

TN248

⑥
86-91

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 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)^[1]; 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^[2], 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 $TEM_{mn,p}$ 。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_{mn} 来表示。

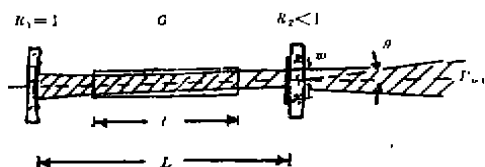


Fig. 1 Beam divergence angle

当 $m=n=0$ 时, TEM_{00} 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:

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

式中, λ_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:

$$\theta_0 \approx \lambda_0 / \pi w_0 \quad (2)$$

对于一个 m 阶模的光束半径为:

$$w_m = w_0 \sqrt{m+1} \quad (3)$$

相应的发散角为:

$$\theta_m = \theta_0 \sqrt{m+1} \quad (4)$$

对于一个 n 阶模的光束半径和发散角也有类似的表达式。

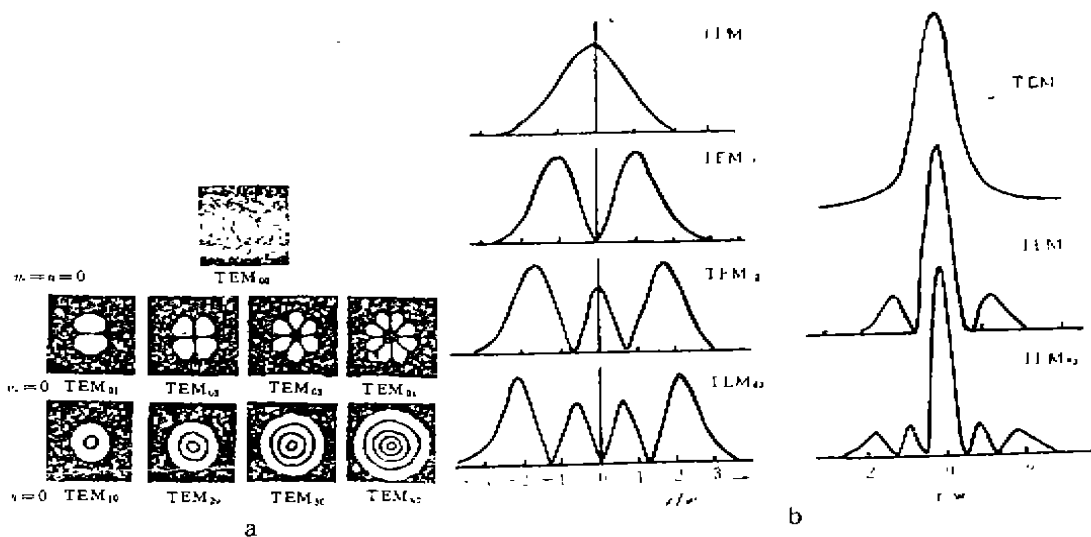


Fig. 2 The mode-pattern with rotational symmetry and the intensity distribution in the far field of the laser beam
a—the mode-pattern with rotational symmetry b—intensity distribution in the far field

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

只有基模、准基模和多模的说法。

图2表示了激光束旋转对称模的花样和光场分布。

三、光束质量的评价

1. 发散角

从光束传输的角度来看,激光束模的阶次愈高,发散角愈大,表明光束质量愈差,反之亦然。例如,高功率 CO_2 激光器的发散角(全角)小于 1.5mrad ,被认为是基模或准基模,大于 2.5mrad 为多模,介于 $1.5\sim 2.5\text{mrad}$ 称之为低阶模。

2. 双参数法(光束半径 $\times$ 发散角)

德国柏林固体激光研究所 Weber 教授认为,只用发散角来评价光束质量是不准确的,例如:可以用望远镜准直系统来减小发散角,但是光束半径却要增加,这样光束半径乘发散角并未减小,因此他认为用光束半径(w) $\times$ 发散角(θ)来表示光束质量更为确切,只有 $\theta \cdot w$ 的乘积很小,才能认为光束质量好,也就是说在近场和远场的光场高斯分布中得到最小可能的值:

$$\theta_e \cdot w_e \geq \lambda/\pi \quad (5)$$

或

$$\theta_{90} \cdot w_{90} \geq 1.32\lambda/\pi \quad (6)$$

式中, w_e 为强度最大值下降到 $\frac{1}{e^2}$ 值时的光束半径; w_{90} 为包括总功率为 90% 的光束直径的一半; θ_e 为相应于 w_e 时的发散角; θ_{90} 为相应于 w_{90} 时的发散角。

例如, 500W CO_2 激光器测到的 $\theta_e \cdot w_e = 4.2\text{mrad} \cdot \text{mm}$, 而 CO_2 激光器的衍射极限为 $\theta_e \cdot w_e = 3.2\text{mrad} \cdot \text{mm}$, 那末,前者为后者的 1.3 倍,由此可判断,此激光器光束模式只能是低阶模。

3. 光束传输系数

1991 年国际标准化组织(ISO),在“激光束宽度、发散角和辐射特性系数的试验方法”中提出了光束传输系数 M 或 M^2 ,传输系数中包含了光束直径、发散角和光波的波长,这更能确切的表示光束质量。

图3表示了光束传输及其主要参数。 Z_0 为光束沿轴向传输最小光腰处的位置; D_0 为最小光腰直径; d_0 为高斯光束的光腰直径; θ 为远场发散角(全角); D_L 为在透镜上的光腰直径; D_1 为离透镜 L_1 处的光腰直径; D_f 为焦斑直径; F 为透镜的焦距; D_{0L} 为离透镜 L_1 处的光腰直径; d_{0L} 为离透镜 L_1 处的高斯光束光腰直径; D_2 为透镜 L_2 处的光腰直径; Z_R 为输出窗与透镜之间的距离; R_s 为在光源侧的透镜曲率半径; R_L 为在测量侧的透镜曲率半径。

由图3可以得到光束的发散角(全角)为:

$$\theta = \frac{D_f}{F} \quad (7)$$

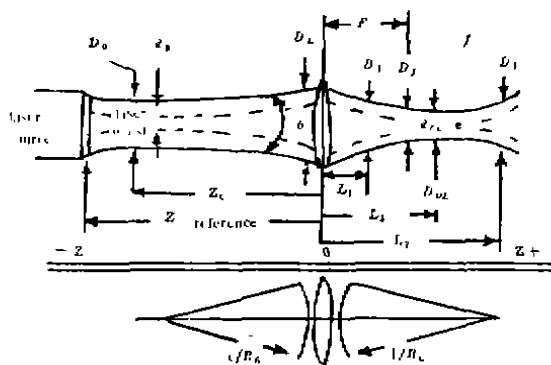


Fig. 3 Beam propagation and principal parameter

式中, F 为焦距, 光束传输参数为:

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

式中, λ 为光波波长; D_{ol} 为光腰直径; D_l 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 ₀₀	TEM ₀₁	TEM ₁₀	TEM ₁₁	TEM ₂₀	TEM ₂₁
M^2	1	2	3	4	5	6

下面举例说明。

Table 1 M^2 value of CO₂ laser and YAG laser

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

很明显, CO₂ 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^[3], 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_{00}	2×10^5	2	3
TEM_{10}	2×10^5	2	1.8
TEM_{20}	2×10^5	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_{00} 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_2 激光器进行薄板切割要比采用多模 CO_2 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($4 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2$)要比多模 1800W 的功率密度($2.3 \times 10^5 \text{W}/\text{cm}^2$)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,我们就会很快发现,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。

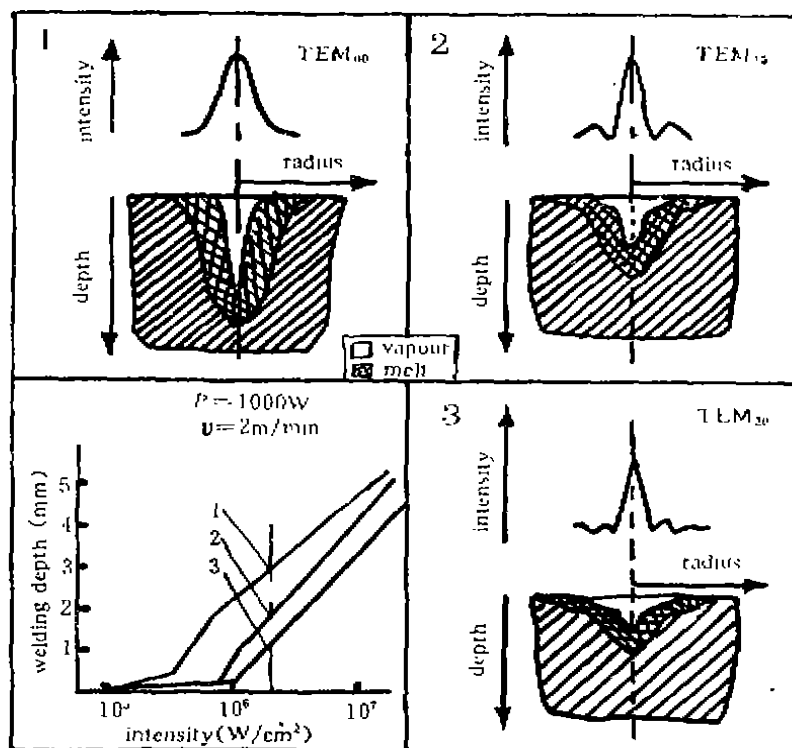


Fig. 4 Influence of the beam-mode on the laser welding

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

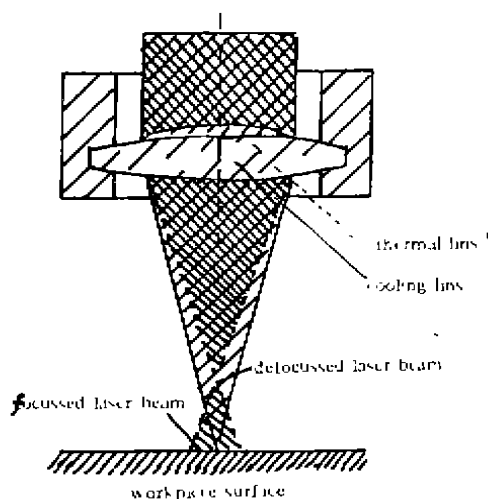


Fig. 5 Thermal effect of the lens

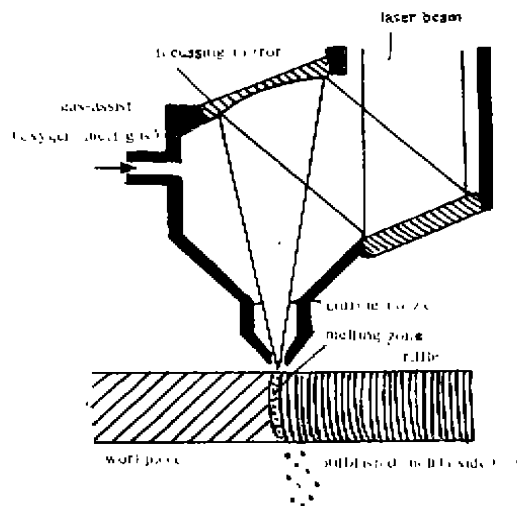


Fig. 6 Focal mirror

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 und Strahlqualität. Laser and Optoelektronik, 1988, (2)
- 2 ISO/TC 172/SC 9/WG1. 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