

# 高功率激光器的光束质量 及其对激光加工的影响

丘军林

(华中理工大学激光研究所, 武汉, 430074)

**摘要:** 本文介绍了光束的模式、评价光束质量的几种方法,着重介绍了国际标准化组织(ISO)提出的光束传输系数  $M$  作为评价光束质量的方法。文中还讨论了光束质量对焊接、切割加工的影响;热透镜效应对加工的影响等。

**关键词:** 高功率激光器 光束质量 激光加工

## The beam quality of high power lasers and its influences on the laser processing

Qiu Junlin

(Institute of Laser, HUST)

**Abstract:** This paper presents the beam mode, some methods for evaluating beam quality. As put forward by International Organization for Standardization, here the method to use beam propagation factor  $M$  for evaluating beam quality has been discussed. The influences of laser beam quality and the thermal effect of lens on the laser welding, cutting and laser processing are also described.

**Key words:** high power laser beam quality laser processing

### 一、引言

激光束用于材料加工,主要是切割和焊接,它们要求有较小的切缝和焊缝,也就是说聚焦后的光斑愈小,能量密度愈高,越有利于加工。然而对于大体积放电的高功率  $\text{CO}_2$  激光器采用稳腔输出往往是多模,为了获得低阶模或基模,就必须采用选模的方法。

评价激光束的光束质量目前在一般产品目录中,主要采用模式、发散角来表示;德国 Weber 教授提出双参数法(发散角  $\times$  光束直径)<sup>[1]</sup>;最近国际标准化组织(ISO)提出了用光束传输系数( $M$  或  $M^2$ )来表示光束质量的方法<sup>[2]</sup>,都是为了更加确切的评价激光束的光束质量。

人们所以如此重视光束质量问题,主要是对激光加工,例如切割、焊接的影响太大,因此引

起了广泛的重视,随着激光加工的广泛应用,人们对此认识就愈来愈深刻。

### 二、光束的模式

不同的光场分布即不同的激光模或激光波形,也就是激光谐振腔的本征频率,并记为  $TEM_{m,n,p}$ 。TEM 表示横向电磁场,  $m, n$  为  $x, y$  方向的节点数,  $p$  为  $z$  方向的半波长数,当  $p=0$  时,光束模式一般都用  $TEM_{m,n}$  来表示。

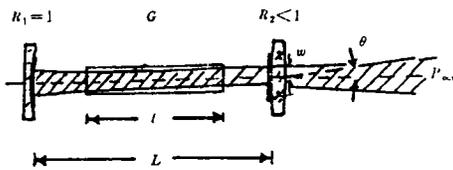


Fig. 1 Beam divergence angle

当  $m = n = 0$  时,  $TEM_{0,0}$  模的光场呈高斯分布,称之为基模,它近似于在光阑上的平面波的衍射,其发散角(半角)如图 1 所示为:

$$\theta_0 = \frac{1.3\lambda_0}{\pi a}, \quad a \ll w_0 \tag{1}$$

式中,  $\lambda_0$  为激光波长;  $a$  是光阑半径;  $w_0$  是高斯光束的束腰半径。

如果光阑位于束腰上,即  $a = w_0$ , 则发散角近似可写成:

$$\theta_0 \approx \lambda_0 / \pi w_0 \tag{2}$$

对于一个  $m$  阶模的光束半径为:

$$w_m = w_0 \sqrt{m + 1} \tag{3}$$

相应的发散角为:

$$\theta_m = \theta_0 \sqrt{m + 1} \tag{4}$$

对于一个  $n$  阶模的光束半径和发散角也有类似的表达式。

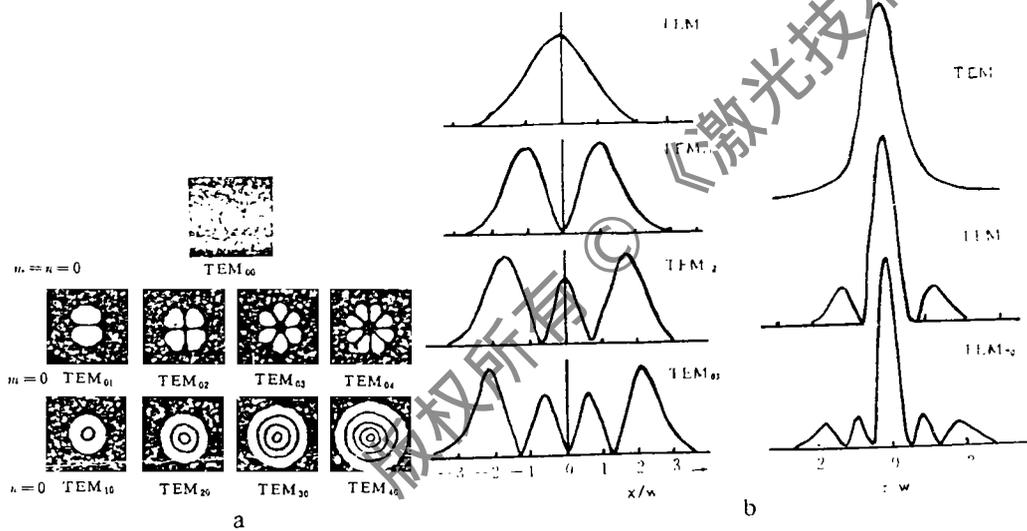


Fig. 2 The mode-pattern with rotational symmetry and the intensity distribution in the far field of the laser beam  
a—the mode-pattern with rotational symmetry b—intensity distribution in the far field

由(3)式、(4)式可见,随着模的阶次增加其光束半径及发散角也增大。在通常情况下,  $m + n < 2$ , 在我国认为是低阶模; 如果  $m + n > 2$  则称为高阶模或多模。这里必须指出的是在国际上



式中,  $F$  为焦距, 光束传输参数为:

$$M = \sqrt{\frac{\pi}{4\lambda} \left[ \frac{D_{ol}^2 (D_1^2 / D_{ol} - 1)^2}{L_2 - L_1 / 2} \right]} \quad (8)$$

式中,  $\lambda$  为光波波长;  $D_{ol}$  为光腰直径;  $D_1$  为离透镜中心  $L_1$  处的光束直径;  $L_2$  为发散后离透镜中心距离。

如果透镜是在光腰的瑞利长度的 1/3 范围内, 并且小于 5%, 则可简化为:

$$M = \sqrt{\frac{\pi}{4\lambda} \cdot \frac{D_L D_f}{F}}$$

或

$$M = \sqrt{\frac{\pi}{4\lambda} \cdot D_L \cdot \theta} \quad (9)$$

式中,  $D_L$  为在透镜上的光束直径。

由此可以得到高斯光束光腰为:

$$d_{ol} = \frac{D_{ol}}{M} \quad (10)$$

由(9)式可以看出, 光束传输系数包含了波长、光束直径及发散角三个参数, 很明显  $M$  值愈小, 光束质量愈好, 文献[2]给出了相应模式的光束传输系数  $M^2$  的数值:

mode	TEM <sub>00</sub>	TEM <sub>01</sub>	TEM <sub>10</sub>	TEM <sub>11</sub>	TEM <sub>20</sub>	TEM <sub>21</sub>
$M^2$	1	2	3	4	5	6

下面举例说明。

Table 1  $M^2$  value of CO<sub>2</sub> laser and YAG laser

type	parameters				
	$\lambda(\mu\text{m})$	$P(\text{W})$	$D_L(\text{mm})$	$\theta(\text{mrad})$	$M^2$
CO <sub>2</sub>	10.6	500	14	1.5	1.56
YAG	1.06	400	6	10	44.4

很明显, CO<sub>2</sub> 激光器的模式为准基模, 而 YAG 激光器的模式则是多模, 并且是高阶次模。

#### 四、光束质量对激光加工的影响

激光束的光束质量对激光加工过程及加工质量均有很大影响, 对不同的加工方法有不同的要求, 例如, 激光热处理只是表面加热, 激光功率密度要求较低( $10^4 \sim 10^5 \text{W/cm}^2$ ), 光斑尺寸较大, 但要求光强分布要比较均匀, 一般情况下激光束可以在多模条件下运行; 但对于激光焊接, 由于要达到金属熔化, 要求有较高的功率密度( $5 \times 10^5 \sim 10^6 \text{W/cm}^2$ ), 对焊缝宽度及焊缝深度都有一定的要求, 一般采用基模或低阶模的激光束, 如果光束质量不好就很难满足焊接质量的要求, 对于激光切割, 由于金属要达到汽化, 这就要有更高的功率密度( $10^6 \sim 10^7 \text{W/cm}^2$ ), 一般采用基模或具有偏振的基模激光束。

##### 1. 光束质量对激光焊接的影响

图 4 给出了不同的模式对钢板焊接深度的影响<sup>[3]</sup>, 下面列表加以说明:

Table 2 Influence of the beam quality on the welding depth

mode	laser power density ( $W/cm^2$ )	welding speed (m/min)	welding depth (mm)
TEM <sub>00</sub>	$2 \times 10^6$	2	3
TEM <sub>10</sub>	$2 \times 10^6$	2	1.8
TEM <sub>20</sub>	$2 \times 10^6$	2	1.1

由上表可见,相同的激光功率密度、相同的焊接速度,由于不同的模式,焊接深度明显的不同,由图4也可以看出,焊缝的质量也完全不同,TEM<sub>00</sub>模具有最佳的深宽比。

## 2. 光束质量对激光切割的影响

下面给出两种不同的模式对同样厚度钢板进行激光切割得到的结果,皆采用辅助吹氧切割。

Table 3 Influence of the beam quality on the laser cutting

mode	laser power (W)	cutting speed (m/min)	thickness (mm)	focused spot diameter (mm)	cut width (mm)
mult mode	1800	2	2	1	0.9
single mode	500	1.7	2	0.125	0.4

由上表我们可以明显看出,采用基模的CO<sub>2</sub>激光器进行薄板切割要比采用多模CO<sub>2</sub>激光器要好得多,切缝也要小得多。虽然基模激光功率只有500W,但其功率密度( $4 \times 10^6 W/cm^2$ )要比多模1800W的功率密度( $2.3 \times 10^5 W/cm^2$ )高一个数量级,因此基模激光器切割效果要好得多。

## 3. 偏振光束对激光切割的影响

如果进行厚钢板或木板激光切割,我们会很快发现,仅仅具有基模的激光束还是不够的,其切口不是垂直的而是倾斜的,如果采用具有圆偏振的基模激光束则可以获得垂直的切口,可以获得满意的切割效果。

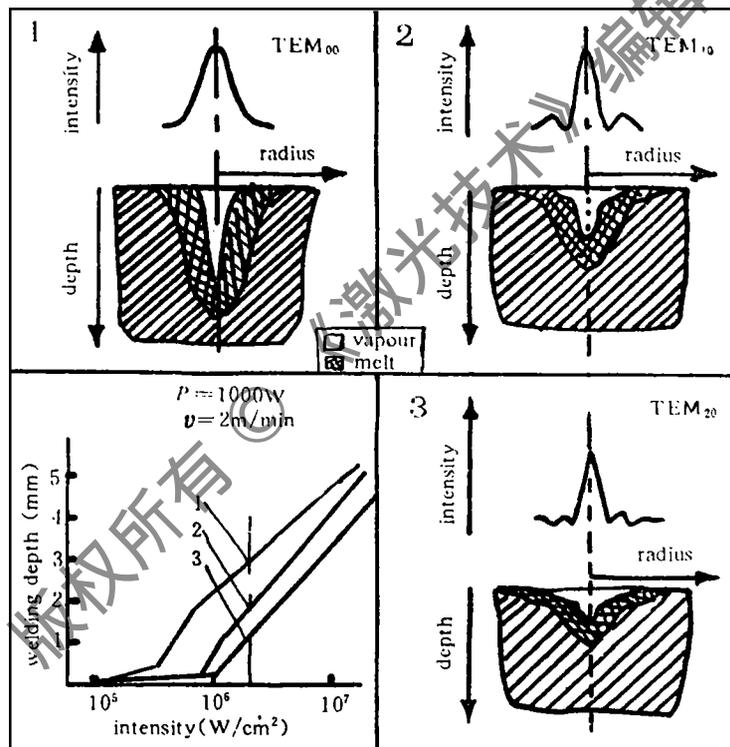


Fig. 4 Influence of the beam-mode on the laser welding

#### 4. 热透镜效应对激光加工的影响

如果在激光加工中我们使用的是固体聚焦透镜(GaAs 或 ZnSe),如图5所示,则当激光束通过时,透镜不断地被加热而发生膨胀,因此改变了透镜的曲率半径,并且使透镜曲率半径变小,这种现象称为热透镜效应。相对应于冷透镜和热透镜各有一个焦点,如果我们将焦点取在

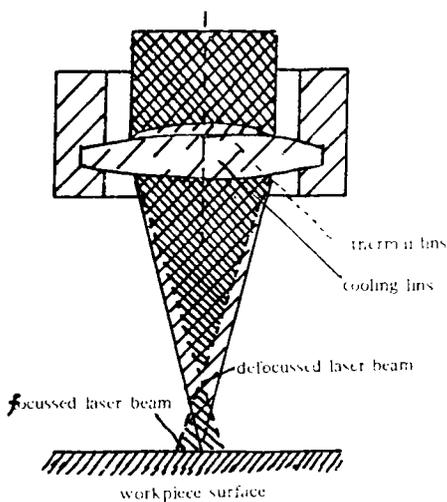


Fig. 5 Thermal effect of the lens

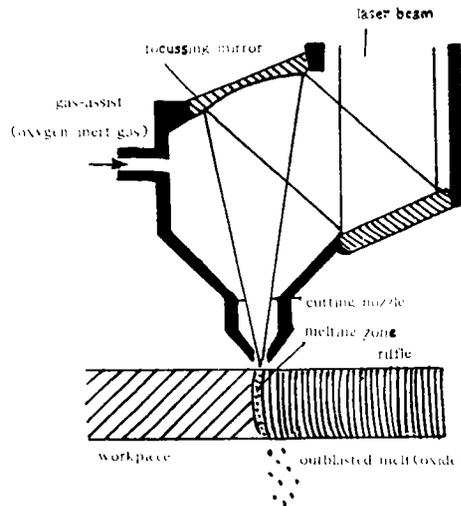


Fig. 6 Focal mirror

工件表面,开始时透镜处于冷的状态,焦点刚好落在工件表面,但随着透镜被加热,焦点就会往上移动,而工件表面形成离焦状态,其表面的光斑尺寸变大,从而影响加工质量。为了克服这种热效应,一方面必须很好地冷却透镜,另一方面要合理选择焦点的位置。但是,如果要从根本上消除这种热效应,最好选择反射式透镜,如图6所示。

## 五、结 束 语

从以上讨论,我们可以得出下面几点结论:(1)对不同的加工方法对激光束的光束质量提出不同的要求。(2)对激光焊接和切割来说,采用基模激光器可以获得较高的功率密度,也可以提高激光加工质量。(3)对原板激光切割要获得满意的切割效果,最好使用具有圆偏振的基模激光束。(4)在激光加工中必须重视热透镜效应对激光加工质量的影响,解决问题的途径之一是使用反射式透镜代替固体透镜。

### 参 考 文 献

- 1 Weber H. Laserresonatoren and Strahlqualität. Laser and Optoelektronik, 1988, (2)
- 2 ISO/TC 172/SC 9/WGI. Terminology and test methods for lasers. 1991-02-19
- 3 Laser in der Materialbearbeitung. Institut fuer Strahlwerkzeuge, Universitaet Stuttgart, 1990

作者简介:丘军林,男,1936年出生。教授。现从事激光技术和应用研究。

收稿日期:1993-08-23 收到修改稿日期:1993-11-26