

大功率 TEA CO₂ 激光远场发散角评估方法

张 阔¹, 陆 君², 杨贵龙¹, 陈 飞¹, 李殿军¹, 郑长彬¹, 郭 劲¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

摘 要: 在大功率激光远距离定向传输中, 远场发散角是衡量其性能的一个重要参量。大功率 TEA CO₂ 激光具有功率高、光束直径大等特点, 常规手段无法准确测量其远场发散角。为解决该难题, 提出了一种利用激光光斑尺寸拟合分析法来评估大功率 TEA CO₂ 激光的远场发散角。首先, 从理论上推导大 Fresnel 数多模高斯激光束远场发散角, 分析了影响激光束发散角的主要因素; 然后, 采用光斑烧蚀法试验测量近场 (≤ 20 m) 光斑数据, 基于光束质量 (M^2) 因子理论拟合得出了激光光束质量和束腰大小, 从而推导出激光束远场发散角; 最后, 对比分析了以上两种方法的计算结果, 讨论了结果存在偏差的原因。结果表明, 近场光斑数据拟合法可准确、便捷地测量大功率 TEA CO₂ 激光束远场发散角。

关键词: 大功率 TEA CO₂ 激光; 远场发散角; 激光光斑; 光束质量

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2286-06

Estimation of far-field divergence of high power TEA CO₂ laser

Zhang Kuo¹, Lu Jun², Yang Guilong¹, Chen Fei¹, Li Dianjun¹, Zheng Changbin¹, Guo Jin¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction With Matter, Changchun Institute of Optic, Fine Mechanic and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China; 2. The Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085, China)

Abstract: In the application of high-power laser long distance transmission, the far-field divergence is the one of important parameters to evaluate the laser performance. Conventional methods cannot be used to measure the far field divergence precisely because of the unique characteristics of TEA CO₂ laser, such as high average power, high peak power and large beam size. In order to solve this problem, a fitting analysis method was proposed to estimate the far field divergence of high power TEA CO₂ laser. Firstly, the far-field divergence of multimode Gaussian laser with large Fresnel number was calculated theoretically. Then, the near-field beam size (≤ 20 m) was measured experimentally using a spot ablated method, and the beam quality and waist radius were calculated based on the M^2 factor, and furthermore the far-field divergence was deduced. Finally, the results of these two methods were compared, and the deviation between the results was also discussed. It is indicated that the fitting method based on the experimental data is available to accurately evaluate the far-field beam divergence of high power TEA CO₂ laser.

Key words: high power TEA CO₂ laser; far field divergence; laser spot; beam quality

收稿日期: 2014-12-21; 修订日期: 2015-01-25

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室自主研究课题 (SKLLIM1413)

作者简介: 张阔 (1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事高功率气体激光器方面的研究。Email: zhangkuo1104@163.com

0 引言

大功率重频 TEA CO₂ 激光器广泛应用于科研、工业加工和国防等领域^[1-2]。其出射激光位于9~11 μm 波段,处于大气传输窗口,是激光远距离定向传输的理想光源^[3]。激光光束远场发散角表征激光器作用距离远近和远场能量密度大小,是衡量激光器远距离传输的一个重要参量,因此,准确测量大功率激光光束的远场发散角具有非常重要的实际意义。

激光光束发散角需要通过测量激光光斑尺寸推算求得。目前,常用的发散角测量方法有聚焦法、刀口法和探测器法^[4-5]。聚焦法是将激光光束经透镜聚焦后,测量焦点位置的激光光斑尺寸,然后根据聚焦透镜焦距计算得出远场发散角。刀口法采用透镜将光束束腰置换到腔外,利用 90/10 刀口法对不同位置输出激光功率分别为 90% 和 10% 的光斑进行测量,通过对测试数据拟合得到激光束腰,进而求得激光光束发散角。探测器法则通过探测器测量不同位置的光斑大小,通过计算得到聚焦后的发散角,由此反推聚焦前的发散角^[6]。由于大功率 TEA CO₂ 激光器的平均功率和峰值功率均远高于刀口和探测器的损伤阈值,以上几种方法并不适于测量大功率 TEA CO₂ 激光远场发散角。为解决此问题,一些研究人员提出了间接的测量方法,避免直接探测激光光斑,而采用漫反射板等装置,利用长波相机等探测设备对漫反射板的光斑进行成像,根据采集的光斑尺寸计算光束发散角^[7-9]。这种方法要求相机成像前要经过足够的衰减,将接收的激光功率降低至其探测器的损伤阈值以下,然而,测量结果的准确性不仅受到探测设备精度的影响,而且该方法对激光功率有非常严格限制,当激光功率超过所用探测设备量程时,则不再适用,且容易将探测器损伤。

为解决此难题,文中提出一种用于评估大功率 TEA CO₂ 激光光束远场发散角的方法。首先,理论上推导并分析多模高斯光束远场发散角的影响因素;然后,试验上利用光斑烧蚀法测量大功率重频 TEA CO₂ 激光光束近场光斑的变化情况;最后,对比激光光束远场发散角理论推导和试验数据拟合结果,验证两种方法计算大功率激光光束远场发散角的有效性。在此基础上,分析两种方法计算结果存在的偏差

及原因。

1 多模激光远场发散角理论分析

1.1 多模激光远场发散角理论计算

大功率 TEA CO₂ 激光器是多模激光输出。为计算多模激光光束远场发散角,首先需要确定基模激光的远场发散角。

根据激光远场发散角定义,基模激光远场发散角可表示为:

$$\theta_{1/e^2} = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2\omega(z)}{z} \quad (1)$$

其中, z 表示测试点与激光光束束腰间的距离; $\omega(z)$ 为不同测试点的基模激光光斑尺寸,可通过公式(2)来计算:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi\omega_0^2} \right)^2} \quad (2)$$

式中: λ 为激光波长; ω_0 表示激光束腰光斑大小。将公式(2)代入公式(1)中,得到基模激光发散角与 ω_0 的关系:

$$\theta_{1/e^2} = \sqrt{\frac{4\lambda^2}{\pi^2\omega_0^2}} \quad (3)$$

式中: θ_{1/e^2} 为激光发散角。文中,大功率 TEA CO₂ 激光器谐振腔采用平凹腔稳定腔(反射镜为凹面镜、输出镜为平面镜),其激光束腰大小与反射镜曲率半径 R 和谐振腔腔长 L 有关:

$$\omega_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 L(R-L) \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(3)中可得到基模激光远场发散角和激光器谐振腔参数之间关系如下:

$$\theta_{1/e^2} = \sqrt{\frac{4\lambda}{\pi}} \left(\frac{1}{L(R-L)} \right)^{1/4} \quad (5)$$

由公式(5)可知,采用平凹腔结构的激光器的基模激光远场发散角与谐振腔结构参数有关。大功率 TEA CO₂ 激光器输出激光为高阶模(TEM_{*mn*}),其远场光斑尺寸和远场发散角不仅与基模激光束腰大小和远场发散角有关,而且与激光模式数 m 、 n 有关:

$$\omega_x = \omega_0 \sqrt{2m+1}, \quad \omega_y = \omega_0 \sqrt{2n+1} \quad (6)$$

$$\theta_x = \theta_{1/e^2} \sqrt{2m+1}, \quad \theta_y = \theta_{1/e^2} \sqrt{2n+1} \quad (7)$$

式中: ω_x 、 ω_y 分别为水平方向(x 方向)和垂直方向(y 方向)激光束腰光斑大小; θ_x 、 θ_y 分别为 x 、 y 方向光束

发散角。

因此,理论计算了实验室自研的大功率 TEA CO₂ 激光器输出激光的远场发散角。该激光器的谐振腔全反镜为曲率半径 $R=18\text{ m}$ 的凹面镀金铜镜,输出镜为对输出激光部分透过了 ZnSe 平面镜,可实现 $9.3\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 双波长激光输出,谐振腔腔长 $L=2.2\text{ m}$ 。为了和后续试验保持一致,选择 $9.3\ \mu\text{m}$ 的波长进行计算,得到基模激光束发散角 $\theta_{1/e^2}=1.41\ \text{mrad}$,束腰光斑尺寸 $\omega_0=4.24\text{ mm}$ 。结合试验测得的 $\omega_x=22\text{ mm}$, $\omega_y=19\text{ mm}$,计算得到 $m=13, n=10$,将其代入到公式(7)中,得到高阶模激光束远场发散角为 $\theta_x=7.33\ \text{mrad}$, $\theta_y=6.46\ \text{mrad}$ 。

1.2 测试点位置对激光远场发散角的影响分析

试验中,采用光程差法测量和计算激光束远场发散角。此方法中,激光光束发散角与测试点的位置选择有关系,因此为了准确获取远场激光光斑数据,需尽可能选择距离较远的测试点,从而排除测量距离的影响。然而,受实际操作空间和距离太远感光元件(有机玻璃、热敏纸等)无法清晰成像的限制,测量距离又不能选取太远,因此,合理选择测试点位置非常重要,可以准确反映激光远场光束特征。

为表征激光束发散角与测量距离的关系,基于上述计算的高功率 TEA CO₂ 激光器参数,得到光程差法表示的激光远场发散角(以 y 方向为例)为:

$$\theta_y = \frac{2\omega_x(z_y) - 2\omega_x(z)}{z_y - z} =$$

$$\frac{2\sqrt{2n+1}\omega_0}{D} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{(z+D)\lambda}{\pi\omega_0^2} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi\omega_0^2} \right)^2} \right] \quad (8)$$

式中: z_y, z 表示两测试点距激光器输出镜的位置, $D=z_y-z$, 表示测试点间距。分别取间距 $D=1\text{ m}, 2\text{ m}, 5\text{ m}, 10\text{ m}$ 和 20 m , 计算距输出镜 40 m 范围内不同测试位置的激光束发散角。

图 1 分别表示基模(TEM₀₀)和高阶模(TEM_{mn})激光束发散角随测试点与输出镜间距离的变化情况。可见看出,在距离输出镜较近的测试点测试,发散角随着测量距离的增加而快速增大,随着发散角位置距输出镜距离的增加,发散角逐渐趋于定值。计算结果表明,为了准确得出大功率 TEA CO₂ 激光远场光束情况,测试点位置要选择在距离输出镜 15 m 之外的位置。

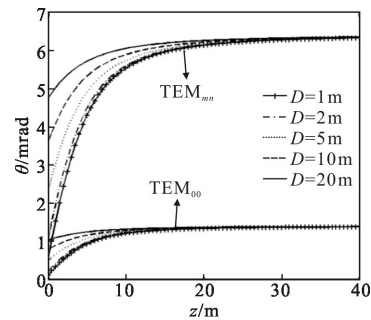


图 1 采用光程差法计算激光束远场发散角结果

Fig.1 Theoretical calculation of the beam divergence by optical path difference method

此外,在相同测试位置,测试点间距 D 越大,得到的发散角越大,但随着测试距离的增加,测试点间距 D 引起的结果间偏差变小,因此要尽可能选择较小的测试点间距。计算得出了不同间距 D 与基准产生的相对偏差,其分布如图 2 所示。当测试点距离 $z=20\text{ m}$ 时, $D=5\text{ m}$ 工况下形成的相对偏差值已经小于 3%。试验中,选择的测试点间距 $D=0.5\text{ m}$ 和 $D=1\text{ m}$ 。

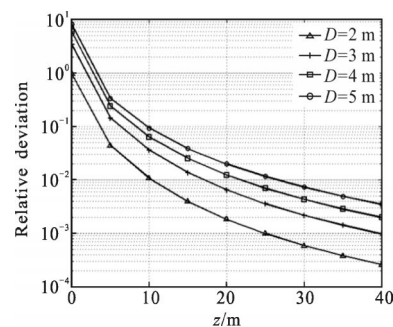


图 2 测试点间距 D 产生的相对偏差

Fig.2 Relative deviation caused by testing points distance D

采用光程差法理论计算激光束远场发散角,在测试距离大于 40 m (约 7 倍瑞利长度)时,激光束远场发散角(y 方向)为 $6.25\ \text{mrad}$,与理论计算偏差为 3.25%,计算结果比较吻合。

2 激光束远场发散角试验测量

大功率 TEA CO₂ 激光器远场发散角的理论计算从原理上分析了发散角的变化规律,但激光器谐振腔由于加工装调过程中存在误差,导致谐振腔尺寸与理论设计略有差异,且大功率 TEA CO₂ 激光器工作过程,高输入电压产生气体放电出射激光的转化效率为 10%~20%,产生大量热能,导致谐振腔镜

受热变形,从而影响发散角。因此,试验测量激光器发散角具有现实意义。

试验中,采用光程差法测量其发散角,在距输出镜不同位置处安放热敏纸,通过测量热敏纸上烧蚀的光斑直径来计算激光束发散角。在激光远场发散角计算中,根据激光光束质量(M^2)因子理论,提出一种基于光斑数据拟合计算远场激光束发散角的方法,该方法克服了常规光程差法(光斑尺寸增加量除以测试点间距)直接测量激光远场发散角的误差,将激光器实际运行时产生影响发散角的因素包含于测试结果。

2.1 测量原理

根据 M^2 因子理论,在自由空间传输的激光的实际光束宽度可表示为:

$$W_x^2(z) = W_{0x}^2 + \frac{W_x^4 \lambda^2}{\pi^2 W_{0x}^2} z^2 \tag{9}$$

$$W_y^2(z) = W_{0y}^2 + \frac{W_y^4 \lambda^2}{\pi^2 W_{0y}^2} z^2 \tag{10}$$

式中: $W_x(z)$ 、 $W_y(z)$ 以及 W_{0x} 、 W_{0y} 分别为 x 方向和 y 方向在测试点 z 处和输出镜处的光束半宽度; $W_x(z)$ 、 $W_y(z)$ 为测量位置 z 的函数,可通过试验测定;利用试验数据,拟合求得输出镜处光束半宽度 W_{0x} 、 W_{0y} 以及光束质量(M_x^2 和 M_y^2) 因子。

根据激光束远场发散角(半角)定义,有

$$\theta_x = \lim \frac{W_x(z)}{z} = \frac{M_x^2 \lambda}{\pi W_{0x}} \tag{11}$$

$$\theta_y = \lim \frac{W_y(z)}{z} = \frac{M_y^2 \lambda}{\pi W_{0y}} \tag{12}$$

根据拟合得到的参量和激光波长 λ 可计算激光束远场发散角。

2.2 试验测试与结果分析

试验测量激光束远场发散角的示意图如图 3 所

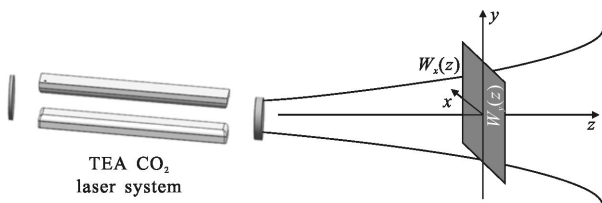


图 3 TEA CO₂ 发散角试验测量示意图

Fig.3 Sketch map for experimentally measuring beam divergence of TEA CO₂ laser

示,激光器以单脉冲模式运行,采用热敏纸采集不同位置的激光光斑,大功率 TEA CO₂ 激光器输出典型激光光斑如图 4 所示。

根据激光束发散角理论计算,发散角在测量初始阶段变化明显,因此,在初始阶段采样点较密,从 0.5 m 开始,间隔 0.5 m 测量一组激光光斑数据,测量 10 组;然后从 5 m 开始,间隔 1 m 测量一组激光光斑数据,测量 15 组。测量 5 m 处激光光斑如图 4 所示。通过测量 x 和 y 方向上的光斑尺寸,可得到计算发散角的数据。

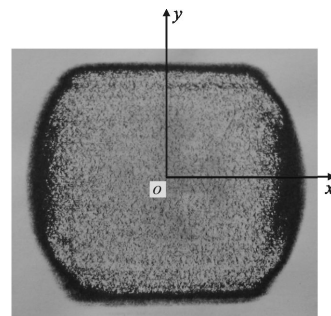


图 4 大功率 TEA CO₂ 激光器距输出镜 5 m 处激光光斑

Fig.4 Laser spot of high power TEA CO₂ laser measured at the distance of 5 m

图 5 给出了光斑尺寸 $W(z)$ 随测试位置 z 的变化关系。可以看出,光斑尺寸和测试距离约成二次变化关系,当测试点约在 10 m 距离内,二次变化曲线的斜率逐渐增大,当测试点在 10 m 距离外,曲线的斜率基本趋于定值。根据试验数据的变化规律,采用二次多项式对试验数据拟合,基于拟合结果,结合公式(9)、(10) 计算光斑出口处的光斑尺寸(半宽) $W_{0x} = 22.7$ mm, $W_{0y} = 20.9$ mm,光束质量因子 $M_x^2 = 25.5$, $M_y^2 = 21.3$,将计算结果代入公式(11)、(12),得到 TEA CO₂ 激光器光束远场发散角为 $\theta_x = 6.63$ mrad, $\theta_y = 6.03$ mrad。

由此可见,试验数据拟合结果与理论计算结果基本一致,可以反映大功率 TEA CO₂ 激光远场光束特性。远场发散角理论和试验结果的相对偏差为 9.5% 和 6.7%。产生偏差的主要原因有:

(1) 由于加工装调误差和镜片热变形等引起的谐振腔参数变化,使发散角发生改变;

(2) 在测试过程中,随着测试距离的增加,热敏纸上烧蚀的激光光斑边缘逐渐变模糊,引入读数误差。由于 y 方向上放电电极对激光束的限模作用,使

y 方向上激光束发散角的变化要小于 x 方向的发散角变化。

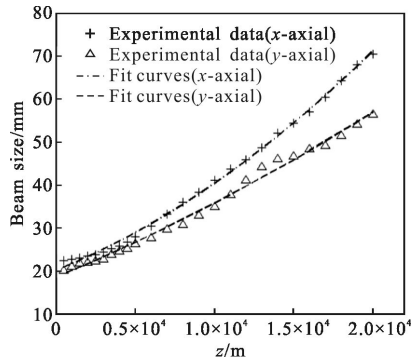
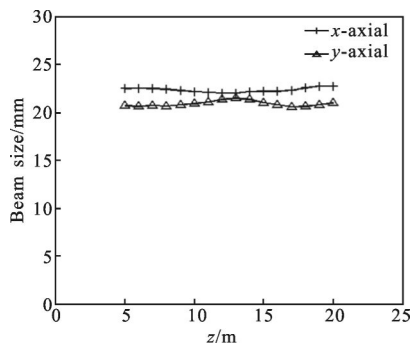


图 5 光斑尺寸随测试距离的变化关系

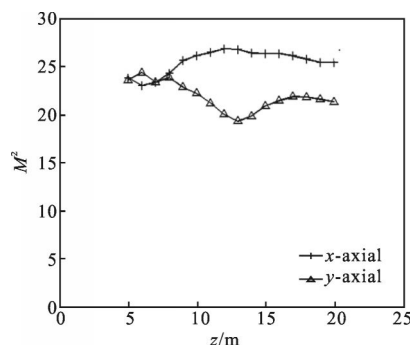
Fig.5 Relationship between beam size and measuring distance

为验证测试距离 z 对激光束发散角计算结果的影响,从 5 m 的测量距离开始,采用文中提出的方法计算出口激光光斑尺寸和光束质量因子的变化,如图 6 所示。图 6 中测试位置变化对出口光斑尺寸



(a) 光斑尺寸

(a) Beam size



(b) 光束质量因子

(b) Beam quality factor

图 6 光斑尺寸和光束质量因子随测试距离变化

Fig.6 Change of beam size and beam quality factor with measuring distance

影响较小,对光束质量因子 M^2 影响较大。当距离选择在 10 m 以外,光束质量因子 M^2 也基本趋于定值。因此,在试验中选择的测试点要包括 10 m 外的点。

3 结论

文中从理论上计算了大功率 TEA CO_2 激光器远场发散角,并应用光程差理论分析了测试点距输出镜距离和两测试点间距对激光束远场发散角的影响:当测试点距输出镜距离大于 15 m 时,发散角趋于定值,且测试点间距对计算结果的影响逐渐降低。提出一种基于试验数据拟合计算激光束远场发散角的方法。试验测量了距输出镜 20 m 范围内的激光光斑尺寸,根据试验数据,拟合了大功率 TEA CO_2 激光器出口处的光斑尺寸和光束质量因子,依据拟合参数计算了激光束远场发散角。对比分析了拟合法和理论计算得到的发散角存在差异的原因,并讨论了取样点数据对计算结果的影响。分析表明文中提出的试验数据拟合方法解决了由于激光功率高和光斑直径大等引起的发散角测试难题,可以准确测量激光束远场发散角。

参考文献:

- [1] Yang Guilong, Li Dianjun, Xie Jijiang, et al. High power repetitive TEA CO_2 pulsed laser [J]. *Laser Physics*, 2012, 22 (7): 1173–1176.
- [2] Li Dianjun, Yang Guilong. Impact of main discharge delay time on optoelectronic conversion efficiency in TEA CO_2 laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14 (5): 807–810. (in Chinese)
- [3] Shao Chunlei, Yang Guilong, Li Dianjun, et al. 9.3 μm branch selection research of high power pulse CO_2 laser [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2011, 38 (3): 03020081–6. (in Chinese)
- [4] Xi Quanxin, Shen Junquan, Shen Huaqin, et al. Measurements of beam divergences in high power CO_2 laser [J]. *Chinese Journal of Laser*, 1992, 19(6): 415–418. (in Chinese)
- [5] Gao Wei, Wang Yunping, Li Bin. Study on characterization and diagnosis of high-power laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1): 61–64. (in Chinese)
- [6] Maestle R, Plass W, Chen J, et al. Investigation of beam pointing stability, far field divergence angle and power density distribution of high power CO_2 -laser [C]//SPIE,

- 1996, 2870: 319–326.
- [7] Feng Guobin, Yang Pengling, Wang Qunshu, et al. Measuring technology for far-field beam profile of high power laser [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2013, 25 (7): 1616–1619. (in Chinese)
- [8] Ye Zhengyu, Song Haiping, Wang long, et al. Measurement of far-field beam quality parameters of high power laser[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2011, 23(1): 87–91. (in Chinese)
- [9] Huang Linhao, Liao Xuebing, Zhao Haiyan, et al. Utilizing laser beam analyzer to measure M^2 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2197–2200. (in Chinese)