

反射镜热形变对激光器谐振腔参数的影响

张新昌 孙孟嘉 郭崇健

(山西大学)

提要: 本文讨论了反射镜热形变对激光谐振腔参数的影响。在具体设计高功率激光器,特别是折迭式 CO_2 激光器谐振腔时,应尽可能预先考虑这种影响。

Influence of thermal deformation in mirrors on resonator parameters

Zhang Xinchang Sun Mengjia Guo Congjian

(Shanxi University)

Abstract: Influence of thermal deformation in mirrors upon the resonator parameters is discussed. In designing a high power laser and a folded-resonator CO_2 laser in particular, it must be considered in advance as much as possible.

随着激光器功率的增大,因吸收损耗而产生的反射镜热形变愈益显著,成为影响激光器谐振腔参数的重要因素,特别对折迭式 CO_2 激光器影响尤为突出,必须加以考虑。

一、实验事实

我们用单支腔长为2米的V形折迭式 CO_2 激光器作实验。除输出窗外,全反射镜均以普通光学玻璃为基片。用内调焦自准直仪从反射镜背面监视其曲率半径的变化,发现当激光器工作后调焦清晰位置有明显变化。反射镜背面水冷时,镜内外表面间温差增大,这种变化更显著。我们还用绝热性能较好的石棉板在输出窗前匀速转动,观测激光输出光斑大小随时间的变化。启动激光器后,激光束在石棉板上烧灼出如图1所示的锥形斑痕。斑痕宽度在30秒至1分钟之间达到稳定值。

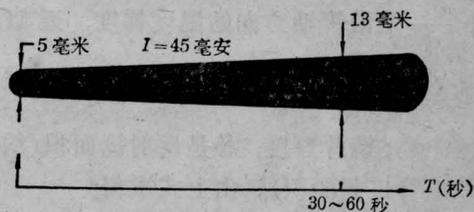


图1 激光输出光斑尺寸随时间的变化

我们认为, $t=0$ 时刻的起始光斑与空腔理论计算出的光斑大小之间的差别是工作气体的类透镜效应引起的;而光斑此后较慢地随时间的增大主要是反射镜的热形变造成的。因为气体类透镜效应的建立时间可由气体分子从激光放电管中心扩散到管壁的特征时间来估计^[1],对 CO_2 激光器的工作气体估算的 $\tau_{\text{扩}} \approx 0.1$ 秒,可见气体类透镜效应的建立过程可视为瞬时的,实验所示的30秒正是反射镜热形变的建立时间。

尽管在大于2米的 CO_2 激光管中,气体

收稿日期:1980年3月4日。

类透镜效应已显露出来, 实验测得的焦距在-20米以上, 然而上述实验中, 光斑随时间的变化量颇大, 说明反射镜基片热膨胀系数较大时, 反射镜热形变对激光谐振腔的影响已变得更为重要。

二、反射镜的热形变

CO₂ 激光器的反射镜金膜热传导性能良好, 可粗略认为反射镜内表面是等温面; 反射镜外表面因水冷也保持某一恒定温度。忽略放电管壁带走的一小部分热量。在热动平衡条件下, 反射镜内表面在单位时间内吸收的热量应等于单位时间内通过镜片热传导走的热量:

$$P(1-r) = 4.18\beta \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) S \approx 4.18\beta \frac{\Delta T}{d} S$$

在上述一维热传导方程中, P 为激光器腔内功率; r 为反射镜反射率; β 是镜片基片的热传导系数, 以 $\beta = 0.002$ 卡/厘米·秒·度来估算; $\frac{\partial T}{\partial z}$ 是沿管轴方向的温度梯度, 近似地认为 $\frac{\partial T}{\partial z} \approx \frac{\Delta T}{d}$; ΔT 是镜片内外表面的平均温差; d 是镜片厚度; S 是反射镜面积(约等于放电管口截面积)。由上式求得:

$$\Delta T \approx 120P(1-r) \frac{d}{S} = 120(1-r) \frac{Wd}{St} \quad (1)$$

其中, W 是激光器的输出功率; t 是输出窗透射率。

设有曲率半径为 R 的凹面镜, 如图 2 所示, 在轴上由曲率中心 O 向该反射镜任意引两矢径, 夹角为 φ 。反射镜外表面的线度 l'' 因水冷温度恒定而不变化; 反射镜内表面因吸收光能温度相对于外表面提高了 ΔT , 线度由 l 变为 $l' = l(1 + \alpha \Delta T)$, 式中 α 是反射镜基片的热膨胀系数, 对 K₉ 光学玻璃 $\alpha = 90 \times 10^{-7}$ 度⁻¹。形变后反射镜曲率半径为 R' , 曲率中心移至 O' 点。由几何关系可求得:

$$R' = \frac{l'}{\varphi'} = \frac{l(1 + \alpha \Delta T)}{\frac{l}{R} - \frac{l\alpha \Delta T}{d}} = \frac{Rd(1 + \alpha \Delta T)}{d - R\alpha \Delta T} \quad (2)$$

$$\approx \frac{Rd}{d - R\alpha \Delta T}$$

若反射镜原是平面镜, 则:

$$R' \approx -\frac{d}{\alpha \Delta T} \quad (2)'$$

可见热形变将使凹面镜曲率半径增大, 使平面镜变成凸面镜。因此, 在设计激光谐振腔时应预先考虑反射镜曲率半径可能的变化, 我们称之为反射镜热形变谐振腔的补偿设计。

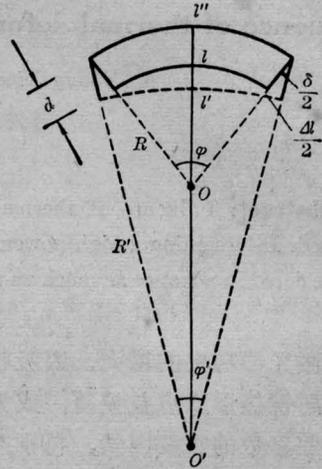


图 2 反射镜的热形变

三、反射镜热形变对谐振腔参数的影响

1. 对直腔的影响

在腔长为 L 、曲率半径分别为 R_1 与 R_2 的反射镜构成的直腔中, 输出镜 R_1 因热传导性能较好, 镜内外表面间 $\Delta T_1 \approx 0$, 故 R_1 不变。激光器工作后, g 参数分别变成:

$$g'_1 = g_1 = 1 - \frac{L}{R_1};$$

$$g'_2 = \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) + \frac{120\alpha L(1-r)W}{St}$$

$$= g_2 + MW。$$

式中 $M = \frac{120\alpha L(1-r)}{St},$

对给定的反射镜, M 是一个常数。可见 g 参数总随 W 单调线性增长, 它使激光输出光斑变为:

$$\begin{aligned} \omega' &= \sqrt{\frac{L\lambda}{\pi}} \left[\frac{g_2'}{g_1'(1-g_1'g_2')} \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{L\lambda}{\pi}} \left\{ \frac{g_2 + MW}{g_1[(1-g_1g_2) - g_1MW]} \right\}^{\frac{1}{4}} \end{aligned}$$

2. 对折迭腔的影响

由于镜片数增多, 反射镜热形变对折迭腔参数的影响比直腔情形要复杂得多。以图 3 所示的较简单的 V 形折迭腔为例, 当 $a_1 = a_2 = a$ 、 $R_1 = \infty$ (平镜输出), 求出等价腔参数为:

$$\begin{cases} N = \frac{a^2}{2\lambda L \left(1 - \frac{L}{R_3}\right)} \\ G_1 = 1 - \frac{2L}{R_3} \\ G_2 = 1 - \frac{2L}{R_3} - \frac{2L}{R_2} \left(1 - \frac{L}{R_3}\right) \end{cases}$$

当反射镜热形变后腔参数变为:

$$\begin{cases} N' = \frac{a^2}{2\lambda L \left[\left(1 - \frac{L}{R_3}\right) + 2MW \right]} \\ G_1' = \left(1 - \frac{2L}{R_3}\right) + 4MW \\ G_2' = \left[\left(1 - \frac{2L}{R_3}\right) - \frac{2L}{R_2} \left(1 - \frac{L}{R_3}\right) \right] \\ \quad + 2M \left[\left(3 - \frac{2L}{R_2}\right) - \frac{L}{R_3} \right] W \\ \quad + 4M^2W^2 \end{cases}$$

利用等价腔 G 参数与 g 参数的变换关系^[2]得:

$$\begin{cases} g_1' = g_1 = 1 \\ g_2' = \left[\left(1 - \frac{2L}{R_3}\right) + 4MW \right] \left\{ \left[\left(1 - \frac{2L}{R_3}\right) - \frac{2L}{R_2} \left(1 - \frac{L}{R_3}\right) \right] \right. \\ \quad \left. + 2M \left[\left(3 - \frac{2L}{R_2}\right) - \frac{L}{R_3} \right] W \right. \\ \quad \left. + 4M^2W^2 \right\} \end{cases} \quad (3)$$

由上式可见, 折迭腔的 G 参数(或 g 参数)也

随激光输出功率 W 单调上升, 但变化比直腔显著得多; 而费涅耳数 N 随 W 单调下降, 即反射镜热形变总使费涅耳数减小。值得注意的是, V 形折迭腔的费涅耳数与折转镜曲率半径 R_3 的关系极大, 费涅耳数的减小主要是折转镜的热形变造成的。因此, 在设计折迭腔时折转镜的曲率半径的选择合适与否是极为重要的。由腔参数随激光输出功率 W 变化的单调性可以推知, 反射镜的热形变完全可能使一个稳定腔变成一个非稳定腔; 反之, 也完全可能使一个过份汇聚的非稳定空腔演变成稳定的工作腔。

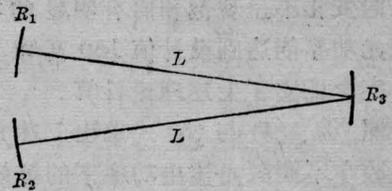


图 3 V 形折迭式谐振腔

若暂不考虑气体类透镜效应的影响, 平镜输出时 TEM_{00} 模的输出光斑半径为

$$\omega' = \sqrt{\frac{L_e \lambda}{\pi}} \left[\frac{g_2'}{1 - g_2'} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

其中 L_e 为 V 形折迭腔的等效腔长, 可以求出

$$L_e = \frac{2L \left[\left(1 - \frac{L}{R_3}\right) + 2MW \right]}{\left[\left(1 - \frac{2L}{R_3}\right) + 4MW \right]} \quad (5)$$

而 g_2' 由(3)式给出。

四、验证与修正

我们就图 3 所示的折迭腔, 选取不同的反射镜组合, 以实验验证上述理论计算。设 $L = 2$ 米; $S = 10$ 厘米²; $d = 0.5$ 厘米; $t = 45\%$; $(1-r) = 1.4\%$; 计算得 $M = 6.72 \times 10^{-4}$ 。方案一为 $R_2 = R_1 = \infty$, $R_3 = 10$ 米, $g_1g_2 = 0.36 < 1$, 空腔是稳定腔。但在 $W = 150$ 瓦时, $g_1'g_2' = 1.209 > 1$, 工作腔已热演变为非稳定

腔。以这种反射镜组合的激光器其最佳激光功率不到 100 瓦；而且放电电流由 20 毫安增至 40 毫安时，激光输出功率无明显变化。用手轻轻扳动反射镜使腔模变化，输出功率亦无明显变化。这一现象表明，腔内存在很强的损耗，且这种损耗是随激光输出功率的增加而迅速增长的，故使输出功率呈现饱和（见图 4）。但采用方案二时， $R_1 = \infty$ 、 $R_2 = 10$ 米、 $R_3 = 5$ 米， $g_1 g_2 = -0.008 < 0$ ，空腔是非稳定腔。当 $W = 150$ 瓦时， $g'_1 g'_2 = 0.266 < 1$ ，工作腔变成稳定腔，即反射镜热形变使一个高损耗腔变成了低损耗腔，激光输出功率随放电电流的变化不呈现饱和而有明显的极值，最佳激光功率能达到设计值 150 瓦以上（见图 5），完全证实了上述理论计算。

按照 (3)、(4) 与 (5) 式求出上述方案二的谐振腔在不同激光输出功率下的等效腔长 L'_e 与腔参数 g'_2 的数值以及相应的 TEM_{00} 和 TEM_{10} 模光斑尺寸，列于表 1。

实测实验结果列于表 2。

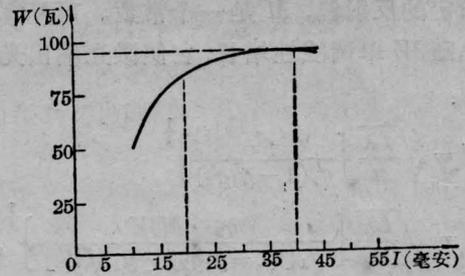


图 4 稳定空腔热形变成高损耗腔（非稳定）时，输出功率呈现饱和

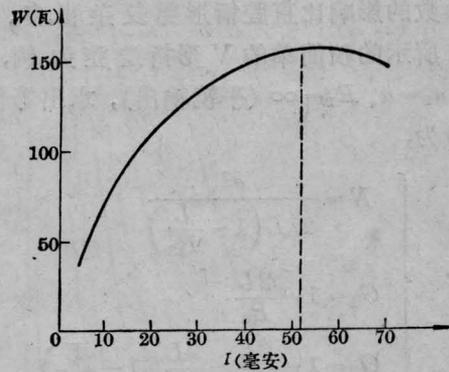


图 5 非稳定空腔热形变成低损耗腔（稳定腔）时，输出功率有明显极值

表 1

激光功率 (瓦)	0	25	50	75	100	125	150	175	200
L'_e (厘米)	12×10^2	9.48×10^2	7.98×10^2	6.98×10^2	6.26×10^2	5.73×10^2	5.31×10^2	4.98×10^2	4.71×10^2
g'_2	-0.008	0.00939	0.0376	0.0772	0.129	0.192	0.268	0.358	0.461
$2\omega'$ (TEM_{00}) (毫米)		3.53	4.61	5.22	5.70	6.14	6.59	7.08	7.67
$2\omega'$ (TEM_{10}) (毫米)		6.11	7.99	9.04	9.88	10.63	11.4	12.27	13.28

表 2

放电电流 (毫安)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
激光功率 (瓦)	26.0	62.0	81.0	101	119	127	136	140	146	152	156	152
光斑直径 (毫米)	3.8	8.2	9.5	10.4	11.5	12.0	12.5	12.8	13.0	13.0	13.0	13.0
模 式 (TEM)	00	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

将上述实验结果与理论计算同绘于图 6 上比较, 看出在功率较小时模斑大小的实验值与理论值基本一致; 当激光输出功率较大时实验值大于理论值, 其原因是随着放电电流的增加, 气体类透镜效应逐渐显著。如果同时计入反射镜热形变与气体类透镜效应, 则能够得到与实验完全符合的计算结果。具体考虑如下:

在 V 形折迭腔中往返传播的激光束相当于连续通过一系列透镜, 透镜之间的空间中充满气体类透镜介质。我们取透镜系列的一个完整周期(图 7)计算其光学往返矩阵^[1]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma L & \gamma^{-1} \sinh \gamma L \\ \gamma \sinh \gamma L & \cosh \gamma L \end{bmatrix} \\ &\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R'_3} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma L & \gamma^{-1} \sinh \gamma L \\ \gamma \sinh \gamma L & \cosh \gamma L \end{bmatrix} \\ &\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R'_2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma L & \gamma^{-1} \sinh \gamma L \\ \gamma \sinh \gamma L & \cosh \gamma L \end{bmatrix} \\ &\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R'_3} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma L & \gamma^{-1} \sinh \gamma L \\ \gamma \sinh \gamma L & \cosh \gamma L \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中

$$R'_2 = \frac{R_2 d}{d - R_2 \alpha \Delta T_2} = \frac{2LR_2}{2L - 2MW R_2};$$

$$R'_3 = \frac{R_3 d}{d - R_3 \alpha \Delta T_3} = \frac{2LR_3}{2L - 4MW R_3}$$

取 $W = 150$ 瓦, $R'_2 = 20.16$ 米, $R'_3 = 10.08$ 米, γ 值以 1.6×10^{-3} /厘米近似估计, 则上述矩阵值为 $\begin{bmatrix} -0.0306 & 4.2555 \\ -0.2342 & -0.0285 \end{bmatrix}$ 。因为这一光学往返矩阵

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2g'_1 g'_2 - 1 & 2L'_e g'_2 \\ \frac{2}{L'_e} g'_1 (g'_1 g'_2 - 1) & 2g'_1 g'_2 - 1 \end{bmatrix}$$

故 $A + D/2 \approx 2g'_1 g'_2 - 1$; 而 $B = 2L'_e g'_2$ 。因这

一透镜序列是由输出窗算起, $g'_1 = g_1 = 1$, 利用上式解得 $g'_2 = 0.485$; $L'_e = 4.93$ 米, L'_e 是等效二镜腔的腔长。利用与 (4) 式相同的公式求得 TEM₀₀ 模光斑半径 $\omega'' = 3.79$ 毫米, 直径为 7.58 毫米。于是对 TEM₁₀ 模来说, 输出光斑直径为 13.13 毫米, 与实验数值 13 毫米十分接近。

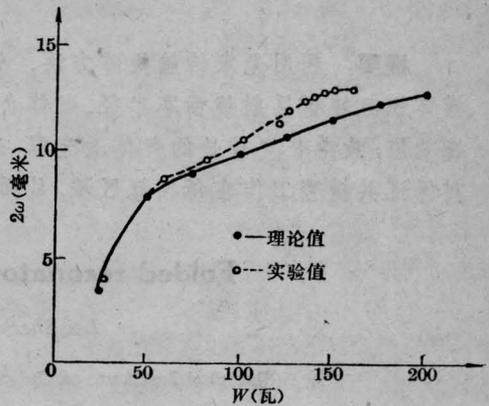


图 6 输出激光光斑尺寸的理论值与实验值比较

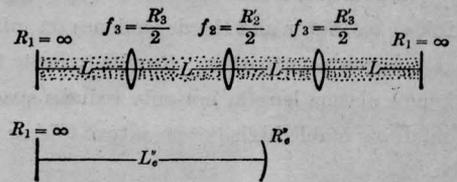


图 7 空间充满类透镜介质的透镜序列的一个周期及其等效二镜腔

五、讨 论

若激光器的功率较高或者反射镜的热膨胀系数与吸收率较大, 则反射镜热形变对激光谐振腔参数的影响是不可忽视的。特别是对于输出功率大于 100 瓦的折迭式 CO₂ 激光器, 为便于商品化而采用成本较低的玻璃放电管与普通光学玻璃的反射镜基片时, 必须计入反射镜热形变的影响而进行预先的补偿设计。