

文章编号 : 0258-7025(2002)10-0875-04

输出耦合镜热形变对聚焦特性的影响及其实时补偿

高海军, 程兆谷, 赵全忠, 谌 巍

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提要 研究了在不同输出功率下, 输出耦合镜热形变所引起的输出光束 Rayleigh 长度的变化规律。采用压力变形反射镜对 Rayleigh 长度变化进行了实时补偿, 修正了由于输出耦合镜热变形造成的影响, 改善了高功率 CO₂ 激光器的聚焦特性。

关键词 Rayleigh 长度, 耦合窗口, 压力变形镜, 聚焦特性

中图分类号 TN 248.2 **文献标识码** A

Effect of Resonator Thermal Deformation on Focusing Characteristics in Flying Optics for a High Power CO₂ Laser

GAO Hai-jun, CHENG Zhao-gu, ZHAO Quan-zhong, SHEN Wei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract For a high power CO₂ laser, its work medium and resonator components including mirrors and coupler will be distorted under the condition of high power laser output. Although with various cooling methods for the resonator, the distortions always happen under different output powers. It means the Rayleigh range Z_R of the certain resonator is varying under different output power. The change rule of Rayleigh range Z_R of output beams caused by the output coupler thermal deformation at various output power are researched. An adaptive optics system, which can compensate the change of Rayleigh range Z_R and revises the effect caused by the thermal distortion of the output coupler, was used. Good focusing characteristics in flying optics is achieved in this way.

Key words Rayleigh range, output coupler, deformable mirror, focusing characteristics

1 引 言

高功率横流 CO₂ 激光器的红外耦合窗口, 一般是以 ZnSe 晶体为基底, 内表面镀增反膜, 外表面镀 100% 的增透膜。在数千瓦高功率激光作用下, 其内表面的增反膜、基底本身和外表面的增透膜吸收热量, 尽管采取了周边水冷等措施, 但耦合窗口热变形随输出功率的升高越来越明显, 严重影响到输出光束的质量, 造成了加工质量的不稳定性。

对于高功率激光器输出窗口的热透镜效应及其补偿, 国内外学者进行了很多研究, 采取了很多措施, 但并不能从根本上保证输出光束具有稳定的质

量。这里根据输出耦合窗口的热变形规律, 在外部采用压力变形反射镜对输出光束的 Rayleigh 长度变化进行实时补偿, 使得光束聚焦特性得到很好的改善。

2 输出耦合窗口热变形对 Rayleigh 长度 Z_R 的影响

对于千瓦到五千瓦的高功率横流 CO₂ 激光器, 输出耦合窗口内表面高反膜的反射率可高达 65% ~ 85%, 工作时它所承受的激光功率至少比输出功率高 3 ~ 5 倍, 而内表面高反膜的吸收率(约 0.0025)

收稿日期: 2002-02-08; 收到修改稿日期: 2002-04-30

作者简介: 高海军(1975—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光应用研究与开发。E-mail: gaohaijun@tsinghua.org.cn

比 ZnSe 基底的吸收系数 (0.0005/cm) 高至少 5 倍, 比外表面增透膜的吸收率大 1~2 倍或更高。所以可以只考虑其内表面高反膜的吸收。

输出功率为 P 时, 输出耦合窗口内表面形变由下式决定^[1]

$$\Delta K(r) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\beta'\beta P}{\pi\kappa\mu^3 J_1(\mu_m) T} J_0(\mu_m/a \cdot r) \quad (1a)$$

式中 β' 为基底本身的热膨胀系数, β 为内表面高反膜的吸收系数, κ 为基底材料的热导率, μ_m 为零阶 Bessel 函数的根, $J_1(\mu_m)$ 为一阶 Bessel 函数的值, T 为腔片的透过率。在内表面中心 ($z = 0$) 点, 变形量达到极大值

$$\Delta K(0) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\beta'\beta P}{\pi\kappa\mu^3 J_1(\mu_m) T} = UP \quad (1b)$$

这里 $U = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\beta'\beta}{\pi\kappa\mu^3 J_1(\mu_m) T}$ 。计算表明, 输出耦合窗口热变形使该腔片内表面近似变为一球面, 其曲率半径 ΔR 经简单几何运算可得

$$\Delta R = \frac{a^2 + \Delta l^2(0)}{2\Delta K(0)} \approx \frac{a^2}{2\Delta K(0)} \quad (2)$$

式(2)中 a 为输出耦合窗口通光口径的半径。对于腔长为 L , 全反射曲率半径为 R_2 , 输出耦合镜参与振荡的内表面曲率半径为 R_1 的激光谐振腔, 忽略工作物质热变形的影响, Rayleigh 长度为^[2]

$$Z_R^2 = \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \quad (3)$$

将(1b)式代入(2)式, 并将(3)式中的 R_1 用 $-\Delta R$ (取负数表明耦合镜内表面为凸面)代替, 可得 Rayleigh 长度 Z_R 和输出功率 P_L 的关系

$$Z_{R0}^2 = \frac{L(-a^2 - 2LUP)(R_2 - L)[-a^2 + 2UP(R_2 - L)]}{[-a^2 + 2UP(R_2 - 2L)]^2} \quad (4)$$

如对于一 5 kW 横流 CO₂ 激光器, $R_2 = 8000$ mm, $L = 3300$ mm, $\beta' = 8.5 \times 10^{-6}/K$, $\beta = 0.005$, $\kappa = 0.18$ W/cm·K, $T = 0.20$, $a = 1.0$ cm。Rayleigh 长度的变化与功率的关系见图 1。可见随着激光器输出功率的增加, 耦合窗口热形变逐渐加剧, 在工作物质、放电状况以及流场等因素比较稳定的条件下, Z_R 呈逐渐减小的趋势。文献[2]中用 BMS-6B 仪测得的 Fanuc C3000 轴流 CO₂ 激光器的 Rayleigh 长度随输出功率变化的数据, 与上述的理论计算变化趋势和结果基本一致。

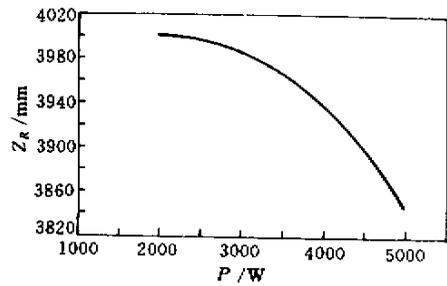


图 1 Rayleigh 长度 Z_R 变化与输出功率 P 的关系

Fig.1 Relation of Z_R and output power P

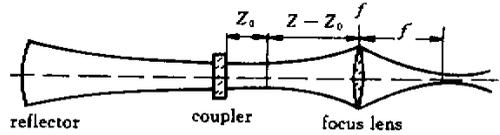


图 2 Gauss 光束聚焦特性示意图

Fig.2 Sketch of Gaussian beam's focus characteristics

3 Rayleigh 长度 Z_R 对高斯光束聚焦特性的影响

高功率 CO₂ 激光器输出的高斯光束为高阶模, 其聚焦特性包括: 实际焦距 f 与几何焦距 f 之差 Δf , 焦斑半径 w 和焦深 h (定义为光斑直径变化到束腰直径 $\sqrt{2}$ 倍时的轴向距离, 即新的 Rayleigh 长度), 可表示为^[3]

$$\Delta f = f^2(Z - Z_0 - f) \left[Z_R^2 + (Z - Z_0 - f)^2 \right] \quad (5)$$

$$w^2 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot M^2 f^2 Z_R \left[Z_R^2 + (Z - Z_0 - f)^2 \right] \quad (6)$$

$$h = f^2 Z_R \left[Z_R^2 + (Z - Z_0 - f)^2 \right] \quad (7)$$

高斯激光束的传输具有以下特点: 在距离束腰较近 (小于 Rayleigh 长度) 的范围内, 光束直径大小几乎不变, 而远离束腰的位置 (大于 Rayleigh 长度), 其直径随着传输距离呈线性增大。因此在对激光束聚焦进行加工时, 要使加工位置位于聚焦后光束的 Rayleigh 长度内。从式(5)~(7)可以得出以下结论: 高斯光束经聚焦镜聚焦后, 聚焦特性中的焦距之差 Δf 和焦深 h 只与 Rayleigh 长度 Z_R 、聚焦镜的焦距 f 及聚焦镜距变换前激光束束腰位置的距离 $Z - Z_0$ 有关, 光斑半径除和以上参数有关之外还与光束质量因子 M^2 成正比。在一般加工过程中, 聚焦镜的焦距 f 、聚焦镜距变换前激光束束腰位置的距离 $Z - Z_0$ 是不变的, 故只要能保证传输到加工头聚焦镜前的激光束的 Rayleigh 长度 Z_R 不变或变化很小, 则 Δf

和 h 在加工过程中保持恒定,同时在良好且稳定的光束质量下,聚焦光斑半径也可以保持一恒定值。这样光束聚焦特性将得到很好的改善,加工质量将得到极大的提高。

4 用自适应反射镜对 Rayleigh 长度 Z_R 进行实时补偿

对于平凹腔,可求得其 Rayleigh 长度为

$$Z_R = \sqrt{(R_2 - L)L} \quad (8)$$

随着激光器输出功率的增加,输出耦合窗口由于热变形已经不再保持平面。输出光束的 Rayleigh 长度已经不可用(8)式来计算,需用式(4)来计算。此时束腰位置已经从原来耦合窗口的位置外移,表达式为

$$Z_0 = -L(R_2 - L)(R_1 + R_2 - 2L) \quad (9)$$

为了保证在聚焦镜前有恒定的 Rayleigh 长度,可在光路上放置一平面反射镜(M)和一金属压力变形反射镜(DM),对输出光束的 Rayleigh 长度进行实时补偿,系统结构如图3所示。铜质压力变形反射镜结构如图4。

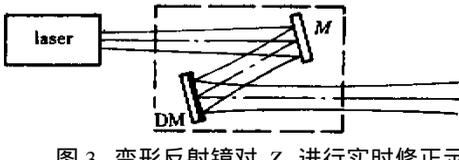


图3 变形反射镜对 Z_R 进行实时修正示意图
Fig.3 Sketch with deformable mirror which can compensate Z_R

该铜镜表面静态形状为一曲率半径为 6 m 的凹形球面,中心厚度 2 mm,直径 60 mm。对于镜面的径厚比大于 10 的铜镜,它的压力变形可通过弹性力学中挠度方程求解,获得镜面在压力载荷下的挠变

形。在表面负荷均匀的情况下,压力与表面形变有以下关系^[4]

$$u(r) = \frac{3 \cdot p \cdot (1 - \nu^2)}{16 \cdot E \cdot h^3} \cdot (r^4 + R^4 - 2 \cdot r^2 \cdot R^2) \quad (10)$$

上式中 $u(r)$ 为 r 位置上镜面表面点离静止位置的偏差, r 为距镜面中心的距离, R 为镜面半径, h 为镜面厚度, p 为水压力, E 为镜面材料弹性模量, ν 为镜面材料横向收缩系数。

压力变形反射镜距输出耦合窗口光程为 Z ,镜面曲率半径在液压的作用下可以作连续变化。在进行光路计算时,变形反射镜可以等效为一焦距为 f_1 的薄透镜,系统等效光路如图5。

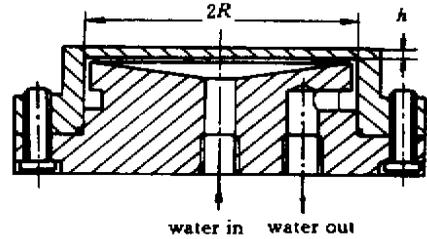


图4 压力变形镜模型
Fig.4 Model of pressure deformable mirror

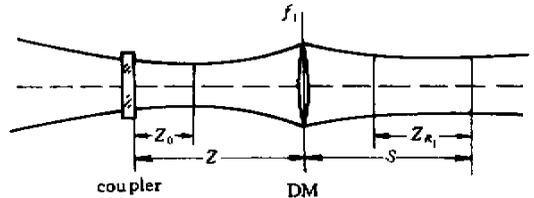


图5 变形镜对 Z_R 进行实时修正等效光路图
Fig.5 Thin lens equivalence of Fig.3

根据式(2)(4)(7)(9)经计算可得到光束经过自适应反射镜后新的 Rayleigh 长度

$$Z_{R1} = h = f_1^2 \cdot \sqrt{L(a^2 + 2LUP_L)(R_2 - L)(a^2 - 2UP_L(R_2 - L)) \cdot [a^2 - 2UP_L(R_2 - 2L)]} + \{L(a^2 + 2LUP_L)(R_2 - L)(a^2 - 2UP_L(R_2 - L)) + [a^2 - 2UP_L(R_2 - 2L)]\} \cdot \{Z + L(R_2 - L)2UP_L[2UP_L \cdot (R_2 - 2L) - a^2] - f_1\} \quad (11)$$

在不同的功率下,输出耦合窗口有着不同的变形,输出光束也有着不同的 Rayleigh 长度。液压系统在计算机的精密控制下,根据变形要求对变形反射镜施加相应的压力,并且用压力传感器将压力信号反馈到控制系统,实现闭环控制,从而使变形反射镜在不

同功率下达到所要求的曲率半径,实现对输出光束的 Rayleigh 长度进行修正的目的,使其保持恒定。

如对于前面提到的 5 kW 横流 CO₂ 激光器,令 $Z_{R1} = 3900$ mm 根据以上关系式通过迭代计算可以得到变形反射镜的等效焦距 f 与功率 P 之间的函数

关系。在 $P > 0, f_1 > 0$ 时,该函数曲线先单调增,达到一极大值再单调减。其极大值点可能出现在 $P < 5 \text{ kW}$ 之内,但通过合理优化选择参数 ($Z - Z_0$),可使该极大值出现在 $P = 5 \text{ kW}$ 之外。在参数允许的前提下,并考虑到变形反射镜实际可有效利用的曲率变化范围,在激光器输出功率范围内得到一条变化平缓的光滑曲线(如图 6 所示)。液压系统根据该曲线对变形镜进行调节,在控制上比较简单,也容易实现。

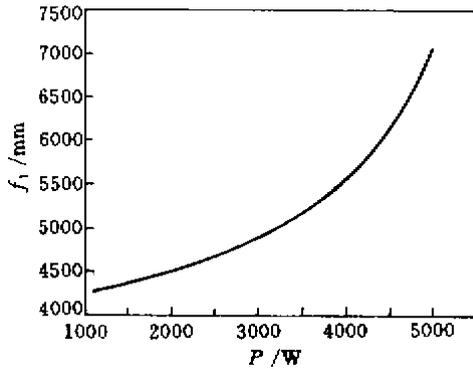


图 6 变形镜焦距 f_1 与输出功率 P 的关系

Fig. 6 Focal length f_1 of DM versus output power P

5 小 结

研究了在不同输出功率下,输出耦合镜热形变所引起的输出光束 Rayleigh 长度的变化规律。利用金属压力变形反射镜对高功率 CO_2 激光器输出耦合窗口由于热变形引起的输出光束的 Rayleigh 长度 Z_R 的变化进行实时补偿,使高斯光束聚焦特性有了极大的改善,提高了加工质量。

参 考 文 献

- 1 Cheng Zhaogu, Cheng Ya, Wang Runwen *et al.*. Thermal distortion of ZnSe output coupler with HR coatings in high power transverse flow CO_2 lasers [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15** (1): 78 ~ 82 (in Chinese)
- 2 H. Kogelnik, T. Li. Laser beam and resonator [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5** (10): 1550 ~ 1567
- 3 Cheng Zhaogu, Jiang Jinbo, Li Xianqin *et al.*. Research on focus characteristics of long distance flying optics for Gaussian beam [J]. *Science in China (Series A)*, 2000, **30** (10): 921 ~ 927
- 4 M. W. Sasnett, J. P. Hurley. On-line focused-beam measurements using a beam propagation analyzer [C]. In: Proceedings of ICALEO, 1994. 742 ~ 750