

文章编号: 0258-7025(2008)04-0549-06

高功率横流 CO₂ 激光横模随时间变化的测量

程 成¹ 马行超¹ 许周速¹ 王文鹏¹ 姚建华²

(浙江工业大学¹ 应用物理系,² 激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310023)

摘要 用激光光束分析仪实时在线测量了一台连续运转的高功率横流 CO₂ 激光器的激光横模, 获得了较为完整的激光横模随时间的变化关系。测量结果表明, 激光输出由两个分离的、非对称的高阶横模叠加组成(“双模”), 两横模中心相距约 8 mm。形成“双模”的原因是串接式谐振腔的前腔和后腔两者的中心轴线不重合以及阴极铜管形变。横模随激光器运行时间的延长而逐步蜕化, 呈更高阶和复杂化趋向。初步分析表明, 横模的时间变化主要与激光器连续运转过程中腔内气体组分发生的变化有关。

关键词 激光技术; 气体激光器; 横模; 测量; 高功率 CO₂ 激光加工机; 随时间变化; 气体组分

中图分类号 TN 248.2⁺2 **文献标识码** A

Measurement of Temporal Depending Lasing Modes of a High Power Transverse-Flow CO₂ Laser Processor

Cheng Cheng¹ Ma Xingchao¹ Xu Zhousu¹ Wang Wenpeng¹ Yao Jianhua²

(¹Department of Applied Physics, ²Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract The transverse modes of a high power transverse-flow CO₂ laser are on-line measured by using a laser beam analyzer. The temporal evolution of the transverse modes is observed also. The output beams are characterized with “double mode”, i. e., two higher-order modes spacing 8 mm between the mode centers, and overlapping unsymmetrical configurations. There is evidence to show that such “double mode” arises from a misaligned axes of the resonator consisting of two tandem resonators, and a distorted cathode-copper tube. The transverse mode are more degenerated into complicated shapes as the lasing operating duration increases. An initial investigation shows that the temporal evolution of the modes depends on the gaseous component varying in the resonator during the lasing operation.

Key words laser technique; gas lasers; transverse mode; measurement; high power CO₂ laser processor; temporal evolution; gaseous component

1 引言

CO₂ 激光器是目前激光加工和激光再生产中的主力激光器。在激光加工或激光再生产过程中, 作为光源的 CO₂ 激光的模式会逐渐发生蜕变, 同时激光功率也会下降和变得不稳定, 从而使激光加工质量不一致和不稳定。目前, 我国国产的 CO₂ 激光加工机基本上为气体横向流动类型, 在横流 CO₂ 激光器中, 激光模式和功率的蜕化及不稳定问题尤其明显, 且长期得不到解决。激光模式和功率的蜕化

及不稳定问题已经成为制约我国激光加工技术发展的一个瓶颈, 研究并解决它具有重要的现实意义。激光光束质量包括了两方面的内容: 激光束的模式结构和光束输出的稳定性。国内外在这方面做了大量的研究^[1~9]。研究解决激光模式和功率的蜕化问题, 首先要测量或确定激光的模式和功率。由于大功率激光加工机的功率很高(一般可达几千瓦), 因此, 模式的测量比较困难或存在各种缺陷。近年来, 人们利用各种各样的电子仪器直接测量高功率激光

收稿日期: 2007-08-28; 收到修改稿日期: 2007-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(60777023)和全国优秀博士论文作者专项基金(FANEDD, 200433)资助项目。

作者简介: 程 成(1953—), 男, 浙江人, 教授, 博士生导师, 主要从事气体激光器、量子点光纤放大器等方面的研究。

E-mail: chengch@zjut.edu.cn

器的空间光束形状特征,如旋转式针孔探头 (rotating pinhole apertures)^[10] 和反射旋转线装置 (reflective rotating wire devices)^[11]。但无论是针孔探头还是反射线装置,都必须对整个主光束进行扫描,因此测量分析与激光加工过程不能同时进行。另外,由于光束图像是由针孔或导线逐个扫描得到的,因此速度较慢,并且不能测量短期内光束的波动。相比之下,焦热电镜头的优势就在于能实时、稳定地得到光束图像。2003年,美国 Spiricon 公司研制成功新型的焦热电镜头的大功率激光光束分析仪 (laser beam analyzer)。两年前,焦热电镜头的激光光束分析仪已被成功地用来对高功率 CO₂ 激光器光束的实时成像与分析^[12]。

本文用大功率激光光束分析仪(美国,II-VI-CO₂-BS-35型),实时在线测量一台连续运转的7 kW横流 CO₂ 激光器的激光横模随时间的变化。

2 实验装置和安排

实验在上海华中雷鸥激光设备有限公司生产的 GFT-IVB 型 7 kW 横流 CO₂ 激光器上进行。充入激光器谐振腔内气体的总量为 1.0664×10^4 Pa,混合气体体积比为 $V(N_2) : V(CO_2) : V(He) = 8 : 1 : 11$ 。流过放电区的气流速度约为 50 m/s。GFT-IVB 型 7 kW 横流 CO₂ 激光器采用管板式放电,谐振腔由双放电区串接而成(图 1)。

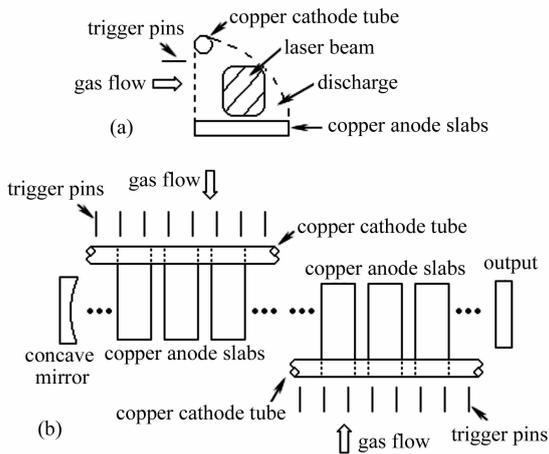


图 1 串接式谐振腔示意图。(a) 剖面图;(b) 俯视图
Fig. 1 Schematic diagram of the resonator consisting of two tandem resonators. (a) section; (b) planform

激光光束分析仪放置在 GFT-IVB 型 7 kW 横流 CO₂ 激光器输出端和光闸(图 2(a)中的 optical gate)之间的光路上,保持光路不变。高功率激光光束透过分光镜后到达 CCD 镜头(图 2(b)中的

pyroelectric camera),再通过 IEEE 1394 数据线,将数据传输到电脑上,由光束分析软件处理得到结果。从分光镜透射后到达 CCD 的透射光占入射光的 0.3%,其余的 99.7% 从图 2(b)中的 output 输出反射回主光路。

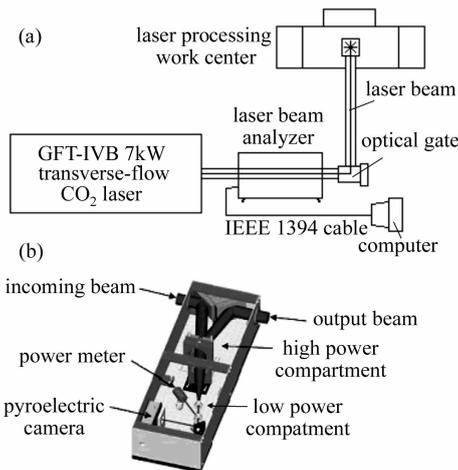


图 2 (a) 激光加工装置和激光光束分析仪示意图;
(b) 激光光束分析仪光束取样系统

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the lasing processing device and the laser beam analyzer; (b) The sampling system in the laser beam analyzer

激光输出的最大功率为 7 kW。为了保持稳定一致的激光输出,选取激光功率较低的 2 kW 作为测量的基准功率。同时,在整个测量期间,激光放电的条件(例如电压、充气气压及比例、气流速度等)都保持不变。

3 测量结果

3.1 横模模式随时间变化的测量

根据 CCD 镜头采集的每秒 16 组数据,激光光束分析仪实时绘制光强分布图,图 3 为某一瞬间(单组数据)的激光光束强度分布图。

在测量中发现,每秒 16 组数据的实时图像连续

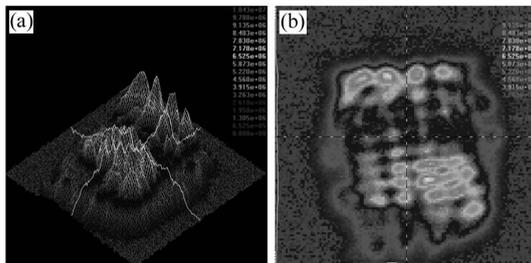


图 3 激光光束强度分布图。(a) 三维图;(b) 二维图
Fig. 3 Laser beam profiles at 2 kW in three-dimension (a) and two-dimension (b), respectively

变化之间差异很大, 瞬间变化的某一组数据很难代表该时间段的实际情况。因此, 在测量时取连续 32 组(2 s)数据的平均值作为结果。图 4 是激光光强

横向分布随时间的变化情况, 图中标注的时间为激光器运行时间, 所测激光场强分布区约为 22 mm × 30 mm。

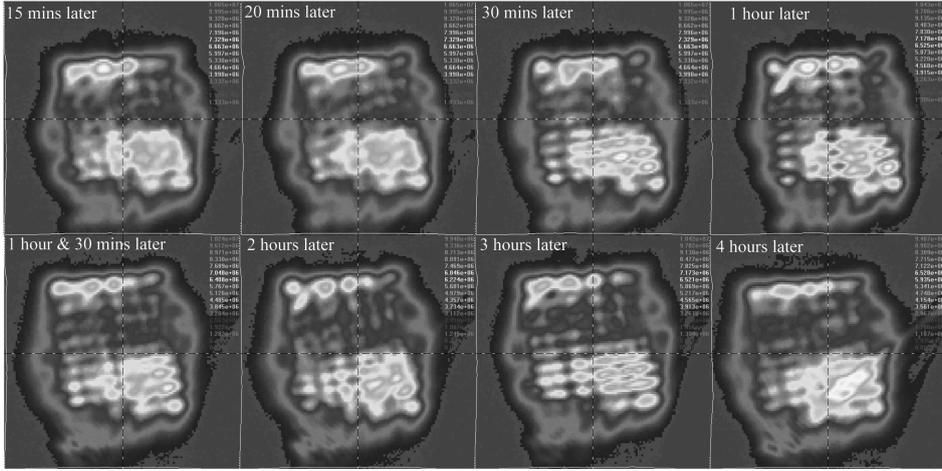


图 4 激光横模随时间变化图

Fig. 4 Temporal evolution of the lasing transverse modes

3.2 光斑尺寸随时间变化的测量

激光光束分析仪在表征光斑尺寸时采用

$$d_{\sigma_x} = 4 \cdot \sigma_x, \quad (1)$$

$$d_{\sigma_y} = 4 \cdot \sigma_y \quad (2)$$

的计算方法, 该方法是建立在工业标准定义基础上的一种方法, 其定义为光束强度曲线在 x 和 y 光轴上能量分布的标准偏差的 4 倍。式中 $d_{\sigma_x}, d_{\sigma_y}$ 分别表示 x 和 y 方向上的光束宽度, $\sigma_{x,y}$ 分别为 x 和 y 方向上光束强度的标准偏差

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_x \sum_y (x - \bar{x})^2 \cdot Z(x, y)}{\sum_x \sum_y Z(x, y)}, \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_x \sum_y (y - \bar{y})^2 \cdot Z(x, y)}{\sum_x \sum_y Z(x, y)}, \quad (4)$$

式中 $Z(x, y)$ 为单个像素的强度, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为光斑中心位置的坐标。

光斑尺寸随时间的变化如图 5 所示, 图中直径

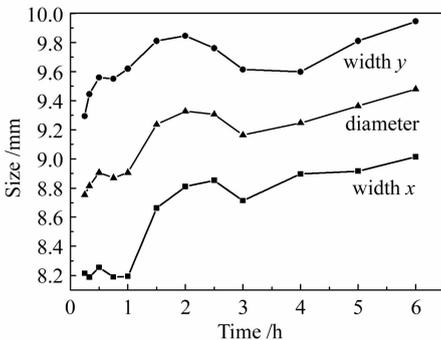


图 5 光斑尺寸随时间的变化

Fig. 5 Temporal evolution of the laser-spot sizes

(Diameter) 的计算值为两个(分别在 x 和 y 方向上)光束宽度的平均值。从图 5 可以看出, 光斑的尺寸随时间变化的总趋势是增大的, 其中 x 轴宽度从 8.214 mm 增至 9.015 mm, y 轴宽度从 9.293 mm 增至 9.945 mm, 增幅分别为 9.7% 和 7.0%, 整个光斑的形状有变“圆”的趋势。光斑的尺寸在 0.5~1.5 h 时间段内比较稳定, 到 1.5 h 时突然有较大幅度的增加, 在 3 h 处又产生了一个极小值, 之后单调递增。

3.3 光斑稳定性随时间变化的测量

光斑稳定性也是反映激光光束质量的一个重要指标, 它主要由光强峰值位置的标准偏差、中心位置的标准偏差、半径的标准偏差等参量来表征。峰值位置的标准偏差主要衡量单模激光光束的稳定性, 对于 CO₂ 激光的高阶横模来说意义不大。因此, 以后两项作为表征光斑稳定性的指标。我们在 6 s 内取光斑连续变化的 100 个左右的样本, 统计光斑

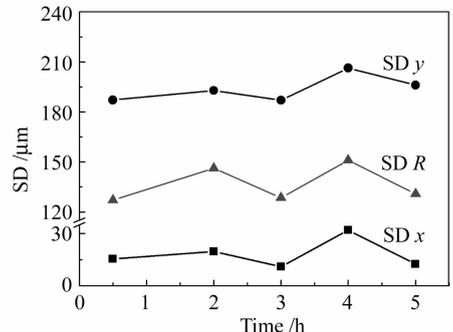


图 6 光斑尺寸的标准偏差随时间的变化

Fig. 6 Temporal evolution of the laser-spots sizes' SD

中心位置 (x 轴和 y 轴坐标) 和半径以及它们的标准偏差 (standard deviation, SD)。光斑稳定性随时间变化如图 6 所示。

4 分析和讨论

由于纵模之间的相互竞争以及粒子无规则的热运动消除了空间烧孔, GFT-IVB 型高功率横流 CO_2 激光器可获得稳定的振荡。在达到稳定振荡时, 激光器内的增益等于谐振腔的光学损耗, 这时腔内存在一个稳定的光强分布。对于二能级系统, 均匀加宽的激光器谐振腔内振荡模光子数密度 ρ 的速率方程可写为^[13]

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho \left[B \left(n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 \right) - c \left(\frac{1 - R_c}{L} + \theta \right) \right] + \delta A_{21} n_2, \quad (5)$$

式中 B 和 A_{21} 分别为激光受激辐射和自发辐射的跃迁概率, n_2 和 n_1 分别为激光上下能级粒子数密度, g 为能级统计权重, R_c 为谐振腔输出镜的反射率, L 为谐振腔腔长, θ 为每单位长度的衍射损失, δ 为自发辐射沿激光束方向所张的立体角。(5) 式方括号内第一项为受激辐射跃迁的贡献, 第二项为光腔损耗; 方程最后一项为自发辐射的贡献。

如果考虑方程(5) 右边的参量具有一个径向分布, 即 $n_1 = n_1(r, t)$, $n_2 = n_2(r, t)$, $\theta = \theta(r)$ 和 $R_c = R_c(r)$ 等, 则谐振腔输出镜上的光子数密度(或即激光光强)的径向分布与激光上下能级的粒子数密度以及激光腔的透射率($T(r) = 1 - R_c(r)$)的径向分布等参量密切相关。在激光器长期运行的过程中, 由于腔镜的热变形以及热损伤, 不可避免地会使出射镜的透射率产生径向分布的不均匀, 因此, 即使在粒子数密度横向分布均匀的情况下(实际是不均匀的), 形成如图 3 所示的模式结构也是可以理解的。光子数密度径向分布或光强分布的确定, 最终需要将方程(5)与激光能级粒子数密度速率方程联立求解, 这是一项非常复杂的工作, 已经超出本文的范围, 在此不涉及。

GFT-IVB 型高功率横流 CO_2 激光器的谐振腔为稳定平凹腔。为简单计算, 可以将其等价于共焦腔的情况(图 7), 考虑一个方向(例如 x 方向)的失调。当平凹腔的透射平面镜在 x 方向上倾斜 ϕ 角, 反射镜不变时, 就相当于其等价共焦腔的两个镜面分别倾斜了 $+\phi$ 和 $-\phi$ 角。这时, 横向本征模所满足的积分方程与调准时的类似, 但需要在 x 方向上附加一个相位因子 $e^{ik2\phi(x+x')}$ ^[14], 即

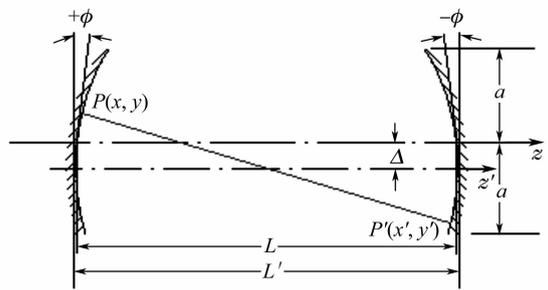


图 7 失调对称球面谐振腔

Fig. 7 Maladjusted symmetric spherical cavity

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m F_m(x) &= \left(\frac{ie^{-ikL}}{\lambda L} \right) \int_{-a}^a F_m(x') e^{-ik[xx'/L - 2\phi(x+x')]} dx' \\ \sigma_n G_n(y) &= \left(\frac{ie^{-ikL}}{\lambda L} \right) \int_{-a}^a G_n(y') e^{-iky'y'} dy' \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 σ_m 和 σ_n 分别为本征函数 $E_{mn}(x, y) = F_m(x)G_n(y)$ 中 $F_m(x)$ 和 $G_n(y)$ 的本征值, a 为反射镜的半径, k 和 λ 分别为波数和波长。通过近似求解可以得到镜面上的场分布^[14]

$$E_{mn}(x, y) = C_{mn} H_m(\sqrt{N_a}x_2/a) H_n(\sqrt{N}y_2/a) \times e^{-(N_a x_2^2 + N y_2^2)/2a^2}, \quad (7)$$

式中 C_{mn} 为常系数, $H_m(x)$ 为 m 阶厄米多项式, N_a 和 N 分别为失调腔和调准腔的非涅耳数。考虑腔镜上的基模光强, 由(7) 式得

$$I_{00}(x, y) = C_{00}^2 e^{-\frac{N_a x^2 + N y^2}{a^2}} = C_{00}^2 e^{-\frac{N_a^2 + N y^2}{a^2}} e^{-\frac{(N_a - N)x^2}{a^2}}, \quad (8)$$

式中对称高斯分布在 x 方向上受到了 $e^{-\frac{(N_a - N)x^2}{a^2}}$ 的调制, 使得光斑失去对称性。

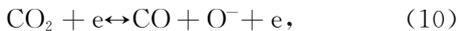
激光腔的失调(腔镜的倾斜), 会使得一些非零阶的横模得以起振, 光强的空间分布不再对称, 或即所形成的高阶模具有非对称。腔镜失调是形成图 3 所示模式具有非对称性的原因之一。

此外, 由于串接式谐振腔的前腔和后腔的中轴线不完全重合, 使得前腔与后腔中的激光等离子体中心位置不重合, 从而在输出镜上形成两个分离的高阶横模。另一方面, 经我们对激光器的详细解剖, 发现作为激光器放电的阴极铜管由于长期受到重力的作用而发生形变——靠近中心处呈下垂状态, 在中心处达到最大(约 5 mm)。水平铜管的下垂形变使得谐振腔中电场分布沿轴向不均匀, 因而使得激光等离子体分布不均匀, 造成激光光子数密度不均匀, 对“双模”造成一定的影响。采取精确定位前腔和后腔的中轴线以及适当加强铜管电极的强度等, 可消除

“双模”现象;反之,如果人为增大前后腔中轴线的间距以及适当调整铜管电极的形变,也可使输出激光光强分布趋于均匀,由此可满足不同的激光加工的需求。

从图 3 中可以看到,激光器工作 30 min 后激光光斑形状趋于稳定,这种稳定的状况会持续 4 h 左右,之后光斑的形状会变得更加复杂,稳定性也略有下降,激光质量也因此下降。在测量过程中,激光功率、放电电压、回路电流等物理量都是不变的。因此,造成激光光束质量下降的原因只能是谐振腔内气体组分的变化。导致气体组分发生变化的主要因素有两个:一是谐振腔内的气体在高压电场作用下发生反应;二是谐振腔慢性漏气。

激光器工作时,由于电子碰撞等原因,谐振腔内原有的气体会发生变化。主要发生的反应有:



(9),(10)反应在激光器工作的初期,由于 CO₂ 含量

与 CO 含量的不平衡,因此以正反应过程为主,其结果是使得 CO₂ 含量降低以及 CO 和 O₂ 增高。随着激光器运行时间的增加以及外界大气的渗入,CO 和 O₂ 的含量逐渐增多,特别是 O₂ 含量的积累,使得逆反应速率增加。我们在先前的测量中发现^[2],激光器工作了 1 h,CO₂ 分解了 20%,但在 1 h 后 CO₂ 含量基本保持稳定。而从激光器运行初期的实际光斑形状来分析,在气体放电后 20~30 min,CO₂ 的含量就达到稳定了。其后光斑质量达到最好和最稳定,其时间可持续 2~3 h。

激光器工作时谐振腔内的充气压强为 1.066×10^4 Pa,远小于腔外的大气压强。在对激光器的密封性测量过程中发现^[2],在密封 163~165 h 后,腔内气体由最初充入的 1.066×10^4 Pa 增大为 $1.094 \times 10^4 \sim 1.096 \times 10^4$ Pa。假设各时间段的漏气是均匀的,可计算得到在实验过程中腔内气体组分的变化,如表 1 所示。表 1 中某气体的含量是指该气体占腔内气体总量的体积分数。

表 1 腔内气体组分的变化

Table 1 Temporal evolution of the gaseous components in the resonator (Volume fraction)

Laser operating duration T_1 / h	Sealed duration T_2 / h	Leaked gas p / Pa	Leaked O ₂ concentration c_1 / %	CO concentration c_2 / %	O ₂ concentration (generated by decomposition of CO ₂) c_3 / %
1.0	5.0	8.8	0.017	0.982	0.491
1.5	22.5	39.3	0.077	0.850	0.425
4.0	48.0	84.0	0.164	0.695	0.348
5.5	72.0	126.0	0.245	0.641	0.320

由表 1 可见,在 4 h 之前,漏入谐振腔的 O₂ 含量 c_1 要远小于由 CO₂ 分解产生的 O₂ 含量 c_3 。此时,可以忽略漏气对腔内气体组分变化的影响。4 h 时, c_1 和 c_3 已经基本相近。随着激光运行时间的延长, c_1 将逐步超过 c_3 ,O₂ 的总含量会接近总气压的 1%。O₂ 浓度的积累,将使得反应式(9)的逆反应速率增加,导致 CO 含量 c_2 的降低。而 CO 能够非常有效地使 CO₂ 分子的 01¹0 能级发生弛豫,并通过共振转换来激励 00⁰1 能级^[13]。由于 O₂ 浓度的增高和 CO 浓度降低等原因,会对气体放电过程产生不良影响,引起激光模式蜕化,甚至导致激光器无法工作。

整个测量过程是在四天内选取特定的时间段分别进行的。由于气体工作时间和密封时间不一致会对结果产生影响。例如 4 h 时的数据实际上是在密封 48 h 后测量的,如果做连续测量,此时密封时间应为 8 h,那么 c_1 体积分数应当为 0.021% 左右,比表 1 中所列的 0.164% 要小得多。因此,光斑质量维持稳定的时间将会比本实验中的 4 h 更长。事实上,激光器换气之后的 1~2 天内,光束质量能够保持在较稳

定的状态,直到 c_1 与 c_3 相近或比 c_3 更多时,会使激光模式蜕化和功率下降。

5 结 论

GFT-IVB 型高功率横流 CO₂ 激光器的激光横模存在着非对称“双模”现象,其模式为强度不等的高阶模,间隔约 8 mm。激光光强分布相对比较均匀。模式的不对称与谐振腔腔镜的失调有关,“双模”现象则与谐振腔的串接结构以及铜管电极的形变有关。

对给定的谐振腔,影响激光横模随时间变化的稳定性的因素主要是谐振腔内气体组分的变化。气体组分的变化主要来自于两个方面:1) CO₂ 与电子碰撞而发生离解,使得其含量降低(主要在激光器运行初期);2) 大气漏入。这两者之间存在一个动态平衡(激光器运行约 30 min 后)。在这一时间段内,激光模式相对稳定。当漏入腔内的 O₂ 与腔内形成的 O₂ 含量相近或更多时,由于 O₂ 的有害作用,使

激光模式和功率蜕化。

在本文的激光横模确定之后,可以通过观测激光横模以及气体成分的时间变化,找到激光横模与气体成分之间的关系,从而可根据激光加工对光源的不同需求,确定最佳的气体成分及比例。同时,也可重新设计激光谐振腔的透反射镜等,使透反射镜的透反射率有一个径向分布。通过不同的透反射镜组合,来获得不同的激光模式。也可以据此重新建立激光动力学方程,通过数值计算来模拟和预计激光模式和功率以及它们的时间演化,从而为实验提供指导。对于激光横模模式的定量分析,由于牵涉到谐振腔的具体结构以及激光光子密度的横向分布等诸多因素,而激光光子密度又与激光上下能级粒子数密度、激光等离子体电子温度和电子密度等有关,其激光动力学过程比较复杂。有关工作有待于进一步开展。我国生产的大功率横流 CO₂ 激光器很多都是串接式谐振腔或双谐振腔,因此,本文的结果具有较为普遍的意义。

致谢 非常感谢浙江工业大学激光加工技术工程研究中心的孙东跃、楼程华等老师及研究生在实验过程中给予的大力帮助。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhiyong, Chen Tao, He Ping *et al.*. Measurement of optical parameters for high-power CO₂ laser beams according to changes of transverse intensity distribution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(12):1075~1079
王智勇,陈涛,贺平等. 大功率 CO₂ 混合模激光束传输参数的精确测量[J]. 中国激光, 2000, **A27**(12):1075~1079
- 2 Cheng Cheng, Zhousu Xu. Experiment determination of after-operating gas compositions in a transverse-flow CW high power CO₂ laser [J]. *Optics and Laser Technology*, 2005, **37**(4):293~297
- 3 Manuel Guizar-Sicairos, Julio C. Gutierrez-Vega. Modeling of

- transverse-mode competition in unstable resonators with large discharge current using the exact cavity equations of motion with dynamic gain [C]. *SPIE*, 2005, **5708**:32~43
- 4 Gai Yujian, Gui Zhenxing, Qian Hongbin *et al.*. New tube-plate electrodes for high-power transverse flow CO₂ lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1172~1175
盖玉健,归振兴,钱红斌等. 高功率横流 CO₂ 激光器的新型管板式电极[J]. 中国激光, 2006, **33**(9):1172~1175
 - 5 Dongxiong Ling, Junruo Chen, Junchang Li. Gaussian-reflectivity mirror resonator for a high-power transverse-flow CO₂ laser [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(13):3158~3162
 - 6 Hong Lei, Li Lijun, Ju Chunlei. Design of optical resonator of folded quasi-sealed-off CO₂ laser unit [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9):792~794
洪蕾,李力钧,鞠春雷. 折叠式准封离型 CO₂ 激光器的光学谐振腔设计[J]. 中国激光, 2002, **A29**(9):792~794
 - 7 Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11):1698~1704
杨向通,范薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形[J]. 光学学报, 2006, **26**(11):1698~1704
 - 8 G. Machavariani, N. Davidson, A. A. Ishaaya *et al.*. Improving the stability of longitudinal and transverse laser modes [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **239**(3):147~151
 - 9 Xuanhui Lu, Kaikai Huang, Dajian Xue *et al.*. Laser beam characteristic for laser resonators with diffraction optical elements [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(3):153~156
 - 10 J. V. Gilse, S. Koczera, D. Greby. Direct laser beam diagnostics [C]. *SPIE*, 1991, **1414**:45~54
 - 11 D. M. Hirak, D. C. Weckman, H. W. Kerr. Measuring the spatial intensity distribution of high-power focused laser-beams using a rotating wire type laser beam analyzer. I: Theory [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1994, **5**:1513~1522
 - 12 Huan Qi, Jyati Mazumder, Larry Green *et al.*. Laser beam analysis in direct metal deposition process [J]. *J. Laser Applications*, 2005, **17**(3):136~143
 - 13 Cheng Cheng. Studies on kinetics of gas lasers and optimal designs of the lasers with large power [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. 34~45
程成. 气体激光动力学研究及大功率激光器优化设计[D]. 杭州:浙江大学, 2001. 34~45
 - 14 Gao Aihua, Gu Qiao, Lu Zhiguo. The maladjustment of laser cavity and light beam quality [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(8):763~766
高爱华,顾樵,陆治国. 激光器腔的失调与光束质量[J]. 光子学报, 1999, **28**(8):763~766