



·激光的热和力学效应·

高能激光系统内光路热效应建模与仿真^{*}

胡 鹏, 张建柱, 张飞舟

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 高能激光系统内光路热效应是影响系统性能的重要因素, 介绍了内光路中光学元件、介质气体热效应物理模型, 分析了影响热效应的主要因素, 并开展了热效应变化规律研究。针对光学元件, 重点研究了元件吸收率、元件材料特性、光斑分布对反射镜、窗口镜、分光镜热像差的影响规律, 指出吸收率主要影响热像差的大小, 而元件基底材料特性和激光分布影响热像差时间和空间变化。针对介质气体, 指出介质气体升温后重力引起的自然对流是影响气体热像差的主要物理因素, 细致研究了热像差随时间的变化规律, 介绍了降低封闭与开放式内光路介质气体热像差的措施与方法。介绍了激光仿真软件平台 EasyLaser 多物理仿真模块, 搭建了包含反射镜、窗口镜、分光镜和介质气体的内光路计算模型, 通过光-热-力-控多物理耦合仿真, 研究了反射镜与窗口镜、介质气体与窗口镜热像差补偿效应, 给出了激光传输远场光斑特征, 表明了 EasyLaser 的多物理仿真模块具备对内光路热效应综合仿真分析能力。

关键词: 高能激光系统; 光学元件; 介质气体; 热效应; 热像差; EasyLaser

中图分类号: TN012; O436

文献标志码: A doi: [10.11884/HPLPB202234.210296](https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210296)

Modeling and analysis of inner thermal effects in high energy laser system

Hu Peng, Zhang Jianzhu, Zhang Feizhou

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: This paper discusses the thermal effects of optical components and media gas in inner propagation of high energy laser system, which is very important for the performance. The thermal aberration models of optical components and media gas, the influencing factors, and the changing laws are introduced. For optical components, some physical factors are emphatically analyzed, including absorptivity, characters of the materials, and laser spot distributions. The results show that the level of thermal aberrations depends on the absorptivity, and spatio-temporal characters depends on the material and the distribution of laser spot. For media gas, the variation of thermal aberrations depend on switch of physical mechanism, heat conduction and heat convection for temperature increment, and the law of time dependent thermal aberrations are studied carefully. Methods and measures of reducing thermal effect are introduced for closed and opened system. The multi-physical module of a software named EasyLaser is introduced and is used to simulate the thermal effects of a laser inner propagation, including reflective mirrors, a optical window, a spectroscopy, and media gas. The results show that the aberrations between reflective mirrors and the optical window, and between gas and the optical windows could be complementary. The characters of laser spot in far-field are also simulated. All the results demonstrate that EasyLaser can be used to simulate and analyse the thermal effects in high power laser system.

Key words: high energy laser system; optical components; media gas; thermal effect; thermal aberration; EasyLaser

高能激光系统从激光器出口到发射系统出口这段光路称为系统内光路, 高能激光系统内光路热效应主要指内光路中的光学元件、介质以及元件镜架等在激光辐照下升温, 造成元件热变形和激光传输通道上气体流场密度不均匀, 引起激光波面畸变, 影响传输, 降低远场光斑集中度。随着激光系统向高能量、高功率发展, 光路越来越复

* 收稿日期: 2021-07-19; 修订日期: 2021-12-24
联系方式: 胡 鹏, hu_peng@iapcm.ac.cn。
通信作者: 张飞舟, zhangfeizhou@163.com。

杂, 光学元件承受的激光功率密度越来越高, 而对激光传输性能指标也在提高, 因此对内光路热效应控制的要求越来越高。虽然光学元件基底材料制备、镀膜技术、内光路环境控制等方面有了大幅改善, 光学元件基底和表面吸收和光路上介质气体吸收越来越小, 大幅降低了内光路热效应的影响, 但在激光长时间辐照下, 光学元件升温、变形和介质气体升温、流动, 依然是影响系统性能的主要原因之一, 是高能激光系统总体设计^[1]、固体激光^[2-3]、合束系统^[4-6]、激光发射系统^[7]必须考虑的重要因素。

光学元件种类多, 近年来国内外对各种类型元件开展了丰富的研究。Joseph 等^[8]研究了凹透镜、凸透镜热效应对光束评价因子 M^2 的影响, 孙峰等^[9]研究了窗口镜热效应对光束质量的影响, 饶鹏、刘文广^[10-11]研究了不同数量反射镜镜面的热变形对输出光束质量的影响, 计算了光束经过不同数量的反射镜反射后的波前分布, Sun^[12] 等研究了主次镜在激光辐照下升温、热变形以及热相差 Zernike 系数变化。介质热效应是内光路热效应中另一个主要因素。内光路介质热效应与激光大气传输热晕机理相同, 但大气传输时一般没有考虑重力, 而是考虑风速影响, 在等压近似下采用物质方程双向交替追赶方法求解大气密度和温度变化。由于内光路介质气体热效应必须考虑气体受热引起的浮力对流对流场分布的影响, 因此采用耦合求解流体力学与激光传输方程, 研究内光路流场密度或温度分布, 进而得到光程热像差, 分析对激光传输的影响^[13-14]。由于内光路气体升温后形成自然对流, 导致介质气体热像差成分复杂, 对激光传输影响更复杂, 对自适应光学校正带来困难。本文介绍了高能激光系统内光路中光学元件、介质热效应物理模型, 总结对元件、介质气体热效应影响的主要因素和变化规律, 介绍了元件、介质热效应多物理仿真平台 EasyLaser 仿真功能和在内光路热效应中的应用, 为高能激光系统元件设计、环境控制提供参考。

1 光学元件

高能激光系统内光路的光学元件, 根据激光传输方向可分为反射元件和透射元件, 如反射镜、变形镜、快反镜为反射元件, 窗口镜、凹/凸透镜为透射元件。反射元件主要是前表面吸收激光能量, 而透射元件除了前、后表面吸收激光能量外, 基底材料吸收透射激光能量也是引起窗口镜热效应的主要因素。对于激光传输, 反射元件热效应是由前表面热变形引起, 热像差是负像差; 对于透射元件热效应是由元件前、后表面变形和基体材料吸收激光能量升温引起的热光效应、弹光效应, 一般情况, 弹光效应可忽略, 而不同基底材料热致折射率变化系数正、负不同, 因此引起的热像差正负也不同^[9]。对于分光镜, 激光在前表面反射、后表面透射, 因此分光镜热效应的反射、透射热像差不同。变形镜是一类重要的光学元件, 虽然其也是反射元件, 但由于变形镜较薄, 变形镜热形变分布与极头位置存在对应关系, 作为相位校正元件, 在对畸变波前进行校正时又引入自身的高阶热像差, 最终还是影响高能激光系统的输出光束质量^[15]。

激光辐照下光学元件热像差, 可通过求解光学元件的热传导方程和热应力方程, 得到元件温度分布和镜面变形, 进而得到元件反射像差和透射像差。通常元件温升较小, 材料物性可看作不变, 并忽略热辐射的影响, 则光学元件温度分布随时间变化的热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \kappa \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + q(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中: ρ , c , κ 分别为材料密度、比热容与热导率; $q(x, y, z, t)$ 表示单位体积吸收的激光能量, 对透射元件

$$q(x, y, z, t) = \beta(x, y, z) I(x, y, t) \quad (2)$$

式中: $\beta(x, y, z)$ 为元件体吸收率; $I(x, y, t)$ 为激光强度分布。

元件表面吸收的激光能量作为热边界条件, 即

$$\kappa \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0}^{z=L} = \eta(x, y) I(x, y, t) \quad (3)$$

假设元件初始温度分布均匀, 则

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0 \quad (4)$$

式中: $\eta(x, y)$ 为元件表面吸收率; T_0 元件初始温度分布; L 是元件厚度。

将热传导方程与热弹性方程式(5)联合求解^[16], 即可得到元件变形。

$$\begin{cases} \nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \\ \nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r(1-2\nu)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} - \frac{2(1+\nu)}{r(1-2\nu)} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \\ \nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

反射元件的热像差 $\Delta\phi_1$ 正比于元件表面变形,且与入射角度有关,即

$$\Delta\phi_1(x, y) = k \frac{2u_z(x, y, 0)}{\cos\theta} \quad (6)$$

透射热相差由前后表面变形以及由折射率变化引起的透射相差引起,忽略弹光效应^[9,17],透射元件热像差 $\Delta\phi_2$ 表达式为

$$\Delta\phi_2(x, y) = k \left[(n_0 - 1) \left(\frac{u_z(x, y, 0)}{\cos\theta} + \frac{u_z(x, y, L)}{\cos\theta} \right) + \int_0^L \frac{dn}{dT} T(x, y, z) dz \right] \quad (7)$$

式中: k 为波数; u_z 为元件表面热变形; θ 为激光入射角度; n_0 为元件折射率; dn/dT 为元件热光系数。

影响元件热效应的因素很多,即使光学元件不同夹持条件也会造成热像差不同,文献[18-19]研究了不同夹持方式下元件热形变分布,比较了不同夹持方式下热像差的大小。从元件热效应的控制方程可以看到,影响元件热像差的最主要因素有3个:(1)元件吸收率,包括表面吸收和体吸收;(2)材料特性,其中材料导热系数和热膨胀系数最重要;(3)光斑分布。下面分别对这3种因素开展详细分析。

1.1 元件吸收率的影响

吸收率是影响元件热效应最重要的因素,文献[20-21]研究表明,在一定条件下,光学元件温升、热变形与吸收率之间存在线性关系。图1给出了相同条件下,硅反射镜热像差在不同吸收率时的仿真结果:吸收率越大,热像差越大;热像差先快速、后缓慢增大。因此,若元件表面辐照激光功率越高,要求反射元件表面吸收率越低。

对于反射元件,基底材料也会吸收少量激光能量。元件体吸收和表面吸收分别与热传导方程(1)中的热源项与热边界条件(2)对应。一般来说,对于简单膜系结构,将吸收的激光能量等效为元件表面吸收;对于复杂膜系,则可采用驻波场方法,计算膜系各层吸收的激光能量^[15-18]。若要考虑基底材料的吸收,则可采用公式近似计算元件基底材料体内吸收^[19],当材料的吸收长度很大,体吸收可简化为常数。膜系吸收模型与面热边界模型对计算结果有一定的影响,但在工程应用中,由于环境导致元件表面不洁净、长时间存放引起材料性能退化等因素,膜系吸收的计算结果与实际吸收也有较大差别,难以准确给出表面吸收率。一般在使用前通过测量元件温升和镜面热变形,反推出元件吸收率,再结合系统光路判断元件热效应对系统性能的影响。

1.2 基底材料特性的影响

基底材料物理特性主要影响元件热像差时间和空间分布。硅、石英和白宝石是光学元件中常用基底材料,硅一般用作反射元件基底材料,石英、白宝石材料通常作为透射元件基底材料,它们的物理性质如表1所示^[22-23]。

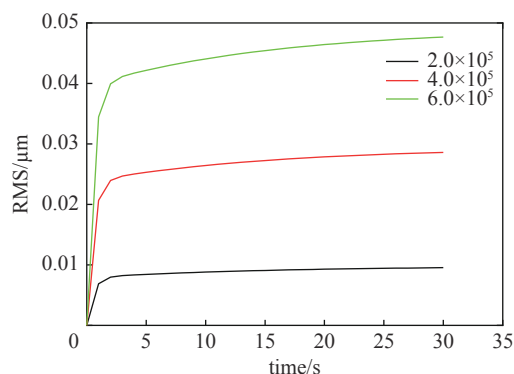


Fig. 1 Thermal aberrations of Si reflector of different absorptivity

图1 硅镜表面吸收率对热像差的影响

表1 元件材料物理参数

Table 1 Physical values of the glasses

material	density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	heat capacity/ ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)	thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Young's modulus/GPa	Poisson ratio	thermal expansion/ K^{-1}	thermal optic coefficient/ K^{-1}
Si	2329	695	153	190	0.26	4.68×10^{-6}	-
Al_2O_3	3980	761.5	24	379	0.27	7.8×10^{-6}	1.15×10^{-5}
SiO_2	2200	753	1.4	73	0.17	0.42×10^{-6}	1.10×10^{-5}

材料的传热能力与热形变能力上的差别是关键。白宝石材料导热系数虽然大于石英材料,但白宝石热膨胀系数大于石英,这使得白宝石材料与石英材料反射和透射热像差的大小关系随时间变化而不同。以这两种材料为基底的分光镜为例,假设其他条件相同,仿真结果如图2所示:白宝石分光镜的反射热像差先快速增大,然后增大速率减小;而石英分光镜增大速率近似线性。在某个时间之前,石英分光镜反射热像差比白宝石小,而后其反射热像差大于白宝石分光镜。两种分光镜透射热像差大小相近,均随时间近似线性增加,透射像差的平衡时间均较长。石英、白宝石窗口镜的透射热像差随时间变化特性与分光镜透射热像变化规律相同。

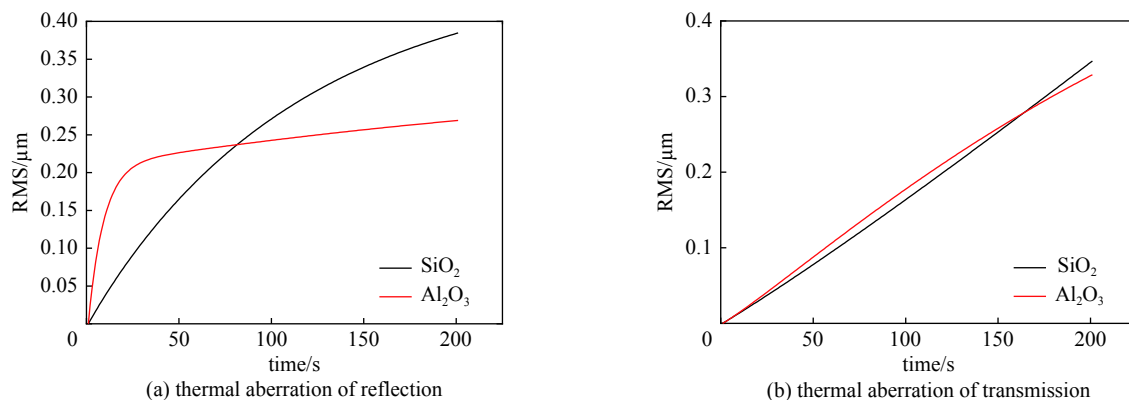


Fig. 2 Thermal aberrations of reflection and transmission for SiO₂ and Al₂O₃

图2 石英和白宝石分光镜反射和透射热像差

反射镜热像差先快速、后缓慢增大的转变时间点主要由基底材料导热系数 $\gamma = \sqrt{\kappa/\rho C}$ 决定,3种材料热扩散长度 $L = 2\sqrt{\gamma t}$ 随时间变化如图3所示。结果表明,在相同条件下,材料导热系数越大,转变时间越短。硅材料导热系数远大于其他两种材料,其转变时间最小。例如,在半径为5 cm的均匀光斑辐照下,硅材料转变时间约5 s,白宝石材料转变时间约30 s,而石英转变时间在200 s以上。因此,硅是良好的反射元件基底材料,而石英镜反射热像差随时间近似线性增大,作为反射镜不利于长时间使用。但是,对某些波长激光硅材料吸收较大,也不宜用作反射镜基底材料,需要考虑其他的基底材料。

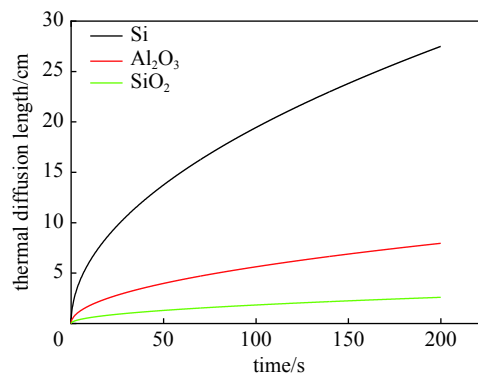


Fig. 3 Thermal diffusion of different materials vs time

图3 不同热扩散长度随时间变化

除了元件基底材料物理特性影响元件热像差,元件大小也影响着影响元件热像差的大小。文献[24]计算了白宝石高反镜在不同直径及厚度尺寸情况下的热变形,结果表明,选择合适直径和厚度可以降低镜面温升,从而减小镜面热变形。口径和厚度增加会增大全系统体积、重量,以及经济成本,因此在系统设计时要综合考虑。

1.3 光斑分布的影响

辐照在光学元件上的激光光斑通常不均匀,由于石英、白宝石材料导热系数小,热像差与光斑分布近似,因此光斑不均匀性使得热像差空间分布增加高频分量^[23],导致热像差 RMS 大幅增大,图4和图5给出了均匀和非均匀光斑对热像差空间和时间分布的影响。

硅材料导热系数大,在达到平衡时间前,激光光斑不均匀性对元件热像差有明显影响,短时间应用必须考虑^[11,25]。当激光长时间辐照,非均匀光斑也会引起热像差空间的高频成分,但热像差 RMS 增大幅度比石英要小得多。

2 介质气体

内光路介质热效应,其物理问题可以表述为:激光传输光路上介质气体吸收激光能量,改变内光路流场密度和温度分布,造成附加热像差。内光路介质气体热效应物理上与激光大气传输热晕效应相同,但激光大气传输分析热晕问题,没有考虑重力引起自然对流^[26],当大气风速较低时,无法准确给出气体温度变化引起流场分布,导致计算结果不准确。在内光路中,介质气体升温后自然对流是介质热像差变化非常重要的机制,由于光斑口径较小,激

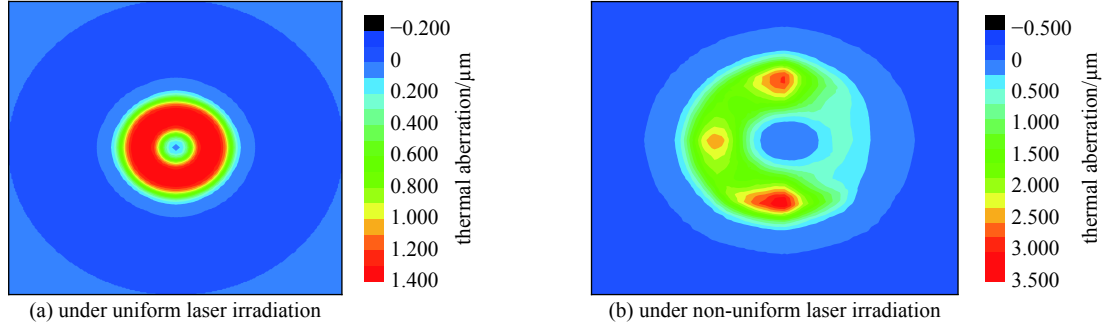

 Fig. 4 Distribution of thermal aberration of SiO₂ under uniform and non-uniform laser irradiation

图 4 石英镜在激光辐照下透射热像差分布

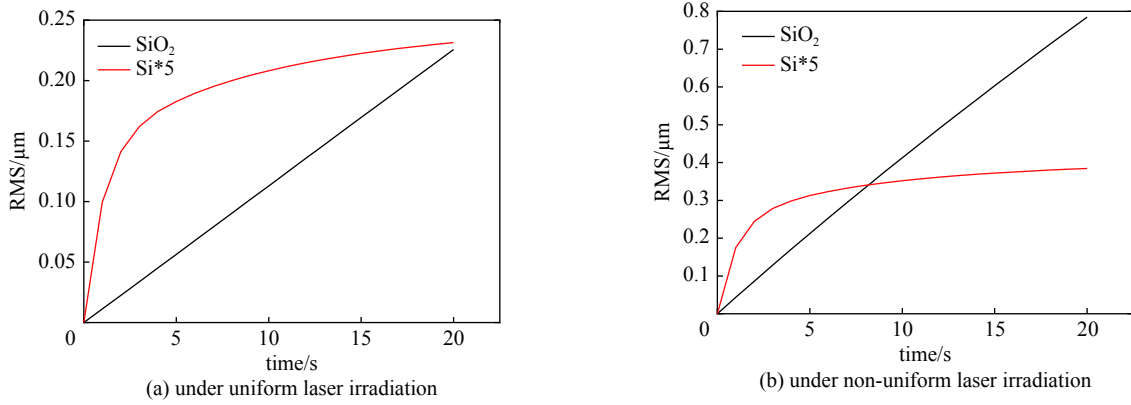


Fig. 5 RMS of thermal aberration under uniform and non-uniform laser spot irradiation as a function of time

图 5 石英镜在激光辐照下透射热相差 RMS 随时间变化

光功率较高, 介质气体吸收激光能量后快速升温引起自然对流, 因此一般采用考虑重力效应影响的流体力学方程组, 求得介质密度或温度分布, 进而得到热像差分布。通常采用流体力学和激光传输方程联合求解, 激光辐照视为光斑区的热源, 并考虑重力引起的自然对流^[27], 求解的流体方程组为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho v) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{F} \quad (9)$$

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v T) = \nabla \cdot \left(\frac{\kappa}{\rho c} \nabla T \right) + Q \quad (10)$$

式中: t 为时间; p 是气体压力; \mathbf{v} 是速度矢量; ρ 为密度; T 为介质气体温度; κ 为热导率; \mathbf{F} 为重力; Q 为热源, 本文为气体吸收的激光能量 αI , α 为介质气体吸收率, I 为通道中激光强度分布。得到介质气体温度分布后, 通过对激光传输光程积分, 即可得到介质气体热像差分布。

$$\Delta \phi = -\frac{2\pi}{\lambda} \int \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T dz \quad (11)$$

因此, 问题的关键是求出内通道中介质气体的密度或温度分布。影响介质气体流场分布的主要因素有: (1) 介质气体吸收率; (2) 介质气体热致折射率的变化系数; (3) 管道构型。本文通过水平封闭管道激光传输介质热效应模型^[27], 研究不同因素对介质热效应的影响物理规律。介质热效应水平管道模型如图 6 所示, 仿真中激光传输长度取为 10 m, 以 N₂ 作为介质气体, N₂ 物理性质如表 2 所示。

2.1 介质气体吸收率的影响

介质气体吸收激光能量升温, 有热传导和自然对流传热两种机制。传热机制由热传导为主向自然对流传热为

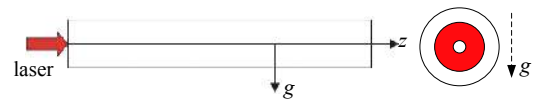


Fig. 6 Sketch of a horizontal closed tube

图 6 介质热效应水平管道模型

表 2 N₂ 的物理性质
Table 2 Physical values of the N₂

density/(kg·m ⁻³)	specific heat capacity/(J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹)	thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	dynamic viscosity/(μPa·s)	refractive index
1.2506	1043	0.026	17.9	1.0002793

主的转换,是影响介质气体热效应变化的主要因素。式(11)表明,流场温度分布与热像差变化一一对应,图7(a)中热像差出现第一个峰后(A₁, A₂, A₃)快速下降,正是传热机制转换引起的:激光辐照初始,气体吸收激光能量,温度不高,介质流场自然对流速度很小,自然对流速度小,介质气体以热传导为主,光斑区内流场分布与光斑相似,如图8(a)~图8(c)所示;随着温度增加,自然对流速度增大,介质气体以自然对流传热为主,光斑区流场温度上高下低,如图8(e)~图8(g)所示。由于光斑区上半部分气体温度大于下半部分,因此远场光斑质心向下漂移。

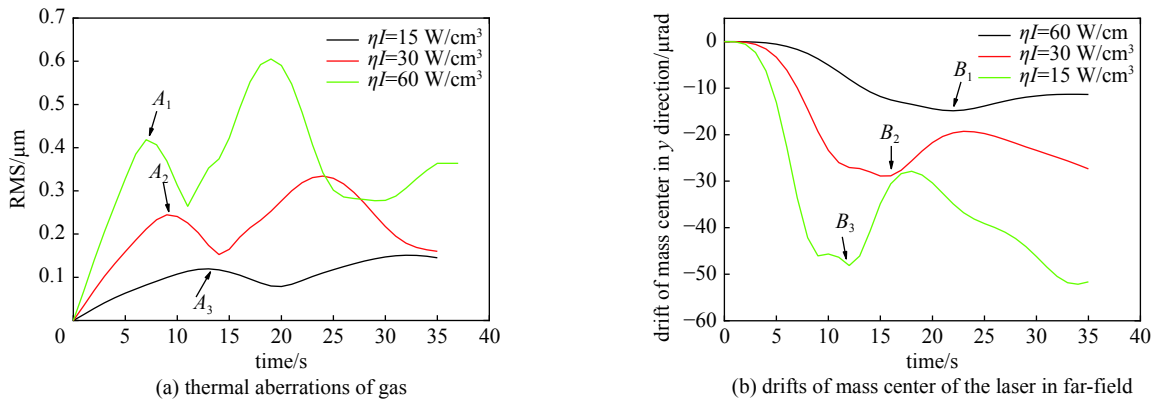


Fig. 7 Thermal aberrations in a closed horizontal tube

图 7 封闭水平管道介质气体热效应

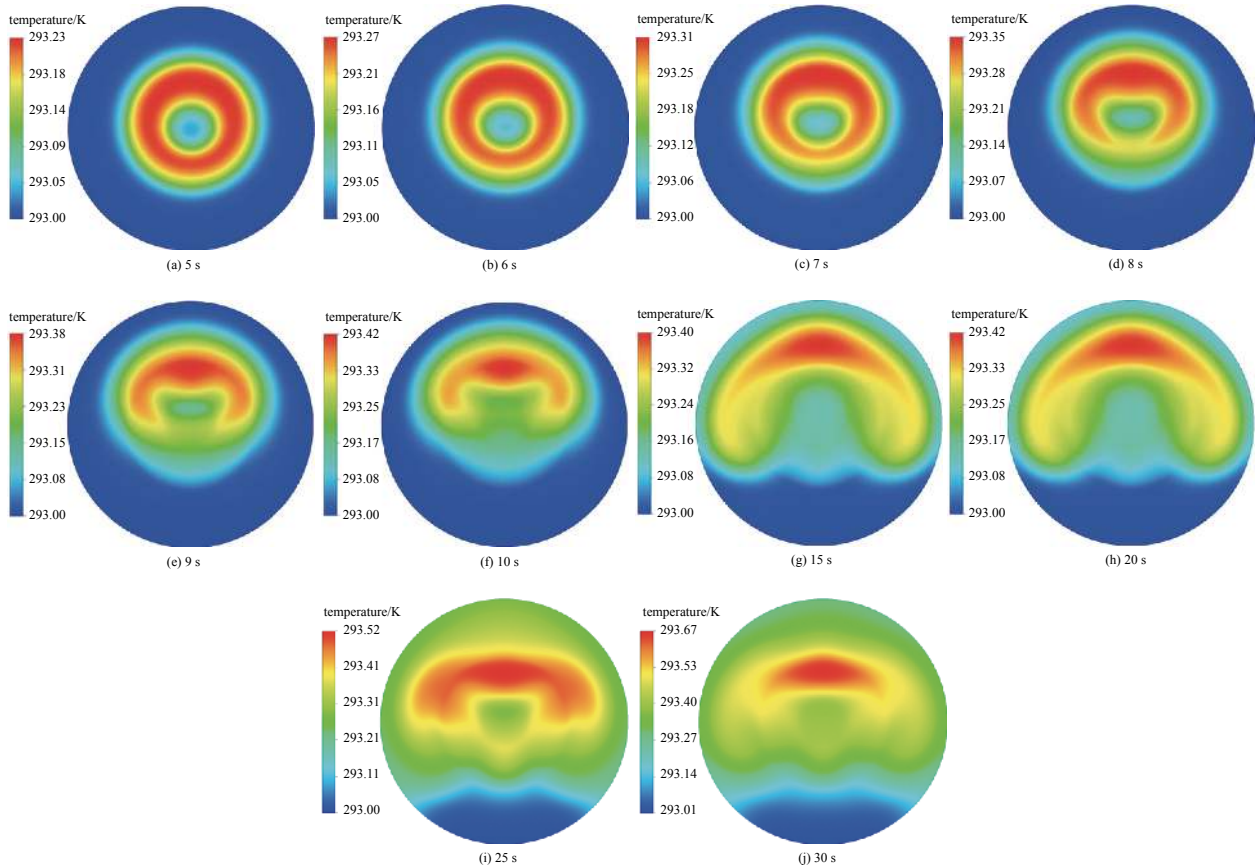


Fig. 8 Temperature distribution of media gas at different time

图 8 不同时刻管道内介质气体温度分布

介质传热机制的转捩时间主要与激光功率、气体吸收率、光斑口径有关,在相同条件下,传热机制转捩时刻随着气体吸收率增大而提前,且转捩时刻的热像差随吸收率增大而增大。光斑区上部介质温度高于下半部,导致激光传输到远场的光斑质心向下漂移,如图7(b)所示。质心漂移和转捩时刻随介质气体吸收率增大而增大,转捩时间在传热机制转为自然对流后,光斑区上下温度差还会维持一段时间,如图8(e)~图8(g)所示,因此在质心漂移转捩时刻比热像差RMS要长,如图7(b)中 B_1, B_2, B_3 所示。由于在出光过程中,光斑区内介质始终吸收激光能量,随着温度升高介质气体上升速度也增大,受热气体向上流动出光斑区后,与周围气体传热导致温度降低,因此速度也降低;在后续上升的高温气流推动下,并且由于管道壁约束,温度降低后的气体沿着管道两侧向下流动;而光斑区内的气体升温向上流动后,光斑区内气体密度减小,使得两侧气体又向光斑区扩散。如此不断反复,流场上下混合,光束质量和质心漂移随之上下振荡。

2.2 介质气体热致折射率变化系数的影响

$$\frac{\partial n}{\partial T} = -\frac{n-1}{\varepsilon T} \quad (12)$$

从公式可以看,减小介质气体热致折射率变化系数,可以直接降低气体热像差。从图9可以看出,热致折射率变化系数随压强减小而减小^[27]。

由于维持低压需要一定的封装设备,增加了工程难度。若内光路压力太低,内外压差会引起系统结构变形带来其他的问题,还会影响其他光电设备的正常运行,在系统设计时需统筹考虑。

2.3 传输通道管道构型的影响

管道构型包括管道长度、口径,热像差与管道长度成正比,而管道口径的影响则比较复杂,因为介质气体吸收激光能量升温后会碰到管道内壁,在内壁的约束下气体向下又流回光斑区,如图8(g)~图8(j)所示,在光斑区受热后又向上运动,如此不断重复,影响流场温度变化,导致介质气体热像差和远场光斑质心漂移也随之振荡。将光斑与管道口径比 ε 作为参数,其他条件相同时, ε 变化对介质气体热像差的影响如图10所示:在热传导为主时,管道口径增大不影响热像差;在浮力对流传热后,在介质气体碰壁前,热像差在减小,在介质气体碰壁后,热像差又增大,如此反复。

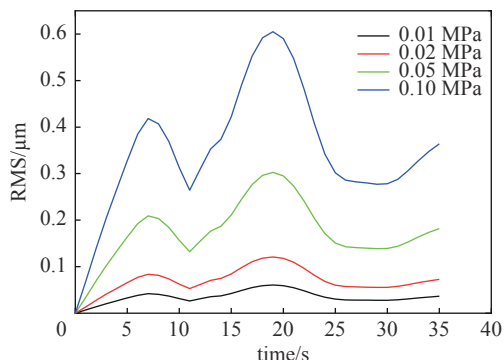


Fig. 9 Thermal aberrations of media gas under different pressure

图9 不同压强时的介质气体热像差

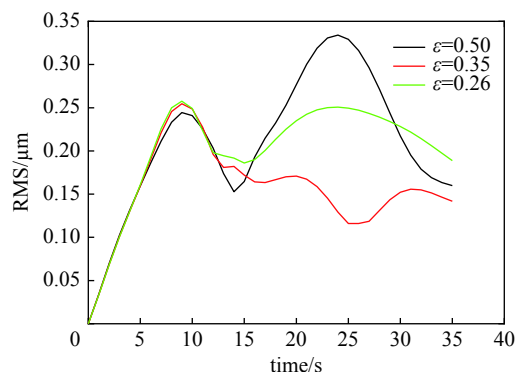


Fig. 10 Thermal aberrations of gas of different ε

图10 光斑与管道口径比对介质气体热像差的影响

介质气体中的水汽、 CO_2 、气溶胶等是吸收激光能量的主要因素,为了控制内光路介质气体热效应,通常采用抽真空置换干燥、纯净的低吸收气体的方法,减小水汽、 CO_2 、气溶胶等的含量。对于合成光束的激光系统,应当选择气体吸收低的子束合成以降低介质气体热效应。介质除了吸收激光能量造成热像差外,光学元件升温后与介质气体也有热量传递,也会增大介质热像差^[28]。

对于没有采用密封结构的内光路,一般采用吹气的方法降低介质气体热像差^[29-30]。研究表明,吹风可以降低气体热效应的影响,但也会带来波面畸变的高频成分,对不同管道构型,吹气速度要求不同。由于内光路结构没有封闭,为了保持传输通道内单一均匀的低吸收系数气体,需要在管道开口处采取措施隔绝内外气体交换,比如气帘技术^[31]。对于复杂光路,为了将热气吹走并保持流场均匀性,需要在内光路中多个地方吹气,增大了系统复杂度。总之,减小介质气体热效应,采用封闭结构降低介质气体吸收与压强,或开放结构吹气,这两种方法各有利弊。

3 Easylaser 多物理仿真模块及其应用

对高能激光系统内光路中热效应开展全光路分析,必须考虑各光学元件、介质气体综合效应,但它们的热像差在空间、时间上区别较大,例如:反射镜和介质气体带来负热像差,窗口镜为正热像差,两类像差可以部分抵消^[32];分光镜反射光热像差为负,而透射光热像差为正,且大小不同,当探测热像差的信标光经过分光镜透射进入自适应光学系统,探测到热像差的空间和时间分布与待校正的激光不相同。另外,当激光在内光路传输较长距离,辐照在元件和介质上的光斑分布会发生变化,并且光源发射的激光分布也随时间变化,因此仿真时不可将激光光斑看作随时间、空间不变。热像差还与激光强度分布、光路布局、材料特性等多个因素有关,在仿真模拟时必须建立光-热-力-流耦合模型,开展多物理仿真计算,才可准确得到热像差的分布。Easy laser 是一款基于组件化建模仿真思想研发的激光系统仿真软件,它具备对光束的光学元件间传输、大气传输、电视成像、自适应光学校正、识别提取跟踪等复杂过程的建模与仿真能力^[33],近年来,又增添了多物理仿真模块,可对激光系统内光路光学元件、介质气体开展耦合仿真,下面介绍该模块主要功能,并通过算例给出主要模拟结果。

3.1 多物理仿真模块

多物理仿真模块具备元件热传导、热变形和介质气体自然对流与激光传输耦合计算功能,充分考虑多种因素,能更好地模拟实验条件,如元件几何大小、材料特性、吸收率、激光光斑随时间/空间变化等。在激光光源传输功能模块中,可以设置均匀、环状、高斯/超高斯等多种激光光源,可以设置波长、功率、初始相位,具备远场传输计算与分析功能,组件界面如图 11 所示。

在反射镜、窗口镜和分光镜组件中,可以根据光路布局设置位置和方位角度,以及元件几何大小、材料属性,还可以文件形式,读入实验测量的像差,包括随时间变化的热变形分布、Zernike 系数。在光谱特性标签中,设置元件吸收特性。反射镜和通道介质组件如图 12 所示,窗口镜和分光镜与其相似。通道介质组件可设置介质气体种类、吸收率、管道半径等,如图 13 所示。每个组件均可设置多个光束通道,可同时模拟主激光与信标光传输。

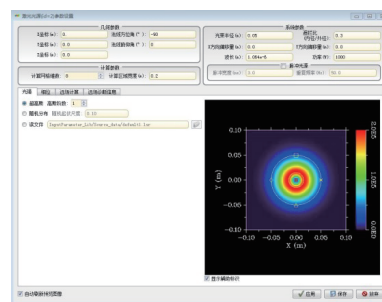


Fig. 11 Component interface of laser source

图 11 光源组件界面

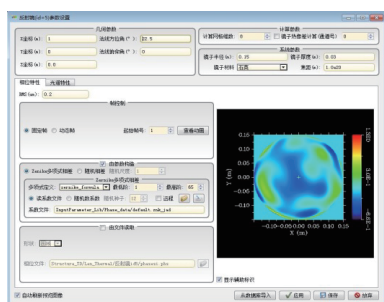


Fig. 12 Component interface of reflector

图 12 反射镜组件界面

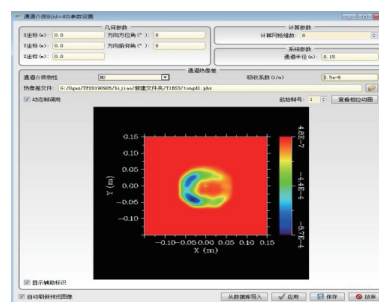


Fig. 13 Component interface of media gas

图 13 通道介质组件界面

热效应模拟结果可通过光束波面诊断和远场诊断组件计算得到。光束波面诊断组件中可设置统计区域,给出波面 PV, RMS 和各阶 Zernike 系数随时间的变化;光束远场诊断组件可设置远场探测口径、传输距离、不同环围能量百分比等参数,给出光束远场峰值功率、不同环围能量百分比的半径和平均功率、光斑质心漂移等,组件界面如图 14 所示。

3.2 内光路热效应综合分析

基于 Easy laser 的多物理仿真模块,搭建包含了反射镜、分光镜、窗口镜和介质气体,以及波面分析和远场分析工具的光路,如图 15 所示。在激光光源组件中设置光斑半径为 5 cm,平均功率为 1000 W/cm²,激光强度为高斯分布;设置光学元件材料均为石英材料,反射镜、分光镜表面吸收率为 1.0×10⁻⁴,窗口镜总吸收为 5.0×10⁻⁴;内光路激光传输长度 7 m,介质吸收系数为 3×10⁻⁵ m⁻¹。

首先分析光路热像差的变化。当只考虑窗口镜时,因为其吸收率较大,导致透射热像差 RMS 较大,且随时间



Fig. 14 Component of analysis for wavefront and laser in far-field

图 14 光束波面和光束远场诊断组件

近线性增加;由于透射热像差与反射镜、分光镜反射像差相反,彼此间可以部分抵消;在高斯光束辐照下,元件热像差成分主要均为离焦,使得全部元件热像差的RMS也是线性变化,如图16(a)所示。窗口镜透射热像差和介质气体热像差也相反,彼此间也可部分抵消;在10s之前,介质气体以热传导机制为主,热像差成分主要是离焦,因此与窗口镜的综合热像差较小;10s后,介质气体以自热对流机制为主,热像差的离焦项减小,且有了更多的高阶量,使得窗口镜与介质气体综合热像差增大,如图16(b)所示。光路综合热像差随时间变化随着全部光学元件、介质气体热像差的此消彼长而变化,如图16(c)所示。

基于远场诊断组件,可给出光路热像差对激光传输的影响分析。在10s之前,热像差主要为离焦,因此远场光斑扩展后仍然呈对称分布;10s之后,由于介质气体热像差的高频成分发展起来,使得远场光斑弥散,并出现了次极大光强,如图17所示。

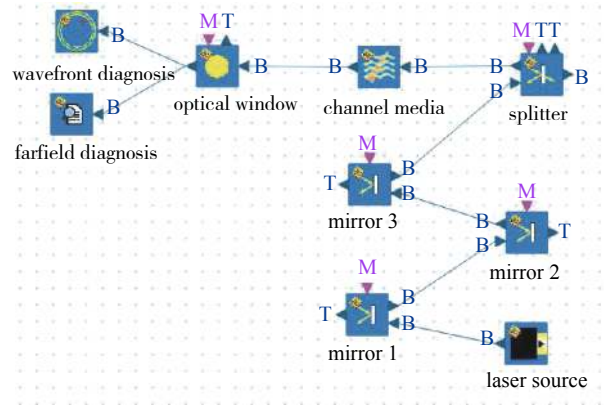


Fig. 15 Sketch of inner thermal effect simulation in Easylaser

图 15 内光路热效应分析光路图

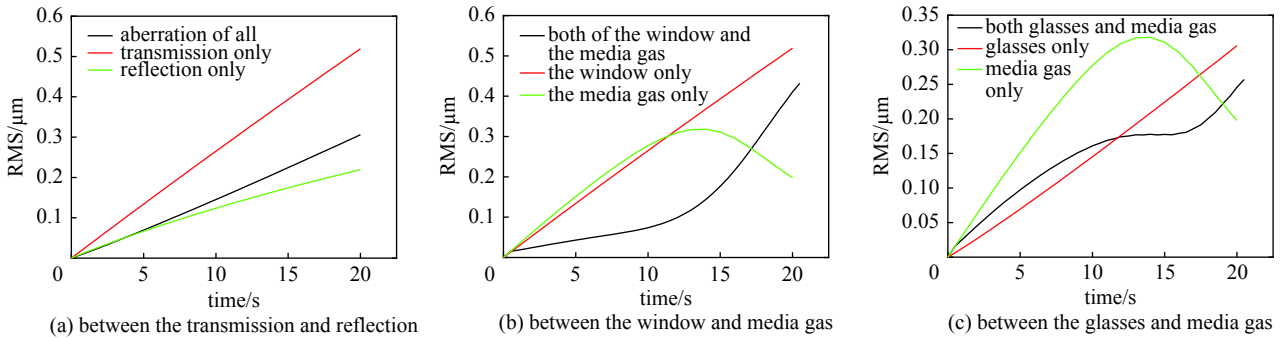


Fig. 16 Complementary effect of thermal aberration between optical components and media gas

图 16 窗口镜与反射镜、介质气体热像差的互补补偿效应

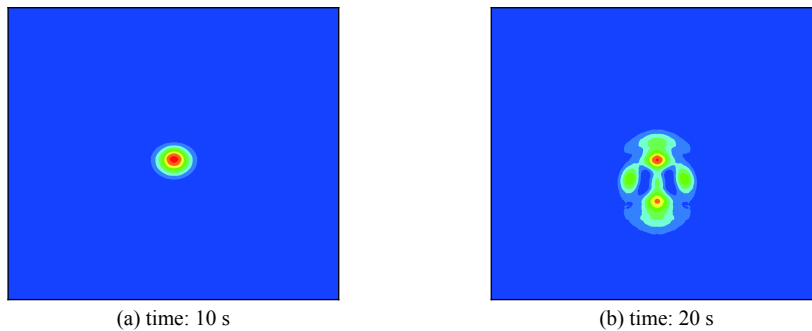


Fig. 17 Laser distribution in far-field

图 17 远场光斑分布

以63.2% 包围能量半径来评价光束质量,其随时间变化曲线与热像差一致,如图18(a)所示,远场光斑峰值随光束质量退化下降很快,如图18(b)所示;由于光学元件上热像差分布对称,因此远场光斑质心漂移主要由介质气

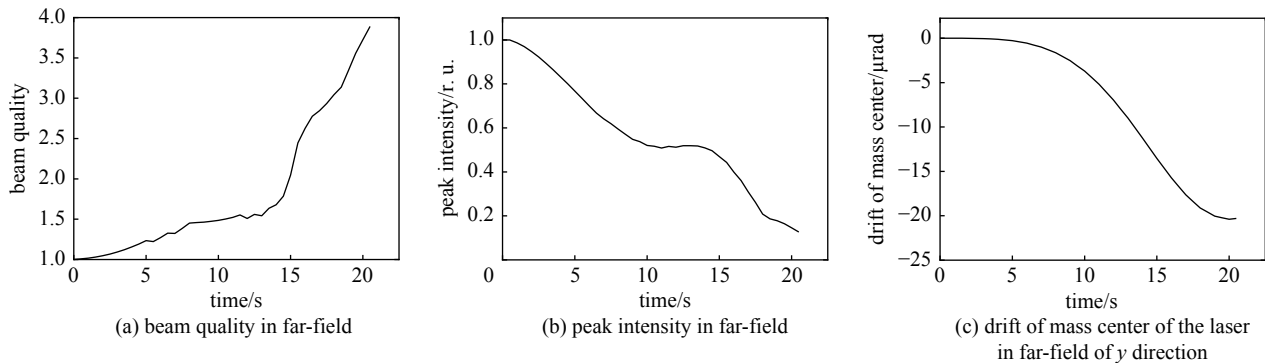


Fig. 18 Characters of laser propagation in far-field

图 18 激光远场传输特征分析

体引起,使得光斑质心向下漂移。热效应导致远场光斑峰值功率密度下降,峰值光强归一化如图 18(c)所示。

4 结论

本文总结了高能激光系统内光路中元件、介质气体热效应的物理建模和分析方法,对各影响因素进行了仿真和分析,并介绍了 EasyLaser 多物理模块及其在内光路热效应中的应用。

光学元件热像差随着吸收率的增大而增大,因此减小它们对激光的面吸收、体吸收是降低元件热效应最重要的手段。元件热像差的时间和空间分布受到元件基底材料几何和物理特性影响最大,硅材料的平衡时间很快,而石英和白宝石材料平衡时间很短,因此石英和白宝石材料热像差受光斑不均匀性的影响比硅材料大。对于分光镜,反射像差和透射像差随时间变化差别较大,通过分光镜探测热像差并用自适应光学系统校正时会影响校正效果。

针对介质气体热效应开展了细致物理分析,辨别了介质气体受热后的自然对流是影响介质气体温度分布最重要的因素,这导致了介质气体热像差随激光辐照时间先增大、再减小、然后震荡的变化趋势。随着介质气体吸收率增大,热像差 RMS 增大且转捩时间提前,后面的震荡变化与光斑口径与管道口径之比有关。对于介质气体热效应,封闭的结构可以通过缩短光程、降低压强减小热致折射率变化系数等手段减小介质热像差,开放的结构一般通过吹气方式降低介质气体热效应。

最后介绍了 EasyLaser 多物理仿真模块,基于该模块给出了包含反射镜、窗口镜、分光镜热效应仿真结果,研究表明,仿真平台具备内光路热效应和激光传输影响的模拟分析能力。应用该平台可开展高能激光系统光学元件材料选择、吸收率和环境控制指标要求、系统能力评估等工作,可对高能激光系统总体设计和性能评估优化等提供支持作用。

参考文献:

- [1] 苏毅. 高能激光系统中的物理问题[J]. 物理, 2005, 34(8): 583-588. (Su Yi. Physics problems in high energy laser system[J]. Physics, 2005, 34(8): 583-588)
- [2] Huang Tingrui, Huang Wenfa, Wang Jiangfeng, et al. Thermal-induced wavefront aberration in sapphire-cooled Nd: glass slab[J]. Applied Physics B, 2016, 122: 182.
- [3] Sikocinski P, Novak O, Smrz M, et al. Time-resolved measurement of thermally induced aberrations in a cryogenically cooled Yb: YAG slab with a wavefront sensor[J]. Applied Physics B, 2016, 122: 73.
- [4] 孙毅, 高云国, 邵帅. 高功率激光热效应对合束系统的影响[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3097-3105. (Sun Yi, Gao Yunguo, Shao Shuai. Influence of high power laser thermal effect on beam combination system[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(11): 3097-3105)
- [5] Li Linxin, Jin Yunxia, Kong Fanyu, et al. Beam modulation due to thermal deformation of grating in a spectral beam combining system[J]. Applied Optics, 2017, 56(19): 5511-5519.
- [6] 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: 121002. (Wang Hanbin, Yang Yifeng, Yuan Zhijun, et al. Research progress on fiber laser spectral beam combining system and grating thermal analysis[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 121002)
- [7] 金钢, 刘顺发, 李树民, 等. 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响[J]. 中国激光, 2002, 29(10): 895-899. (Jin Gang, Liu Shunfa, Li Shumin, et al. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(10): 895-899)
- [8] Peñano J, Sprangle P, Ting A, et al. Optical quality of high-power laser beams in lenses[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(3): 503-510.
- [9] 孙峰, 程祖海, 张耀宁, 等. 在波长 1.315 μm 下的几种激光器窗口热效应比较研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 412-416. (Sun Feng, Cheng Zuhai, Zhang Yaoning, et al. Thermal distortions in calcium fluoride, potassium chloride and fused silica windows at 1.315 μm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(4): 412-416)

- [10] 饶鹏, 刘文广, 华卫红. 反射镜热畸变对高能激光系统输出光束质量的影响[J]. *光学与光电技术*, 2009, 7(3): 12-15. (Rao Peng, Liu Wenguang, Hua Weihong. Thermal distortion influence of reflector on output beam quality of HEL system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(3): 12-15)
- [11] 刘文广, 饶鹏, 华卫红. 非均匀激光辐照下硅镜热变形对光束传输特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(10): 1615-1619. (Liu Wenguang, Rao Peng, Hua Weihong. Effects of thermal distortion of Si mirror irradiated by non-uniformity laser intensity on laser propagation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(10): 1615-1619)
- [12] Sun Yi, Li Fu, Yang Wenqiang, et al. Thermal effects of optical antenna under the irradiation of laser[C]//Proceedings of SPIE 10463, AOPC 2017: Space Optics and Earth Imaging and Space Navigation. 2017: 104631F.
- [13] 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. (Liu Jian, Jin Gang, Wang Shiqing, 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)
- [14] 孙运强, 习锋杰, 许晓军, 等. 内通道流场与光场能量耦合的数值模拟[J]. *中国激光*, 2011, 38: 0202013. (Sun Yunqiang, Xi Fengjie, Xu Xiaojun, et al. Model for the optical field and fluent field coupling effects[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38: 0202013)
- [15] 胡小川, 彭家琪, 张彬. 变形镜热形变及其对光束质量的影响分析[J]. *中国激光*, 2015, 42: 0102003. (Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, Zhang Bin. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42: 0102003)
- [16] 严宗达, 王洪礼. 热应力[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993 (Yan Zongda, Wang Hongli. Heat stress[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993)
- [17] 安建祝, 李有宽, 杜祥琬. 激光窗口热透镜效应对光束质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(4): 429-433. (An Jianzhu, Li Youkuan, Du Xiangwan. Influence of laser window's thermal lensing effect on beam quality[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(4): 429-433)
- [18] 吴双, 贺也洵, 张彬. 不同夹持方式下不同高反膜系腔镜的热形变分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51: 021402. (Wu Shuang, He Yehuan, Zhang Bin. Analysis of thermal distortion of resonator mirror with high reflective coatings in different clamping ways[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 021402)
- [19] 张建业, 陈帆, 马骏, 等. 熔融石英基片热形变及其对光束质量的影响分析[J]. *激光技术*, 2019, 43(3): 374-379. (Zhang Jianyun, Chen Fan, Ma Jun, et al. Thermal deformation of fused silica substrates and its influence on beam quality[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(3): 374-379)
- [20] 贺敏波, 江厚满. 激光辐照下高反射镜热变形问题的尺度律[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(9): 2043-2046. (He Minbo, Jiang Houman. Scaling law in thermal deformation of high reflecting mirror under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(9): 2043-2046)
- [21] 贺敏波, 任伟艳, 张世强, 等. 长时间出光条件下反射镜的热变形对光束质量的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50: 122302. (He Minbo, Ren Weiyan, Zhang Shiqiang, et al. Influence of mirror thermal deformation on beam quality under laser long-time irradiation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50: 122302)
- [22] 周琼, 姜宗福, 习锋杰. 光学系统中白宝石分光镜的热变形像差分析[J]. *中国激光*, 2012, 39: 1002001. (Zhou Qiong, Jiang Zongfu, Xi Fengjie. Study of thermal deformations induced optical aberrations for Al_2O_3 mirror in an optical system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39: 1002001)
- [23] 胡鹏, 张建柱. 激光系统中元件热效应时空特性分析[J]. *光学学报*, 2020, 40: 2014001. (Hu Peng, Zhang Jianzhu. Analysis of spatio-temporal characters of thermal effects of optical components in laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40: 2014001)
- [24] 梅艳莹, 杨涛. 强光辐照下白宝石高反镜尺寸对热变形的影响[J]. *激光技术*, 2014, 38(3): 375-379. (Mei Yanying, Yang Tao. Effect of dimensions on thermal deformation of high reflectance sapphire mirrors under high power laser irradiation[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3): 375-379)
- [25] 陈发良, 李有宽. 环形分布激光束引起光学窗口镜热变形理论分析[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(8): 736-740. (Chen Faliang, Li Youkuan. Thermal deformation of optical windows induced by annularly-distributed laser beam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 736-740)
- [26] Gavrielides A, Phillip P. Time-dependent thermal blooming in axial pipe flow[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(21): 3359-3365.
- [27] 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: 0702005. (Hu Peng, An Jianzhu, Zhang Feizhou. Pressure effects on laser propagation in a closed horizontal tube[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40: 0702005)
- [28] 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 Peng, Su Hua, An Jianzhu, et al. Thermal coupling effects on laser propagation in closed tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1651-1656)
- [29] 胡小川, 贺也洵, 吴双, 等. 内通道轴向风速对强激光相位特性的影响[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45: 0806003. (Hu Xiaochuan, He Yehuan, Wu Shuang, et al. Effect of axial wind speed in inner propagation channel on phase characteristics of high-power lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45: 0806003)
- [30] 柳建, 王世庆, 金钢, 等. 吹气抑制气体热效应时管道结构对光传输的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(3): 391-393. (Liu Jian, Wang Shiqing, Jin Gang, et al. Effect of tube structure on beam propagation when depressing thermal effect by blowing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(3): 391-393)
- [31] 孙运强, 习锋杰, 陈洪斌, 等. 内通道气帘的设计与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48: 051404. (Sun Yunqiang, Xi Fengjie, Chen Hongbin, et al. Design and analysis on gas curtain of beam path indoor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48: 051404)
- [32] An Jianzhu, Li Youkuan, Du Xiangwan. Thermal effects of a laser beam tube consisting of a window and nonflowing gas[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(24): 2899-2901.
- [33] 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. (Xie Xiaogang, Zhang Jianzhu, Yue Yufang, et al. EasyLaser: component-based laser system simulation software[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2536-2540)