

## 封闭空间内热耦合效应对激光合束传输的影响

龚宇<sup>\*\*</sup>, 吴娟<sup>\*\*\*</sup>, 杨钧兰<sup>\*</sup>, 雒仲祥, 李源

中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 激光在气体介质中传输时, 气体吸收激光能量导致折射率变化, 形成气体热效应, 降低光束质量。针对这一问题, 介绍了光-流-热耦合效应理论, 建立了椭圆形高斯激光束的合束传输热耦合效应仿真模型。通过数值仿真分析了长方体封闭空间中由激光加热诱导的自然对流现象及流场对光束传输影响的变化过程, 研究了热效应的影响因素。结果表明, 气体对激光能量的吸收会导致光轴偏转, 光束质量下降, 远场光斑形态发生改变; 封闭空间内热效应自然对流导致的光束质量下降呈先增加再减少后稳定的趋势; 通过改善介质吸收和流场分布, 可以有效改善气体热效应对光束质量的不利影响; 合束过程中的流场分布和光束质量变化比单束光路情况下复杂。

**关键词** 激光光学; 激光合束; 光束传输; 热效应; 光束质量

中图分类号 TN012

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221492

## 1 引言

热晕效应会影响激光在气体介质中的传输效果。低能激光的传输衰减和湍流效应是线性的, 但高能激光的热晕效应不仅与光束形态密切相关, 还受气流运动和吸收能量等影响, 作用机理十分复杂<sup>[1]</sup>。空气流动导致的信号畸变称为气动光学效应, 对光学系统造成传输干扰, 导致畸变、抖动、模糊和能量衰减<sup>[2-4]</sup>。Wang 等<sup>[5-6]</sup>总结了近四十年激光通信、追踪和定向能系统中的气动光学研究及计算气动光学的发展, 如麻省理工大学的林肯实验室已经开发了 Sigmadyne SigFit 程序用于在早期设计中评估气动光学效应的影响<sup>[7-8]</sup>。气动光学主要研究窗口外部流动对光学性能的影响, 揭示湍流流动结构的光学传输机理。

本研究关注系统内部传输光路的气流和热影响。高能激光在气体介质中传输时部分能量被空气吸收而形成热效应<sup>[9]</sup>。孙运强等<sup>[10-11]</sup>在研究中提到, 由于激光在内通道中功率密度高, 高斯光束在内通道中传输 10 m 产生的衰减作用相当于在外通道中传输 40 km 的衰减, 因此内通道热效应的研究不可或缺。郑也等<sup>[12]</sup>通过搭建实验平台对组束激光器内部的气体热效应进行了探索, 但理论仿真无疑是设计阶段成本更低廉的评价手段。吕可等<sup>[13]</sup>建立了一套激光内通道传输时气体热效应对光束质量影响的一维近似模型, 可为激光系统的设计评估提供定性参考, 但无法获得准确分布。朱福音<sup>[14]</sup>利用 FLUENT 软件对激光在内通道传输时的流场进行求解, 然后以自定义程序将光场以热源形式加入流场, 建立了光场流场耦合分析模型, 对内通道

结构进行了分析比较。北京应用物理与计算数学研究所的胡鹏等<sup>[15-17]</sup>建立了水平管道和垂直管道热耦合效应模型, 研究了封闭管道中介质气体、压强和镜面吸收等对热耦合作用及光束质量的影响, 表明光束质量会随着流场分布的变化而振荡。刘万生等<sup>[18]</sup>数值模拟了阵列光束不同排布方式下热晕效应对光束质量的影响和轴向风对热晕的抑制作用。

在以往的研究中, 激光传输的封闭空间多为圆管内通道, 而在复杂系统中由于器件结构及光束分布的限制无法将光束屏蔽于圆形通道中。另外, 以往的研究中光束形态多为理想的圆形平顶光束, 能量均布, 并且在大部分计算中未考虑密度变化引起的浮升力作用。因此, 以往的研究结论不能适用于其他结构复杂、光束非理想的激光系统。

本文研究内容为长方体封闭空间中的激光传输热效应, 光束形态为椭圆形, 且能量具有高斯分布特征, 考虑了封闭空间内由于自然对流而产生的时空效应。此外, 模型采用了光谱合成技术<sup>[19-20]</sup>, 研究了光束合成过程产生的热耦合效应。本文建立的封闭空间内热耦合效应对激光传输影响的研究方法, 可拓展至任意空间、时间、光束形态的分析, 更具备普适性, 可为高能激光系统的设计和性能评估提供有力支撑。

## 2 基本原理及验证

## 2.1 光-流-热耦合效应理论

求解气体介质中激光传输的热效应问题, 包括流场计算、光传输计算及光-热耦合作用计算。

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-01-20; 录用日期: 2023-02-16; 网络首发日期: 2023-03-09

通信作者: \*442030299@qq.com; \*\*gy.gongyu@qq.com; \*\*\*wj.62803221@163.com

## 2.1.1 光传输理论

光传输满足 Maxwell 方程组。对于平面电磁波的传播,其电矢量可以描述为

$$E = E_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)], \quad (1)$$

式中:  $E$  为传输方向上的电场;  $E_0$  为电场初始振幅;  $k$  为波矢;  $r$  为电场位置;  $\omega$  为角频率;  $t$  为时间。

在模拟大尺寸空间中长距离的光学结构电磁场传播时,通常将电磁波看成射线,通过求解射线位置和波矢来进行射线追迹,其方程组为

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \\ \frac{dk}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial q} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $q$  为射线位置矢量。

通过该方程组,可以求解不同光学元件界面及非均匀折射率介质中的光线传输轨迹。

## 2.1.2 流体力学控制方程

任何流体流动和传热都遵循质量、动量和能量三大守恒定律<sup>[21]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \rho \mathbf{F} + S_\eta - \nabla \cdot \mathbf{p}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(E + p) \mathbf{v}] = \\ \rho \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h, \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $v$  为速度矢量;  $F$  为体积力项,本文中考虑自然对流作用,即重力;  $S_\eta$  为分子黏性项;  $p$  为压力;  $E$  为内能;  $\boldsymbol{\tau}$  为应力张量;  $T$  为温度;  $\lambda$  为气体导热系数;  $S_h$  为热源项,即介质吸收能量。

此外,对于可压缩流动需要补充一个状态方程使流体力学方程组封闭:

$$\rho = f(p, T). \quad (6)$$

对于理想气体有  $p = \rho RT$ ,  $R$  为摩尔气体常数。

## 2.1.3 光热耦合效应

在激光传输路径中,气体介质和光学元件会吸收部分激光产生能量变化,另外还有外部环境、空气流动等因素共同作用引起介质或元件温度变化,进而影响介质折射率分布,最终导致激光在传输路径中产生相位畸变。

根据 Beer 定律可以计算光传输的能量衰减:

$$I = I_0 \exp(-\alpha L), \quad (7)$$

式中:  $I$  为光强;  $I_0$  为初始光强;  $\alpha$  为介质吸收系数;  $L$  为吸收光程。

中心波数为  $\nu_0$  的吸收线在光谱位置  $\nu$  的吸收系数可由下式计算<sup>[1]</sup>:

$$\alpha = S f(\nu - \nu_0), \quad (8)$$

式中:  $S$  为谱线强度;  $f$  为归一化线型函数。计算中需

要用到的大气吸收线参数可以通过美国大气分子吸收光谱数据库 HITRAN 查得。

气体介质由于温度和密度变化产生的折射率变化满足 Gladstone-Dale 关系<sup>[22]</sup>:

$$n - 1 = k_{GD} \rho, \quad (9)$$

式中:  $k_{GD}$  为 Gladstone-Dale 常数。

对于混合气体,折射率表示为

$$n - 1 = \sum k_{GD_i} \rho_i = \sum k_{GD_i} \frac{p_i}{RT}, \quad (10)$$

式中:  $\rho_i$  为每种气体组分的密度。

由于介质折射率变化带来附加光程变化,从而引起光束质量及远场光斑形态。介质热效应导致的光程差(OPD)计算方法为

$$D_{op} = \int_0^L n(x, y, z, t) dL - \int_0^L n_0(x, y, z, t) dL, \quad (11)$$

式中:  $n_0$  为介质的初始折射率。

由介质热效应引起的波面变化会导致光束质量退化。本文采用的光束质量评价因子为光束质量  $\beta$ , 定义为测量的实际光束的远场发散角  $\theta_{actual}$  与同样尺度的理想光束的远场发散角  $\theta_{ideal}$  之比:

$$\beta = \frac{\theta_{actual}}{\theta_{ideal}}. \quad (12)$$

本文将仿真所得的椭圆形波前整形为圆形,然后与理想圆形高斯光束进行对比计算。非理想光束的  $\beta$  值总是大于 1, 其值可整体反映光束的质量信息,具体计算方法可见文献[23-24]。

## 2.2 物理模型

封闭空间内激光的传输模型为如图 1 所示的合束箱体,简化后模型由密闭箱体和 2 个衍射光学元件(多层电介质膜衍射光栅,其作用为把不同波长的激光通过两块光栅的衍射形成共孔径合成光束,基材为石英玻璃)组成,省略了部分光学和电子元器件,仅考虑激光能量对空气加热的影响,且不计算箱体外部的传输。封闭空间尺寸为 1600 mm × 600 mm × 340 mm, 光路传输路径如图 1 中深色部分所示,五束椭圆形状子束从右端入射,在衍射元件的作用下合成为一束激光,最后从左端窗口出射。密闭箱体中充满常压空气,对空间内的温湿度进行控制。

在本研究中,光束为椭圆形,其长轴为 42 mm,短

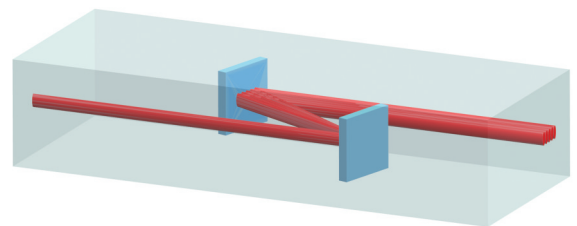


图 1 封闭空间内激光合束传输模型

Fig. 1 Model of laser beam combining propagation in enclosed space

轴为 16 mm, 光束能量符合高斯分布形态。对空气含湿量进行控制, 考虑衰减后算得合束段空气的激光能量吸收分布如图 2 所示, 五路合束前各子束能量为其 1/5; 各衍射光学元件表面吸收设为  $10 \times 10^{-6}$ 。

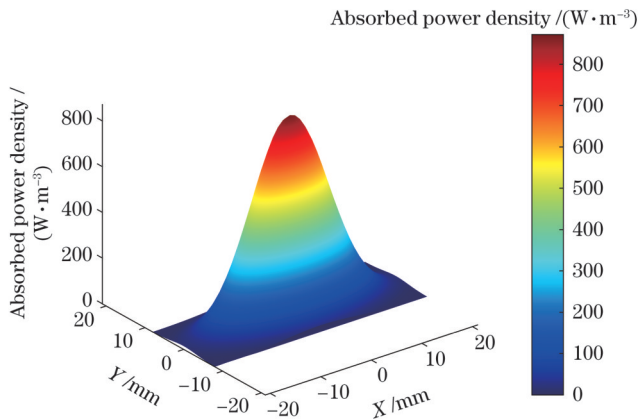


图 2 合束段吸收能量分布

Fig. 2 Absorbed power density of beam combining section

### 2.3 实验校核

开展了图 1 所示合束模型出光实验, 激光束传输路径为光源→合束箱体→整形→探测器。从箱体出射后, 椭圆光束整形为圆形光束, 再利用远近场探测器测量光轴计算光束质量, 测量时间为 10 s, 工作压力为 1 atm (约  $1.01 \times 10^5$  Pa), 使用的激光波段为  $(1064 \pm 5)$  nm。实验测量光束质量与仿真结果(第二子束光)如图 3 所示。

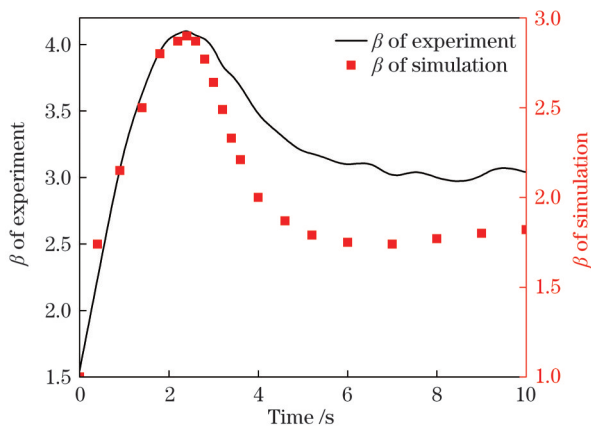


图 3 实验测量和仿真光束质量对比

Fig. 3 Comparison of beam quality between experiment and simulation

实验测量光束质量呈现先上升再下降最后稳定的趋势, 其峰值出现在 2.4 s 左右, 光束质量稳定后的轻微波动可能是由于实验现场气流及其他元器件的不稳定性所导致的。另外, 元件温升会随时间逐渐累积, 致使稳定后曲线呈现轻微上升趋势。

仿真结果曲线与实验曲线规律极为相似, 峰值时间相同, 稳定时间相近, 但其值低于实验曲线, 下降沿更陡峭。仿真光束质量低于实验值的原因在于:

(1) 实验初始  $\beta$  值为 1.55, 说明整个系统在初始时刻即带有像差; (2) 实验传输光路更长(含光源、箱体入射段与出射段、整形器和探测器); (3) 五路光束的热像差分布不完全相同。仿真下降沿更陡峭的原因可能有: (1) 实验更多的光学元件温升逐渐增加, 减缓了下降速度; (2) 实验现场某些条件与仿真的理想条件不完全一致而产生差异。光束质量并非与波前峰-谷(PV)值成简单的正比关系, 仿真与实验的初始值不同, 且实验条件不够理想, 必然导致结果数值上的差异。但仿真结果可以表明所建立的激光热耦合效应模型与实验规律吻合良好, 可以预测由气体介质热效应引起的光束质量退化情况。

## 3 分析与讨论

### 3.1 封闭空间内流场模拟

封闭空间内的自然对流中, 流体运动主要是由于温度梯度造成的浮升力导致的。瑞利数(浮升力与黏性作用力的比值)可用于判断自然对流过程的流动特征, 当瑞利数  $Ra$  超过  $10^9$  时流动状态转变为湍流, 表示为

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{\alpha_l g \rho l^3 \Delta T}{\eta a}, \quad (13)$$

式中:  $Gr$  为格拉晓夫数;  $Pr$  为普朗特数;  $\alpha_l$  为热膨胀系数;  $g$  为重力加速度;  $l$  为特征长度;  $\Delta T$  为温差;  $\eta$  为动力黏度;  $a$  为热扩散系数。

本研究中, 空气由于激光加热导致的温升较小, 且封闭空间尺寸不大, 其瑞利数在  $10^7$  量级, 为层流状态, 故采用层流模型进行计算。在抽气算例中, 空气流速较低, 湍流流动影响不大, 故采用时均化 RANS  $k-\epsilon$  模型求解。所有元件和介质的初始温度设为  $20^\circ\text{C}$ 。

第二个元件表面只有一个光斑, 其表面温度分布如图 4 所示, 温度分布规律与热源相同, 呈椭圆高斯状。30 s 内温度持续上升, 也会导致镜面附近的空气温度逐渐增加。

合束后远离元件表面的空气截面的温升情况如图 5 所示(箭头表示速度矢量)。与元件不同, 刚开始时空气温度分布为椭圆高斯状, 随后由于空气不断加热, 密度发生变化产生浮升力, 出现自然对流作用, 热空气上升至封闭空间上部。由于热空气的不断扩散, 在短暂时间后, 空气的最高温度不再变化, 维持在  $20.44^\circ\text{C}$  左右。

合束后远离镜面处空气的最大温度变化和由于浮升力作用导致的空气流速变化如图 6 所示。空气温度在 3 s 内快速上升, 随后缓慢下降, 最后趋于稳定。刚开始时空气温度均匀, 密度变化不大, 空气流动缓慢, 因此温度不断上升; 随着气体流速的增大, 热空气被不断带走, 温度出现了小幅下降; 温度降低又导致流速放缓, 因而温度逐渐趋于稳定。这是典型的空气加热自

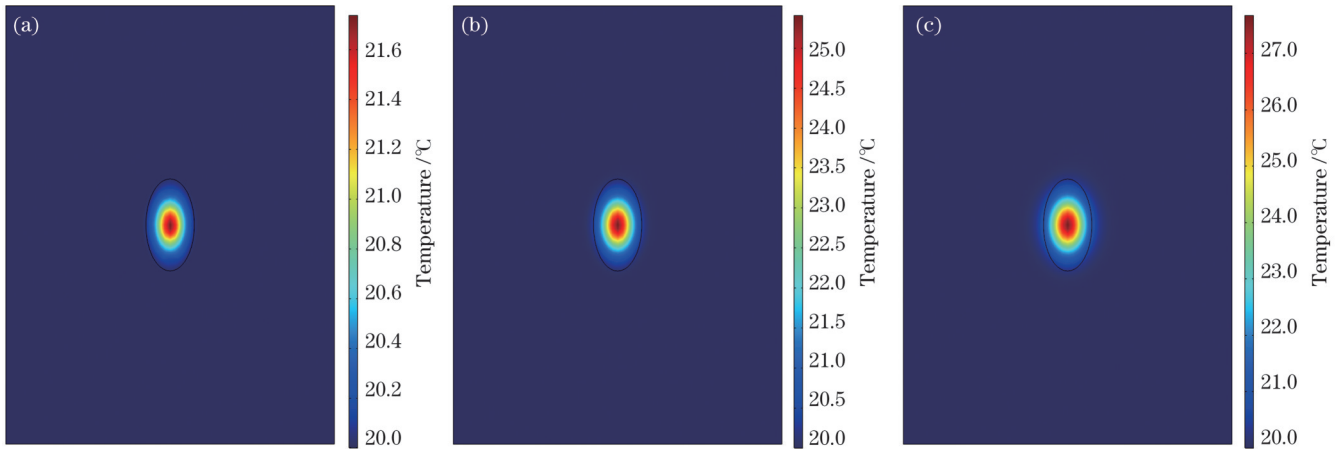


图 4 不同时刻元件表面温度。(a)1 s;(b)10 s;(c)30 s

Fig. 4 Temperature distribution of optical element surface at different time. (a) 1 s; (b) 10 s; (c) 30 s

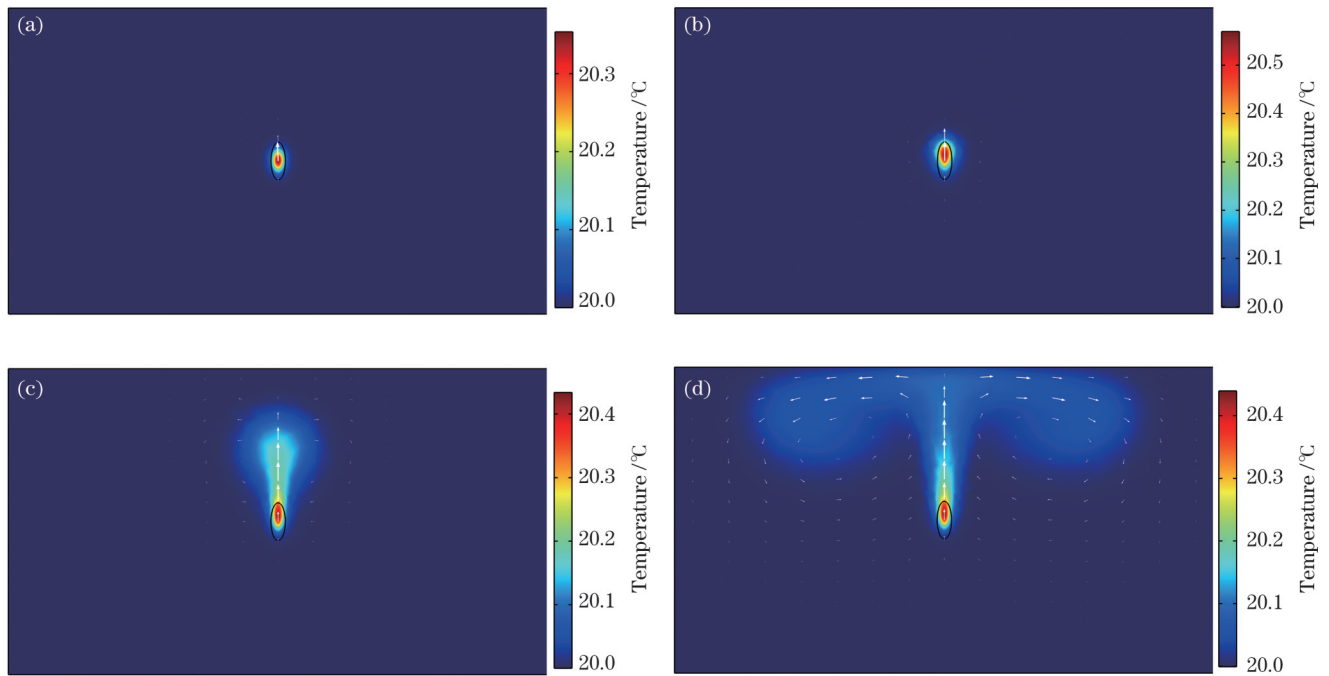


图 5 不同时刻空气的温度分布云图。(a) 1 s;(b) 3 s;(c) 10 s;(d) 30 s

Fig. 5 Temperature distribution of air at different time. (a) 1 s; (b) 3 s; (c) 10 s; (d) 30 s

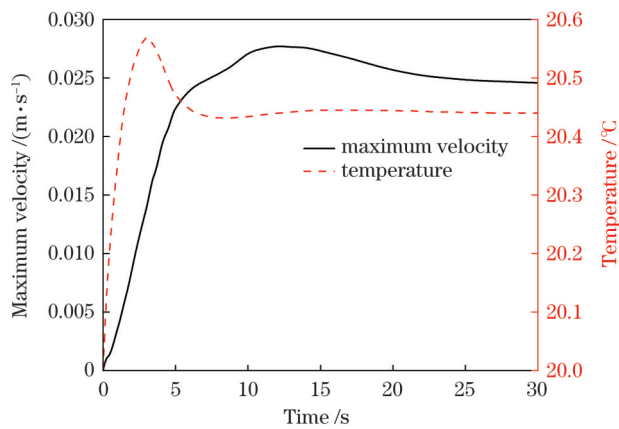


图 6 远离镜面的空气的最大流速变化和温度变化

Fig. 6 Variation of maximum velocity and temperature of air far from optical element with time

然对流过程,温度场和流场之间具有强烈的耦合作用。可以预测由气体热效应带来的附加波前变化也会存在先升后降再稳定的变化。

### 3.2 封闭空间内的光-流-热耦合效应

对光场、流场和温度场进行耦合计算,得到气体介质温度与流动变化状态下的光线轨迹,进而求得出射窗口上光线的光程差分布。除了激光能量出现衰减,在非均匀介质中,光线的传输轨迹也会发生偏转,在出射位置由于介质热效应导致的光斑位置变化约为  $3.6 \mu\text{m}$ 。

本节以合束中的第二子束光为分析对象。不同时刻由于热效应导致的附加相位畸变如图 7 所示。激光加热会导致空气密度减小,根据 Gladstone-Dale 关系式可知,空气折射率随之减小,因而 OPD 均为负值。OPD 分布与气体的温度分布变化规律相似,起初呈椭

圆高斯状,有明显的离焦像差,随着气流上升,OPD 最低点上移,最后形状趋于稳定,其 PV 值呈先增加再降

低后稳定的趋势。

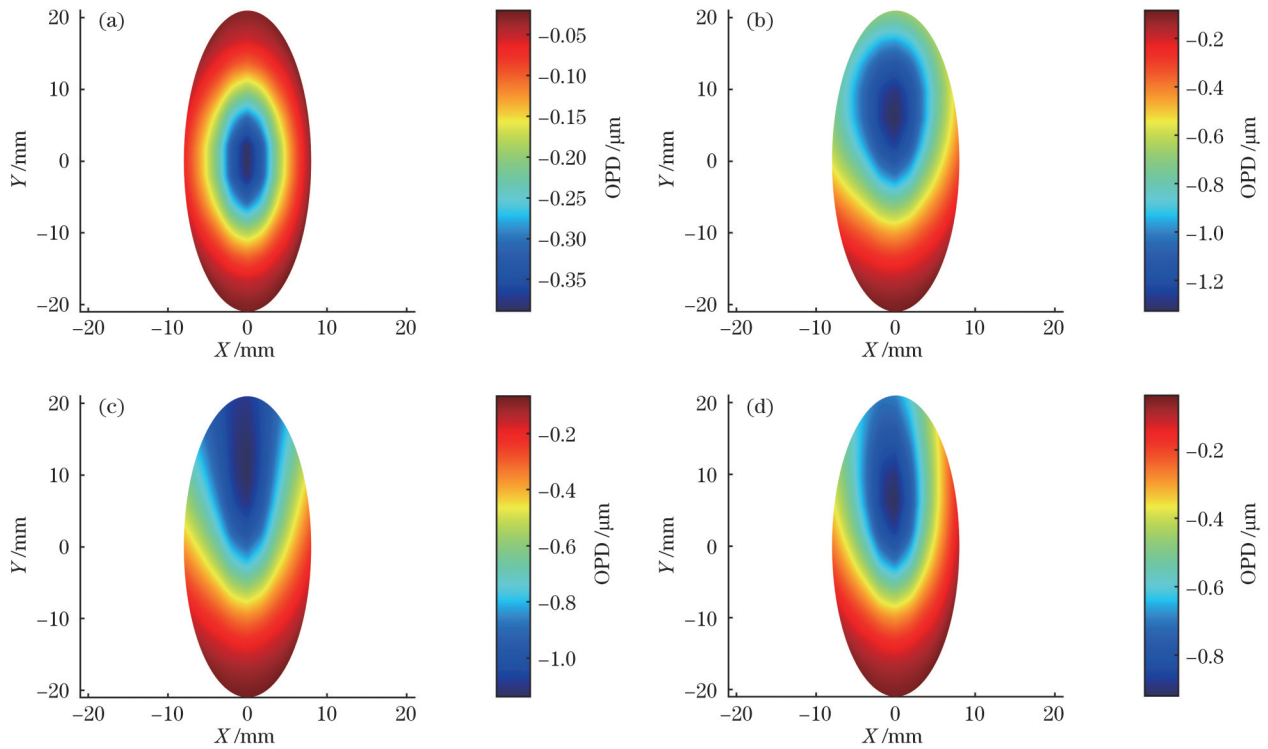


图 7 不同时刻的光程差分布。(a) 0.4 s;(b) 3.2 s;(c) 5 s;(d) 10 s

Fig. 7 OPD distribution at different time. (a) 0.4 s; (b) 3.2 s; (c) 5 s; (d) 10 s

对所求得的波前分布进行 Zernike 分解,结果表明介质热效应导致的热像差构成主要存在于前 10 项。10 s 时的波前分解如图 8 所示(活塞项已忽略),最大项为 Y 方向倾斜,这是由于温升最高点上移导致的,倾斜会导致光轴角度偏转,但不影响光束质量;次大项为离焦像差,此外还有小部分像散、彗差和球差产生,这些像差会导致光束质量下降。

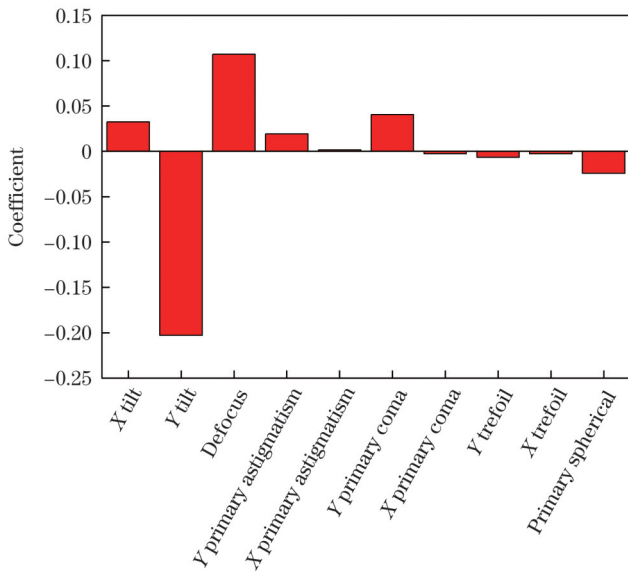


图 8 10 s 时波前 Zernike 分解

Fig. 8 Zernike polynomials evaluation of wavefront at 10 s

图 9 是光程差的 PV 值和光束质量随时间的变化情况。两者呈现相同趋势,但光束质量在 2.4 s 出现峰值,而波前光程差的 PV 峰值出现在 3.2 s,这是因为在 2.4 s 后 OPD 最低点上移过程中,倾斜像差增加,离焦像差开始减小,而倾斜对光束质量没有影响,故光束质量开始下降。但在相同模型中,介质的热像差各项像差构成相同,光束质量情况与光程差的 PV 值呈正相关,为了方便对比,后文仅以 PV 值分析不同情况下光束质量的退化情况。

出光 0.4 s 时,气体温升不高,热畸变较小,光斑形态良好,如图 10 所示;随着时间增加,光斑核心区域下

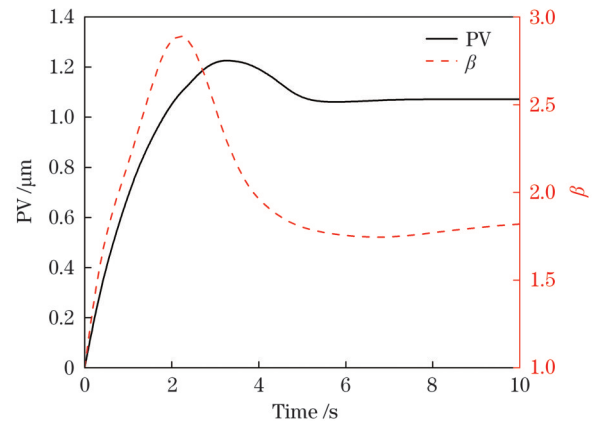


图 9 光程差 PV 值和光束质量变化

Fig. 9 Variation of PV of OPD and beam quality with time

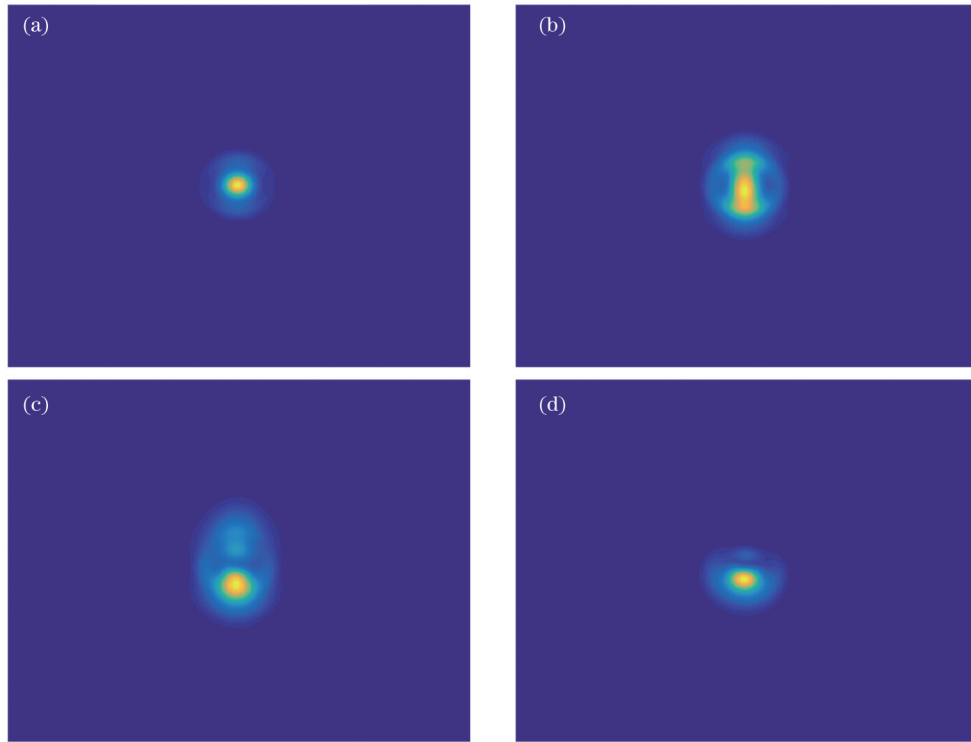


图 10 远场光斑形态变化。(a) 0.4 s; (b) 1.4 s; (c) 2.4 s; (d) 5 s

Fig. 10 Energy distribution in far field at different time. (a) 0.4 s; (b) 1.4 s; (c) 2.4 s; (d) 5 s

移,由于像散和彗差的逐渐增加,光斑被拉长,2.4 s 峰值点后光束质量会恢复一部分,光斑集中度也有一定程度恢复。

### 3.3 热效应的影响因素

合束后能量密度更高,变化更强。合束为一束后的强吸收段如图 11 所示。本节以此为分析对象,来比较不同因素对热耦合效应的影响。

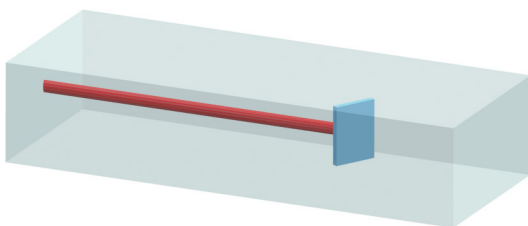


图 11 合束段的激光传输模型

Fig. 11 Model of beam combining section

#### 3.3.1 介质吸收系数

在所使用的激光波段(1064±5) nm,空气中主要吸收介质为水蒸气 and 气溶胶,其次为氧气(氮气吸收极小;除氮气外,空气中氧含量远大于其他气体)。通过控制气体介质中的含湿量和气体成分可以改变空气介质的吸收系数 $\alpha$ 。

不同介质吸收系数下,30 s 出射窗口表面光程差的 PV 值变化如图 12 所示。随着吸收系数的增加,气体热效应导致的光程差 PV 值增加;且由于吸收功率的增大,气体升温速度加快,对流产生气体运动提前,从而导致光程差 PV 的峰值点有略微的提前。吸收系

数增加一倍,光程差 PV 值增加 67%,但由于对流运动的加强,继续增加吸收系数时光程差 PV 值的涨幅会有所下降。因此,通过改变封闭空间内气体介质的含湿量或气体成分,控制气体介质对激光能量的吸收,可有效改善气体热效应对光束质量退化的影响。

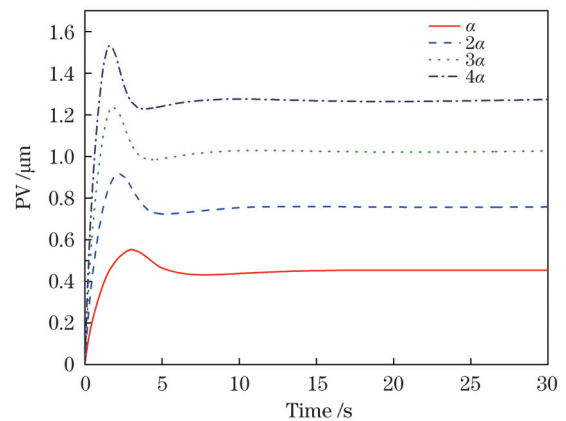


图 12 不同介质吸收系数下光程差 PV 值变化

Fig. 12 Variation of PV of OPD under different gas absorption coefficients

#### 3.3.2 元件吸收

一般情况下,受表面加工和镀膜工艺的影响,光学元件的表面吸收系数远大于介质吸收系数。下面对不同元件吸收系数导致的气体热效应进行分析,但不考虑元件形变的影响(衍射元件的表面微结构形变较复杂),重点关注元件表面吸热对气体的加热作用。

在介质吸收系数为 $\alpha$ 时,元件表面不同吸收的模

拟结果如图 13 所示。分析表明,元件表面的吸收对光程差的影响不大,元件吸收系数提高 5 倍,对气体介质热效应带来的光程差 PV 值变化为 15%。镜面附近虽然气体温度很高,但其影响区域仅存在于镜面附近的热边界层内,对于气体介质中的长距离传输只占较小部分。在元件无吸收的情况下,光程差的 PV 值在一定时间后稳定,但随着元件吸收的增加,稳定后的光程差 PV 值呈现缓慢上升趋势,这是因为固体无对流作用,且元件基底材料导热性一般,元件表面及附近气体的热量会随时间推移一直累积。总的来说,元件表面的吸收情况对气体介质热效应作用贡献较小,但在实际工程应用中元件自身的热变形或受力变形所带来的像差不可忽略。

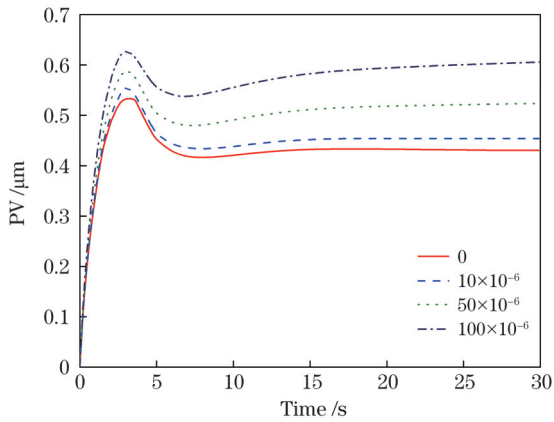


图 13 不同元件表面吸收下光程差 PV 变化

Fig. 13 Variation of PV of OPD under different optical component absorption coefficients

### 3.3.3 气体置换

前述结果表明空气对激光能量的吸收导致了附加相位差,加热导致的空气对流可以带走热量,避免温度持续上升。若在空间内进行气体置换,可及时带走热量。

在介质吸收系数为  $\alpha$  的情况下,对合束箱体内进行不同方案的气体置换,如图 14 所示。方案 1 为箱体左侧进风,右侧出风;方案 2 为箱体下侧进风,上侧出风;方案 3 为箱体左右两侧进风,上侧出风。所有入口均为 20 °C

气体,流速 0.05 m/s。首先进行流场的稳态计算,待流场稳定后出光,再进行光束能量和光场传输计算。

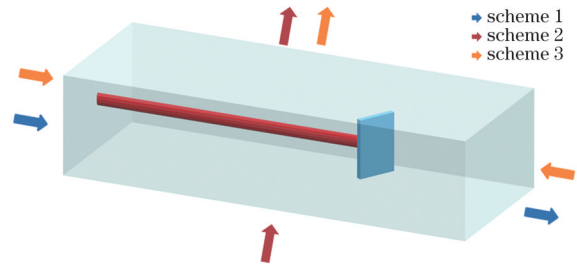


图 14 合束段模型不同气体置换方案

Fig. 14 Different schemes of gas replacement in beam combining model

在气体置换作用下,求得光程差的 PV 值变化如图 15 所示。可见气体置换对波前变化 OPD 的 PV 值有良好的抑制作用,置换方案 1 和方案 2 可将 PV 值降低 64%,方案 3 可将 PV 值降低 50%。方案 3 的进气大部分在上盖两侧流出,无法对整个光束区域进行良好置换,故效果不如前两个方案。

不同置换方案下,空间内的流场分布不同,波前分布也会不同,如图 16 所示。对所求得的波前分布

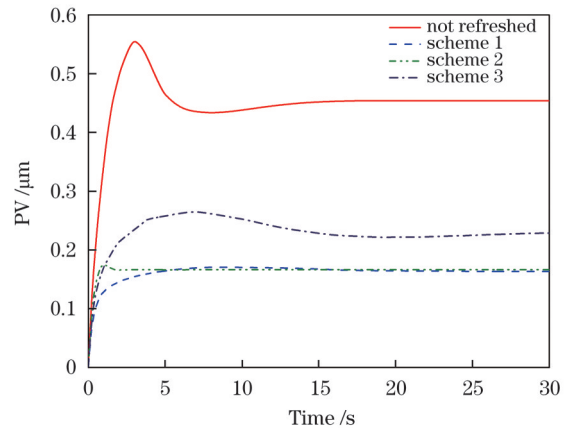


图 15 不同气体置换方案下光程差的 PV 值变化

Fig. 15 Variation of PV of OPD under different schemes of gas replacement

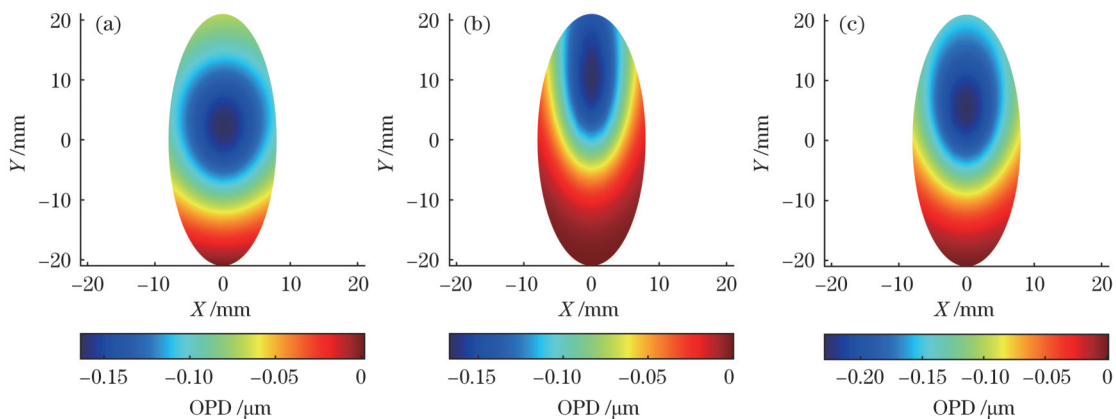


图 16 30 s 时不同气体置换方案的 OPD 分布。(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3

Fig. 16 OPD distribution of different replacement schemes at 30 s. (a) Scheme 1; (b) scheme 2; (c) scheme 3

进行 Zernike 分解,结果如图 17 所示。方案 1 和方案 3 可减小波谷点上移量,对应的倾斜像差相对减小,从而减小光轴偏转量;方案 2 气流方向与自然对流方向相同,会加强波谷点上移,倾斜像差明显,但高

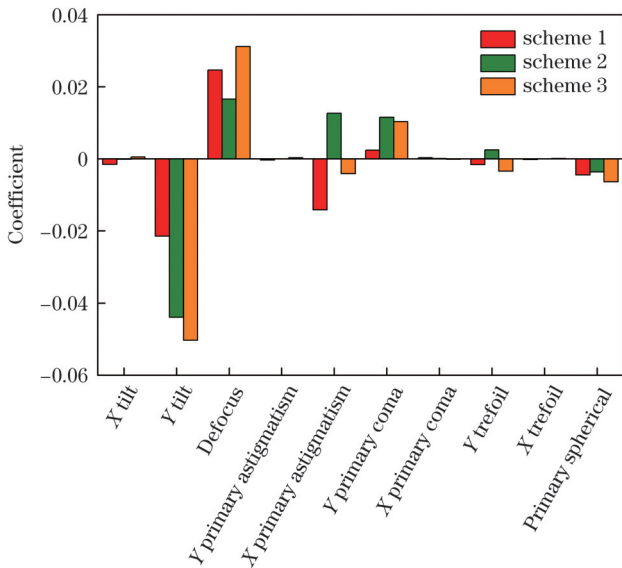


图 17 30 s 时不同气体置换方案的波前 Zernike 分解

Fig. 17 Zernike polynomials evaluation of different replacement schemes at 30 s

阶像差减小,光束质量最高。对于该分析模型,方案 1 是综合光轴偏转和光束质量较佳的方案,但方案 1 的进气会在元件后方产生涡流。在实际工程应用中,空间内元件较多,很可能在光束区域有涡流的发生,导致更多高阶像差,从而降低光束质量。因此需要根据实际模型来进行流场的优化设计,使气流均匀分布。

### 3.4 合束传输的光-流-热耦合效应

对光束合束过程进行分析。虽然合束前功率密度低,但其传输路径增长,介质热效应带来的相位畸变更大。假设合束后的功率相同,计算两路和五路光束合成传输过程,介质吸收功率分布如图 18 所示。

以五束模型为例,图 19 为合束区域中间截面的温度分布云图。开始时,子束区域、合束区域、单束区域各自吸收热量,互不影响;吸收的能量达到一定水平后,空气开始产生自然对流,各区域的热空气在浮升力作用下竖直上升;随着各区域的热空气逐渐交汇,导致竖直上升的气流之间产生相互作用,改变了空气流动方向,相互之间产生涡流。因此各路光束虽然能量相近,但路径长度不同,所经区域的流场、温度场分布不同。

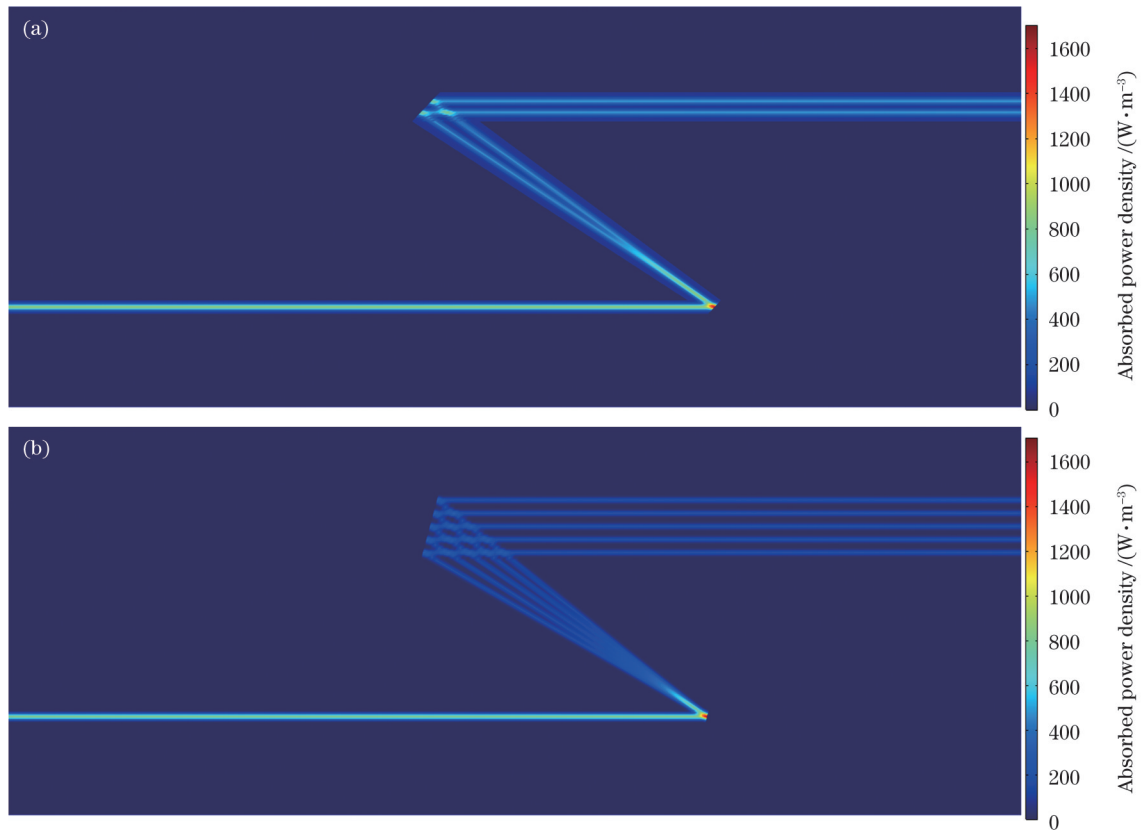


图 18 介质吸收激光能量分布。(a)两束模型;(b)五束模型

Fig. 18 Absorbed power density. (a) Two-beam combining model; (b) five-beam combining model

两束模型和五束模型出光 30 s 时由于气体热效应带来的 OPD 分布如图 20 和图 21 所示。各个子束

的介质热像差虽然 PV 值相近,但分布均不相同,呈现对称形状。出射窗口表面各子束 Y 向的倾斜像差



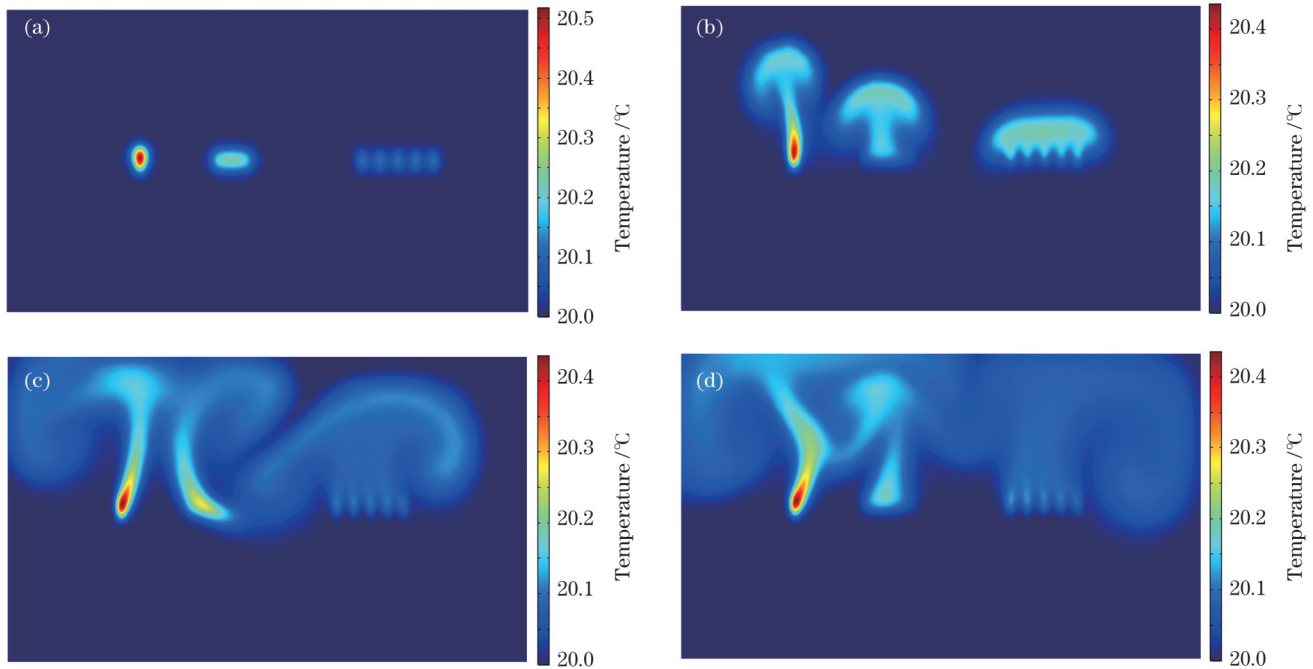


图 19 五束模型的温度场变化。(a)2 s;(b)10 s;(c)20 s;(d)30 s

Fig. 19 Temperature distribution at different time for five-beam combining model. (a) 2 s; (b) 10 s; (c) 20 s; (d) 30 s

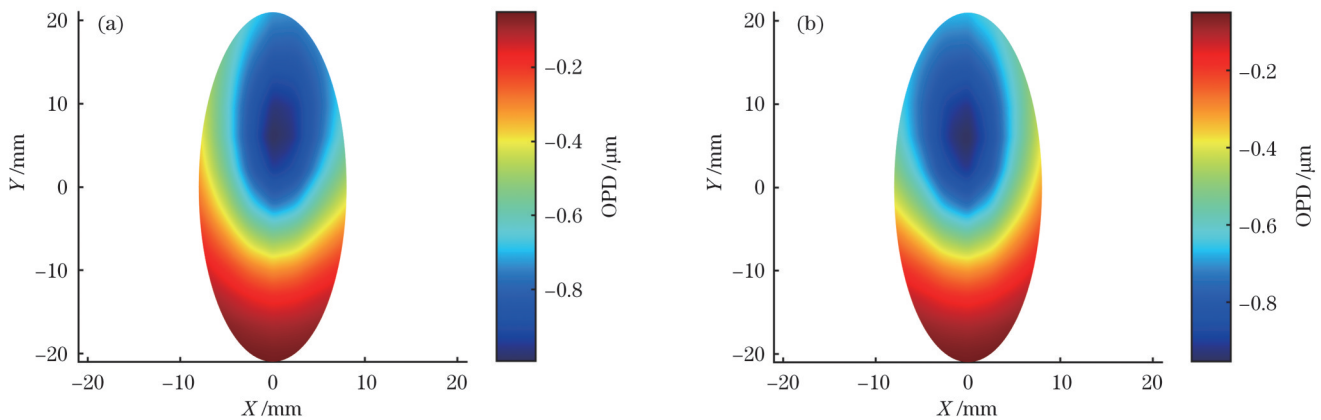


图 20 30 s 时两束模型的 OPD 分布。(a) 光束 1; (b) 光束 2

Fig. 20 OPD distribution of two-beam combining model at 30 s. (a) 1st beam; (b) 2nd beam

相近,而 $X$ 向的倾斜像差方向相反,光斑位置有分散趋势,导致合束后光束质量下降。虽然差异较小,在出射窗口上几乎没有分开,但对于数千米远距离传输的强激光而言,其远场光斑则会出现分散,降低合束的光束质量。这也是使用单束模拟的光束质量与实验结果对比偏低的原因之一。影响合束传输过程中介质热像差的因素包括子束个数及功率、子束形状及分布、合成方法、传输距离和系统布局等。

## 4 结 论

本文介绍了光-流-热耦合效应理论,建立了封闭空间内激光合束传输的热耦合效应模型,通过数值模拟及实验现象对比,分析了气体介质热效应的产生、时空变化及其影响因素。主要结论如下:(1)气

体介质对激光能量的吸收会影响激光传输,导致光轴偏转,光束质量下降,远场光斑形态发生改变;(2)封闭空间内,由于气体介质的自然对流作用,热效应带来的相位畸变和光束质量呈先增加再下降后稳定的趋势;(3)元件表面吸收对气体介质热效应的影响小于气体自身吸收的影响,通过控制空间内的气体成分、温湿度等,可以改变气体介质对激光能量的吸收,从而有效改善气体热效应对光束质量的不利影响;(4)在内空间内进行气体置换,可降低光程差 PV 值,但换气会导致波前分布变化,要注意气流合理组织,避免产生高阶像差;(5)合束系统中各子束会发生相互干涉,波前分布会有差异,各子束有分散趋势。

在实际系统中,内传输箱体里还有各类结构件、探

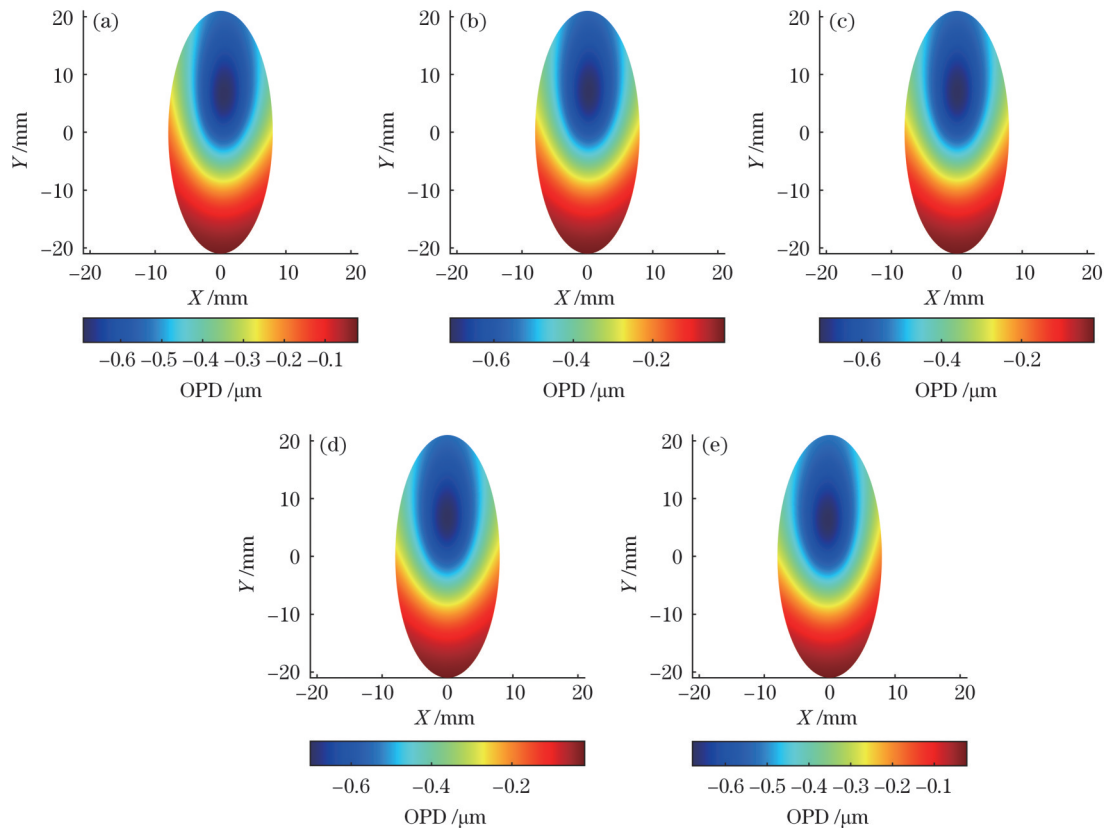


图 21 30 s 时五束模型的 OPD 分布。(a) 光束 1; (b) 光束 2; (c) 光束 3; (d) 光束 4; (e) 光束 5

Fig. 21 OPD distribution of five-beam combining model at 30 s. (a) 1st beam; (b) 2nd beam; (c) 3rd beam; (d) 4th beam; (e) 5th beam

测元件和电子器件,其中电子器件还会产生热量,均会导致流场分布差异,从而可能导致气体热效应带来不同的像差情况。因此,对于无法将强光束屏蔽于密封管道中的系统而言,其介质热像差都需要根据实际应用单独进行考虑和分析。

### 参 考 文 献

- [1] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 17-19.
- [2] Rao R Z. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 17-19.
- [2] 殷兴良. 现代光学新分支学科: 气动光学[J]. 中国工程科学, 2005, 7(12): 1-6.
- [3] Yin X L. A new subdiscipline of contemporary optics: aero-optics [J]. Strategic Study of CAE, 2005, 7(12): 1-6.
- [3] 韩莹. 超音速光学头罩气动光学效应仿真分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 1-5.
- [4] Han Y. The simulation analyses of aero-optics effects of supersonic optical hood[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 1-5.
- [4] 丁浩林, 易仕和. 高速光学头罩气动光学效应研究进展[J]. 气体物理, 2020, 5(3): 1-29.
- [5] Ding H L, Yi S H. Research advance in aero-optical effect of high-speed optical dome[J]. Physics of Gases, 2020, 5(3): 1-29.
- [5] Wang M, Mani A L, Gordeyev S. Physics and computation of aero-optics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2012, 44: 299-321.
- [6] 史可天, 马汉东. 计算气动光学研究进展[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(2): 186-192.
- [7] Shi K T, Ma H D. Progress in computational aero-optics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(2): 186-192.
- [7] Bury M, Doyle K, Sebastian T, et al. An integrated method for aero-optical analysis[C]//51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 7-10, 2013, Grapevine (Dallas/Ft. Worth Region), Texas, USA. Reston: AIAA Press, 2013: 286.
- [8] Genberg V, Michels G, Doyle K, et al. Computational methods to compute wavefront error due to aero-optic effects[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8840: 88400A.
- [9] Li X Q, Ji X L. Effect of thermal blooming on the beam quality of truncated laser beams[J]. Optik, 2016, 127(20): 8350-8356.
- [10] 孙运强. 激光内通道传输的气体热效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 1-29.
- [11] Sun Y Q. Study on the thermal blooming of beam propagation in the inner channel[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 1-29.
- [11] 孙运强, 习锋杰, 陈洪斌, 等. 旋转光束气体热效应的仿真分析[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0402012.
- [12] Sun Y Q, Xi F J, Chen H B, et al. Simulation and analysis of thermal effect of rotary beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0402012.
- [12] 郑也, 倪庆乐, 张琳, 等. 受激拉曼散射对高功率激光传输特性影响研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0701005.
- [13] Zheng Y, Ni Q L, Zhang L, et al. Influence of stimulated Raman scattering on propagation properties of high-power laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): .0701005.
- [13] 吕可, 郑威, 华卫红. 激光内通道传输气体热效应对光束质量的影响[J]. 光电工程, 2012, 39(9): 119-124.
- [14] Lü K, Zheng W, Hua W H. Thermal effects on laser beam quality in the inner channel propagation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(9): 119-124.
- [14] 朱福音. 激光内通道热效应研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017: 6-31.
- [15] Zhu F Y. Research on the thermal blooming of laser propagation in the inner channel[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 6-31.
- [15] 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.

- 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.
- [16] 胡鹏, 苏华, 安建祝, 等. 封闭管道中热耦合效应对激光传输的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1651-1656.  
Hu P, Su H, An J Z, et al. Thermal coupling effects on laser propagation in closed tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1651-1656.
- [17] 胡鹏, 张建柱, 张飞舟. 高能激光系统内光路热效应建模与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(1): 011008.  
Hu P, Zhang J Z, Zhang F Z. Modeling and analysis of inner thermal effects in high energy laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(1): 011008.
- [18] 刘万生, 袁志军, 王汉斌, 等. 封闭通道浮力对流下阵列光束热晕效应分析[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0114001.  
Liu W S, Yuan Z J, Wang H B, et al. Thermal blooming effect of array beams under buoyancy convection in closed channel[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0114001.
- [19] 王汉斌, 杨依枫, 袁志军, 等. 光纤激光光谱合束及光栅热效应研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121002.  
Wang H B, Yang Y F, Yuan Z J, et al. Research progress on fiber laser spectral beam combining system and grating thermal analysis [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121002.
- [20] 何旭宝, 奚小明, 张汉伟, 等. 基于双色镜的光纤激光光谱合成研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0900004.  
He X B, Xi X M, Zhang H W, et al. Research progress of fiber laser spectral combining based on dichromatic mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0900004.
- [21] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 1-7.  
Tao W Q. Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 1-7.
- [22] Qin X, Xiao X D, Puri I K, et al. Effect of varying composition on temperature reconstructions obtained from refractive index measurements in flames[J]. Combustion and Flame, 2002, 128(1/2): 121-132.
- [23] 苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 33-37.  
Su Y, Wan M. High energy laser system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 33-37.
- [24] 杜祥瑞. 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.  
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.

## Influence of Thermal Coupling Effect on Laser Beam Combining Propagation in Enclosed Space

Gong Yu<sup>\*\*</sup>, Wu Juan<sup>\*\*\*</sup>, Yang Junlan<sup>\*</sup>, Luo Zhongxiang, Li Yuan

*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*

### Abstract

**Objective** When laser propagates in gas medium, the gas absorbs the laser energy and causes the refractive index to change, forming the gas thermal effect and reducing the beam quality. The laser has a high power density in the inner channel of the system, so the attenuation of Gaussian beam transmitted in the inner channel is far greater than that transmitted in the outer atmosphere. In addition, the thermal blooming effect of high-energy laser is not only closely related to the beam shape, but also very complex due to the interaction between the air flow and the absorption of laser energy. We hope to establish a more comprehensive thermal coupling effect model of laser transmission, which will provide strong support for the design and performance evaluation of the high-energy laser system. In this paper, the theory of optical-fluid-thermal coupling effect is introduced, and the simulation model of the thermal coupling effect of combined transmission of the elliptical Gaussian laser beams is established.

**Methods** To solve the thermal effect of laser transmission in gas medium, flow field calculation, optical transmission calculation and optical-thermal coupling calculation are required. The optical transmission satisfies Maxwell equations. When simulating the electromagnetic field propagation of optical structures with long distance in a large size space, ray tracing is performed by solving the ray position and wave vector. Fluid flow and heat transfer follow the three conservation laws of mass, momentum and energy. The energy attenuation of laser transmission can be calculated according to Beer's law, while the refractive index change of gas medium due to temperature and density changes satisfies Gladstone-Dale relationship. The wavefront aberration of the laser propagating in the enclosed space of the system is obtained by solving the above theoretical model with the finite element method, and the beam quality is calculated by comparing the results with those of the ideal Gaussian beam. The established model of laser thermal coupling effect is in good agreement with the experimental law, and can predict the degradation of beam quality caused by the thermal effect of gas medium.

**Results and Discussions** Through numerical simulation, the natural convection phenomenon induced by laser heating in a cuboid enclosed space and the change process of the influence of the flow field on the beam propagation are analyzed, and the influential factors of the thermal effect are studied. After the light comes out, the surface temperature of the optical elements will continue to rise, while the air temperature will not change within a few seconds (Figs. 4 and 5). The optical path difference (OPD) distribution is elliptical Gaussian type at first, with obvious defocusing aberration, and its peak-to-valley (PV) value and beam quality show a trend of first increasing, then decreasing, and then stabilizing (Figs. 7 and 9). With the increase of the absorption coefficient, the OPD PV value caused by the thermal effect of gas increases (Fig. 12), but the absorption of the element surface has a low contribution to the

thermal effect of gas medium (Fig. 13). The gas thermal effect can be suppressed and the beam quality can be improved by certain gas replacement methods (Fig. 15). The flow field distribution of each region in the spectral beam combining system is different, and the path of each sub-beam is different, so the aberration is also different. The number and power of sub-beams, the shape and distribution, the combining method, the transmission distance and the system layout will all affect the thermal aberration difference of the medium in the process of combined beam transmission.

**Conclusions** In this paper, the theory of optical-fluid-thermal coupling effect is introduced, and the thermal coupling effect model of laser beam combining transmission in an enclosed space is established. The absorption of laser energy by the gas medium will affect the laser transmission, resulting in optical axis deflection, beam quality degradation, and changes in the shape of far-field spot. In this study, the influences of medium absorption, optical element absorption and gas replacement on the thermal effect of internal transport gas are analyzed. In the spectral beam combining system, all sub-beams will interfere with each other, the wavefront distribution will be different, and every sub-beam will have a dispersion trend. The model can analyze the thermal effects of different systems according to the actual situation, and the influence of structural parts and electronic devices on the flow field and laser transmission can also be considered, providing an effective reference for the design and performance evaluation of high-energy laser systems.

**Key words** laser optics; laser beam combining; laser beam transmission; thermal effect; beam quality