

文章编号: 1001-4322(2004)06-0703-04

# 激光通道传输热特性对远场光束质量的影响\*

刘顺发, 金 钢, 柳 建, 陈洪斌, 马振洲

(中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘 要:** 通过仿真计算分析了激光在光束控制系统通道内传输所产生的热效应及其对远场光束质量的影响。激光传播由近轴波方程描述, 用快速傅里叶变换技术求解; 激光热效应引起的流场密度变化采用完全 Navier-Stokes 方程计算。计算给出了不同波长、不同吸收系数条件下的远场光斑情况。计算结果表明, 在典型的工作条件和状态下, 较高能量激光在光束控制系统通道内产生的热效应影响不容忽视, 它会明显降低远场目标处的能量集中度, 增大光斑的发散。

**关键词:** 激光传输; 光束质量; 热效应; N-S 方程

中图分类号: O437

文献标识码: A

在各种激光发射系统中, 激光器发出的光束要经光束控制系统进行变焦、整形等一系列传输变换后才能汇聚到目标物体上, 为满足不同的应用要求, 需保证发射激光有较好的远场光束质量和较高的能量集中度, 这就要求发射系统有较好的静态光束质量, 即要求系统刚度好、强度高, 反射镜的面形误差小等。除此之外, 还要求整个系统在使用过程中有良好的动态光束质量, 也就是激光在发射过程中与传输通道介质相互作用所导致的发射系统光路畸变要小。

众所周知, 较高能量激光在大气中传输时, 其一小部分能量被大气中的水蒸汽、二氧化碳等分子或气溶胶粒子吸收, 导致传输路径上的空气被加热, 使气体介质的密度和折射率发生变化, 产生负透镜效应, 从而造成激光束的畸变和发散, 降低激光能量集中度<sup>[1,3]</sup>。而对于光束控制系统内激光与传输介质相互作用对发射光束质量影响的研究报道较少<sup>[4,5]</sup>。事实上在一个光束控制系统内, 当激光在封闭的管道内传输时, 尽管传输路径较短, 但由于光束直径较细, 激光能量密度相对较高, 且封闭的管道中无横向切变气流的冷却作用, 因此激光束与传输通道中气体介质之间的热相互作用可能会十分强烈, 使介质温度升高, 进而使其密度和折射率发生变化, 并反过来影响激光光束的传输, 导致远场光束畸变。这种激光在发射过程中对整个系统的动态影响, 直接关系到发射系统使用效能。对此现象进行分析对系统设计具有重要意义。

本文采用数值计算方法, 分析研究了较高能量激光在光束控制系统内传输时的热效应问题。光束控制系统中激光引起的气体介质的密度变化采用完全的 Navier-Stokes 方程描述, 对此方程的求解采用了具有二阶精度的强隐式格式和 LU 分解技术; 激光束的传播由近轴波方程描述, 采用像屏法和快速傅里叶变换技术求解; 通过计算激光引起的通道热效应, 分析介质的密度、折射率变化所导致的传输光束在发射系统出口处累积的光程差和位相差, 进而采用夫琅和费衍射方法计算出远场光强分布, 并与无热效应影响光场的远场光强进行比较。

## 1 计算方法

激光传输通道内气体介质吸收部分激光能量将引起介质的密度、折射率发生变化, 并反过来影响光束的传输特性, 对这一过程的描述由激光传输波动方程和反映介质密度变化的流体力学方程组构成。

激光场  $A$  满足缓变振幅近似下的近轴波方程

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \nabla^2 A + k^2 \left( \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) A \quad (1)$$

$$I = |A|^2 \exp(-z) \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2002-05-09; 修订日期: 2004-02-06

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 刘顺发(1967—), 男, 重庆万州人, 1989年毕业于北京理工大学工程光学系, 1995年毕业于中国科学院光电技术研究所, 工学硕士, 副研究员, 从事光学传输、光电工程研究工作; 成都双流 350 信箱; E-mail: sfliu@oe.ac.cn。

对此方程的求解,采用像屏法处理,即考虑光波在自由空间传输一段距离后叠加一附加相位变化。

$$A = A_{\text{vac}} \exp(-ikz) \quad (3)$$

$$= \frac{1}{z} \left[ \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right] dz \quad (4)$$

以上各式中:  $A_{\text{vac}}$  为真空中光场;  $z$  为沿光束路径的传播距离;  $k = 2\pi/\lambda$  为在均匀介质中的波数;  $n_0$  和  $n$  分别是未扰动折射率及光作用后扰动介质的折射率。气体介质折射率与密度  $\rho$  的关系为<sup>[2]</sup>

$$n - 1 = K \rho \quad (5)$$

其中  $K$  为 Gladstone-Dale 常数。

要求解方程(3)中的光场,须知道热效应引起的附加热相位变化(4)式,即激光引起的气体热运动所导致的介质密度及折射率的变化情况。对此本文采用流体力学中完全的 Navier-Stokes 方程求解。流体质量方程、动量方程、能量方程的 Navier-Stokes 方程组为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho E}{\partial x_j} = - \frac{u_i}{2} \frac{\partial p}{\partial x_j} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial E}{\partial x_j} \right) + S_e \quad (8)$$

式中:下标  $i, j$  分别取 1, 2, 3 代表三个坐标方向分量,满足爱因斯坦求和规则;  $p$  为压力;  $E$  为内能;  $\mu_{\text{eff}}$  为有效粘性系数;  $u_i$  为速度分量;源项为

$$S = -\rho g, \quad S_e = -\rho g E \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  为气体介质对激光的吸收系数;  $g$  为重力加速度。对此方程求解采用强隐式方法和 LU 分解技术<sup>[6]</sup>,采用 Roe 平均并结合数值 Riemann 不变量和通量限制器的概念,构造了具有迎风性质的半离散格式,实践表明可收到快速稳定收敛的效果。计算中采用了对角化处理,减少了大量的矩阵运算,使得计算效率大大提高。

将以上方程进行迭代求解,可得到光束控制系统出口处含附加热相位畸变的激光光场。利用光波在均匀介质中传播的夫琅和费衍射可确定其远场光斑<sup>[7]</sup>,将远场激光光斑的 84% 环围能量半径作为光斑半径,并与无热效应影响的初始光斑的远场夫琅和费衍射光斑进行比较,根据远场光斑半径的变化可判定激光束发散情况<sup>[8]</sup>。

含相位改变的光波为

$$E_0(r) = A(r) \exp[j\phi(r)] \quad (10)$$

$E_0(r)$  在远场的夫琅和费衍射为

$$E(r) = \frac{\exp[j(\pi/2 + z^2)/z]}{jz} E_0(r) \exp\left[-j\frac{2\pi}{z}r\right] d \quad (11)$$

在  $z = R$  焦面上的强度分布为

$$I(r) = \frac{1}{2R^2} \left| A(r) \exp[j\phi(r)] \exp(-2\pi jr/R) d \right|^2 \quad (12)$$

## 2 计算结果与分析

通过仿真计算分析了激光在光束控制系统传输通道内传输 25m 距离后所产生的热效应对其远场光斑质量的影响。将激光束在通道入口处初始光场的远场夫琅和费衍射光斑半径作为归一化半径。

图 1 为  $\lambda = 3.8\mu\text{m}$  的高斯光场远场光斑环围能量半径的变化情况,计算中取激光功率  $P = 0.5\text{GW}$ ,光斑直径  $d = 5\text{cm}$ ,时间  $t = 5\text{s}$ ,图 1(a) 中气体介质吸收系数  $\alpha = 1 \times 10^{-5}$ ,可见由于热效应影响,激光束远场光斑归一化半径扩展至  $r = 6.5$ 。

如果气体介质对激光能量的吸收减小,则热效应影响明显降低。图 1(b) 为气体介质的吸收系数减为  $\alpha = 1 \times 10^{-6}$  时的远场光斑能量分布情况,其余参数不变,由图可见,此时远场光斑半径为  $r = 2.6$ 。相对前一情形,远场光斑半径明显减小。即对于通道传输的激光束,当气体介质对激光束的吸收系数减小时可明显减小其远场光斑的热扩散,降低热效应,提高传输光束的光束质量。

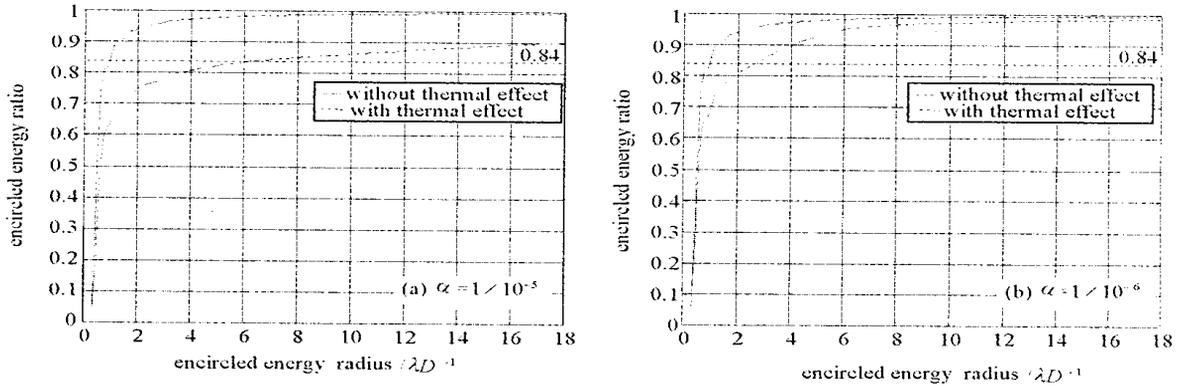


Fig. 1 Encircled energy vs unity radius with different  
图 1 不同介质吸收系数时环围能量随归一化半径变化

通过仿真计算分析比较了热效应影响与激光波长的关系。图 2(a)所示为  $\lambda = 10.6\mu\text{m}$  的激光由于光束控制系统传输通道热效应影响引起的远场光斑能量分布,其它各计算条件与图 1(a)的条件相同,此时远场光斑半径为  $r = 2.7$ 。相对图 1(a)的情形明显减小。

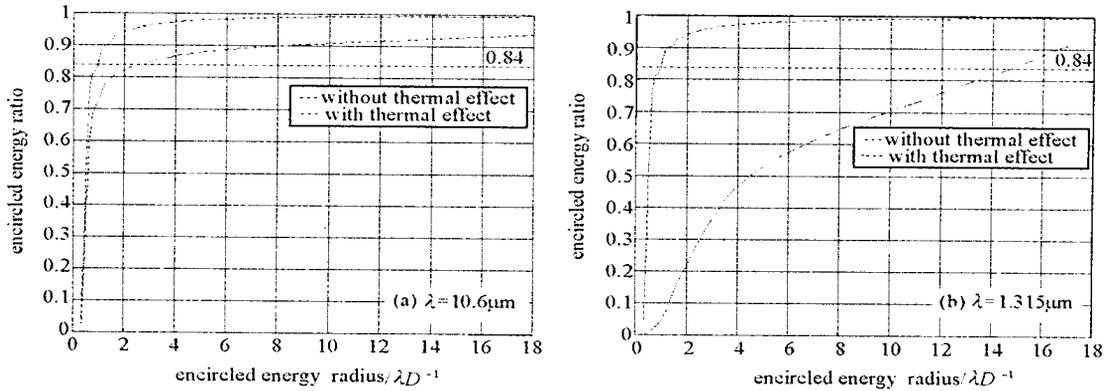


Fig. 2 Encircled energy vs unity radius with different wave length  
图 2 不同波长时环围能量随归一化半径的变化

而当波长变短时,例如当激光波长取  $\lambda = 1.315\mu\text{m}$ ,而其它参数不变时,计算可知远场光斑半径变为  $r = 14.7$ ,如图 2(b)所示。即在相同计算条件下,短波长激光的热效应引起的光束发散明显大于长波长的热效应引起的光束发散。

以上计算表明,在一定条件下,光束控制系统激光热效应对发射光束质量影响很大,在系统设计时必须加以考虑。如果传输通道上杂质气体含量较高,对激光能量吸收作用较强,则会显著增大热效应,使传输光束扩散、畸变,远场光束质量大大下降。此外对于波长较短的激光,在其它参数不变的情况下,热效应影响更为强烈。这是因为对于同样的能量吸收,尽管所导致的气体介质密度的变化是一样的,然而对于同样的密度变化量,对不同波长的激光所产生的附加热相位是不同的,波长越短的光束所产生的附加热相位就越大,热相位越大则导致传输光束扩散、畸变越大,远场光束质量下降越大,环围能量半径越大。因此,要提高光束控制系统内通道激光束的传输特性,在充分考虑系统静态像差条件下,对系统内气体介质的吸收特性以及传输波长的匹配关系都要作全面综合的考虑,方能得到较好的传输光束质量。

### 3 结 论

本文建立了光束控制系统内细光束传输的仿真分析方法,并对一些典型参数情况进行了仿真计算分析,主要考虑了激光加热气体介质对不同波长激光远场光束质量的影响。认为要提高光束控制系统内通道激光束的传输特性,在充分考虑系统静态像差条件下,对系统内气体介质的吸收特性以及传输波长的匹配关系都要作全面综合的考虑,方能得到较好的传输光束质量。对实际系统而言,除传输通道气体介质对传输光束质量将产生影响外,还有很多其它影响因数,如镜面热畸变、系统振动等,这些都是在实际系统设计中需要考虑的问题。

## 参考文献:

- [1] Gebhardt F G. Twenty-five years of thermal blooming: an overview[A]. Proc of SPIE[C]. 1992, **1221**:2—25.
- [2] Strohbehm J W. Laser beam propagation in the atmosphere[M]. Berlin:Spring-Verlag. 1978.
- [3] 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):223—252. (Chen D Q, Li Y K, Xu X S, et al. Numerical simulation of thermal blooming in atmospheric laser propagation. *High Power Laser and Particle Beams*, 1993, **5**(2):223—252)
- [4] Shen P I, Andrepont M. Thermal blooming of HEL in the non-flowing beam tube with various wall temperature[A]. Proc of PIE[C]. 2000, **4034**:100—109.
- [5] 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 G, Liu S F, Li S M, et al. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(10):895—899)
- [6] Jameson H A. Solution of steady three-dimensional compressible Euler and Navier-Stokes equations by an implicit LU scheme[R]. AIAA 88—0619.
- [7] 鲜浩,姜文汉. 波像差与光束质量指标的关系[J]. 中国激光,1999, **26**(5):415—419. (Xian H, Jiang W H. The relation between wavefront aberration and the beam quality factor. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, **26**(5):415—419)
- [8] 杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因数[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. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, **24**(4):327—332)

## Effect of thermal characteristics in laser transmitting channel on far-field beam quality

LIU Shurfa, JIN Gang, LIU Jian, CHEN Hong-bin, MA Zhen-zhou  
(Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences,  
P. O. Box 350, Chengdu 610209, China)

**Abstract:** In this paper, the laser thermal effects, produced in the transmitting channel of a beam control system, are numerically analyzed. The laser propagation is governed by the paraxial wave equation, which is solved by the FFT method. The air density variation is calculated with the complete Navier-Stokes equations. The numerical tests are carried out for different wave length of laser and different absorption coefficients of air medium, in order to estimate the effects on the beam quality at far field. The results show that the laser thermal effects in the transmitting channel may largely reduce the concentration of laser energy at far field.

**Key words:** Laser propagation; Beam quality; Thermal effect; Navier-Stokes equation