

稳态热晕对激光束大气传输特性的影响

任宏岩,李刚,沈洪斌,王元铂,姜楠,毛少娟
(军械工程学院光学与电子工程系,河北石家庄 050003)

摘要:利用稳态热晕条件下的高斯光束的光强分布模型,数值分析了无风和有风两种情况下稳态热晕效应引起的光束畸变。在无风情况下,分析了热晕对不同传输距离、不同初始功率的激光束能量分布的影响;在有风情况下,分析了热晕对近场和远场激光束的影响,分析了不同横向风速对光束畸变的影响。

关键词:稳态热晕;高斯光束;大气传输;数值模拟

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Influence of steady-state thermal blooming for laser beam under atmospheric transmission

REN Hong-yan, LI Gang, SHEN Hong-bin, WANG Yuan-bo, JIANG Nan, MAO Shao-juan

(Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: By using the light intensity distribution of Gaussian beam under the steady-state thermal blooming condition, numerical analysis is done for light beam distortion by the steady-state thermal blooming under two conditions of without wind and wind. Without wind, the influence of thermal blooming for laser beam energy distribution of different transmission distance and different initial laser power is analysed; the influence of thermal blooming for near-field laser beam and far-field laser beam is analysed under wind condition, the influence of lateral wind speed for the light beam distortion is analysed.

Key words: steady-state thermal blooming; gaussian beam; atmospheric transmission; numerical simulation

1 引言

强激光大气传输产生的效应可分为两类,第1类是线性光学效应,包括大气折射、吸收、散射和湍流;第2类是非线性光学效应,主要有热晕、受激拉曼散射和大气击穿。热晕是影响强激光大气传输的最严重的非线性问题之一,因此研究热晕对激光束大气传输的影响具有重要意义^[1-5]。热晕分为稳态热晕和瞬态热晕。稳态热晕是连续波或高重复频率强激光通过大气传输时产生的,而瞬态热晕是由脉冲强激光产生的。本文通过数值模拟研究稳态热晕对激光束大气传输特性的影响,理论分析对指导实验具有一定意义。

2 理论分析

决定热晕效应的3个基本方程分别是光束传输

的傍轴波方程^[6]、大气的流体力学方程^[6]和洛伦兹-洛伦茨关系公式^[7]。对于连续激光,当各流体力学量达到稳态时的热晕称为稳态热晕。由于大气吸收而导致的密度、压力变化较小,可以作为微扰项处理,并把未畸变光束作为其零阶解,从而可把流体力学方程组线性化。忽略所有与时间有关的项,联合求解线性化流体力学方程组、Lorentz-Lorenz方程和傍轴近似标量波动方程,可求得稳态解。

稳态时若激光束初始为准直高斯光束,且风速为零,得到沿传播方向 z 方向的光强分布为:

作者简介:任宏岩(1964-),男,硕士,副教授,主要从事光电技术,夜视技术,激光技术的教学和研究工作。E-mail: renhongyan616@126.com

收稿日期:2009-07-10;修订日期:2009-09-08

$$I(x,y,z) = I(x,y,0) \exp\left[-\alpha z - D_c \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{a^2}\right)\right] \quad (1)$$

式中, α 为大气吸收系数; a 为光斑半径; z 为传播距离; 量纲一的参量 D_c 反映热畸变的程度, 其表示式为:

$$D_c = \frac{-n_T p}{\pi k n a^2} \left[z - \frac{1}{a} (1 - \exp(-\alpha z)) \right] \approx -\frac{n_T p \alpha z^2}{2 \pi k n a^2} \quad (\alpha z \ll 1) \quad (2)$$

式中, k 为波数; p 为初始激光功率; n 为折射率; n_T 为常压下气体密度随温度的变化率。

当有横向风时, 光强分布为:

$$I(x,y,z) = I(x,y,0) \exp(-\alpha z) \exp\left\{-N_c \left[\frac{x}{a} \exp\left[-(x^2+y^2)/a^2\right] + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(1 - \frac{2y^2}{a^2} \exp(-y^2/a^2)\right) \left[1 + \operatorname{erf} \frac{x}{a}\right]\right]\right\} \quad (3)$$

式中, $\operatorname{erf} \frac{x}{a}$ 为误差函数; N_c 为 Bradley-Hermann 热畸变参量, 通常用以衡量激光束的热晕相位畸变, 表示式为:

$$N_c = -\frac{n_T I_0 \alpha z^2}{n \rho c_p v_x a} \left[\frac{2}{\alpha z} - \frac{2}{(\alpha z)^2} (1 - \exp(-\alpha z)) \right] \approx -\frac{n_T I_0 \alpha z^2}{n \rho c_p v_x a} \quad (\alpha z \ll 1) \quad (4)$$

式中, v_x 为是横向风速; I_0 为初始激光光强; ρ 为空气密度; c_p 为定压比热容。

利用式(3)得到的激光束传播轴向上光强的变化情况, 其中无热晕时的激光束光强分布满足 Beer 定律。由于热晕效应的影响, 传输过程中和无热晕情况相比光强的衰减更加迅速, 传输距离 5000 m 时, 光强衰减为零, 如图 1 所示。这是因为空气在激光束作用下, 部分激光能量被空气中的分子和气溶胶吸收, 加热空气导致气压上升, 气体以声速膨胀, 气压趋于平衡, 密度降低, 折射率下降, 形成一个负透镜, 使光束发散, 引起激光束的散焦, 光束扩展, 中心光强急剧下降, 严重影响了光束质量。

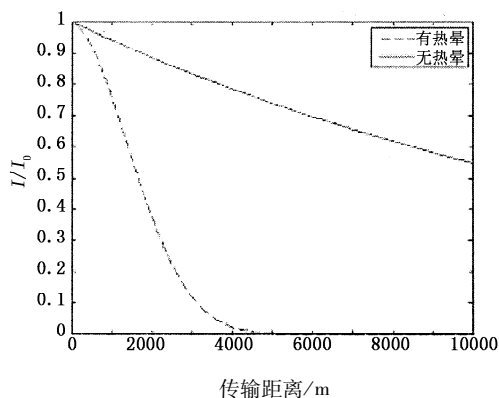


图1 激光传输轴向上光强随传输距离的变化

3 无风稳态热晕引起的激光束畸变

计算中选取各参量如下: 波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, 准直后光束半径 $a = 8 \text{ cm}$, 高斯光束的焦参量为无穷

大, 激光初值功率 $p = 1 \times 10^6 \text{ W}$, 标准水平均匀大气, 气压 $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$, 空气密度 1.302461 kg/m^3 , 大气吸收系数 $\alpha = 6 \times 10^{-5} / \text{m}$, 比定压热容 c_p 与比定容热容 c_v 之比 $\gamma = 1.4$, 折射率变化率 $n_T = 3.0 \times 10^{-4}$ 。设初始激光为准直高斯光束, 在不同传输距离处引起的激光束畸变情况如图 2 所示, 图中光强用激光初值光强作归一化处理。由图 2 可知, 随着激光束传输距离的增加, 光强明显降低, 光束直径扩展, 光束能量向光束边缘集中, 并逐渐出现能量中空现象。由于风速为零, 光斑的等光强线轴对称均匀分布。

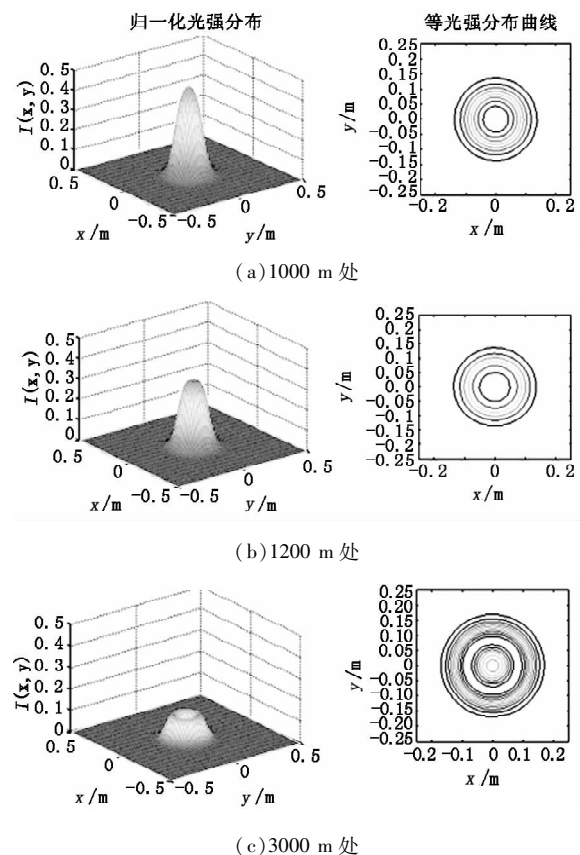


图2 无风时稳态热晕条件下不同传输距离上激光束能量分布

图3给出了 $p=5 \times 10^5 \text{ W}$ 和 $p=1 \times 10^6 \text{ W}$ 时激光束在 1200 m 和 1500 m 距离上的光强分布。由图3可知,激光束传输相同距离时,初始激光功率越大,热晕对激光在大气中的传输特性影响越严重,经大气传输后激光能量衰减越大,光束能量中空现象出现的越早。由于热晕效应的存在,在激光束其他参量相同的条件下,大功率激光器的远场峰值光强反而比小功率激光器的远场峰值光强小得多,因此热晕效应限制了激光大气传输时的最高功率密度。该功率密度对应的光强度称为临界光强 I_c 。达到 I_c 时的初始激光功率称临界功率 P_c 。归一化激光峰值光强 I_p/I_c 随归一化初始激光功率 P/P_c 的变化曲线如图4所示。由于热晕效应的存在,大气中远场激光可达到的最大光强度与激光发射功率无关。由图4中曲线可以看出,当激光功率很小时,热晕效应可忽略不计,激光在空气中自由传输,当激光功率增大到一定程度后,热晕效应成为激光束畸变的主要原因。如果 P 超过了 P_c ,随着发射功率的增加,远场光强反而下降。

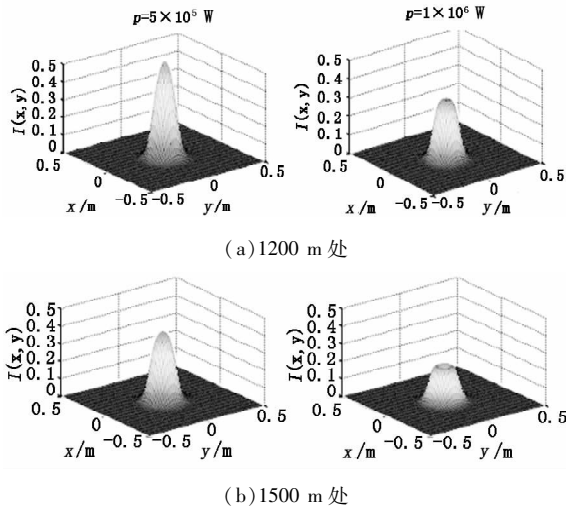


图3 $p=5 \times 10^5 \text{ W}$ 和 $p=1 \times 10^6 \text{ W}$ 时激光束在 1200 m 和 1500 m 距离上的光强分布

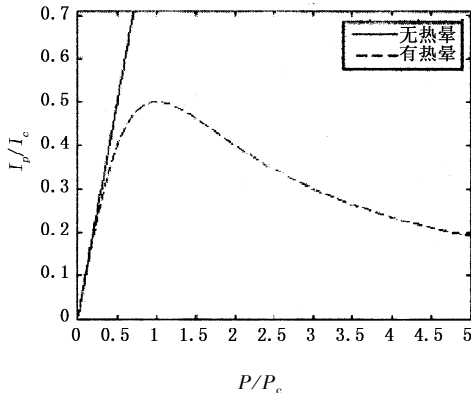
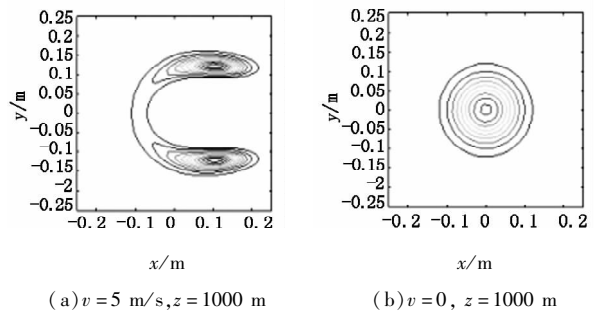


图4 有热晕时激光峰值光强随初始激光功率的变化曲线

4 有风稳态热晕引起的激光束畸变

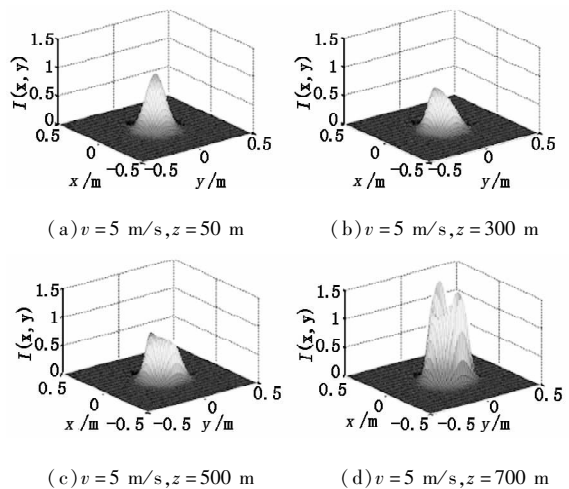
计算中选取各参量如下:风速 $v=5 \text{ m/s}$,激光初值功率 $p=10 \text{ kW}$,其他参量与无风时分析相同。有横向风和无风时稳态热晕条件下 1000 m 处的等光强分布曲线如图5所示。可以看到,对于连续准直高斯光束,在无横向风存在时,光束截面内光强分布保持对称性;当有横向存在时,横向风使大气垂直于激光束传输方向运动,上风处空气压缩、变冷,折射率变大,下风空气密度降低,折射率减小,形成特有的弯向上风的新月型光束能量分布,造成激光束的畸变、弯曲和发散。



(a) $v=5 \text{ m/s}, z=1000 \text{ m}$ (b) $v=0, z=1000 \text{ m}$

图5 有横向风($v=5 \text{ m/s}$)与无风时稳态热晕条件下 1000 m 处的激光束等光强分布曲线

当横向风速 $v=5 \text{ m/s}$ 时,分别取传输距离为 50 m, 300 m, 500 m 及 700 m 计算得到的光强分布如图6所示。发现存在横向风时热晕激光束峰值光强的变化趋势为:近场由大到小、远场由小到大,在满足 $\alpha z \ll 1$ 条件下的远场光强峰值甚至远远超过了激光束的初始光强。这是由于横向风的作用使强激光束附近空气的折射率发生了变化,形成了上风处折射率高,下风处折射率低的折射率分布,造成激光能量向高折射率的方向聚焦,即向



(a) $v=5 \text{ m/s}, z=50 \text{ m}$ (b) $v=5 \text{ m/s}, z=300 \text{ m}$
(c) $v=5 \text{ m/s}, z=500 \text{ m}$ (d) $v=5 \text{ m/s}, z=700 \text{ m}$

图6 横向风速 $v=5 \text{ m/s}$ 时稳态热晕条件下不同传输距离处的激光束光强分布

上风处聚焦所致。

图7为不同风速稳态热晕条件下1000 m处的等光强分布曲线。由图7可以看出,随风速不断增大,热晕效应引起的激光束畸变逐渐变小,这是因为随着横向风速的增大,空气流动加速,当横向风速大到一定程度后激光束附近空气吸收的激光能量被迅速带走,使得激光束上、下风处空气密度、折射率逐渐趋于相同,一定程度上减小了热晕造成的激光束畸变。由式(4)也可看出,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。

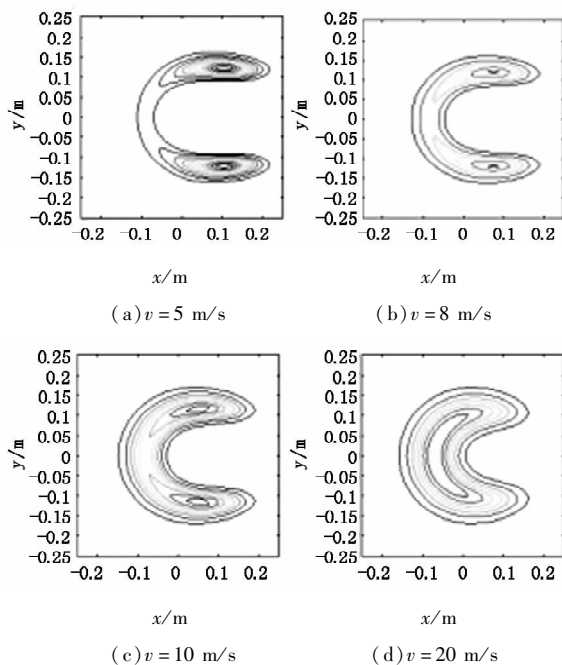


图7 不同风速稳态热晕条件下1000 m处的激光束等光强分布曲线

5 结论

通过对强激光大气传输中的热晕效应进行数值模拟,研究了非线性稳态热晕引起的激光束畸变情况,结果表明:热晕可造成激光束的散焦,光束扩展,中心光强急剧下降,甚至造成光斑中空的“草帽形”光强分布,严重影响激光束质量,限制了激光大气传输的最大光强度,当激光功率超过临界功率时远场激光强度不升反降;存在横向风时热晕激光束峰值光强的变化趋势为:近场由大到小、远场由小到大,在满足 $\alpha z \ll 1$ 条件下的远场光强峰值甚至远远超过了激光束的初始光强,而较大风速的横向风可以抑制稳态热晕造成的光束畸变。

参考文献:

- [1] 饶瑞中. 激光大气传输湍流与热晕综合效应[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 130 - 134.
- [2] 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.
- [3] 冯晓星, 范承玉, 王英俭, 等. 聚焦脉冲激光大气传输热晕效应的数值分析[J]. 推进技术, 2007, 28(5): 574 - 577.
- [4] 孙中涛, 孙晓泉, 邹继伟. 脉冲激光大气传输热晕数值分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 189 - 193.
- [5] 陈志华, 杜太焦, 王建国. 激光大气传输热晕与光束抖动综合效应的数值模拟[J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 251 - 256.
- [6] 苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [7] 强希文. 强激光大气传输非线性热畸变效应的解析分析[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(6): 6 - 10.