质量和质心漂移也会有所不同。考虑图 3 中的 5 种排布方式的阵列单元,即水平排布、竖直排布、正三角形排布、倒三角形排布和斜向排布。

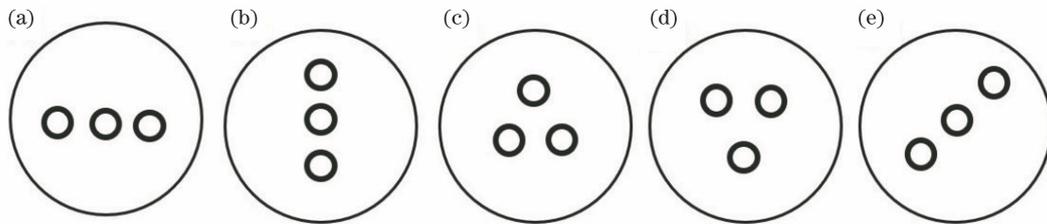


图 3 不同排布方式下的阵列单元。(a)水平;(b)竖直;(c)正三角形;(d)倒三角形;(e)斜向

Fig. 3 Array cells with different arrangements. (a) Horizontal; (b) vertical; (c) positive triangular; (d) inverted triangular; (e) slanting

在表 1 的模拟参数下,研究各光束的热晕情况。表 3 是计算得到的不同排布方式下各位置处光束的光束质量、 $y$  和  $z$  方向质心漂移情况以及三光束相比于单光束的光束质量  $\beta$ 、质心漂移的改变量,其中负号代表相比于单光束、三光束的光束质量  $\beta$ 、质心

漂移量有所减小。对于水平、正三角形、倒三角形排布,由于光束对称,左、右两光束的光束质量  $\beta$ 、质心漂移情况基本相同,相比于单光束,所有光束的光束质量  $\beta$ 、 $z$  方向质心漂移都得到了进一步改善,热晕效应得到了进一步削弱。

表 3 数值模拟的结果  
Table 3 Numerical simulation results

Array arrangement	Beam position	Beam quality $\beta$	Centroid drift in $y$ direction / mm	Centroid drift in $z$ direction / mm	Change of beam quality $\Delta\beta$	Change of centroid drift in $y$ direction / mm	Change of centroid drift in $z$ direction / mm
Horizontal	Left	3.33	0.417	0.571	-0.415	0.417	-0.139
	Middle	3.38	0	0.703	-0.362	0	-0.007
	Right	3.33	0.418	0.571	-0.415	0.418	-0.139
Vertical	Upper	2.58	0	0.436	-1.160	0	-0.273
	Middle	2.88	0	0.538	-0.865	0	-0.172
	Lower	3.73	0	0.711	-0.008	0	0.002
Positive triangular	Left	3.68	0.348	0.635	-0.064	0.348	-0.074
	Middle	2.58	0	0.555	-1.160	0	-0.155
	Right	3.68	0.348	0.634	-0.064	0.348	-0.075
Inverted triangular	Left	3.49	0.320	0.645	-0.248	0.320	-0.065
	Middle	3.67	0	0.706	-0.070	0	-0.003
	Right	3.50	0.320	0.645	-0.246	0.320	-0.064
Slanting	Left	3.68	0.445	0.577	-0.066	0.445	-0.132
	Middle	3.33	0.101	0.712	-0.415	0.101	0.002
	Right	3.62	0.479	0.583	-0.122	0.479	-0.126

结合表 3 和通道内浮力对流情况,对与重力方向垂直和沿重力方向的水平和竖直排布、三角形排布下的正三角形和倒三角形排布以及斜向排布 5 种排布方式的热晕情况进行具体分析,图 4~6 分别为不同排列方式下各光源附近 5 倍束腰半径区域的空气速度大小和方向以及焦点处的光强分布图。

### 3.2.1 水平和竖直排布

考虑分别如图 3(a)、(b)所示的水平和竖直排布的情况。其中图 4(a1)~(c1)、4(a2)~(c2)为水平排布,图 4(a1)、(a2)为左光束,图 4(b1)、(b2)为中光束,图 4(c1)、(c2)为右光束。图 4(d1)~(f1)、(d2)~(f2)为竖直排布,图 4(d1)、(d2)为上光束,图 4(e1)、(e2)为中光束,图 4(f1)、(f2)为下光束。

阵列光束间相互影响使三束光所受浮力对流流速均进一步增大,从图 4 和表 3 可以看出浮力对流流速越大,热晕效应越弱。对于水平排布,两侧光束位置处受中间光束的影响,使得空气密度更小,空气流速更大,热晕效应也更弱,并且由于对流风的风向相较于单光束有所改变, $y$  方向光束不再对称,光斑向来风处偏转, $y$  方向上产生了较大的质心漂移。对于竖直排布,三束光附近对流风均主要沿  $z$  方向, $y$  方向质心偏移量均约为 0,由于对流风方向向上,风速最大区域在光源上方,上方光束受下方光束的影响,风速更大,光束质量  $\beta$ 、质心漂移量更小,并且越靠近上方,光束热晕效应越弱,因此上方光束热

晕的削弱作用明显优于水平排布的情况。但是风主要沿  $z$  方向且分布不均匀,对  $z$  方向热晕效应的抑制更强,所以上方光束  $z$  方向上的光斑宽度更小, $y$ 、 $z$  方向上的光束质量  $\beta$  相差较大,光斑形状更加扁平,而最下方的光束几乎不受其他光束的影响,此时的热晕情况与单光束相近,可见竖直排列增强了浮力对流对上方光束热晕效应的削弱作用。

### 3.2.2 三角形排布

考虑图 3(c)、(d)中三角形排布的情况。图 5(a1)~(c1)、(a2)~(c2)为正三角形排布,图 5(d1)~(f1)、(d2)~(f2)为倒三角形排布,其中图 5(a1)、(a2)、(d1)、(d2)为左光束,图 5(b1)、(b2)、(e1)、(e2)为中光束,图 5(c1)、(c2)、(f1)、(f2)为右光束。可以看出正三角形排布阻止了两侧光的进一步优化,极大改善了中间光束的光束质量  $\beta$ ,但是由于两侧风  $y$  方向分量较大,所以正三角形排布对中间光束  $z$  方向质心漂移的改善不如竖直排布。倒三角形排布下中间光束因处在下方,两侧光  $y$  方向上的质心漂移要小于水平排布,但由于对流风风向主要为中上方,三光束之间的相互影响较小,因此光束质量的改善效果不明显。

### 3.2.3 斜向排布

图 6 为斜向排布方式下光源附近空气速度大小和方向、焦点处光强分布图。图 6(a1)、(a2)对应左光束,图 6(b1)、(b2)对应中光束,图 6(c1)、(c2)对

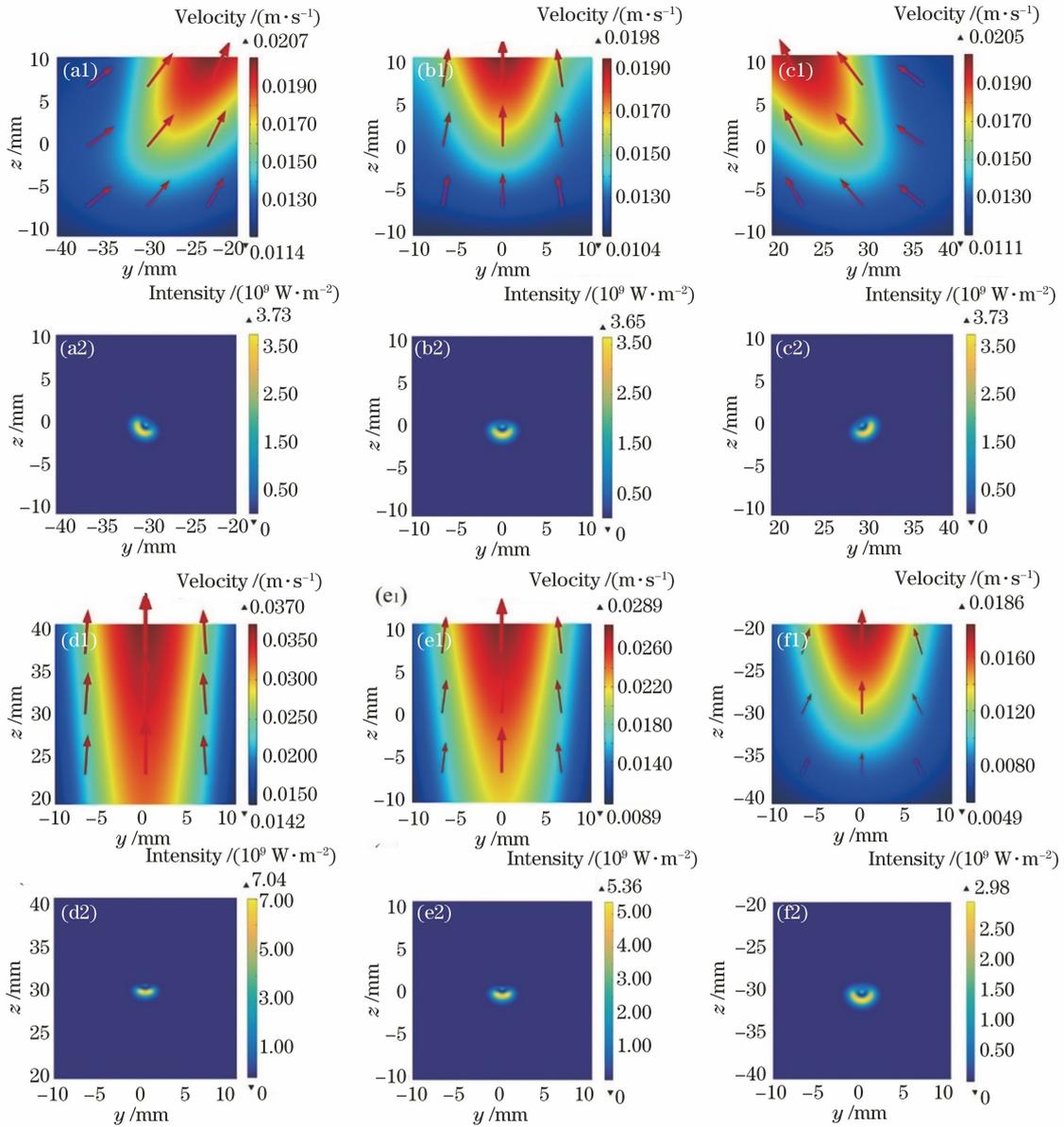


图 4 水平和竖直排布下光源附近的空气速度大小和方向、焦点处光强分布图。(a1)(a2)水平排布左光束;(b1)(b2)水平排布中光束;(c1)(c2)水平排布右光束;(d1)(d2)竖直排布上光束;(e1)(e2)竖直排布中光束;(f1)(f2)竖直排布下光束  
 Fig. 4 Amplitude and direction of air velocity near laser source and intensity distributions at focal point under horizontal and vertical arrangements. (a1)(a2) Left beam of horizontal arrangement; (b1)(b2) middle beam of horizontal arrangement; (c1)(c2) right beam of horizontal arrangement; (d1)(d2) upper beam of vertical arrangement; (e1)(e2) middle beam of vertical arrangement; (f1)(f2) lower beam of vertical arrangement

应右光束。斜向排布下中间光束会受到右上方和左下方光束的影响,光束质量有较大改善,这与正三角形排布的效果类似。但由于风速最大区域处于中间光束左上方、左光束右上方,对比其他排布方式,这种排布方式下三光束的质心漂移量均较大并且左、右光束的光束质量  $\beta$  与单光束基本相同。

综上所述,由于多光束间互相影响,浮力对流得到增强,5 种排布方式的热晕效应均得到了进一步的削弱,但如果阵列排布中出现了沿  $y$  方向上的分

量,则不可避免地会出现  $y$  方向的质心漂移。通过改变排布方式, $y$  和  $z$  方向的质心漂移情况也有所差别,可以发现若要充分发挥光束间引导束的作用以确保获得最佳光束质量和较小的质心漂移,可以考虑竖直排布或者正三角形排布,若要保证每束光的光束质量接近,可以考虑水平排布方式。

### 3.3 轴向风对热晕效应的抑制

在工程应用中,激光合成后输出激光的光束质量  $\beta$  一般控制在 3 以内比较合适,由于激光器后还

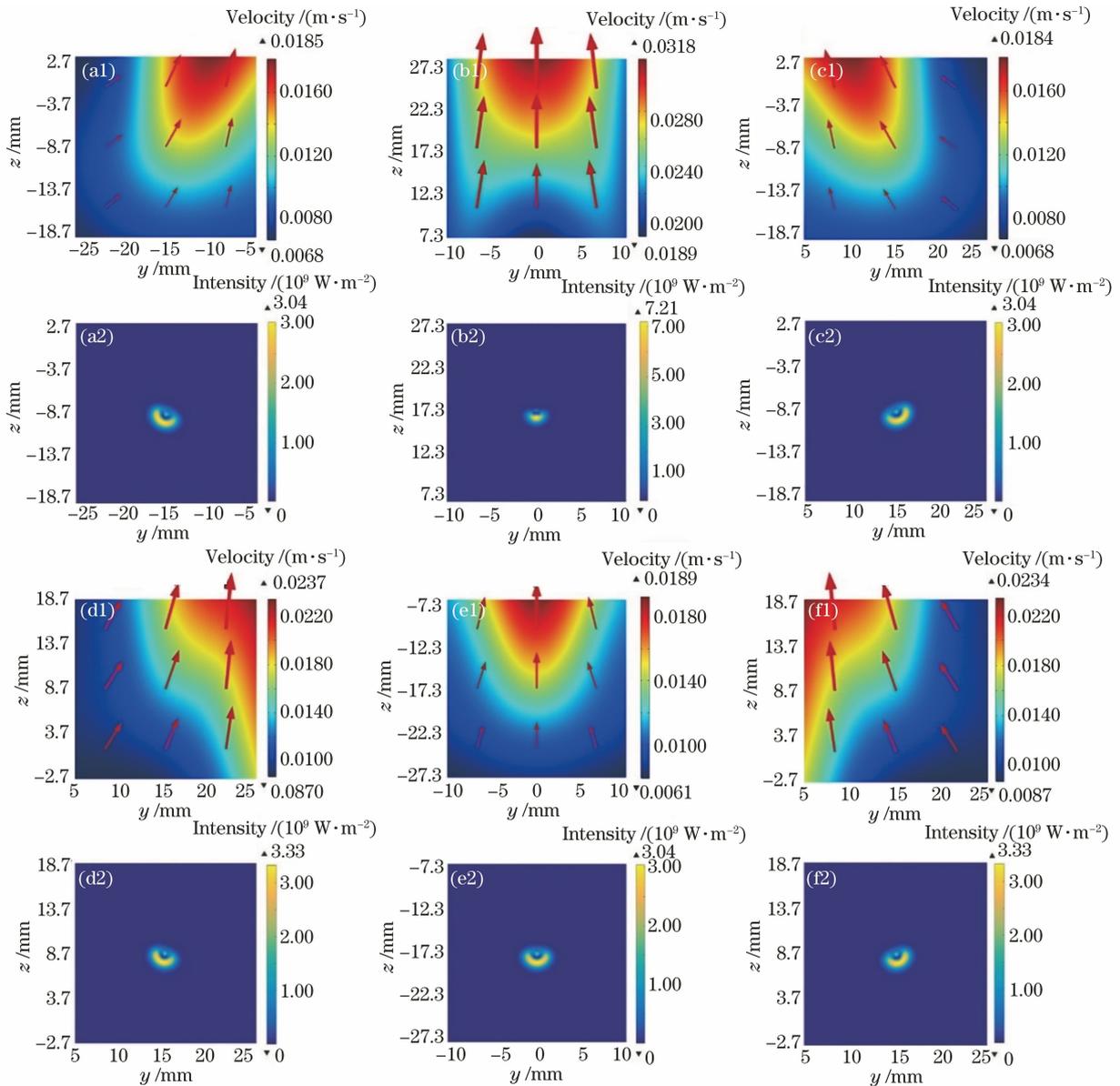


图 5 三角形排布方式下光源附近空气速度的大小和方向以及焦点处的光强分布图。(a1)(a2)正三角形排布左光束；(b1)(b2)正三角形排布中光束；(c1)(c2)正三角形排布右光束；(d1)(d2)倒三角形排布左光束；(e1)(e2)倒三角形排布中光束；(f1)(f2)倒三角形排布右光束

Fig. 5 Amplitude and direction of air velocity near laser source and intensity distributions at focal point under triangular arrangements. (a1)(a2) Left beam of positive triangular arrangement; (b1)(b2) middle beam of positive triangular arrangement; (c1)(c2) right beam of positive triangular arrangement; (d1)(d2) left beam of inverted triangular arrangement; (e1)(e2) middle beam of inverted triangular arrangement; (f1)(f2) right beam of inverted triangular arrangement

有扩束、中继等其他系统,除了出现热晕效应外,还会出现其他的畸变,所以在表 1 的参数之下,当通道内激光功率在万瓦以上、激光功率密度较高、热晕效应较为明显时,需要补偿或者抑制热晕效应。考虑轴向通风作为抑制热晕效应的主要方式之一,研究通道内轴向风时,存在单光束和图 3(a)中水平排布方式下三光束的热晕抑制情况。图 7(a)~(c)分别

是在表 1 参数下且管道内速度大小为 0.01,0.05,0.09,0.1,0.5,0.9,1,5 m/s 的轴向风时,不同情况下  $y$  方向和  $z$  方向的质心漂移量、光束质量,其中 conduction 代表单光束且仅考虑热传导, buoyancy 代表单光束且考虑浮力对流, convection-m 和 convection-r 代表水平排布三光束中的中光束与右光束。随着轴向风速的增大,光束质量  $\beta$ 、质心漂移

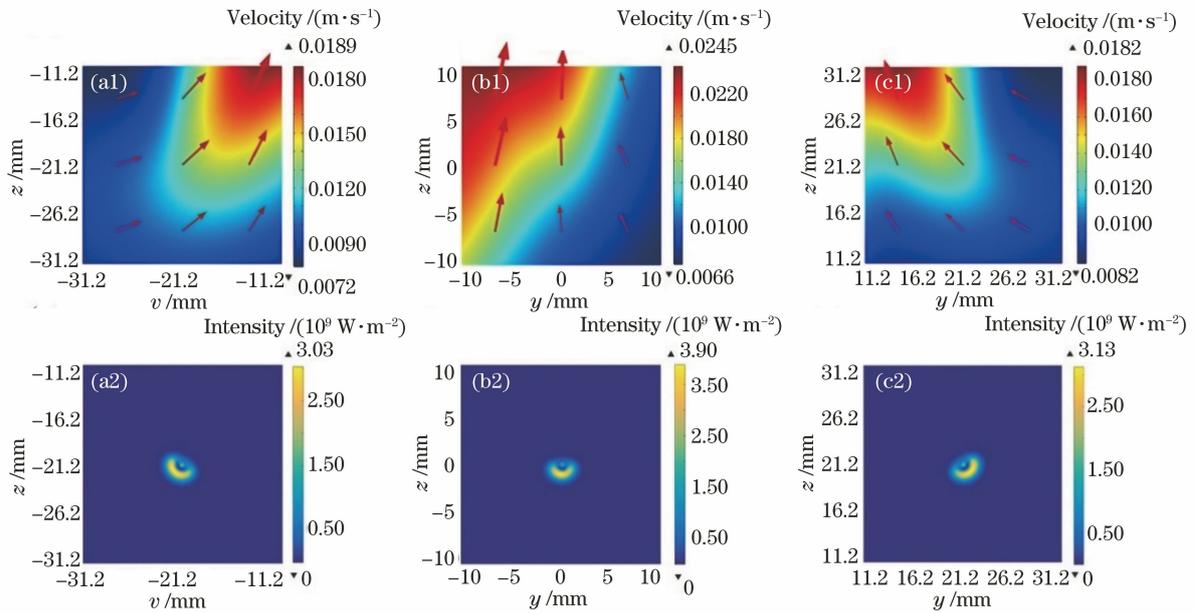


图 6 斜向排布方式下光源附近空气速度的大小和方向以及焦点处的光强分布图。

(a1)(a2)左光束;(b1)(b2)中光束;(c1)(c2)右光束

Fig. 6 Amplitude and direction of air velocity near laser source and intensity distributions at focal point under slanting arrangement. (a1)(a2) Left beam; (b1)(b2) middle beam; (c1)(c2) right beam

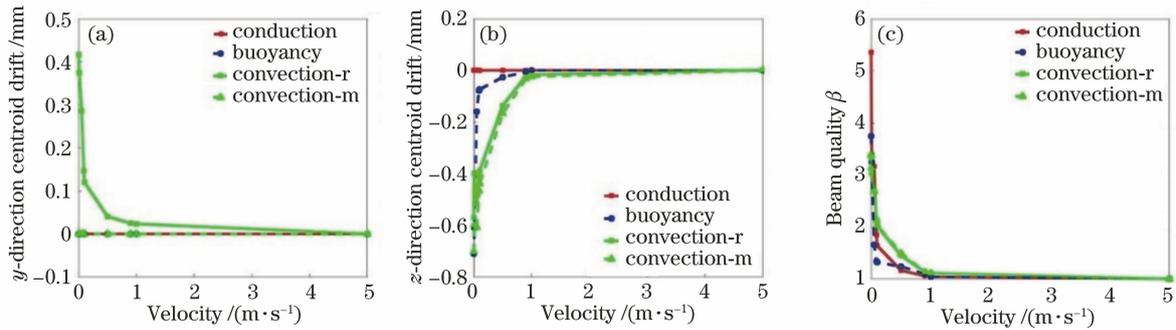


图 7 仅考虑热传导、考虑浮力对流时单光束和多光束  $y$  方向质心漂移、 $z$  方向质心漂移,以及光束质量与轴向风速的关系图。(a)  $y$  方向质心漂移;(b)  $z$  方向质心漂移;(c)光束质量

Fig. 7 Centroid drift in  $y$  direction, centroid drift in  $z$  direction, and relationship between beam quality and axial wind speed of single beam and multiple beams when only considering heat conduction and considering buoyancy convection.

(a) Centroid drift in  $y$  direction; (b) centroid drift in  $z$  direction; (c) beam quality

量均不断减小,在风速较小时,二者减小得更快。对比单光束下考虑和不考虑浮力对流两种情况,可以看出,在轴向风速较小时,浮力对流的存在促进了光束质量的优化,相同轴向风速下存在浮力对流时光束质量  $\beta$  更小,但对  $z$  方向的质心漂移量的影响不可忽略,并且相同的轴向风速和浮力对流风速对光束质量的改善情况接近。对于水平排布的三光束,由于存在更多的热源,同样轴向风速下热晕抑制效果比单光束差一些,但是浮力对流对热晕效应的影响仍然存在。轴向风速继续增大时,浮力对流的影响逐渐减弱,热晕效应也逐渐减弱,当轴向风速达到

1 m/s 时,各种情况下光束质量  $\beta$ 、质心漂移基本与理想光束相同,热晕效应基本得到抑制。

## 4 结 论

建立了封闭水平管道热效应模型,理论仿真了单光束和阵列光束单元的热晕效应。所得结果表明,与仅考虑热传导的热晕效应相比,浮力对流影响下,光束质量因子  $\beta$  有所减小,光斑形状改变,在重力方向会有一定的质心漂移,封闭通道内浮力对流对热晕效应的影响不可忽略。当存在阵列光束时,不同阵列排布方式下浮力对流流速、流向不同,相同

参数条件下阵列光束对比单光束,热晕效应得到了进一步的削弱。若要获得最佳光束质量和较小的质心漂移,可以考虑竖直排布或者正三角形排布;若要保证每束光的光束质量接近,则可以考虑水平排布。此外,在利用轴向风抑制热晕效应时,轴向风速较小时,浮力对流的存在促进了光束质量的优化,但重力方向质心漂移的影响仍不可忽略;进一步提高轴向风速,浮力对流的影响逐渐减弱,热晕效应逐渐被削弱,直至基本得到抑制。封闭通道内浮力对流影响下的阵列光束的热晕效应研究,可以为高功率激光的非相干合成和传输的设计及优化提供一定的参考。

### 参 考 文 献

- [1] Gebhardt F G. Twenty-five years of thermal blooming: an overview [J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1221: 2-25.
- [2] Hillion P, Quinnez S. Thermal blooming calculations with analytical diffraction approximated expressions [J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1981, 22(4): 897-907.
- [3] Yan W, Chen Z H, Du T J, et al. Numerical simulation of modal method based adaptive optics correction thermal blooming [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0901001.  
闫伟, 陈志华, 杜太焦, 等. 热晕效应模式法自适应光学校正的数值模拟 [J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0901001.
- [4] Li Y J, Qian X M, Zhu W Y, et al. Numerical analysis of beam spreading of high-power solid laser propagation through non-Kolmogorov turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0601002.  
李玉杰, 钱仙妹, 朱文越, 等. 高能固态激光非 Kolmogorov 湍流大气传输光斑扩展的数值分析 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0601002.
- [5] Valley G C, Shen P L W, Kelly R E. Thermal blooming in axial pipe flow: authors' reply to comment [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(14): 2270-2271.
- [6] Kelly R E, Shen P I. Thermal blooming in axial pipe flow: the effects of beam shape and thermal conditions at the pipe wall [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(18): 3037-3039.
- [7] Liu J, Liu S F, Jin G. Thermal effects on laser propagating in a closed tube with air [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, 15(1): 100-103.  
柳建, 刘顺发, 金钢. 封闭充气管道中气体热效应对激光传输的影响 [J]. *光电子 • 激光*, 2004, 15(1): 100-103.
- [8] Smith D. Thermal defocusing of CO<sub>2</sub> laser radiation in gases [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1969, 5(12): 600-607.
- [9] Thomson J A, Meng J C, Boynton F P. Stagnation and transonic effects in thermal blooming [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(2): 355-366.
- [10] Feng X, Huang Y B, Fan C Y, et al. Numerical model for high energy laser indoor transmission [J]. *High Power Laser & 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.
- [11] Gebhardt F G. High power laser propagation [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(6): 1479-1492.
- [12] Yeh C, Pearson J E, Brown W P. Enhanced focal-plane irradiance in the presence of thermal blooming [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(11): 2913-2916.
- [13] Qiang X W, Wang T L, Wu N Q. Multi-laser-beams atmospheric propagation [J]. *Optoelectronic Technology*, 1999, 19(3): 167-172.  
强希文, 王铁良, 吴乃清. 多光束激光大气传输 [J]. *光电子技术*, 1999, 19(3): 167-172.
- [14] Li X Q, Cao J Y, Ding Z L, et al. Thermal blooming effect of flat-topped laser beam array propagating through atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126020.  
李晓庆, 曹建勇, 丁洲林, 等. 列阵平顶光束大气传输的热晕效应 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126020.
- [15] Tao X Y, Ji X L, Lü B D. Suppression of the thermal effect within a beam control system in the presence of wind [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2004, 16(11): 1370-1374.  
陶向阳, 季小玲, 吕百达. 风对光束控制系统内热效应的抑制作用 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(11): 1370-1374.
- [16] McClellan C, Munn M W, Norris H, et al. Optical effects of gas flow through an optical train: an experimental determination [J]. *Applied Optics*, 1979, 18(23): 3984-3989.
- [17] Fleck J A, Morris J R, Feit M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. *Applied Physics*, 1976, 10(2): 129-160.
- [18] Liu J, Jin G, Wang S Q, et al. Weakly compressible fluid model to study thermal effects on laser propagating in closed tube [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(12): 1983-1986.  
柳建, 金钢, 王世庆, 等. 连续激光内通道传输的弱

- 可压缩流模型[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(12): 1983-1986.
- [19] Hu P, An J Z, Zhang F Z. Pressure effects on laser propagation in a closed horizontal tube[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 0702005.  
胡鹏, 安建祝, 张飞舟. 封闭水平管道中气体压强对激光传输的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702005.
- [20] Xian H, Jiang W H. The relation between wavefront aberration and the beam quality factor[J]. Chinese Journal of Lasers, 1995, 26(5): 32-36.  
鲜浩, 姜文汉. 波像差与光束质量指标的关系[J]. 中国激光, 1995, 26(5): 32-36.
- [21] Liu S F, Jin G, Liu J, et al. Effect of thermal characteristics in laser transmitting channel on far-field beam quality[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(6): 703-706.  
刘顺发, 金钢, 柳建, 等. 激光通道传输热特性对远场光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 703-706.
- [22] Su Y, Wan M. High energy laser system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 42-45.  
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 42-45.
- [23] Gao X Y, Su Y, Xie C L, et al. Centroid position of focal spot of laser beam with aberration[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2006, 18(5): 717-719.  
高学燕, 苏毅, 谢川林, 等. 畸变光束的焦斑质心位置[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 717-719.
- [24] Zhang J H, Shi C P. Experimental research on thermal blooming effects of high energy laser internal optical transmission[J]. Electro-Optic Technology Application, 2020, 35(3): 45-49.  
张建晖, 史春鹏. 强激光内光路传输的热晕效应实验研究[J]. 光电技术应用, 2020, 35(3): 45-49.
- [25] Zhang E T, Ji X L, Lü B D. Influence of atmospheric absorption in the inner optical system on the laser beam quality[J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 96-98.  
张恩涛, 季小玲, 吕百达. 内光路中大气吸收对远场光束质量的影响[J]. 激光技术, 2006, 30(1): 96-98.