

延迟位相在大功率 CO₂ 多模激光束传输 与聚焦中的重要性

王智勇 陈 涛 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)

提要 采用激光光束的延迟位相分析法,研究了大功率 CO₂ 激光束传输与聚焦时光束横截面的大小和光强分布的变换规律。采用大功率激光束光斑质量诊断仪测量了 TLF6000 型 CO₂ 激光束在不同位置处横截面的大小和光强分布,理论分析与实际测量结果相吻合。根据延迟位相分析法,设计了在焦点附近获得最小的光强起伏变化的光学变换系统。

关键词 大功率 CO₂ 多模激光束,延迟位相,激光加工

1 引 言

随着激光材料加工应用的越来越广泛,迫切需要了解所使用的激光束源的特性,以获得高质量的加工效果^[1]。以往在材料加工中,很少考虑光束传输过程中横截面能量分布的变化,认为在光束传输过程中其横截面的能量分布总是相同的^[2,3]。但实际上激光器所发出的激光束并不是理想的单模激光束,而是多种模式混合的多模激光束,光束在传输过程中,其横截面能量分布总是在变化的。

长期以来人们对单模激光束的研究比较多,客观上忽视了激光束延迟位相(也称附加相位超前)的作用,因为单模激光束的延迟位相并不影响单模激光束传播时横截面能量的分布。对多模激光束传输的研究,引入了 M^2 光束质量因子,将多模激光束等效为基模高斯光束,虽然带来了许多方便,但是它不能反映多模光束在传输过程中光束横截面能量分布的改变。另外,在多模激光束聚焦过程中,一般不能采用 q 参数及 $ABCD$ 定律来分析其聚焦过程^[4]。

本文采用延迟位相分析法研究了多模激光束传输过程中能量分布的规律及聚焦特性,得到了多模激光束的聚焦公式,并研究了在聚焦过程中光功率横截面强度分布的变化规律。最后设计了在聚焦焦点处获得最小能量起伏变化的光学变换系统。

2 多模激光束传输特性

本文所指多模激光束为激光器输出光束为多种高斯模叠加场,它可以按照一系列厄米-高斯(方形镜腔)或拉盖尔-高斯(圆形镜腔)单模光束的线性组合^[5],不失一般性,只考虑一维情况,有

$$\phi = \sum_m C_m \phi_m \quad (1)$$

$$\phi_m = \phi_{0m} e^{-i\left(kz + k\frac{z^2}{2R(z)}\right)} e^{i(\omega_m t + \varphi_m)} \quad (2)$$

$$\phi_{0m} = a_m G_m \left[\frac{\sqrt{2} x}{\sigma(z)} \right] e^{-x^2/\sigma^2(z)} \quad (3)$$

式中, G_m 为厄米 - 高斯(方形镜腔)或拉盖尔 - 高斯(圆形镜腔)多项式; C_m 为复线性叠加系数, 且 $\sum_m |C_m|^2 = 1$, $C_m = \rho_m e^{i\varphi_m}$; a_m 为归一化因子, 满足 $\int_{-\infty}^{\infty} \phi_m^* \phi_m dx = 1$; $\sigma(z)$ 为光束半径, 且

$$\sigma(z) = \sigma_{00} \sqrt{1 + (z/Z_R)^2} \quad (4)$$

φ_m 为高斯光束延迟位相, 且

$$\varphi_m = (m + 1) [\text{arctg}(z/Z_R) + \varphi_0] \quad (5)$$

σ_{00} 为基模高斯光束束腰半径; Z_R 为高斯光束的瑞利长度(焦深或共焦参数)。

对于气体激光器, 损耗足够小时, 不会出现各种模式之间的差频效应^[6], 当损耗很大时, 激光器将输出很多模式, 须考虑各个模式之间的差频效应, 此时可以把输出光束看作高斯 - 斯耐尔光束^[7], 本文只考虑前一种情况, 即 $\omega_m = \text{const}$; 多模高斯光束在沿 z 方向传播中, 受耦合位相 ψ_m 和延迟位相 φ_m 的影响, 其横截面强度分布是变化的。考虑激光束在真空或弱介质, 如大气中的短距离传输, 模式之间不会发生耦合, 即 $\psi_m = 0$, 则多模高斯光束的横截面光场强度分布为

$$I = |\phi^* \phi| = \sum_m |C_m|^2 \phi_{0m}^2 + 2 \sum_{m>n} \rho_m \rho_n \phi_{0m} \phi_{0n} \cos\{(m-n)[\text{arctg}(z/Z_R) + \varphi_0]\} \quad (6)$$

图 1 所示为采用大功率 CO_2 激光束与光斑诊断仪(Prometec UFF100)所测量的 TLF6000 型多模激光束在不同传播距离横截面光强分布的变化状况与根据式(6)采用计算机模拟的对

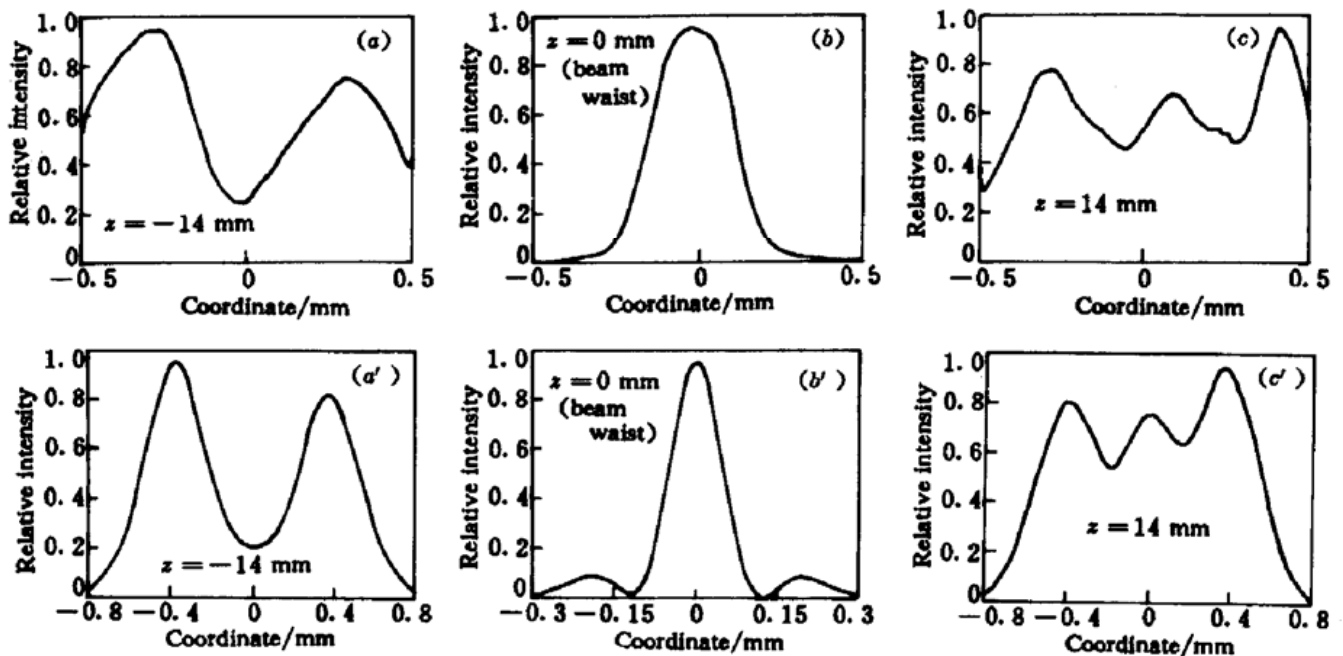


图 1 TLF6000 型多模激光束在不同传播距离横截面光强分布的测量结果 (a, b, c)

和根据式(6)的计算结果 (a', b', c')

激光束模式含量为 $\phi_0: \rho_0 = 55\%$, $\phi_1: \rho_1 = 1.5\%$, $\phi_2: \rho_2 = 43.5\%$, 且 $Z_R = 6.7$ mm, $\varphi_0 = 4.56$ rad, $\sigma_{00} = 0.136$ mm

Fig. 1 The measured cross-sectional intensity distribution (a, b, c) of a TLF6000 CO_2 laser is compared with the computational result (a', b', c') obtained according to equation (6)

The content of laser beam modes is $\phi_0: \rho_0 = 55\%$, $\phi_1: \rho_1 = 1.5\%$, and $\phi_2: \rho_2 = 43.5\%$.

And $Z_R = 6.7$ mm, $\varphi_0 = 4.56$ rad, and $\sigma_{00} = 0.136$ mm

比结果。可以看出测量结果与计算结果基本吻合。

3 采用延迟位相分析多模激光束的聚焦特性

采用薄透镜聚焦激光束, 设透镜入射端坐标原点在入射高斯光束束腰位置处, 出射端坐标原点也在出射高斯光束束腰位置处, 则透镜入射端高斯光束光场为

$$E_1 = \sum_m a_m G_m \left(\frac{\sqrt{2} x}{\sigma(z)} \right) e^{-x^2/\sigma^2(z)} e^{-i \left[k z + k \frac{x^2}{2R(z)} \right]} e^{i \varphi_m} \quad (7)$$

$$\varphi_m = (m + 1) [\arctg(z/Z_R) + \varphi_0] \quad (8)$$

$$\sigma(z) = \sigma_{00} \sqrt{1 + (z/Z_R)^2} \quad (9)$$

再设透镜出射端光场为

$$E_2 = \sum_m a_m G_m \left(\frac{\sqrt{2} x}{\sigma(z')} \right) e^{-x^2/\sigma^2(z')} e^{-i \left[k z' + k \frac{x^2}{2R(z')} \right]} e^{i \varphi_m'} \quad (10)$$

$$\varphi_m' = (m + 1) [\arctg(z'/Z_R') + \varphi_0'] \quad (11)$$

$$\sigma'(z) = \sigma'_{00} \sqrt{1 + (z'/Z_R')^2} \quad (12)$$

又设入射高斯光束束腰位置距离透镜为 s , 出射光束束腰距离透镜为 s' , 则

$$z' = z + s + s'$$

对于薄透镜, 在透镜入射面和出射面的光斑大小是相等的, 即

$$\sigma(s) = \sigma'(-s') \quad (13)$$

又延迟位相的传输是连续的^[5], 则

$$\varphi_m(s) = \varphi_m'(-s') \quad (14)$$

在透镜的后焦面上, 场分布为入射光束 E 的傅里叶变换, 也就是光场 E 的夫琅和费远场衍射, 即

$$\varphi_m(s + f) = \lim_{z \rightarrow \infty} \varphi_m(z) = \lim_{z \rightarrow \infty} (m + 1) [\arctg(z/Z_R) + \varphi_0] = (m + 1) \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_0 \right)$$

而场 E_2 在透镜后焦面的延迟位相为

$$\varphi_m'(f - s')$$

以上两式应相等, 得

$$\varphi_m'(f - s') = (m + 1) \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_0 \right) \quad (15)$$

将式(8)~(11)代入式(12)~(14), 求解得

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f} + \frac{Z_R^2}{s(s^2 + Z_R^2 - sf)} \quad (16)$$

$$\text{tg} \Delta \varphi = \frac{Z_R'}{f - s'} = \frac{Z_R}{f - s} \quad (17)$$

$$\Delta \varphi = \arctg \frac{Z_R}{f - s} \quad (18)$$

式中 $\Delta \varphi = \varphi_0' - \varphi_0$ 表示激光光束经透镜聚焦后延迟位相的改变。式(16)与 Kogelnik 等采用 q 参数^[8]所推导的单模高斯激光束以及 R. Iflaender 等采用的 ABCD 定律^[4]所推导的多模激光束的聚焦公式完全一致, 但是采用延迟位相分析法更能够反映多模激光束经透镜聚焦后横截

面光强分布的变化。式(18)同 H. Weber 所得的公式^[5]说明了经透镜聚焦后延迟位相增加了, 光束横截面光强分布规律也发生了改变, 并且当 $s = f$ 时即入射光束束腰位置在透镜前焦面上, $\Delta\varphi = \pi/2$, 由式(17)可知 $s' = f$, 即出射光束束腰位置在透镜后焦面上。图 2 所示为聚焦后延迟位相改变随 s 变化的曲线图。

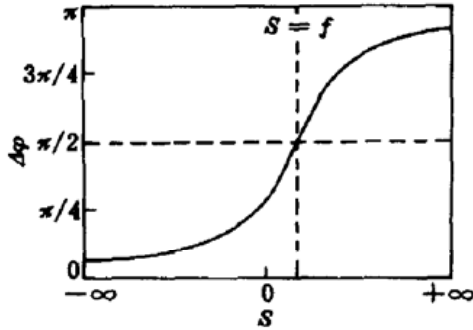


图 2 $\Delta\varphi$ 随传输距离 s 的变化曲线

Fig. 2 Changes of $\Delta\varphi$ according to different s

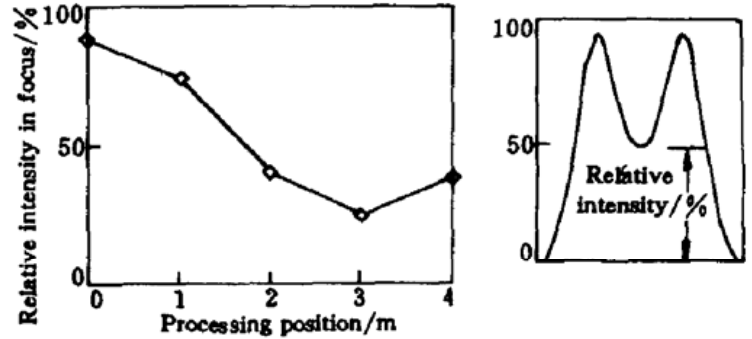


图 3 在不同的加工位置激光束在焦点处的横截面强度分布不相同

Fig. 3 Different beam intensity distributions in different processing positions

4 在焦点处具有最小光强起伏的光学系统设计

在激光加工中,要求在焦点附近光强分布应尽量保持一致,这样才能保证有较好的加工质量。尤其对于飞行光学系统,由于在不同的加工位置,束腰离透镜的距离不相同,由式(18)知, $\Delta\varphi$ 在加工范围内发生变化,导致光束能量分布在不同位置的焦点处不一样(如图 3 所示),图中所示为采用 UFF100 型诊断仪测量 TLF105 型激光加工机在加工范围内不同位置处,光束横截面能量分布的中心最低能量密度与最高能量密度的比值。为了保证同一个加工参数能适用于整个加工范围,有必要设计一套光学系统,使在加工范围内 $\Delta\varphi$ 不改变。

在激光加工中一般导光系统的类型有两种:即固定光束与移动光束。对于不同类型的导光系统应采取不同的光学系统,下面分别进行讨论。

4.1 固定光束型

对于固定光束型可以采用单透镜。由式(6)可知为使光强分布 I 变化最小,应使

$$\arctg(z/Z_R) + \varphi_0 = k\pi \quad (19)$$

k 为整数。

由式(11)及(18)可知,对于单透镜类型

$$\arctg(z'/Z_R') + \varphi_0 + \arctg \frac{Z_R}{f-s} = k\pi \quad (20)$$

在焦点处, $z' = 0$ 解得

$$s = f + Z_R \text{ctg} \varphi_0 \quad (21)$$

式中 φ_0 可以通过位相提取(Phase Retrieval)技术获得^[9]。

4.2 移动光束型

对于移动光束型,为使光束能量改变最小,可采用光学望远镜系统。设光学望远镜的前后透镜分别为 1 和 2,焦距分别为 f_1, f_2 ,透镜间距为 d , s'' 为激光束经透镜 1 聚焦后束腰位置到透镜 2 的距离,则激光束通过透镜 1 和 2 的光束相位改变为

$$\varphi_0' = \varphi_0 + \operatorname{arctg} \frac{Z_R}{f_1 - s} \quad (22)$$

$$\varphi_0'' = \varphi_0' + \operatorname{arctg} \frac{Z_R'}{f_2 - s''} \quad (23)$$

由式(17)得

$$Z_R' = Z_R \frac{f_1 - s'}{f_1 - s} \quad (24)$$

且 $s'' = d - s$ (25)

再由式(23)~(26)得

$$\varphi_0'' = \varphi_0 + \operatorname{arctg} \frac{Z_R}{f_1 - s} + \operatorname{arctg} \frac{Z_R}{f_2 - d + s'} \frac{f_1 - s'}{f_1 - s} \quad (26)$$

为了在焦点处获得最小光强变化, 应 $\varphi_0'' = k\pi$, 解得

$$d = f_2 + s' + Z_R \operatorname{ctg} \left(\varphi_0 + \operatorname{arctg} \frac{Z_R}{f_1 - s} \right) \frac{f_1 - s'}{f_1 - s} \quad (27)$$

式中 s' 可由式(16)求解。因此在飞行光学系统中, 在光束移动过程中应调节光束望远镜两个透镜之间的距离, 获得在焦点处最小光束能量分布的变化。

5 结 论

采用延迟位相分析法, 可以分析 CO₂ 激光束在自由空间的传输与变换, 它解决了一般只采用光束质量 M^2 一个参数描述多模激光束传输的缺陷, 反映了光束在传输与聚焦过程中光束横截面能量分布的变化状态。在激光加工中为了获得良好的加工质量, 应使多模聚焦光束在焦点附近光束能量变化最小, 对于固定光束型, 采用单透镜即可, 而对于移动光束型的飞行光学系统, 可采用光学望远镜作光束变换系统。

参 考 文 献

- 1 M. Essian, P. W. Fuerschbach. Beam characterization of a materials processing CO₂ laser. *Welding Journal*, 1996, February : 47s~54s
- 2 O. O. Diniz Neto, C. A. S. Lima. Nonlinear three-dimensional temperature profiles in pulsed laser heated solids. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, 27(9) : 1795~1804
- 3 D. Schuoecker. Heat conduction and mass transfer in laser cutting, laser technologies in industry. *SPIE*, 1988, 952 : 592~599
- 4 R. Iffländer, H. Weber. Focusing of multimode laser beams with variable beam parameters. *Optica Acta*, 1986, 33 (8) : 1083~1090
- 5 H. Weber. Focusing and imaging of laser beams. *Opt. Commun.*, 1987, 62(2) : 124~126
- 6 John P. Goldsborough. Beat frequencies between modes of a concave-mirror optical resonator. *Appl. Opt.*, 1964, 3 (2) : 267~275
- 7 Rolf Gase. The multimode laser radiation as a Gaussian schell model beam. *J. of Modern Opt.*, 1991, 38(6) : 1107~1115
- 8 H. Kogelnik, T. Li. Laser beams and resonators. *Appl. Opt.*, 1966, 5(10) : 1550~1566
- 9 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison. *Appl. Opt.*, 1982, 21(15) : 2758~2769

Study of Beam Propagation and Focus of a High Power CO₂ Laser with a Phase Shift Analysis

Wang Zhiyong Chen Tao Zuo Tiechuan

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

Abstract In laser materials processing, the transverse beam intensity distribution affects processing quality greatly. In this paper the phase shift (also called accessory phase overtaking) in laser beam is used to analyse the high power CO₂ laser beam transverse size and intensity distribution. The transverse beam size and intensity distribution in different positions in a TLF6000 laser beam propagation were measure by UFF100. The theory is agreed with measurement. According to this theory, an optical transformation system is designed to attain the minimum laser beam intensity distribution near the laser beam focus.

Key words high power CO₂ multi-mode laser beams, phase shifts, laser materials processing