

# 飞行光学导光系统中的空气热透镜效应\*

王智勇 陈 凯 陈 涛 雷 訇 左铁钊

(国家产学研激光技术中心, 北京工业大学应用激光所 北京 100022)

**摘 要** 研究了激光加工用大功率 CO<sub>2</sub> 激光束在飞行光学导光系统中传输所产生的空气热透镜效应。实验发现当飞行光学导光系统中的空气静止时将产生空气热透镜效应, 而充以一定压力的压缩空气却可以消除空气热透镜效应。实验表明无热透镜效应时, 光束遵循高斯光束传输规律, 而有热透镜效应时, 光束偏离高斯光束的传输规律, 并影响到激光束聚焦焦点的大小和位置。另外通过激光空气热透镜效应的非线性模型计算了热透镜效应所引起的光束传输相对高斯光束的偏离量, 理论计算和实验测量相吻合。在此基础上提出了热透镜效应引起光束传输虚束腰和实束腰的概念, 并指出应采用虚束腰来推导光束的传输与聚焦特性。

**关键词** 热透镜, 大功率 CO<sub>2</sub> 激光加工, 飞行光学导光系统。

## 1 引 言

在激光材料加工中, 当使用的激光器的功率较低、激光器距离加工台的距离也比较短时, 因空气对激光束的吸收较小, 普遍认为空气对光束造成的影响是比较小的, 不象激光束长距离传输如激光雷达系统<sup>[1]</sup>、固体激光束在晶体中的传输<sup>[2~4]</sup>以及激光束在液体中传输<sup>[5]</sup>那样受介质的影响那么大。随着激光加工的发展, 激光器的功率越来越大, 并采用移动光束的飞行光学导光系统来进行大范围的激光加工, 这样激光束在空气中的传输所受到空气的影响不能忽略, 该影响表现为激光诱导空气热透镜效应, 它引起光束在传输过程中的扩大及束腰大小和位置的偏移等, 并影响光束的聚焦形态, 从而影响大范围激光加工质量的稳定性。

激光束在空气中的传输受空气的影响主要有两个方面, 一是空气吸收激光束的能量, 引起激光传输路径中气体温度的升高, 空气折射率变化, 从而产生激光热透镜效应, 使光束迅速扩大; 二是空气湍流引起激光束传输路径折射率的随机变化, 使激光束发生畸变。对于短脉冲高功率(兆瓦级)激光器, 其脉冲重复频率一般较低(如数十赫兹), 光束尺寸较小, 其热透镜效应的持续时间大约为几个毫秒<sup>[6]</sup>, 前一个脉冲产生的热透镜不会影响到后一个脉冲, 激光束主要受空气湍流的影响。而对于小功率、连续或高重复率激光束, 在传播距离较短时热透镜效应和空气湍流的影响可以忽略, 当传输距离很长(千米级)时, 将同时受到空气热透镜效应和湍流的影响。对于材料加工所用大功率(千瓦以上)CO<sub>2</sub>激光器, 传输距离在几十米范围以内, 受大气湍流的影响可以忽略。但是由于激光器工作时排放的气体中含有 CO<sub>2</sub>,

\* 国家重点自然科学基金资助课题, 批准号: 59635170

收稿日期: 1997-04-28; 收到修改稿日期: 1998-03-09

它使激光器周围空气中 CO<sub>2</sub> 气体含量增加，必然增大对激光束的吸收，再加上激光器的功率很大，并工作于连续或高重复率状态，空气热透镜效应将非常显著而不能忽略。本文即研究了激光加工用大功率 CO<sub>2</sub> 激光束在飞行光学导光系统中传输所产生的空气热透镜效应。

## 2 实验装置及大功率激光束的测量原理

实验在一台采用飞行光学导光系统的五轴联动激光加工机上进行，如图1所示。加工机的加工范围为 3000 mm × 1000 mm × 500 mm，可数控。激光器最大功率为 6000 W，可连续或脉冲输出。整个导光系统是密封的，并在导光系统第一面反射镜 M<sub>1</sub> 后充以一定压力的无油、无尘、干燥的净化压缩空气。最小加工位置离充气口 3500 mm。

激光束的光束尺寸及强度分布通过大功率激光光束光斑诊断仪 UFF100 (Prometec Laserscope) 来测量。其测量原理如图 2 所示。激光光束入射到安置在旋转头上的空心针，空心针上打有不同孔径的小孔，小孔采样激光束并通过空心针上的两个小反射面，照射到位于旋转头上方

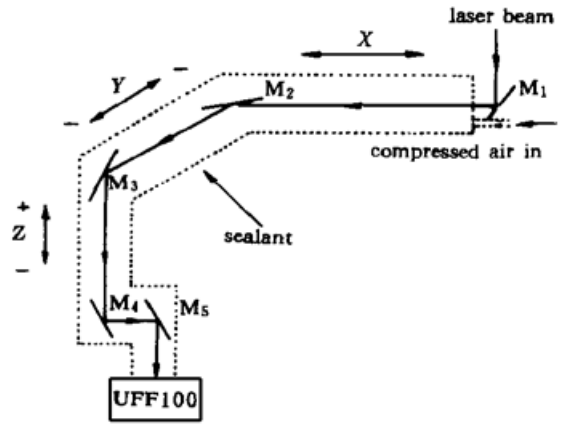


Fig. 1 Schematic of flying optics in the machine

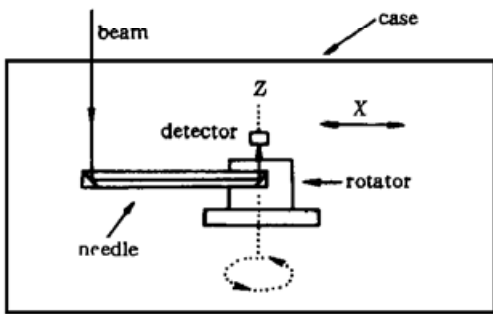


Fig. 2 Schematic of the high power laser beam diagnostic system

旋转头上方的一个热电探测器上。旋转头通过绕 z 轴的旋转和 x 方向的平移获得整个激光束横截面能量分布的探测。它可以测量非聚焦和聚焦激光束。从探测器获得的激光束能量分布的信息被传到一台计算机上并存入磁盘，以便日后读取。UFF100 光束诊断仪固定在激光加工机的工作头下方，可随数控工作头的移动而移动。当工作头在 x、y 方向移动时，可测量光束在不同加工位置的情况，而工作头上装有聚焦镜并上下移动时，可测量聚焦光斑在焦点附近的情况，安装反射镜时，测量的就是非聚焦光束。

## 3 实验结果

### 3.1 气体压力对光束传输的影响

所通入的净化的压缩空气可以减小热透镜效应。在不同压力情况下，测量光束半径随不同压力的变化如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出，当不通以压缩空气时，激光束受热透镜效应的影响，光束半径明显扩大，当通以一定压力的压缩空气后，一方面压缩空气带走了一部分热量，使得气体的温升降低，从而降低热透镜效应，更重要的是所通入的压缩空气的扰动，使得封闭的飞行光学导光系统中的气流沿径向的温差减小了。而这种温差的减小取决于通入的压缩空气在一个特定的导光系统内所起的扰动的程度，依据实验条件的不同而不同。在本实验条件下，所用塑料导管的直径为 6 mm，压缩空气减压阀离出气口的长度为 1.5 m。如图 3，在离入气口 3500 mm 处，对于 6000 W 激光束，当通入空气的压力(所述压力为压缩空气减压阀处的压力)大于  $2 \times 10^5$  Pa 时，光束半径基本相同，表明热透镜效应基本消除，而

在离入气口 7500 mm 处, 如图 4 所示, 热透镜效应在 3500 mm 处大, 需要  $3 \times 10^5$  Pa 以上的压力才能消除热透镜效应。

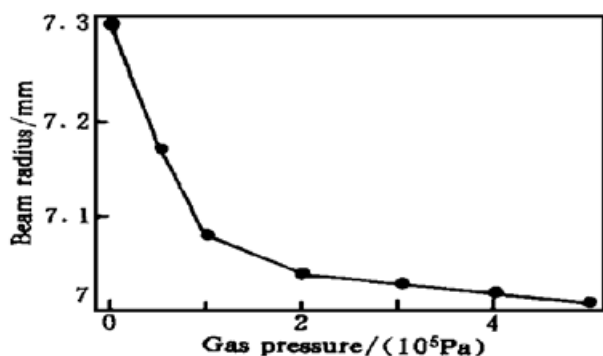


Fig. 3 The influences of gas pressure to laser beam radius at 3500 mm point

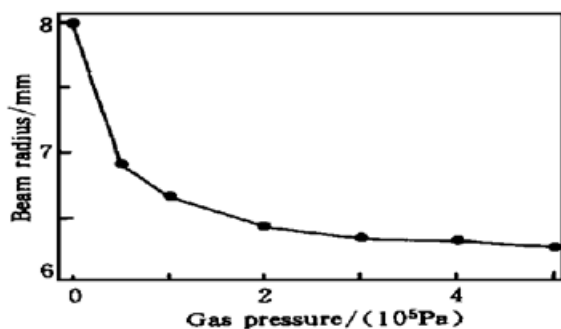


Fig. 4 The influences of gas pressure to laser beam radius at 7500 mm point

### 3.2 热透镜效应对光束的扩束作用

热透镜效应的典型作用就是使激光束扩束。图5所示是未通以压缩空气(有热透镜效应)与通以大量压缩空气(无热透镜效应)时, 沿光束传输方向不同距离处光束半径的比较。可以看出, 无热透镜效应时, 光束的传输遵循高斯光束的传输规律, 而热透镜效应对光束的扩展随着距离的增加而增加, 不再遵循高斯光束的传输规律。这要求在静止空气中测量大功率  $\text{CO}_2$  激光束的光束质量和束腰位置时, 应考虑到热透镜效应的影响, 并消除热透镜效应, 才能得到准确的测量结果。

### 3.3 热透镜效应对束腰位置和大小影响

从图 5 可知热透镜效应使激光束的最小光束半径的位置逆传输方向移动, 但是这个最小光束半径及其位置并不是实际激光束的束腰半径和位置。这是因为热透镜效应随光束的传输距离的增加而增加, 因此在每一点的光束所对应的束腰位置和大小都是变化的, 因为这个变化的束腰位置和大小是不能直接观测到的, 作者称之为虚束腰, 而称受热透镜效应影响后所能测量的激光束的最小光束半径为赝束腰。赝束腰在实际应用中不能作为实际激光束的束腰。

### 3.4 热透镜效应对光束聚焦焦点位置和大小影响

热透镜效应使激光束沿传输方向的扩束、束腰大小和束腰位置改变, 必然会影响激光束的聚焦状态。图 6 所示为在不同的加工位置, 实验测得的有热透镜效应和无热透镜效应的聚焦焦点的大小和位置。从图可以看出, 当存在热透镜效应和不存在热透镜效应时, 聚焦焦点的大小和位置是完全不相同的。由图 5 知当存在热透镜效应时, 光束半径在传输距离的任意位置都比无热透镜效应的要大, 根据激光束聚焦理论<sup>[11]</sup>, 入射在聚焦镜上的光束半径越大, 其聚焦焦点越小, 这与图 6(a) 的实验结果是相同的。由上节分析, 在不同的加工位置虚束腰的位置和大小是不相同的, 而这就会影响到聚焦焦点的位置, 故对于有无热透镜效应, 光束聚焦位置就不相同, 如图 6(b) 所示。由图 6 还可知, 一方面可以通过对热透镜效应的控制,

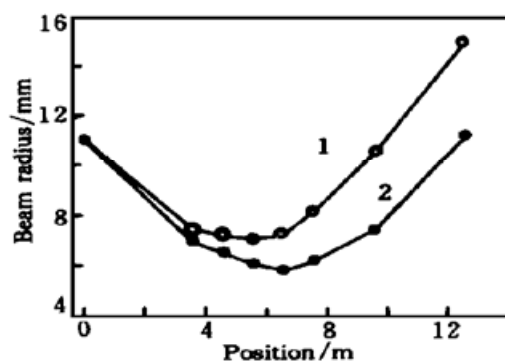


Fig. 5 The comparison of radius between with thermal lens (curve 1) and without thermal lens (curve 2) along the beam propagation

在一定的条件下利用负透镜效应来扩束激光束,以改善聚焦激光光束质量;另一方面由于在激光加工中,如激光切割与焊接,对聚焦焦点的大小和位置很敏感,这要求在设计激光加工机以及实际进行激光加工时要充分考虑到热透镜效应的影响。

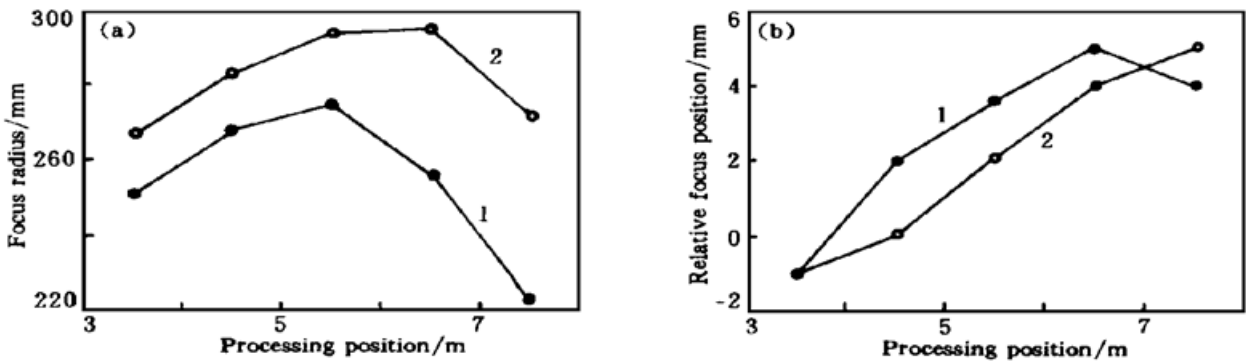


Fig. 6 The comparisons of focus radius (a) and focus position (b) between with thermal lens (curve 1) and without thermal lens (curve 2) at different processing position

## 4 对实验结果的理论解释

### 4.1 激光热透镜效应模型

对于光束半径为 1.0 mm 的激光束,热透镜的热扩散大约需要 6 ms,因此脉宽较窄如纳秒级的激光束,空气吸收激光束能量时没有热扩散<sup>[6]</sup>,而对连续激光束,空气对激光束的能量吸收和扩散是同时进行的,空气不断吸收光束能量,并转换成热量,引起空气温度的升高,空气温度的升高又导致空气不断向周围空间进行热扩散,并最终达到热平衡。并形成一个中心高、外周低、沿径向具有一定温度梯度的温度场  $T(r, z)$ ,导致气体密度中心低外周高的密度梯度,从而导致沿径向的气体折射率变化,产生类似负透镜效应。另外热透镜效应使得激光束扩束,扩束后又影响到了空气温度的重新分布,从而又影响到热透镜的大小和位置。对激光加工所用大功率 CO<sub>2</sub> 激光束,尽管不是 TEM<sub>00</sub>模结构,但可通过光束质量简单等效为 TEM<sub>00</sub>模<sup>[8-10]</sup>,不考虑光束在传输过程中横截面光强的变化,并忽略热辐射、热对流以及沿轴向的热传导,则在单位体积和单位时间空气所吸收的热量为:

$$Q(r) = (2PB/\pi\Omega^2) \exp(-2r^2/\Omega^2) \quad (1)$$

式中  $P$  为激光器的平均功率,  $\beta$  为热吸收系数,  $\Omega$  为强度为 86% 处的光束半径。设温度升高为  $\Delta T$ , 空气的热扩散系数为  $D$ , 根据稳态热传导公式有:

$$D[\partial^2\Delta T/\partial r^2 + (1/r)\partial\Delta T/\partial r] + Q/\rho c = 0 \quad (2)$$

$\rho$  为空气的密度,  $c$  为比热。据初始条件  $\Delta T(r, 0) = 0$ , 由文献[10], 求解(2)式可获得严格的解析解。为了讨论方便, 在近轴附近, 可采用高斯近似, 而不会引入较大的误差<sup>[12]</sup>, 得:

$$\Delta T = (P\rho/4\pi D\rho c) \exp(-2r^2/\Omega^2) \quad (3)$$

空气温度的升高导致光程发生变化, 设温度升高为  $\Delta T$  时的光程变化为:

$$\delta n = n\Delta l - n_0\Delta l_0 \approx (\partial n/\partial T)\Delta l\Delta T \quad (4)$$

式中  $\Delta l$  为激光束的光程,  $n$  为空气的折射率,  $n_0$ 、 $\Delta l_0$  为温度未发生变化前的空气折射率和光束的光程。由文献[6]得:

$$\partial n/\partial T = -(n-1)/T_a \quad (5)$$

式中  $T_a$  为空气的温度。将(3)式、(5)式代入(4)式得到:

$$\delta n = - (P\beta\Delta l/4\pi D\rho c)[(n-1)/T_a] \exp(-2r^2/\Omega^2) \quad (6)$$

热激发透镜的聚焦长度由下式决定<sup>[10]</sup>:

$$\partial\delta n/\partial r|_0 = -r/f \quad (7)$$

式中  $f$  为热透镜有效聚焦长度, 将(6)式代入(7)式, 写成积分的形式, 并考虑到当光束半径较大时球面像差的影响<sup>[11]</sup>, 得:

$$\frac{1}{f} = - \int \frac{P\beta(n-1)\ln 2}{\pi\Omega^2 D\rho c T_a} dl \quad (8)$$

由于高斯光束在传输过程中光束半径随着传输距离的变化而变化, 在半径较小的位置, 光束在单位面积上的能量相应较大, 热透镜效应也较大, 反之, 在半径较大的位置, 热透镜效应减弱。因此等效热透镜的位置不能认为是在这一段空气的中间位置, 而应是对距离的加权平均。由于热透镜效应的强弱与  $\Omega^2(z)$  成反比, 其位置  $s$  可由下式决定:

$$s = \{ \int z/\Omega^2(z) dz \} / \int 1/\Omega^2(z) dz \quad (9)$$

设未受热透镜效应影响的原始激光束的光束半径为  $w$ , 光束束腰半径为  $w_0$ , 坐标原点为束腰位置处, 则:

$$w^2(z) = w_0^2 [1 + (z/Z_R)^2] \quad (10)$$

式中  $Z_R = \pi w_0^2/\lambda M^2$  为光束的瑞利半径, 其中  $\lambda$  为激光波长,  $M^2$  为光束质量因子。

设  $s'$  和  $w_0'$  为经热透镜变换后激光束束腰的位置和半径, 根据透镜聚焦公式<sup>[12]</sup>, 得:

$$s' = f + f^2(s-f)/[(s-f)^2 + Z_R^2], \quad w_0'^2 = \{f^2/[(s-f)^2 + Z_R^2]\} w_0^2 \quad (11)$$

激光束经热透镜变换后在  $z$  位置的光束半径为:

$$w^2(Z) = w_0'^2 (1 + Z^2/Z_R'^2) \quad (12)$$

式中,  $Z' = s' - s + z$ , 为变换后激光束的束腰位置与测量点  $Z$  的距离。  $Z_R' = \pi w_0'^2/\lambda M^2$  为变换后激光束的瑞利半径。

设热透镜效应的起始位置为  $z = z_0$ , 考虑到变换后激光束的扩束作用, 影响到热透镜的大小和位置, 则:

$$\Omega(z) = \begin{cases} w(z_0) = w'(z_0), & z = z_0 \\ w(z), & z > z_0 \end{cases} \quad (13)$$

对在光束传输的不同位置处的热透镜的大小与位置、激光束经热透镜变换后的束腰大小与位置、激光光束半径大小的求解应联立求解积分方程组(8)~(13)式, 这是一组非线性方程, 求出解析解比较困难, 本文采用数值方法来求解。

#### 4.2 热透镜效应引起的高斯光束传输的偏离

在光束传输的不同位置处的扩束大小为

$$\Delta w(z) = w'(z) - w(z) \quad (14)$$

图7所示为在光束传输过程中的各个位置, 热透镜对激光束的扩束后相对与原始激光束的半径的增加量的测量值和根据理论模型及(14)式的计算值的比较。从图中可以看出, 计算结果与测量值吻合较好, 证明了理论计

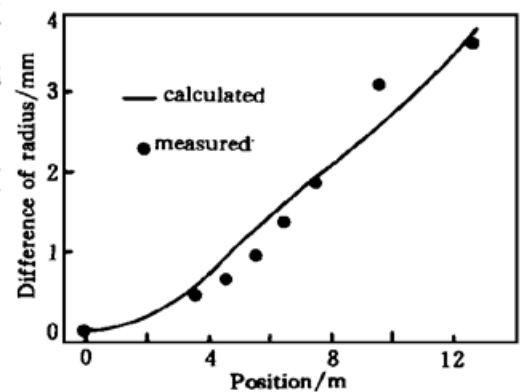


Fig. 7 The comparison of difference on beam radius of with thermal lens and without thermal lens between the measurement and calculation

算的正确性。

### 4.3 虚束腰的大小和位置

受热透镜效应影响的实际激光束的束腰(虚束腰)位置  $s'$  和大小  $w_0'$  由(11)式决定。图8和图9分别为热透镜效应引起的虚束腰的位置和大小在不同的光束传输距离处相对于原始激光束束腰位置和大小的曲线图。由于在不同的加工位置热透镜引起的负透镜的大小和位置不相同,导致了在不同的加工位置对原始激光束变换后的虚束腰的位置和大小也不一样,虚束腰的位置和大小遵循激光束的负透镜聚焦原理。可以看出,在传输距离较小时,热透镜效应不明显,虚束腰位置和大小基本与原始激光束一致;随着传输距离的进一步增加,热透镜效应越来越显著,束腰位置逐渐沿传输方向移动,束腰大小也增大;随着传输距离的进一步增加,束腰位置将逆传输方向逐渐靠近原始激光的束腰位置,而束腰大小也从增大转为降低。在上节中中就是根据(11)式来计算受热透镜影响的虚束腰的位置和大小,从而才能正确求出光束半径的增大量。由于虚束腰的位置和大小在不同的激光束传输位置受热透镜效应的影响是不相同的,因而在不同的位置聚焦时,聚焦光束的大小和位置将是不相同的,如图6所示。

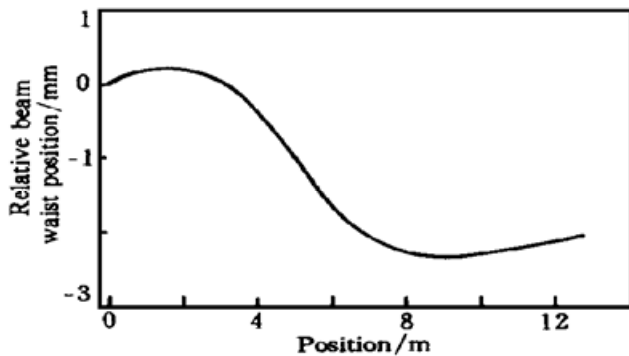


Fig. 8 Change of beam waist position caused by thermal lens relative to original beam waist

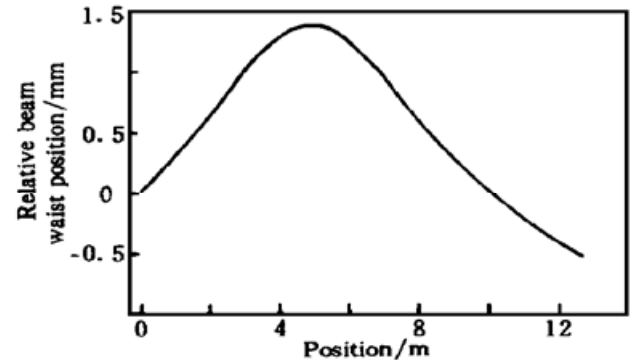


Fig. 9 Change of beam waist size caused by thermal lens relative to original beam waist

**结 论** 本文在实验上发现在大功率  $\text{CO}_2$  激光加工中,当采用飞行光学导光系统来传输激光束时,导光系统中的空气处于静止状态时,空气将吸收激光束的能量,引起空气热透镜效应,而当使导光系统中的空气流动时,可以减小或消除空气热透镜效应,因而光束的传输与聚焦状态是不相同的。这取决于通入导光系统的压缩空气的压力。传输距离越大,空气热透镜效应就越明显,为了消除空气热透镜效应,要求通入的压缩空气的气压就越高。无热透镜效应时,光束遵循高斯光束传输规律,而有热透镜效应时,光束将偏离高斯光束的传输规律,其聚焦特性也发生变化。热透镜效应还会使传输的激光束出现虚束腰和腰束腰,在实际应用中应采用虚束腰来判断光束的传输特性。本文根据大功率  $\text{CO}_2$  激光束在空气中传输的非线性热透镜模型解释了以上现象,理论计算和实验结果相吻合。

### 参 考 文 献

- [1] Barnes J C, Browell E V, Vaughn W R *et al.*. Development of a high altitude airborne DIAL system — the lidar atmospheric sensing experiment. *LASE, Proc. 13th Int. Laser Radar Conf.*, NASA Conf. Pub., 1986, **2431**: 6~9
- [2] Neuenschwander B, Weber R, Weber H P. Determination of the thermal lens in solid-state lasers with stable cavities. *IEEE Journal of Quant. Electron.*, 1995, **31**(6): 1082~1087

- [3] Tucker J E, Marquardt C L, Bowman S R *et al.*. Transient thermal lens in a ZnGeP<sub>2</sub> crystal. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(15) : 2678~ 2682
- [4] Ozygus B, Erhard J. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers with transverse beat frequencies. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(10) : 1361~ 1362
- [5] Olaizola A M, Da Costa G, Castillo J A. Geometrical interpretation of a laser-induced thermal lens. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(5) : 1125~ 1130
- [6] Barnes N P, Thomas M E, Koch G J *et al.*. Atmospheric thermal lensing in laser resonators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(5) : 962~ 969
- [7] Wright D, Greve P, Fleisher T *et al.*. Laser beam width, divergence and beam propagation factor—an international standardization approach. *Opt. & Quant. Electron.*, 1992, **24**(9) : s993~ s1000
- [8] Essian M, Fuerschbach P W. Beam characterization of a materials processing CO<sub>2</sub> laser. *Welding Research Bulletin Supplement.*, February 1996. 47s~ 54s
- [9] Smith D C. High-power laser propagation: Thermal blooming. *Proc IEEE*, 1977, **65**(12) : 1679~ 1714
- [10] Bacnes N P, Williams-Byrd J A. Average power effects in parametric oscillators and amplifiers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(1) : 124~ 131
- [11] Self S A. Focusing of spherical Gaussina beams. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(5) : 658~ 661

## Atmospheric Thermal Lens in Flying Optics

Wang Zhiyong    Chen Kai    Chen Tao    Lei Hong    Zuo Tiechuang

(National Center of Laser Technology, Institute of Applied Lasers in Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

(Received 28 April 1997; revised 9 March 1998)

**Abstract** The atmospheric thermal lens in flying optics induced by high power CO<sub>2</sub> laser during laser materials processing is studied. It is found in experiments that when the air in flying optics is static, atmospheric thermal lens can be induced. However, when the air is filled to the flying optics at certain pressure, atmospheric thermal lens can be eliminated. When there is no thermal lens, laser beam propagation obey the Gaussian theory; when there has thermal lens, laser beam propagation will deviate the Gaussian theory. This will have influence on laser focus size and position. And This deviation is calculated according to the nonlinear mode of laser induced thermal lens. The calculation coincides with the measurement. On the basis of it, two new concepts —— pseudo-beam waist and virtual-beam waist are proposed. And the paper points out that virtual-beam waist can be used to calculate laser beam propagation but not pseudo-beam waist.

**Key words** atmospheric thermal lens, high power CO<sub>2</sub> laser materials processing, flying optics.