

稳定谐振腔激光输出窗口的设计研究

王 英 王海林 曹红兵 陈泽民

(华中理工大学激光技术与工程研究院,武汉,430074)

摘要: 探索了利用输出镜外表面改进输出光束特性、满足一些特殊应用场合的方法,实验表明,这种方法在大面积激光加工等技术中有良好的应用前景。

关键词: 输出镜外表面 光束特性

Analysis and design of stable resonator output mirror

Wang Ying, Wang Hailin, Cao Hongbing, Chen Zemin

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: Through the *ABCD* method for light transformation, the radius of curvature of the outer surface of output mirror of a laser resonator is an important factor in influencing the beam property. In some practical applications, for example laser machining for large work piece, we can design a proper radius of the curvature of the output mirror to improve the beam quality to be suitable for the application requirement.

Key words: the out face of output mirror beam property

引 言

随着激光的广泛应用,对于激光束的要求也越来越复杂多变,而对于激光束的这些不同要求,可以通过选择不同的激光谐振腔型来满足,关于这一点已有许多深入的研究^[1]。但是,经常有许多不同的要求对激光谐振腔的设计是相互矛盾的。例如:激光谐振腔的稳定性要求总是伴随着较小的光斑和较大的发散角,这种矛盾经常使实际设计很难达到最佳,解决的方法就是增加谐振腔设计可供选择的自由度。分析激光谐振腔的结构,我们可以很快发现最简单而又不会影响激光谐振腔结构的参数,就是输出窗口的外表面。以往的研究只注意激光谐振腔输出镜的内表面,通过我们的研究可以看出,选择输出镜的外表面曲率半径,可以明显地增加激光谐振腔选择自由度,满足更多的实际应用。

1 输出窗口外表面对输出光束的影响

采用输出窗口外表面对激光输出光束进行调整是在不影响激光谐振腔本身结构参数的前提下进行的,因此,腔内参数是已知的。根据文献[2],激光谐振腔内的实际振荡光束完全可以用基模高斯光束的特性推广而得。如果已知激光谐振腔中的基模高斯光束腰斑半径 w_0 和发散半角 θ_0 ,则实际光束的腰斑直径 D_0 和发散全角 θ 分别为: $D_0 = 2M w_0$, $\theta = 2M \theta_0$ 式中, M 是实际光束的光束传输因子。同时,实际光束的腰斑位置与基模高斯光束的相同。实际光束通过光学系统的变换与基模高斯光束的一样满足 *ABCD* 法则,因此,通过对基模高斯光束进行分析,其结果可以直接推广到多模运转的情况。

设激光器输出镜的内表面曲率半径为 R_1 , 外表面曲率半径为 R_2 , 内表面处激光束的光斑大小为 ω_1 (其具体数值可以由激光谐振腔 G 参数求得)。则此薄透镜的光学变换矩阵可以由 R_1 和 R_2 两个表面的光线矩阵来确定。

设 R_1 表面的光线矩阵为 P_1 , 则有^[3]

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -(1-n)/(nR_1) & 1/n \end{pmatrix} \quad (1)$$

设 R_2 表面的光线矩阵为 P_2 , 则有

$$P_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)/R_2 & n \end{pmatrix} \quad (2)$$

因为我们假定输出镜可以作为薄透镜来处理, 因此输出镜的光学变换矩阵为

$$P = P_1 \cdot P_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (n-1)/R_1 - (n-1)/R_2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (3)$$

设 R_1 表面处的光束参量为 q_1 , 则 $1/q_1 = 1/R_1 - i/(\omega_1^2)$ (4)

设 R_2 表面处的光束参量为 q_2 , 则

$$1/q_2 = (Cq_1 - D)/(Aq_1 + B) = n/R_1 - (n-1)/R_2 - i/(\omega_2^2) \quad (5)$$

又因为: $1/q_2 = 1/R_3 - i/(\omega_3^2)$ (6)

比较(5), (6)式, 可得出输出光束离开输出镜时波阵面曲率半径为

$$R_3 = [n/R_1 - (n-1)/R_2]^{-1} \quad (7)$$

相应的光斑为

$$\omega_3 = \omega_1 \quad (8)$$

由上述分析, 可以求出输出光束的束腰为

$$\omega_0 = \omega_3 \{1 + [R_3/(\omega_3^2)]^2\}^{-1/2} = \omega_1 \{1 + [n/R_1 - (n-1)/R_2]^2\}^{-1/2} \quad (9)$$

束腰位置为

$$Z = R_3 \{1 + [R_3/(\omega_3^2)]^2\}^{-1} = [- (n-1)/R_2 + n/R_1]^{-1} \{1 + [n/R_1 - (n-1)/R_2]^2\}^{-1} \quad (10)$$

由(9), (10)式可见, 在谐振腔形式(即谐振腔两镜面内表面)决定之后, 输出光束特性与输出镜的外表面仍有很大的关系, 这对于实际工程设计是很重要的。适当选择输出镜的外表面曲率半径可以有效地改善输出光束特性, 并有可能使谐振腔的设计更加简单。

例如输出光束的远场发散角: $\theta = \omega_0/Z$ (11)

式中, ω_0 为输出光束的束腰。由上式可见, 要使 θ 最小, 则应使 ω_0 最大, 由(9)式可以看出, 要使 ω_0 最大, 只要 $R_3 \rightarrow \infty$ 即可。因此可得, 输出光束远场发散角最小的输出镜应该满足条件:

$$(n-1)/R_2 - n/R_1 = 0 \quad (12)$$

即: $R_1/R_2 = n/(n-1)$ (13)

此时输出光束取腰斑最大值, 而发散角取最小值。

$$\theta = \omega_0/(2Z) \quad (14)$$

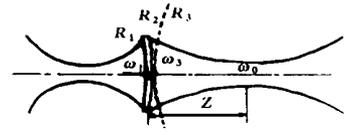


Fig. 1 Transformation through output mirror

2 通过外表面的设计满足大面积激光切割的要求

在激光工业加工中, 激光切割占有很大比例, 激光切割的对象主要是大型板材工件, 为了

减少工作台的复杂性,在输出光束的发散角可以满足条件的情况下,应该采用光反射头运动的形式替代工件运动形式,但是采用光路运动方式后,我们很快发现当工件较大时,在整个工件范围内各处的切割效果有明显的不同,其主要原因是整个工件范围内聚焦光斑的大小有明显的变化。因为当光头运动时,聚焦镜相对于激光器在运动,则入射光束的束腰位置相对于聚焦镜的距离在不断变化,而这个距离的变化将影响聚焦腰斑的大小和位置。

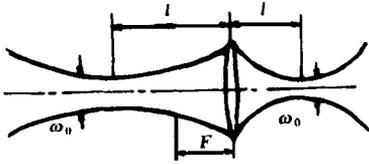


Fig. 2 Single lens focusing waist ω_0' vs l

单聚焦透镜聚焦光斑大小 ω_0' 满足^[1]

$$1/\omega_0'^2 = (1/\omega_0^2)(1 - l/F) + (1/F^2)(l/F)^2 \quad (15)$$

$$l = F + [(l - F) \cdot F^2] / [(l - F)^2 + f^2] \quad (16)$$

式中, $f = \omega_0'/\omega_0$

显然,当 $f \gg F$ 时(一般总是满足的), l 的变化是很小的,而 ω_0' 的变化则大得多。因此, ω_0' 的变化是引起

切割效果下降的主要原因。

在图3中可见, ω_0' 随 l 的变化曲线只有在 $l = F$ 附近最不敏感,即相同 l 变化只有在 F 附近引起的变化最小。要保证最好的切割效果,应该将入射光斑的束腰位置放在工件的正中间,这样 l 的变化正好在 F 的附近。

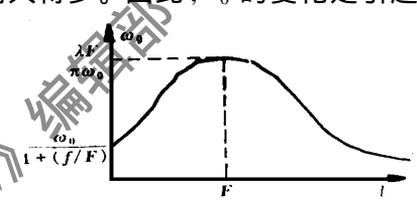


Fig. 3 Focused beam waist vs l

但是,多数情况下激光器输出腰斑的位置是根据激

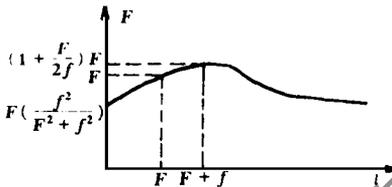


Fig. 4 Location of focused beam waist vs l

光器本身特性确定的。因此,利用输出窗口的外表面将光束的腰斑变化到要求的位置,根据(10)式可知,选择适当的 R_2 是可以作到这一点的,同时不会增加整个系统的复杂性。实际工作中,根据这种设想很方便地满足了大面积激光切割的要求。我们适当地选择输出窗口的外表面曲率,将输出光束的腰斑位置放在

1m × 1m 工件工作台的中心,成功地解决了工件近点和远点聚焦光点的差异。当然,具体的曲率半径是根据具体谐振腔形式和工件位置精心确定的。

3 结 论

充分考虑输出窗口的外表面曲率半径,可以为谐振腔的设计提供更多的方便选择。当然,具体的设计要根据实际情况而定。

参 考 文 献

- 1 吕百达. 激光光学. 第二版,成都:四川大学出版社,1992
- 2 陈培锋,丘军林. 激光技术,1996;20(1):46~49
- 3 王绍民,赵道木. 矩阵光学原理. 第一版,杭州:杭州大学出版社,1994

作者简介:王 英,女,1962年出生。工程师。主要从事固体激光器件与技术的研究。