

序列长脉冲激光热晕效应的定标规律

张鹏飞, 乔春红*, 冯晓星, 李 南, 黄 童, 范承玉, 王英俭

中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 针对序列长脉冲激光, 提出了衡量序列长脉冲激光热晕效应强度的热畸变参数, 建立了序列长脉冲激光热晕效应的数值仿真模型, 并进行了实验验证。对比分析后发现实验结果与仿真结果在光斑形态和大小方面具有较好的一致性, 从而验证了序列长脉冲激光热晕效应的数学物理模型及仿真算法的可靠性。在此基础上, 通过改变大气参数及发射系统参数进行大量的数值仿真, 得出由序列长脉冲激光热晕效应引起的光斑扩展与热畸变参数的定量关系, 即序列长脉冲激光热晕效应的定标规律。

关键词 大气光学; 定标规律; 数值仿真; 序列长脉冲激光; 热晕效应

中图分类号 TN201 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1001001

Scaling Laws of Thermal Blooming Effect of Repetitively Long Pulse Laser

Zhang Pengfei, Qiao Chunhong, Feng Xiaoxing, Li Nan, Huang Tong,
Fan Chengyu, Wang Yingjian

*Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*

Abstract Thermal distortion parameters are proposed to evaluate the intensity of thermal blooming effect of repetitively long pulse laser. A numerical simulation model of thermal blooming effect of repetitively long pulse laser is established, and experiments are carried out. By comparing the simulation results with the experimental results, we find that the experimental results agree well with the simulation results in terms of spot shape and size, which verifies the reliability of the mathematical-physical model of repetitively long pulse laser and the simulation algorithm. On this basis, the quantitative relationships between the spot expansion and the thermal distortion parameters caused by the repetitively long pulse thermal blooming effect, named scaling laws of thermal blooming effect of repetitively long pulse laser, are obtained by a large number of numerical simulations under different atmosphere parameters and launching system parameters.

Key words atmospheric optics; scaling laws; numerical simulation; repetitively long pulse laser; thermal blooming effect

OCIS codes 010.1300; 010.1290

1 引 言

热晕效应是高能激光大气传输中较为严重的非线性效应之一, 也是限制高能激光大气传输中能量传输效率的重要因素^[1-5]。根据激光器的工作原理, 热晕效应可以分为连续激光热晕效应和脉冲激光热晕效应; 根据脉宽(t_p)与光束声速渡越时间($t_c = D'/c_s$, D' 为光斑直径, c_s 为声速)的长短可将热晕效应分为长脉冲热晕效应和短脉冲热晕效应^[1], 当 $t_p > t_c$ 时为长脉冲热晕效应, 反之则为短脉冲热晕效应。

收稿日期: 2017-04-12; **收到修改稿日期:** 2017-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61405205)

作者简介: 张鹏飞(1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事激光大气传输与自适应光学校正方面的研究。

E-mail: zhp0530@163.com

* **通信联系人.** E-mail: chqiao@aiofm.ac.cn

对于单脉冲(包括长脉冲及短脉冲)热晕效应,Smith^[1]首先基于几何光学理论提出描述脉冲热晕强度的定标参数,给出传输路径上光强分布的数学表达式,并进行了大量的实验验证^[6-9]。对于序列脉冲,目前的研究主要针对短脉冲热晕的重叠效应^[10-13],而关于长脉冲热晕效应的数值仿真及实验研究报道较少。此外,关于序列长脉冲热晕效应强度的表征方式较少。

本文针对序列长脉冲激光,提出了可用于衡量序列长脉冲激光热晕效应强度的热畸变参数,建立了序列脉冲激光热晕效应的数学仿真模型,并开展了热晕效应实验。同时利用数值仿真程序进行了大量的数值计算,得到序列长脉冲激光大气传输热晕效应的定标规律,为进一步研究序列长脉冲激光大气传输的基本规律提供了一定参考。

2 序列长脉冲激光热晕效应的数学物理模型

2.1 数学物理模型

高功率脉冲激光在大气中传输时,热晕效应引起的折射率 n_b 满足^[14]:

$$\left(\nabla_{\perp}^2 - \frac{1}{c_s^2} D^2\right) D n_b = -\Gamma \alpha \nabla_{\perp}^2 I(r, z) + \eta \nabla_{\perp}^2 (\nabla_{\perp}^2 n_b), \quad (1)$$

式中 $D = \partial/\partial t + \mathbf{V} \cdot \nabla_{\perp}$ 为算符(t 为时间变量, \mathbf{V} 为风速矢量, ∇_{\perp} 为横向梯度算符), $\Gamma = \mu_t / \rho c_p$ ($\mu_t = |dn/dT|$ 为折射率随温度的变化率, ρ 为气体密度, c_p 为气体定容比热容), α 为气体吸收系数, ∇_{\perp}^2 为横向拉普拉斯算符, η 为大气热扩散系数, $I(r, z)$ 为光强分布(r 为径向坐标, z 为轴向坐标)。

长脉冲激光在大气中传输时,大气加热过程可近似为等压过程,在等压近似下,(1)式可以简化为^[14]

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla_{\perp}\right) n_b - \eta \nabla_{\perp}^2 n_b = -\Gamma \alpha I(r, z). \quad (2)$$

对于序列脉冲激光传输热晕效应而言,第 n 个脉冲不仅受其本身的影响,还可能受到前一系列激光脉冲的影响。此外,序列脉冲较长时,还要考虑风速的影响。第 n 个激光脉冲产生的密度扰动可表示为

$$\rho_n(r, t) = \rho_1 [r, t - (n-1)t_r] + \sum_{m=1}^{n-1} \{\rho_1 \{x - V_y [t - (m-1)t_r], t - (m-1)t_r\} - \rho_1 \{x - V_y [t - (m-1)t_r - t_p], t - (m-1)t_r - t_p\}\}, \quad (3)$$

式中 ρ_1 为单脉冲产生的密度扰动, V_y 为 y 轴方向风速, t_p 为脉宽, t_r 为脉冲间隔, m 为脉冲数。 n_b 可表示为

$$n_b = (n_0 - 1)\rho_1/\rho_0, \quad (4)$$

式中 n_0 、 ρ_0 分别为周围环境大气的折射率和密度。对于实验系统,气体通常局限在一个特定的管道内,因此还需考虑管道内的热对流效应。热对流速度的计算式为^[15-17]

$$\frac{\partial n_b}{\partial t} + V_y \frac{\partial n_b}{\partial y} - \eta \left(\frac{\partial^2 n_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_b}{\partial y^2} \right) = -\Gamma \alpha I(r, z), \quad (5)$$

$$\rho_0 \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = -\rho_1 g, \quad (6)$$

式中 g 为重力加速度。

2.2 序列长脉冲激光热晕效应的热畸变参数

热畸变参数 N_D ^[2] 正比于光场风速渡越时间内热晕效应引起的相位畸变光程差 N_{λ} , 是表征连续激光热晕效应强弱及定标光束质量的重要参数。对于平台光束, N_{λ} 与 N_D 之间的关系为 $N_{\lambda} = N_D / (\sqrt{2}\pi)$ ^[2]。

长脉冲激光脉宽 t_p 一般小于风速渡越时间 t_V , 因此仅需考虑 t_p 内引起的光束光程变化, 对应的热畸变参数为

$$N_{D,L} = \sqrt{2}\pi N_{\lambda} = \sqrt{2}\pi \Gamma k I_0 \alpha L t_p, \quad t_p \leq t_V, \quad (7)$$

式中 L 为传输距离。当 $t_p \geq t_V$ 时, 使用 N_D 描述即可。序列脉冲热晕效应畸变相位光程差与 t_V 内的重叠脉冲数目 N_p 成正比, 对应的热畸变参数可以表示为

$$N_{D,LX} = \sqrt{2}\pi \Gamma k I_0 \alpha L t_p N_p, \quad N_p \geq 1, \quad (8)$$

N_p 可定义为

$$N_p = D' f_p / V, \quad (9)$$

式中 V 为风速, f_p 为脉冲的重复频率。

在非均匀路径中, (9) 式可进一步扩展为

$$N_{D_LX} = 8\pi\sqrt{2}\Gamma\lambda^{-1} \int_0^L f(z) dz, \quad (10)$$

其中

$$f(z) = \begin{cases} \frac{t_p \left\{ P\alpha(z) \exp \left[- \int_0^z dz' \varepsilon(z') \right] \right\} N_p(z)}{D^2(z)}, & t_p < \frac{D(z)}{V(z)} \\ \frac{\left\{ P\alpha(z) \exp \left[- \int_0^z dz' \varepsilon(z') \right] \right\}}{V(z)D(z)}, & t_p \geq \frac{D(z)}{V(z)} \end{cases}, \quad (11)$$

式中 P 为激光发射功率; $V(z)$ 为横向风速; $D(z)$ 为传输路径上的光束直径, $D(z) = \sqrt{[(1-z/L)D_0]^2 + [4z/(kD_0)]^2}$ ^[3], 其中 D_0 为激光发射孔径, k 为波数; $N_p(z) = D(z)f_p/V(z)$, 在发射孔径位置 ($z=0$), $N_p(0) = N_{p0} = D_0 f_p / V$ 。

2.3 序列长脉冲激光热晕效应的仿真模型验证实验

为验证序列长脉冲激光热晕效应模型的有效性, 开展了序列长脉冲激光热晕效应实验。实验系统光路如图 1 所示。激光器发射波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的脉冲激光, 激光能量的可调范围为 $20 \sim 100 \text{ J}$, 脉冲宽度的可调范围为 $0.1 \sim 3.0 \text{ ms}$ 。激光扩束后经分光镜 S1 透射进入封闭的氨气 (NH_4) 管道, 管道长 1.94 m 。由于 NH_4 本身对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光具有强吸收作用, 激光经过 NH_4 管道时会产生明显的热晕效应。激光通过管道, 被全反射镜 S2 反射至能量计, 能量计用于监测激光能量。利用 CCD 监测光束经 S2 透射端衰减后的光束质量。当测量完管道和 NH_4 透过率之后, 移掉管道前端 S1 及能量计, 以减小光路像差, 光路总长为 3.3 m 。实验中激光扩束后的直径约为 4 cm , 声速渡越时间 $t_v = D/c_s \approx 9.6 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。 $t_p \gg t_v$ 满足长脉冲热晕效应条件。

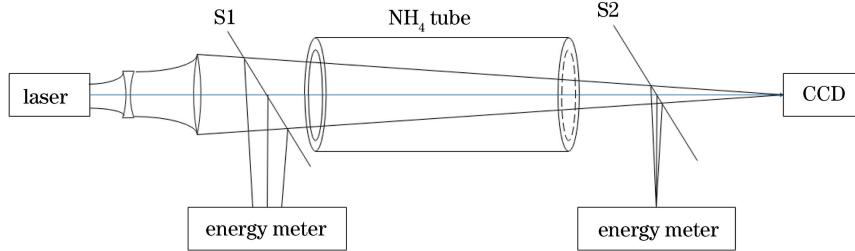


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Diagram of experimental system

在常压下多次测量管道两端激光器的能量, 计算平均值, 得到管道 NH_4 的透过率及管道本身的透过率, 进而得到 NH_4 的吸收系数。计算得到管道玻璃单面透过率为 95.01% , NH_4 的吸收系数为 $8.8 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。光束质量评价采用二阶矩半径扩展倍数, 笛卡儿坐标系下 z 处 x, y 方向的二阶矩半径 ω_x, ω_y 可表示为

$$\omega_x = \sqrt{\frac{\iint (x - \bar{x})^2 I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy}}, \quad (12)$$

$$\omega_y = \sqrt{\frac{\iint (y - \bar{y})^2 I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy}}, \quad (13)$$

式中 $I(x, y, z)$ 为光强分布, \bar{x} 为光斑质心横坐标, \bar{y} 为光斑质心纵坐标。二阶矩半径扩展倍数定义为二阶矩半径与衍射极限下艾里斑大小之比, 即

$$\beta = \frac{\omega}{1.22\lambda f/D}, \quad (14)$$

式中 ω 为 ω_x 或 ω_y , f 为系统焦距。

图 2 给出了激光经管道后 1 s 内的光斑演化情况, 图 2(a1)~(a10) 为第 1~10 个脉冲的实验结果, 图 2(b1)~(b10) 为第 1~10 个脉冲的数值仿真结果, 图中两列光斑具有相同的坐标尺寸。实验中发射能量为 21 J, 脉冲重复频率为 10 Hz, 脉宽为 1 ms。仿真中使用的初始光强分布为漫反射屏测量结果, 光束像差为 5 倍衍射极限, 聚集传输 3.3 m。计算中采用差分算法, 并考虑自然对流效应。实验过程中单脉冲的热畸变参数约为 143.46。

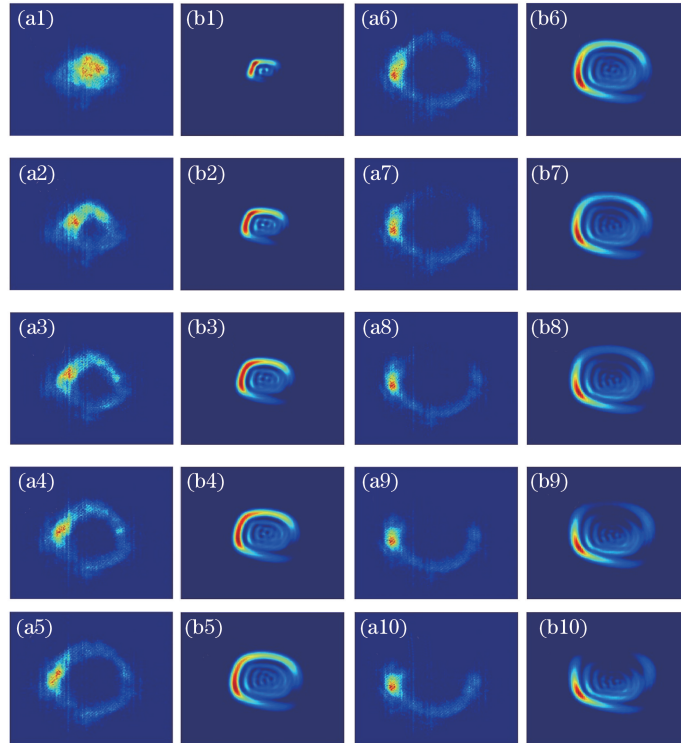


图 2 CCD 上 1 s 内光斑的演化。(a1)~(a10) 实验结果;(b1)~(b10) 为数值仿真结果
Fig. 2 Evolution of light spot on CCD within 1 s. (a1)-(a10) Experimental results;
(b1)-(b10) numerical simulation results

从图 2 中可以看出, 光斑的演化过程基本一致。第 2 个脉冲经过管道时热晕效应显现出来, 光斑呈圆形扩展且随着脉冲数进一步增加逐渐扩大, 这是由脉冲热晕的重叠效应造成的, 后一个脉冲受前一系列脉冲的影响。从第 7 个脉冲开始, 光斑上半部分开始缺失, 原因是 NH_4 吸收激光热量克服重力作用上升的过程中自然对流速度逐渐增加, 光斑向风向上游偏移。

实验和仿真中光斑扩展倍数随脉冲数的变化情况如图 3 所示。从图 3 可以看出, 仿真值与实验值较为一致, 从而验证了序列长脉冲激光热晕模型及仿真算法的可靠性。

3 序列长脉冲激光大气传输定标规律

在建立仿真模型的基础上, 开展了大量的仿真计算。仿真中采用的参数为: 激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 脉宽为 1 ms, 脉冲重复频率范围为 10~200 Hz, 水平聚焦传输距离的范围为 3~7 km, 激光发射孔径为 0.36 m (无系统遮拦), 吸收系数为 0.0082 km^{-1} , 散射系数为 0.073 km^{-1} , 风速为 2~5 m/s。

图 4 给出了不同热畸变参数条件下光斑扩展倍数随热畸变参数的变化, 图中各点为不同传输条件下仿

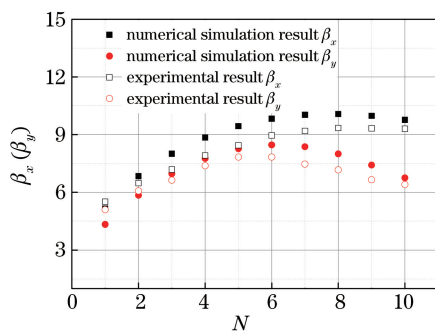


图 3 光斑扩展倍数随激光脉冲数 N 的变化

Fig. 3 Light spot expansion multiple versus laser pulse number N

真程序计算的结果,图中曲线为拟合的结果。从图 4 中可以看出, $N_{D,LX}$ 对 N_{p0} 仍然有一定的依赖性,随着 N_{p0} 的增加,相同的热畸变参数扩展较小,这是由于 $N_{D,LX}$ 描述了热晕效应引起的最大相移,而没有描述热晕效应引起的相位。当脉冲重复频率较低时,热晕效应引起的相位中球差类像差比重较大;相反,当脉冲重复频率较高时,具有重复频率的激光脉冲热晕效应引起的相位成分与连续激光热晕效应引起的相位成分相近,倾斜、像散等削弱了光束质量的扩展。

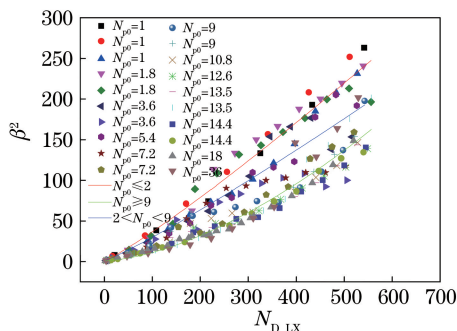


图 4 光斑扩展倍数随热畸变参数的变化

Fig. 4 Light spot expansion multiple versus thermal distortion parameter

由于光斑扩展对 N_{p0} 具有依赖性,将 N_{p0} 分为不同的区间进行分段拟合。序列长脉冲激光热晕效应定标规律为

$$\beta^2 = \begin{cases} 1 + (N_{D,LX}/4.21)^{1.13}, & N_{p0} \leq 2 \\ 1 + (N_{D,LX}/5)^{1.12}, & 2 < N_{p0} < 9 \\ 1 + (N_{D,LX}/24.02)^{1.62}, & N_{p0} \geq 9 \end{cases} \quad (15)$$

4 结 论

针对序列长脉冲激光,提出了衡量序列长脉冲激光热晕效应强度的热畸变参数,建立了序列长脉冲激光热晕效应的数学物理模型,并进行了实验验证。对比分析仿真结果和实验结果,发现二者在光斑形态和大小方面具有较好的一致性,从而验证了序列脉冲热晕效应数学物理模型及仿真算法的可靠性。在此基础上,数值仿真得到由序列长脉冲激光热晕效应引起的光斑扩展与热畸变参数的定量关系,该结果可为实际工程应用提供一定的理论依据和参考。研究主要集中于序列脉冲的热晕效应,实际高能激光在大气中传输时,大气的吸收、散射、湍流等线性效应也是影响激光传输的重要因素。下一步的工作将对线性与非线性热晕综合效应对序列脉冲激光传输的影响规律进行研究。

参 考 文 献

[1] Smith D C. High-power laser propagation: Thermal blooming [J]. Proceedings of the IEEE, 1977, 65(12): 1679-1714.

- [2] Gebhardt F G. Twenty-five years of thermal blooming: An overview[C]. SPIE, 1990, 1221: 2-25.
- [3] Gebhardt F G. High power laser propagation[J]. Applied Optics, 1976, 15(6): 1479-1493.
- [4] Yan Wei, Chen Zhihua, Du Taijiao, *et al.* Numerical simulation of correction thermal blooming based on deformable mirror eigen mode[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1101001.
闫伟, 陈志华, 杜太焦, 等. 基于变形镜本征模式法校正大气热晕的数值模拟[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1101001.
- [5] Wang Yibin, Jin Guangyong, Zhang Wei. Temperature and thermal stress analysis of aluminium alloy plate irradiated by long pulsed laser[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(8): 0802006.
王翼彬, 金光勇, 张巍. 长脉冲激光作用下铝合金板材温度和热应力分析[J]. 中国激光. 2016, 43(8): 0802006.
- [6] Eggins P L, McMordie J A, Dougl A C, *et al.* Thermal blooming of single pulse CO₂ laser radiation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1979, 12: 2063-2077.
- [7] Wu Yi, Wang Yingjian, Wang Chao, *et al.* Experiment research of thermal blooming effect induced by high power laser pulses[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1992, 4(1): 86-91.
吴毅, 王英俭, 汪超, 等. 单脉冲高功率激光热晕效应的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1992, 4(1): 86-91.
- [8] Liu Changling, Hu Xijing, Yuan Yonghua, *et al.* Whole-beam thermal blooming experiments with a long laser pulse [J]. High Power Laser and Particle Beams. 1993, 5(3): 394-404.
刘常龄, 胡熙静, 袁永华, 等. 长脉冲强激光整束热晕实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1993, 5(3): 394-404.
- [9] Sun Zhongtao, Sun Xiaoquan, Zou Jiwei. Numerical analysis of thermal blooming induced by pulsed laser propagation in atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 189-193.
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.
- [10] Aitken A H, Hayes J N, Ulrich P B. Thermal blooming of pulsed focused Gaussian laser beams[J]. Applied Optics, 1973, 12(2): 193-197.
- [11] Buser R G, Rohde R S, Berger P J, *et al.* Transient thermal blooming of single and multiple short laser pulses[J]. Applied Optics, 1975, 14(11): 2740-2746.
- [12] Ageichik A A, Kotyaev O G, Rezunkov Y A, *et al.* Thermal blooming of repetitively-pulsed CO₂-laser radiation propagating in the atmosphere[J]. Journal of Optical Technology, 1999, 66(11): 939-944.
- [13] Wallace J, Lilly J Q. Thermal blooming of repetitively pulsed laser beams [J]. Journal of the Optical Society of America, 1974, 64(12): 1651-1655.
- [14] Clifford S F, Gracheva M E, Gurvich A S. Laser beam propagation in the atmosphere[M]. New York: Springer-Verlag, 1978: 224-280.
- [15] Thomson J A. Stagnation and transonic effects in thermal blooming[J]. Applied Optics, 1977, 16(2): 355-366.
- [16] Smith D C. Thermal defocusing of CO₂ laser radiation in gases[J]. IEEE on Quantum Electronics, 1969, 5(12): 600-606.
- [17] Feng Xuan, Huang Yinbo, Fan Chengyu, *et al.* Numerical model for high energy laser indoor transmission[J]. High Power Laser and 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.