

## 高能激光大气传输光束扩展的定标规律研究

孙兴旺, 张庆, 钟哲强, 张彬\*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

**摘要** 为快速预测和评估高能激光大气传输时湍流和热晕对光束扩展的影响,开展了激光大气传输光束扩展的定标规律研究。通过计算模拟光束扩展随大气特征参量和激光参数的变化规律,建立了含湍流和热晕综合效应的激光大气传输光束扩展的定标关系。由此定标关系可知,当激光的初始光束质量较差时,由衍射和湍流引起的光束扩展随发射系统口径与大气相干长度之比的增大而更快地增强。随着发射系统菲涅耳数的增大,光束扩展受热晕的影响也随之增强。所建立的定标关系适用于不同强度的湍流和热晕效应情况下对不同功率的激光光束扩展规律的快速预测和评估,可为激光系统的设计及优化提供参考。

**关键词** 大气光学; 高能激光; 定标关系; 大气湍流效应; 热晕效应

中图分类号 TN012

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2401008

## Scaling Law for Beam Spreading During High-Energy Laser Propagation in Atmosphere

Sun Xingwang, Zhang Qing, Zhong Zheqiang, Zhang Bin\*

*College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China*

**Abstract** To quickly predict and evaluate the effects of turbulence and thermal blooming on the beam spreading during high-energy laser (HEL) propagation in atmosphere, this study examined the scaling law for the beam spreading during laser propagation in atmosphere. By calculating the variation law of the simulated beam spreading with characteristic parameters of atmosphere and laser parameters, the paper built a scaling relationship for the beam spreading during laser propagation in atmosphere with both the turbulence effect and the thermal blooming effect. This scaling relationship reveals that when the initial beam quality of the laser is poor, the beam spreading caused by diffraction and turbulence grows with the ratio of the aperture of the transmitting system to the atmospheric coherence length at a faster rate. Also, the effect of thermal blooming on beam spreading intensifies as the Fresnel number of the transmitting system increases. The established scaling relationship performs well in rapidly predicting and evaluating the beam spreading laws of lasers with different powers under turbulence and thermal blooming effects of different intensities. Therefore, it can provide a reference for the design and optimization of laser systems.

**Key words** atmospheric optics; high-energy laser; scaling relationship; atmospheric turbulence effect; thermal blooming effect

## 1 引言

目前,人们对激光在大气传输过程中的湍流、跟踪抖动和热晕等已经有了较为成熟的处理方法和规律性认识<sup>[1-6]</sup>。为了对激光经过大气传输后的光束质量退化情况进行快速预测和评估,国内外学者已针对激光大气传输特性评价参数、大气特征参量和激光参数之

间的定量关系开展了大量的探索。Smith<sup>[1]</sup>和Gebhardt<sup>[7]</sup>分别给出了高能激光经过湍流、热晕相互作用后光束峰值强度的经验公式。黄印博等<sup>[8]</sup>给出了含湍流和跟踪抖动的激光大气传输光束扩展的定标关系,并定性讨论了系统衍射角和湍流强度对含跟踪抖动的激光大气传输光束扩展规律的影响。随后,黄印博等<sup>[9]</sup>在Smith<sup>[1]</sup>工作的基础上定性地讨论了发射系

收稿日期: 2022-06-21; 修回日期: 2022-07-18; 录用日期: 2022-07-22

基金项目: 国家重大专项应用基础项目(JG2020376)、国家重点研发计划(2021YFC2202203)、中国科学院自适应光学重点实验室基金(LAOF1801)

通信作者: \*zhangbinff@sohu.com

统菲涅耳数对含热晕的高能激光大气传输光束扩展的影响。2007年,乔春红等<sup>[10]</sup>给出了氟化氙激光经过含湍流和热晕的大气传输后光束扩展的定标关系,并在文献[11]中讨论了在不同强度湍流效应下含热晕的高能激光大气传输光束扩展的定标关系。

然而,实际大气传输环境较为复杂,激光经大气传输后的光束质量退化机理会由于大气特征参量和激光参数的变化而不尽相同<sup>[12-18]</sup>。因此,在处理不同大气特征参量和激光参数条件下的光束质量退化问题时,使用现有的定标关系进行定量描述尚存在一定困难。目前,国内外关于描述大气特征参量、激光参数和激光大气传输特性评价参数之间的定量关系的公开报道并不多,且相关研究给出的也多为定性或半定量的结论<sup>[8,14-18]</sup>。

本文基于高能激光大气传输数值仿真模型,对多种典型传输参数条件下高能激光大气传输特性进行数值模拟和比较分析,进而展开大气特征参量和激光参数等与光束扩展的定标规律研究。

## 2 理论分析

通常而言,高能激光通过大气聚焦传输后在远场的光束质量退化情况可以采用表征焦面上光束扩展倍数的光束质量因子等评价参数进行有效的描述。

对于焦面处的光束扩展情况,一般采用均方和半径的分析方法<sup>[2,8]</sup>进行描述较为方便,激光经过大气传输后的光束质量因子 $\beta$ 可以表示为

$$\beta^2 = \beta_D^2 + \beta_T^2 + \beta_I^2 + \beta_W^2, \quad (1)$$

式中: $\beta_D$ 为光束质量因子,表征衍射引起的光束扩展; $\beta_T$ 为光束质量因子,表征湍流引起的光束扩展; $\beta_I$ 为光束质量因子,表征跟踪抖动引起的光束扩展; $\beta_W$ 为光束质量因子,表征热晕引起的光束扩展。在假定湍流和热晕的作用是相互独立的基础上<sup>[10]</sup>,式(1)可以进一步写成如下形式<sup>[11]</sup>:

$$\beta^2 = \beta_0^2 + (D/r_0)^2 + 3(\sigma_f/\sigma_d)^2 + [(N_D/5.56) + 0.7(N_D/5.56)^{1.50}], \quad (2)$$

式中: $\sigma_f$ 是发射系统的单轴跟踪抖动误差,通常小于 $10 \mu\text{rad}$ <sup>[9]</sup>; $\sigma_d$ 是在理想条件下发射系统的光束衍射角<sup>[2]</sup>,满足

$$\sigma_d^2 = \left( \frac{m'\beta_0\lambda}{2r_m} \right)^2, \quad (3)$$

式中: $\beta_0$ 为初始光束质量因子; $\lambda$ 为激光波长; $r_m = D/2$ 为发射系统半径; $m' = 0.92$ <sup>[2]</sup>。 $r_0$ 为大气相干长度<sup>[2]</sup>,其表达式为

$$r_0 = 2.10 \left[ 1.45k^2 \int_0^L C_n^2(Z) \left( \frac{L-Z}{L} \right)^{5/3} dZ \right]^{-3/5}, \quad (4)$$

式中: $L$ 为激光传输距离; $C_n^2$ 为折射率结构常数; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; $Z$ 为传输距离在 $0 \sim L$ 之间的积分变量。 $N_D$ 为Bradley-Herrmann热畸变参数<sup>[19]</sup>,通常用于度量热晕强度,热晕效应越强则 $N_D$ 值越大,在不考虑光束

旋转和扫描时,其表达式为

$$N_D = \frac{4\pi\sqrt{2}C_0}{\lambda} \int_0^L \frac{\alpha(Z) \left[ P \exp \left( - \int_0^Z \epsilon(z') dz' \right) \right]}{[v \cdot D(Z)]} dZ, \quad (5)$$

式中: $C_0 = 1.66 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{J}$ ; $\lambda$ 为激光波长; $L$ 为激光传输距离; $P$ 为激光发射功率; $\alpha$ 为大气吸收系数; $\epsilon$ 为消光系数; $v$ 为风速; $D(Z)$ 为光束直径,在假定湍流与热晕的作用相互独立的基础上, $D(Z)$ 可近似看作是发射系统口径 $D$ <sup>[11,20]</sup>。

值得注意的是,式(2)是在 $1.3 \sim 3.8 \mu\text{m}$ 激光波长范围、初始光束质量因子小于4.3且不考虑发射系统菲涅耳数对光束扩展影响的条件下得出的平均值<sup>[11]</sup>。然而,在实际激光大气传输中,光束扩展速率与激光波长、初始光束质量因子和发射系统菲涅耳数( $N_F = D^2/\lambda L$ )等参数密切相关<sup>[8,17]</sup>。因此,用以表征光束扩展速率的拟合系数应是和激光参数等相关的函数,而将其简单地视为一个常数并不十分合理。基于上述考虑,提出了含衍射、湍流、跟踪抖动和热晕的激光大气传输光束扩展规律的关系式:

$$\beta^2 = \beta_0^2 + A_1(D/r_0)^2 + B_1(\sigma_f/\sigma_d)^2 + (N_D/N_{0t}) + 0.7(N_D/N_{0t})^{1.50}, \quad (6)$$

式中: $A_1$ 、 $B_1$ 和 $N_{0t}$ 分别为衍射及湍流、跟踪抖动和热晕引起的光束扩展速率的拟合系数,均是受激光参数影响的函数。式(6)等号右边第一、二项表征衍射及湍流引起的光束扩展<sup>[12]</sup>,第三项表征跟踪抖动引起的光束扩展<sup>[9]</sup>,第四、五项表征热晕引起的光束扩展<sup>[10,21]</sup>。

针对所提出的定标关系[式(6)],采用数值模拟的方法验证这一定标关系的可行性和准确性,并研究与拟合系数 $A_1$ 、 $B_1$ 和 $N_{0t}$ 有关的主要参数及其定量关系。

## 3 数值模拟结果及讨论

在数值模拟中,选取多种典型的传输参数,主要包括:发射系统口径 $D$ 分别为 $0.4 \text{ m}$ 、 $0.5 \text{ m}$ 、 $0.6 \text{ m}$ 、 $0.7 \text{ m}$ 和 $0.8 \text{ m}$ ;激光波长 $\lambda$ 的取值范围为 $0.35 \sim 9.00 \mu\text{m}$ ;激光传输距离 $L$ 的取值范围为 $1 \sim 12 \text{ km}$ ;初始光束质量因子 $\beta_0$ 的取值范围为 $1.0 \sim 20.0$ ;发射系统的菲涅耳数 $N_F$ 的取值范围为 $5 \sim 140$ ;横向平均风速 $v$ 分别为 $2 \text{ m/s}$ 和 $5 \text{ m/s}$ ;大气吸收系数 $\alpha$ 分别为 $3.3 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ;折射率结构常数 $C_n^2$ 的取值范围为 $6.4 \times 10^{-17} \sim 5.0 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 。为提高仿真计算的准确性,文中数值计算结果均为经过100次激光大气传输后在焦面处长曝光的统计结果。同时,以数值计算结果与所建立的光束扩展定标关系式得到的预测结果之间的相对误差小于 $15\%$ <sup>[22-23]</sup>为标准,评价所建立的定标关系式的适用性。

### 3.1 含衍射、湍流的激光大气传输光束扩展规律

在仅考虑衍射和大气湍流的条件下,采用最小二乘法<sup>[9,11]</sup>得到了表征含衍射、湍流的激光大气传输光束扩展速率的拟合系数 $A_1$ 与初始光束质量因子 $\beta_0$ 、激光

波长  $\lambda$  的关系, 结果如图 1 所示。图 1 中,  $\beta_{in}$  为光束质量因子, 表征衍射和湍流等线性效应引起的光束扩展,

$D/r_0$  的变化是通过改变折射率结构常数  $C_n^2$  和激光传输距离  $L$  而实现的<sup>[11,19]</sup>。

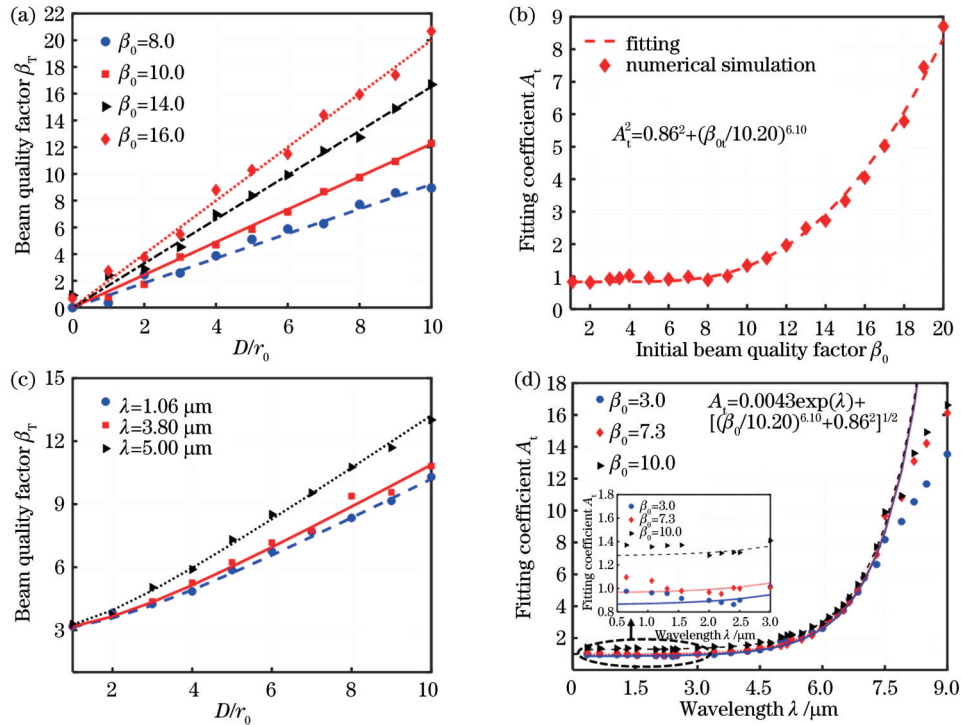


图 1 拟合系数  $A_t$  分别随初始光束质量因子  $\beta_0$  和激光波长  $\lambda$  的变化。(a) 不同初始光束质量因子条件下光束扩展随  $D/r_0$  的变化; (b) 拟合系数  $A_t$  随初始光束质量因子  $\beta_0$  的变化; (c) 不同激光波长  $\lambda$  下光束扩展随  $D/r_0$  的变化; (d) 初始光束质量因子分别为 3.0、7.3 和 10.0 时拟合系数  $A_t$  随激光波长  $\lambda$  的变化

Fig. 1 Variation of fitting coefficient  $A_t$  with initial beam quality factor  $\beta_0$  and wavelength  $\lambda$ . (a) Beam spreading for different beam quality factor  $\beta_0$  with  $D/r_0$ ; (b) variation of fitting coefficient  $A_t$  with initial beam quality factor  $\beta_0$ ; (c) beam spreading for different wavelength  $\lambda$  with  $D/r_0$ ; (d) variation of fitting coefficient  $A_t$  with  $\lambda$  for initial beam quality factor  $\beta_0$  of 3.0, 7.3, and 10.0

在图 1(a) 中, 激光波长为 1.06  $\mu\text{m}$ , 发射系统口径为 0.6 m。图 1(a) 表明, 当激光的初始光束质量较差时, 由湍流引起的光束扩展随发射系统口径与大气相干长度之比的增大而更快地增强。在图 1(a) 计算参数的基础上, 只改变初始光束质量因子, 进一步分析表征激光大气湍流传输光束扩展速率的拟合系数  $A_t$  与初始光束质量因子的关系, 得到的结果如图 1(b) 所示。从图 1(b) 可以发现, 光束扩展速率随着初始光束质量因子的增大而单调增加, 这表明当激光的初始光束质量越差时, 激光经过大气湍流传输后的光束质量退化情况越严重。在图 1(c) 中, 激光传输距离为 2 km, 初始光束质量因子为 3.0, 进一步改变传输距离从而实现  $D/r_0$  的变化。图 1(c) 表明, 当激光波长增大, 由衍射及湍流引起的光束扩展随发射系统口径与大气相干长度之比的增大更快地增强。在图 1(c) 计算参数的基础上, 分别取初始光束质量因子为 3.0、7.3 和 10.0, 通过改变激光波长进一步分析表征激光大气湍流传输光束扩展速率的拟合系数  $A_t$  与激光波长的关系, 如图 1(d) 所示, 其中插图短波长范围 ( $\lambda \leq 3.0 \mu\text{m}$ ) 内拟合系数  $A_t$  随波长的变化关系。分析图 1(d) 可知, 当激光波长  $\lambda \leq 3.0 \mu\text{m}$  时, 激光大气湍流传输光束扩展速率随着波长的变化并不明显, 当激光

波长范围为 3.0  $\mu\text{m} \sim 7.5 \mu\text{m}$  时, 光束扩展速率单调增大, 特别是当激光波长超过 5.0  $\mu\text{m}$  时, 激光大气湍流传输光束的扩展速率随着波长的增大而迅速增加。分析其原因在于: 当  $\lambda \leq 3.0 \mu\text{m}$  时, 短波长激光受湍流的影响较大, 但同时短波长激光的衍射效应相对较弱, 致使这一波长范围内存在二者的综合抗衡效应<sup>[18]</sup>, 光束扩展速率的变化随着波长的变化并不十分明显。然而, 随着激光波长的继续增加 ( $3.0 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 7.5 \mu\text{m}$ ), 这一抗衡效应逐渐减弱。同时, 根据式 (4), 当  $D/r_0$  一定时, 对于给定的折射率结构常数  $C_n^2$ , 激光波长越长, 相应的激光传输距离  $L$  越大, 而激光在更长距离的大气湍流传输时, 其光束会表现出更快速地扩展, 特别是当激光波长超过 5.0  $\mu\text{m}$  时, 这一现象更为明显。

进一步分析图 1 可知, 当激光波长  $\leq 7.5 \mu\text{m}$  时, 采用最小二乘法得到的拟合关系式均能与数值模拟结果很好地吻合。当激光波长  $\lambda > 7.5 \mu\text{m}$  时, 数值计算结果与由所构建的定量关系得到的预测值之间的相对误差均大于 15%, 使用该定标关系式描述含衍射、湍流的激光大气传输光束扩展速率随激光参数的变化规律将不再准确。于是, 表征含衍射、湍流的激光大气传输光束扩展速率的拟合系数  $A_t$  与激光波长及初始光束质量因子的定量关系可以表示为



$$A_1 = 0.0043 \exp(\lambda) + \left[ (\beta_0 / 10.20)^{6.10} + 0.86^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

式(7)的激光波长单位是  $\mu\text{m}$ , 适用波长范围是  $\lambda \leq 7.5 \mu\text{m}$ 。

### 3.2 含跟踪抖动的激光大气传输光束扩展规律

在实际发射系统中,通常不可避免地会存在跟踪抖动的影响<sup>[9,24]</sup>。分别取单轴跟踪抖动误差  $\sigma_i$  为  $1.0 \mu\text{rad}$ 、 $2.0 \mu\text{rad}$ 、 $3.0 \mu\text{rad}$ 、 $5.0 \mu\text{rad}$ 、 $7.0 \mu\text{rad}$ 、 $9.0 \mu\text{rad}$  和  $10.0 \mu\text{rad}$ <sup>[9]</sup>,模拟得到不同激光波长和初始光束质量因子对应的拟合系数  $B$  的均值,如表1所示。

表1 不同波长  $\lambda$  和初始光束质量因子  $\beta_0$  条件下跟踪抖动项系数  $B$  的值

Table 1 Values of tracking jitter term coefficient  $B$  for different wavelength  $\lambda$  and initial beam quality factor  $\beta_0$

$\lambda / \mu\text{m}$	0.44	0.65	1.06	1.32	2.20	3.80
$\beta_0=1.0$	8.17	8.84	7.62	5.14	8.40	6.77
$\beta_0=2.0$	7.04	7.27	6.50	8.11	6.97	5.51
$\beta_0=2.3$	5.12	6.10	6.83	6.14	6.29	8.47
$\beta_0=3.0$	5.90	6.50	7.60	6.04	6.30	7.33
$\beta_0=4.3$	7.58	6.45	8.35	5.60	6.81	6.64
$\beta_0=5.3$	7.80	7.89	5.06	6.96	6.83	7.44

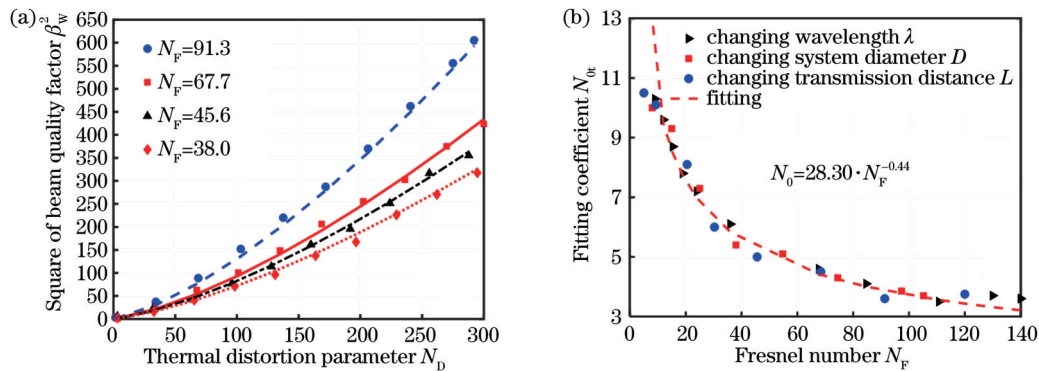


图2 光束扩展随热畸变参数  $N_D$  的变化和拟合系数  $N_{0t}$  随发射系统菲涅耳数  $N_F$  的变化。(a)不同菲涅耳数  $N_F$  条件下光束扩展随热畸变参数  $N_D$  的变化;(b)拟合系数  $N_{0t}$  与发射系统菲涅耳数  $N_F$  的定量关系

Fig. 2 Beam spreading varying with thermal distortion parameter  $N_D$  and variation of fitting coefficient  $N_{0t}$  with Fresnel number  $N_F$  of transmission system. (a) Beam spreading for different Fresnel number  $N_F$  varying with thermal distortion parameter  $N_D$ ; (b) quantitative relation between fitting coefficient  $N_{0t}$  and Fresnel number  $N_F$  of transmission system

图2(a)中热畸变参数  $N_D$  是通过改变激光传输距离和激光功率来改变的<sup>[11]</sup>。可以看出,当发射系统菲涅耳数较大时,由热晕引起的光束扩展随着热畸变参数的增大而变得更快,这与文献[8,25]的结论是一致的。在图2(a)计算参数的基础上,通过改变发射系统口径、激光传输距离和激光波长,进一步模拟得到拟合系数  $N_{0t}$  与发射系统菲涅耳数之间的定量关系,如图2(b)所示。可以看出,当发射系统菲涅耳数  $N_F$  的范围为  $8 \leq N_F \leq 110$  时,采用最小二乘法得到的拟合表达式与数值模拟结果可以较好地吻合,含热晕的激光大气传输光束扩展速率的拟合系数  $N_{0t}$  与发射系统菲涅耳

分析表1可以发现,由跟踪抖动引起的光束扩展项系数  $B$  在激光波长范围为  $0.44 \sim 3.80 \mu\text{m}$  和初始光束质量因子范围为  $1.0 \sim 5.3$  条件下的变化并不明显。随着激光波长的继续增加,系统衍射角  $\sigma_d$  也在持续增大,因此,在其他传输条件不变的情况下,由跟踪抖动引起的光束扩展  $B(\sigma_i/\sigma_d)^2$  对焦平面处总的光束扩展的贡献相对减小。例如,当  $\sigma_i = 10.0 \mu\text{rad}$ 、 $D = 0.6 \text{ m}$ 、 $D/r_0 = 10$  时,激光波长由  $0.44 \mu\text{m}$  增加到  $3.80 \mu\text{m}$ ,所对应的光束扩展  $(\sigma_i/\sigma_d)^2$  分别从  $11.1^2$  下降到  $1.3^2$ ,其对焦平面处光束扩展的贡献占比从  $57.3\%$  下降到  $1.8\%$ 。随着激光波长的增加,由于系数  $B$  的选取而造成的误差也减小。同理,随着初始光束质量因子的增加,由跟踪抖动引起的光束扩展占总体光束扩展的比值也越来越小,相应系数  $B$  的取值误差的影响也相对越来越小。

基于上述考虑,系数  $B$  受传输参数的影响并不十分明显,可以近似为一个常数。因此,对表1中数据再次求平均值,得  $B = 6.93$ 。

### 3.3 含热晕的激光大气传输光束扩展规律

高能激光在大气中传输时,不仅会受到大气湍流的影响,还会由于激光加热大气而出现非线性热晕效应<sup>[8,21]</sup>。进一步开展了含热晕的激光大气传输光束扩展的规律分析,得到了表征含热晕的激光大气传输光束扩展速率的拟合系数  $N_{0t}$  与发射系统菲涅耳数  $N_F$  的定量关系,如图2所示。

数的定量关系可以表示为

$$N_{0t} = 28.3 N_F^{-0.44}. \quad (8)$$

当发射系统菲涅耳数  $< 8$  或  $> 110$  时,数值计算结果与式(8)得到的预测值之间的相对误差均大于  $15\%$ ,因此,使用式(8)描述含热晕的激光大气传输光束扩展速率随发射系统菲涅耳数的变化规律将不再准确。

式(8)表明,随着发射系统菲涅耳数的增大,光束聚焦能力随之增强,激光在大气中传输时受热晕的影响也随之加重,尤其是在强热晕条件下,不同发射系统菲涅耳数对应的这种传输效果差异性更为明显。

### 3.4 光束扩展定标关系式及其验证

综上所述,本文所提出的含衍射、湍流、跟踪抖动

和热晕的激光大气传输在焦平面处 63.2% 环围功率半径内的光束扩展定标关系式为

$$\beta^2 = \beta_0^2 + \left\{ 0.0043 \exp(\lambda) + \left[ \left( \beta_0 / 10.20 \right)^{6.10} + 0.86^2 \right]^{1/2} \right\} (D/r_0)^2 + 6.93 (\sigma_r / \sigma_d)^2 + N_D / (28.3 N_F^{-0.44}) + 0.7 \left[ N_D / (28.3 N_F^{-0.44}) \right]^{1.50}. \quad (9)$$

为进一步验证所建立激光大气传输的光束扩展定标关系式[式(9)]的有效性,选取多种典型传输参数进行数值模拟,并将模拟结果分别与本文定标关系式和文献[11]结果进行了分析和对比,典型结果如图3所

示。图3(a)、(b)为单独考虑衍射及湍流时光束扩展的结果,图3(c)、(d)分别为含湍流和热晕时在弱湍流和强湍流环境下光束扩展的结果。

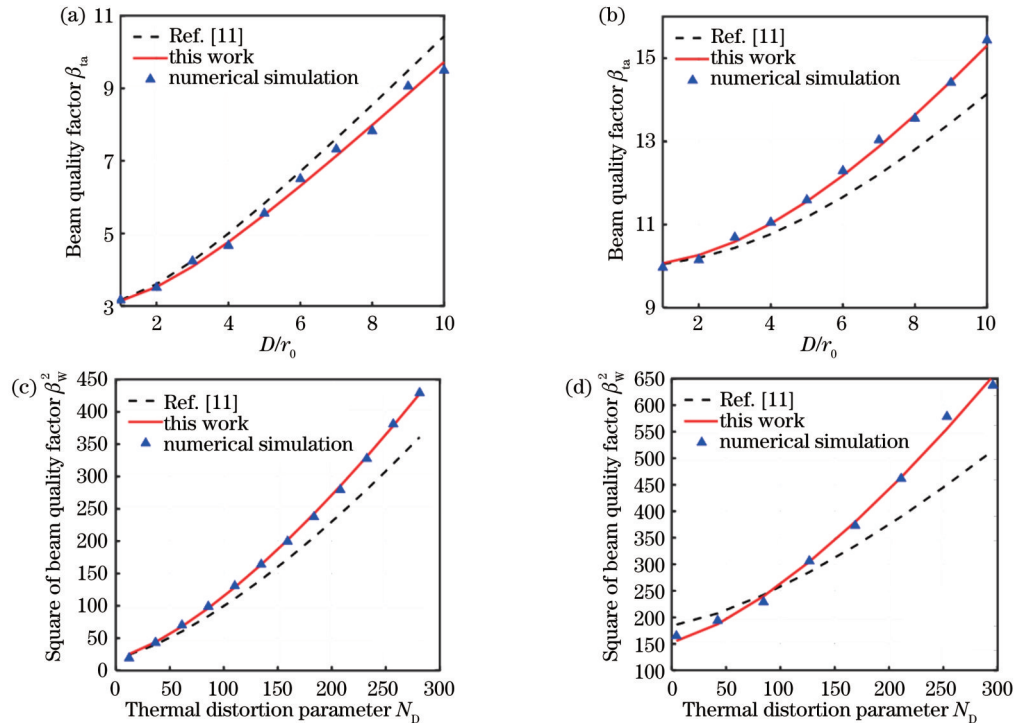


图3 多组典型传输条件下本文所建立的定标关系式与文献结果拟合效果对比。(a)  $\lambda=0.65 \mu\text{m}, \beta_0=3.0$ ; (b)  $\lambda=1.31 \mu\text{m}, \beta_0=10.0$ ; (c)  $N_F=48.5, D/r_0=1.7$ ; (d)  $N_F=84.7, D/r_0=8.6$

Fig. 3 Comparison of fitting effects between this paper and the literature under multiple typical transmission conditions.

(a)  $\lambda=0.65 \mu\text{m}, \beta_0=3.0$ ; (b)  $\lambda=1.31 \mu\text{m}, \beta_0=10.0$ ; (c)  $N_F=48.5, D/r_0=1.7$ ; (d)  $N_F=84.7, D/r_0=8.6$

由图3(a)、(b)可以看出,在弱湍流环境下,本文建立的光束扩展定标关系式和文献结果均能与数值模拟结果较好地吻合。然而,随着湍流效应的增强,本文所建立的定标关系式依然与数值模拟结果保持较好地吻合,而文献结果却与数值模拟结果的偏差逐渐增大。

分析图3(c)、(d)可以发现,在弱湍流环境下,随着热晕效应的增强,文献结果与数值计算结果的偏差逐渐增大。在强湍流环境下,文献结果与数值计算结果的偏差先减小,  $N_D \geq 100.0$  时逐渐增大,且与弱湍流环境相比,强湍流环境下文献结果与数值模拟结果的偏差更大,尤其是在热晕效应较强 ( $N_D \geq 100.0$ ) 时这种偏差更为明显。然而,所提出的定标关系式在不同湍流强度下均能与数值模拟结果较好地吻合。具体来说,在强湍流环境下,当  $N_D \geq 100.0$  时,文献结果与数值模拟结果的相对平均偏差达 7.0%,而对于本文所

建立的定标关系式,这一偏差下降到了 1.5%。由此可见,本文提出的定标关系式对激光大气传输的光束扩展预测和评估效果有了较为明显的提升。

进一步分析图3可知,在多种典型传输参数条件下,所建立的激光大气传输光束扩展定标关系式均可以对激光大气综合效应产生的光束扩展情况进行快速、准确的描述。

## 4 结 论

基于Kolmogorov湍流理论,针对多种典型大气传输参数条件,通过大量的高能激光大气传输数值模拟及分析比较,明确了影响高能激光大气传输光束扩展规律的主要因素。结果发现,含湍流、热晕等的激光大气传输光束扩展规律受激光波长、初始光束质量因子和发射系统菲涅耳数的影响较为明显。激光的初始光

束质量因子越大,由衍射和湍流引起的光束扩展速率越快。发射系统的菲涅耳数越大,光束聚焦能力越强,激光在大气中传输时受热晕的影响也更加严重。在此基础上,提出了含湍流和热晕的激光大气传输光束扩展的定标关系式,用于在多种典型传输参数条件下对高能激光大气传输综合效应及其引起的光束扩展的快速、准确的预测和评估,从而可为高能激光系统的设计及优化提供有用参考。

## 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] Breaux H, Evers W, Sepucha R, et al. Algebraic model for cw thermal-blooming effects[J]. Applied Optics, 1979, 18(15): 2638-2644.
- [3] Cai Y J, Chen Y T, Eyyuboğlu H T, et al. Scintillation index of elliptical Gaussian beam in turbulent atmosphere[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2405-2407.
- [4] Li J S, Kang J C, Chen S P, et al. Research on beam expansion characteristic of supercontinuum laser in atmospheric turbulence[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12169: 12169AU.
- [5] 邓凌, 李晓庆, 穆轶, 等. 风控热晕下椭圆激光光束质量的优化研究[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0405001.  
Deng L, Li X Q, Mu Y, et al. Beam quality optimization of elliptical laser under wind-dominated thermal blooming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0405001.
- [6] 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.
- [7] Gebhardt F G. High power laser propagation[J]. Applied Optics, 1976, 15(6): 1479-1493.
- [8] 黄印博, 王英俭. 跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 152-156.  
Huang Y B, Wang Y J. The effect of tracking jitter on the beam spreading induced by atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(2): 152-156.
- [9] 黄印博, 王英俭. 聚焦光束大气传输光束扩展定标规律的数值分析[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6715-6719.  
Huang Y B, Wang Y J. Numerical analysis of the scaling laws about focused beam spreading induced by the atmosphere[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6715-6719.
- [10] 乔春红, 范承玉, 王英俭. 氟化氙激光大气传输的定标规律[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(12): 1965-1969.  
Qiao C H, Fan C Y, Wang Y J. Scaling laws about DF high energy laser propagation in real atmosphere[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 1965-1969.
- [11] 乔春红, 范承玉, 黄印博, 等. 高能激光大气传输的定标规律[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 433-437.  
Qiao C H, Fan C Y, Huang Y B, et al. Scaling laws of high energy laser propagation through atmosphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 433-437.
- [12] 石小燕, 王英俭, 黄印博. 发射系统遮拦比对均强聚焦光束光斑扩展的影响[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(12): 1181-1183.  
Shi X Y, Wang Y J, Huang Y B. Numerical analysis on the uniform focused beam spreading induced by atmosphere turbulence with different obscuring ratio[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2003, 15(12): 1181-1183.
- [13] 李玉杰, 钱仙妹, 朱文越, 等. 高能固态激光非Kolmogorov湍流大气传输光斑扩展的数值分析[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0601002.  
Li Y J, Qian X M, Zhu W Y, et al. Numerical analysis of beam spreading of high-power solid laser propagation through non-Kolmogorov turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0601002.
- [14] 张鹏飞, 乔春红, 冯晓星, 等. 序列长脉冲激光热晕效应的定标规律[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001001.  
Zhang P F, Qiao C H, Feng X X, et al. Scaling laws of thermal blooming effect of repetitively long pulse laser[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1001001.
- [15] 杨宁, 赵亮, 许颖, 等. 径向偏振部分相干扭曲光束在各向异性大气湍流中的传输特性[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2103001.  
Yang N, Zhao L, Xu Y, et al. Propagation characteristics of radially polarized partially coherent twisted beam in anisotropic atmospheric turbulence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2103001.
- [16] 李成强, 王挺峰, 张合勇, 等. 光源参数及大气湍流对电磁光束传输偏振特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(10): 104201.  
Li C Q, Wang T F, Zhang H Y, et al. Effect of source parameters on polarization characteristics of electromagnetic beam propagating in atmospheric turbulence[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(10): 104201.
- [17] 陆璐, 季小玲, 邓金平, 等. 非Kolmogorov大气湍流对高斯阵列光束扩展的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014207.  
Lu L, Ji X L, Deng J P, et al. Influence of non-Kolmogorov turbulence on the spreading of Gaussian array beams[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014207.
- [18] 钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中. 地空激光大气斜程传输湍流效应的数值模拟分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 787-792.  
Qian X M, Zhu W Y, Rao R Z. Numerical simulation of turbulent effects of laser propagation along a ground-space slant atmospheric path[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 787-792.
- [19] 何武光. 光电对抗中的激光大气传输仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.  
He W G. Simulation study on laser propagation through the atmosphere in optoelectronic countermeasures[D].

- Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [20] 乔春红, 范承玉, 王英俭, 等. 高能激光大气传输的仿真实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(11): 1811-1816.
- Qiao C H, Fan C Y, Wang Y J, et al. Simulation experiment of high energy laser propagation in the atmosphere[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(11): 1811-1816.
- [21] 朱文越, 钱仙妹, 饶瑞中, 等. 高能激光大气传输性能评估技术[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 19-30.
- Zhu W Y, Qian X M, Rao R Z, et al. Evaluation technology of high energy laser atmospheric propagation performance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(12): 19-30.
- [22] 黄印博, 王英俭. 激光传输大气参量测量精度要求的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 720-724.
- Huang Y B, Wang Y J. Effect of the measurement errors of atmospheric parameters on the laser propagation effects [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 720-724.
- [23] 朱文越, 王辉华, 陈小威, 等. 高能激光大气传输评估的不确定性研究[J]. 量子电子学报, 2020, 37(5): 524-533.
- Zhu W Y, Wang H H, Chen X W, et al. Uncertainty analysis of evaluation of high power laser propagation in atmosphere[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2020, 37(5): 524-533.
- [24] 杨欣欣, 王继红, 任戈. 湍流大气传输中跟踪抖动对远场影响的仿真研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(6): 5-11.
- Yang X X, Wang J H, Ren G. Simulation study on influence of tracking jitter on far field in turbulent atmospheric transmission[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(6): 5-11.
- [25] 吴书云. 激光大气传输热晕效应及自适应光学校正的数值仿真和实验研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2020.
- Wu S Y. Numerical simulation and experimental study for effects of thermal blooming on laser propagation in the atmosphere and compensation with adaptive optics[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020.