

光束质量对激光加工中光束行为的影响

王智勇 陈虹 左铁钊

(北京工业大学国家产学研激光技术中心, 北京, 100022)

摘要 在光束质量定义的基础上, 阐述了光束质量对激光加工中光束的传输、聚焦、光束变换以及光束加工范围的影响.

关键词 光束质量, 激光加工, 光学变换, 飞行光学

分类号 TG 665

1 光束质量的定义

到目前为止, 激光光束质量的好坏可以采用光束远场发散角、光束聚焦特征参数值 K_f (也称双参数法) 和衍射极限倍因子 M^2 (M) 或光束传输因子 K 值来表示^[1, 2].

光束的远场发散角决定了激光光束可传输多远而不明显发散. 发散角越大, 光束质量越差. 但是光束发散角可通过光学变换来改变, 因而不能全面地评价激光束的质量.

激光光束的聚焦特征参数 K_f 定义为聚焦前后光束的束腰半径 \times 远场发散半角, 即

$$K_f = \omega_0 \cdot \theta = \omega'_0 \cdot \theta' \quad (1)$$

式中: ω_0 为激光束束腰半径; θ 为聚焦前激光束的远场发散半角; ω'_0 为聚焦光束的束腰半径; θ' 为聚焦后激光束的远场发散半角. 采用 K_f 值来评价激光光束质量的优劣, 避免了只用光束发散角作为光束质量判据的不全面性. K_f 值越小, 光束的传输距离越长, 聚焦的焦点越小, 焦点功率密度越高, 因而光束质量越好.

现在通用的是采用国际标准化组织 (ISO) 在“激光光束宽度, 发散角和辐射特性系数的试验方法”中推荐的光束传输因子 K 或衍射极限倍因子 M^2 来评价光束质量的好坏. M^2 和 K 实际上表现了光束质量的好坏, 本文把 M^2 和 K 统称为光束质量因子, 分别定义为

$$M^2 = \frac{\text{实际光束的腰斑直径} \times \text{远发散角}}{\text{理想光束的腰斑直径} \times \text{远场发散角}} = \frac{\pi}{\lambda} \omega_0 \theta \quad (2)$$

$$K = 1 / M^2 \quad (3)$$

M^2 、 K 、 K_f 之间的关系为

$$M^2 = 1 / K = (\pi / \lambda) K_f \quad (4)$$

若设某多模激光束的束腰半径为 ω_0 ; 等效基模高斯光束半径为 ω_{00} ; 在传输过程中任意位置横截面处的光束半径为 Ω ; 等效基模高斯光束半径为 Ω_0 , 多模激光束的光束质量因子为 M^2 , 则

$$\omega_0 = M \omega_{00}, \quad \Omega = M \Omega_0 \quad (5)$$

因此多模激光束可以采用内嵌基模高斯光束来等效.

2 光束质量对多模激光束传输与聚焦的影响

2.1 光束质量对多模激光束传输的影响

设多模激光束的束腰半径为 ω_0 , 将式 (5) 代入基模高斯光束的瑞利半径, 远场发散角及传输表达式便

可得到相应的多模激光光束的表达式

$$Z_R = (\pi \omega_0) / (\lambda M^2) \tag{6}$$

$$\theta = \lambda M / \pi \omega_0 \tag{7}$$

$$\omega(z) = \omega_0 + \sqrt{1 + (z / Z_R)^2} \tag{8}$$

图1为根据式(8)得出的不同 M^2 值激光束沿 z 方向的传输结果。从图1可看出,当 M^2 值增大时,光束的发散角也增大,由式(7)知激光束的发散角与 M^2 值成正比;瑞利半径随 M^2 值的增大而减小;由式(6)知瑞利半径与 M^2 值成反比。可见,对于一定口径大小的光学系统,为了最大限度地利用光学系统,光束的 M^2 值应尽可能小。

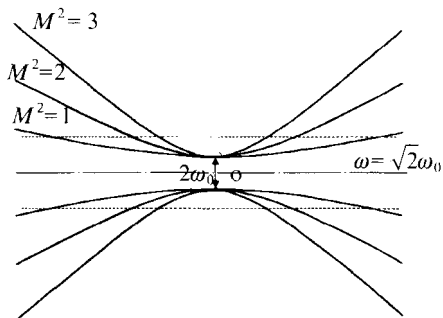


图1 不同光束质量值的激光光束的传输

2.2 光束质量对多模激光光束聚焦的影响

设激光束的束腰半径为 ω_0 ,将式(5)代入基模高斯光束的透镜聚焦公式,有

$$\omega_0' = \lambda f M^2 / \pi \omega_0 \tag{9}$$

由式(9)可知,对于相同束腰大小的激光束,聚焦焦点半径与 M^2 值成正比。图2为透镜聚焦时不同 M^2 值的激光束与聚焦焦点大小的关系。可见对于激光焊接与切割,为了获得高的聚焦能量密度,要求焦点尽量小,因此光束质量 M^2 值小的更易获得高的能量密度。将式(9)改写成

$$f = \pi \omega_0 \omega_0' / \lambda M^2 \tag{10}$$

从式(10)可看出,聚焦镜的焦距和光束质量因子 M^2 成反比,即光束质量因子越小的激光束,其聚焦镜的焦距可以很长,反之必须减小聚焦镜的焦距。从图3可看出,随着 M^2 值的增加,为了获得相同大小的焦点,透镜焦距减小,聚焦焦点向透镜方向靠拢,这将带来两个问题,一是短焦距的聚焦镜不易制造,并且象差也比较大;二是加工时的飞溅容易污染聚焦镜。另外从图3还可看出,当 M^2 值增大时,聚焦的焦深也变小了,这对激光加工是不利的。

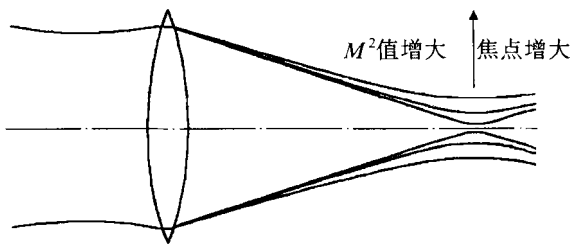


图2 不同 M^2 值的激光束与聚焦焦点大小的关系

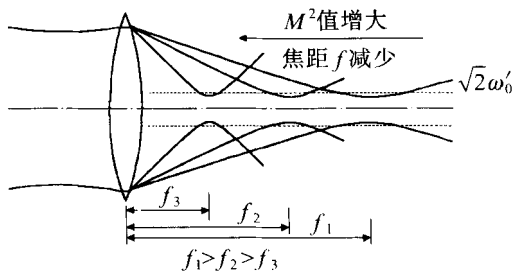


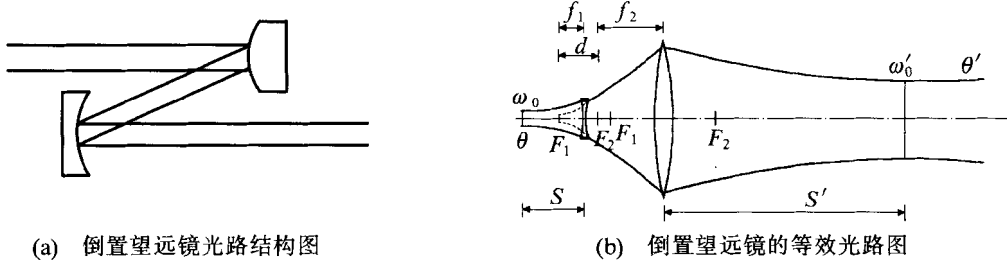
图3 为获得相同大小的焦点,不同 M^2 值的激光束与聚焦镜焦距的关系

3 光束质量对飞行光学导光系统中光学变换的影响

不同的激光器所发出的原始激光束的发散角是不一样的,当光束的发散角比较大时,光束直径沿传输路径迅速扩大。显然,对于口径一定的导光系统,这样的原始激光束是不能直接用来传输的,应对其进行变换,降低其发散角。另外,当加工范围很大时,必须考虑多模激光束在不同加工位置处聚焦的焦点偏移和其大小的变化,同样也需要光学变换。

可以采用倒置光学望远镜对激光束进行光学变换,降低光束传输的发散角,并将激光束束腰位置变换到加工位置的中心。对小功率激光束,传统的倒置望远镜的前后镜一般是正透镜,但对大功率激光束,由于需要良好的冷却,一般采用铜反射镜,而且倒置望远镜的前镜不应采用凹面镜,因为倒置望远镜前镜的焦距比较短,聚焦焦斑比较小,在大功率情况下,容易引起人身安全事故,还会引起空气击穿,造成光束畸变,光束质量变差。因此对大功率激光束,倒置望远镜的前镜采用凸面镜,后镜采用凹面镜,如图4(a)所

示；在分析光束的变换时，将凸面镜等效为负透镜，凹面镜等效为正透镜，如图 4(b) 所示。



(a) 倒置望远镜光路结构图

(b) 倒置望远镜的等效光路图

图4 采用倒置望远镜实现激光束的变换

设束腰为 ω_0 的多模激光束的等效束腰为 ω_{00} ，根据高斯激光束透镜聚焦公式，有

$$\omega_{00}'^2 = \frac{\lambda^2 \omega_{00}^2 f_1^2}{\lambda^2 (s - f_1)^2 + \pi^2 \omega_{00}^4} \tag{11}$$

$$s' = f_1 + \frac{\lambda^2 f_1^2 (s - f_1)}{\lambda^2 (s - f_1)^2 + \pi^2 \omega_{00}^4} \tag{12}$$

对凹透镜为负值，考虑到比较小，近似有 $s' \approx f_1$ ，得

$$\omega_{00}''^2 = \frac{\lambda^2 f_1^2 f_2^2 \omega_{00}^2 (\lambda^2 (s - f_1)^2 + \pi^2 \omega_{00}^4)}{d^2 (\lambda^2 (s - f_1)^2 + \pi^2 \omega_{00}^4)^2 + \pi^2 \lambda^2 f_1^4 \omega_{00}^4} \tag{13}$$

$$s''' = f_2 + \frac{d f_2^2 (\lambda^2 (s - f_1)^2 + \pi^2 \omega_{00}^4)^2}{d^2 (\lambda^2 (s - f_1)^2 + \pi^2 \omega_{00}^4)^2 + \pi^2 \lambda^2 f_1^4 \omega_{00}^4} \tag{14}$$

一般情况下， d, f_1 较小，且当 s 接近前镜后焦点时（为了减小导光系统的口径，应在原始激光束的束腰附近进行变换）有 $s - f_1 \ll \pi \omega_{00}^2 / \lambda$ ，简化式 (13)、(14) 得到

$$\theta / \theta' = \omega_0' / \omega_0 = f_2 / f_1 \tag{15}$$

$$s' = \left(1 + \frac{d f_2 \pi^2 \omega_0^4}{\lambda^2 f_1^4 M^4} \right) f_2 \tag{16}$$

图 5 为 TLC105 激光加工机原始激光束与采用倒置望远镜变换系统变换后激光束传输的比较。从图中可以看出，使用望远镜后光束发散角降低，光束束径变化缓慢，传输距离长，束腰在加工范围的中心，这有利于提高加工质量。

采用倒置望远镜可以将原始激光束进行光束变换，光束发散角的降低由式 (15) 决定，当选取 $f_2 > f_1$ 时便可降低光束的发散角。变换距离由式 (16) 决定，通过调节 d 的大小，便可调节光束变换后的束腰位置， d 越大，光束束腰位置离开望远镜的距离也越远。从式 (15) 可以看出， M^2 不影响望远镜变换系统对光束的发散角的变换，而从式 (16) 知，望远镜对光束束腰位置的变换距离同 M^2 值的平方成反比关系。因此，光束质量越差的激光束越不容易被变换，其激光加工范围也不可能很大。

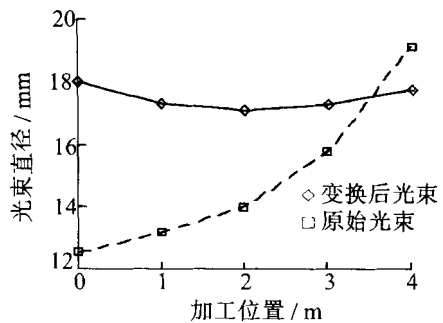


图5 采用望远镜变换系统后光束传输与原始激光束的比较

4 光束质量对飞行光学大范围激光加工焦点稳定性的影响

由基模高斯光束的透镜聚焦公式可得到多模激光光束透镜聚焦公式

$$\omega_0'^2 = \frac{\lambda^2 f^2 M^4 \omega_0^2}{\lambda^2 M^4 (s-f)^2 + \pi^2 \omega_0^4} \tag{17}$$

$$s' = f + \frac{\lambda^2 f^2 M^4 (s-f)}{\lambda^2 M^4 (s-f)^2 + \pi^2 \omega_0^4} \tag{18}$$

同束腰位置在透镜前焦点处相比较得

$$\delta\omega = \lambda f M^2 \omega_0 \left(\sqrt{\frac{1}{\lambda^2 M^4 (s-f)^2 + \pi^2 \omega_0^4}} - \frac{1}{\pi \omega_0^2} \right) \tag{19}$$

$$\delta s = \frac{\lambda^2 f^2 M^4 (s-f)}{\lambda^2 M^4 (s-f)^2 + \pi^2 \omega_0^4} \tag{20}$$

式中： $\delta\omega$ 表示束腰在不同的位置与在透镜前焦点处焦斑大小的差值； δs 表示束腰在不同的位置与在透镜前焦点处焦点位置的差值。光束聚焦时，光斑大小、焦点 M^2 偏移与值和加工距离的关系分别见图 6 和图 7 所示

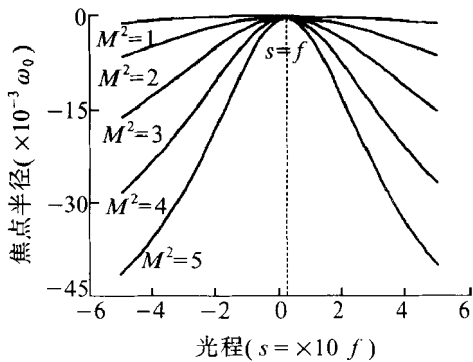


图6 不同 M^2 值的激光束在不同光程处的焦点大小

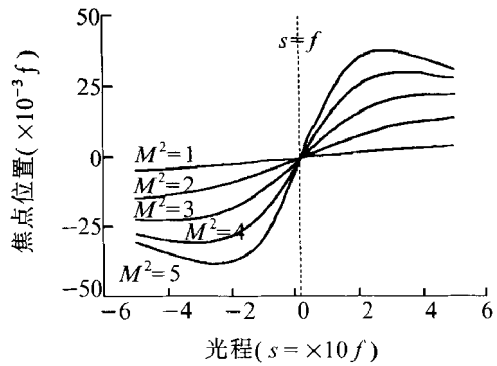


图7 不同 M^2 值的激光束在不同光程处的焦点偏移值

从图 6、图 7 可看出，不同的 M^2 值的激光束在大范围激光加工时，在不同的位置其焦点的大小和位置是不相同的，当 M^2 值较大时，在整个加工范围内焦点的位置和大小的变化就比较大。众所周知，在激光加工中焦点的位置和大小影响了激光加工的质量，当焦点的位置和大小变化很大时，激光加工将无法采用同一参数在这个加工范围内都得到良好的加工质量。因此，大范围激光加工要求激光束的光束质量比较好，不是任意激光束都适合于采用飞行光学导光系统来进行大范围激光加工的，只有光束质量较好的才比较适合。

5 光束质量对激光束加工范围的影响

如图 8 所示，透镜分别在光束束腰的前后聚焦，设束腰前后聚焦束腰（焦点）大小分别为 ω'_{01} 和 ω'_{02} ，焦深（瑞利半径）为 d_1 和 d_2 ，焦点差为 δs ，定义 $\Delta d = d_1 + d_2 - \delta s$ ，设激光加工机的加工范围为 $s_2 - s_1$ ，则称 Δd 为在此加工范围内的有效焦深。那么

$$d_1 = \pi \omega_{01}'^2 / \lambda M^2 \tag{21}$$

$$d_2 = \pi \omega_{02}'^2 / \lambda M^2 \tag{22}$$

将 $s' \approx f_1$ 代入式 (21)、(22) 有：

$$\Delta d = d_1 + d_2 - \delta s = f^2 \left(\frac{Z_R + (s_1 - f)}{Z_R^2 + (s_1 + f)^2} + \frac{Z_R - (s_2 - f)}{Z_R^2 + (s_2 - f)^2} \right) \tag{23}$$

一般情况下，光束束腰位置在加工范围的中间，则 $s = s_2 = -s_1$ ，并考虑到加工范围 $2s \gg 2f$ ，则

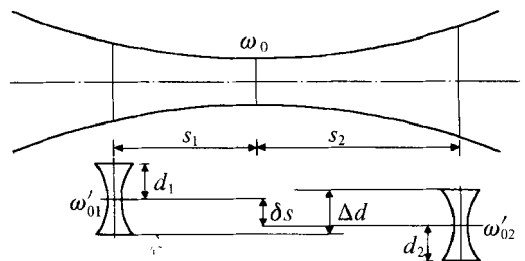


图8 多模激光束在不同光程处聚焦示意图

$$\Delta d = 2f^2 \frac{Z_R - s}{Z_R^2 - s^2} \quad (24)$$

以上各式中 $Z_R = \pi \omega_0^2 / \lambda M^2$, 为加工用激光光束的瑞利长度。

从式 (21) 可看出, 随着加工范围的增加, 有效加工焦深减小, 当 $s = Z_R$ 时, 有效焦深为零。当 $s = f$ 时, 即束腰在透镜前焦点处的固定光束的加工, 得到最大加工焦深为 $\Delta d_0 = 2(f^2 / Z_R)$, 设 $\Delta d = 0.5 \Delta d_0$, 有

$$S = 2s = 2(\sqrt{2} - 1) Z_R \approx 0.83 Z_R \quad (25)$$

S 称为加工光束的有效加工范围。

或设 $\Delta d = (\sqrt{2} / 2) \Delta d_0$, 标准更严格些, 则

$$S \approx 0.5 Z_R \quad (26)$$

由式 (25)、(26) 可知, 对于相同束腰大小 (导光系统的口径一定) 的不同光束质量的光束, 光束质量越好, 有效加工范围就越大, 反之越小。因此, 光束质量很差的光束将不适合于采用飞行光学系统用来进行大范围的激光加工。

从式 (12) 又可看出, 当 M^2 增大时, 相同光束束腰大小的激光束在聚焦时, 光斑尺寸变大, 这将降低聚焦光斑的功率密度, 当光束质量很差, 即 M^2 很大时, 该光束不适合于进行焊接、切割等要求焦点高功率密度的激光加工。

6 结论

本文分析了光束质量对多模激光光束传输与聚焦、光束变换、采用飞行光学导光系统大范围激光加工焦点的稳定性以及激光束加工范围的影响, 得出光束质量对激光加工中光束行为的影响是全方面的。采用飞行光学导光系统的激光加工系统对光束质量的要求更严格, 并不是所有激光束都可以采用飞行光学导光系统, 只有光束质量较好的激光束才适合。

参 考 文 献

- 1 丘军林. 高功率激光器的光束质量及其对激光加工的影响. 激光技术, 1994, 18(2): 86~91
- 2 肖荣诗, 梅汉华, 左铁钊. 激光器的光束特性在材料加工中的作用. 北京工业大学学报, 1996, 22(3): 43~50
- 3 Wright D, Greve P, Fleischer J, et al. Laser beam width, divergence and beam propagation factor-an international standardization approach. Optical and Quantum Electronics, 1992, 24: S993~S1000
- 4 周炳琨, 高以智, 陈家骅, 等. 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1995

Influence of Beam Quality on Laser Beam Behavior in Laser Materials Processing

Wang Zhiyong Chen Hong Zuo Tiechuan

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

Abstract On the basis of concept for laser beam quality, this paper described the influence of beam quality on laser beam propagation, focus, beam transformation and beam processing area.

Keywords beam quality, laser processing, beam transformation, flying optics