

激光反射镜动态形变的测量

王哲恩 钱铮

(中国科学院上海光机所)

提要: 采用泰曼-格林干涉仪, 测量了反射镜在高功率激光连续辐照下发生的热形变和镜背侧冷却水压造成的压力形变。测量结果表明, 为缩小激光热形变和压力形变, 降低激光功率密度和增大反射镜径厚比是必要的。碳化硅是较优秀的反射镜材料。

Measurement of dynamic distortion of laser mirrors

Wang Zheen, Qian Zheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: Thermal distortion of mirrors caused by high power CW laser radiation and pressure distortion by water-cooled back pressure have been measured using a Twyman-Green interferometer. Analysis of measurement results show that it is necessary to reduce the radiation power density and increase the diameter-thickness ratio of mirrors in order to minimize the thermal distortion by laser and pressure distortion. SiC is a good substrate material for laser mirrors with higher thermal conductivity, higher Young's modulus and lower coefficient of thermal expansion.

随着高功率连续激光器的输出功率不断提高, 激光反射镜在强激光连续辐照下的热形变已为人们所关注。为使激光反射镜能在高功率激光连续辐照下正常工作, 通常选用导热性能好的金属材料作反射镜基体, 并在镜背侧加以强迫水冷。这些措施有效地提高了反射镜抗热破坏能力, 可是镜体因吸收造成的热膨胀依然存在。镜背侧的强迫水冷则更加加剧体内的温度梯度, 从而使镜面热形变愈趋严重。此外, 冷却水的压力也对镜面造成一定量的压力形变。本工作采用干涉仪方法测量了水冷反射镜在动态平衡时的形变, 给出镜面形变的定量结果。

一、实验方法

(1) 测量装置及原理

选用泰曼-格林干涉仪作测量手段, 以 He-Ne 激光为测量光源 ($\lambda = 6328$ 埃), 辐照负载光源为千瓦级多模连续 CO₂ 激光器 ($\lambda = 10.6$ 微米)。测量光路图见图 1。图中的负透镜 f_1 焦距略短于 M_2 的曲率, 并使其焦点与 M_2 的曲率中心相重合。这样, 经 M_2 返回且通过 f_1 的波阵面为平面。适当调整标准镜 M_1 的取向, 使干涉仪两臂严格垂直, 便获

收稿日期: 1981年4月27日。

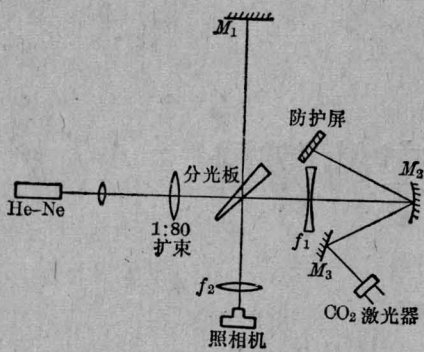
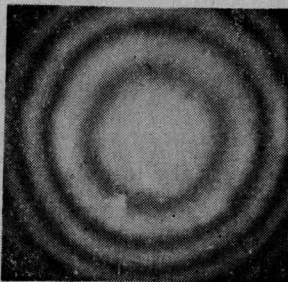


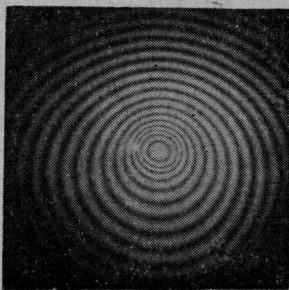
图1 激光反射镜动态形变测量光路图



(a) 无负载



(b) 冷却水压为 0.6 公斤力/厘米²



(c) 镜面辐照光负载 1000 瓦, 水冷压力 1 公斤力/厘米²

图2 碳化硅反射镜($\phi 60 \times 5$ 毫米)干涉图

得所需干涉图。当实验镜 M_2 表面无辐照负载, 背侧也无冷却水压力作用时, 由 M_2 返回的波阵面是完好的平面, 由此获得的干涉图为一均匀亮区(如图2(a)所示)。当激光辐照及背侧水冷压力造成 M_2 表面发生形变时,

由 M_2 返回的波阵面也就因此产生畸变, 干涉的结果使其产生等厚干涉条纹(图2(b)、(c))。测量干涉条纹数和间距, 也就获得实验镜子在给定工作环境时的形变量及形变分布。

(2) 反射镜结构及基体材料

反射镜的冷却结构和基体材料对镜面形变有一定的影响。我们采用的水冷结构为圆筒状, 筒高 30 毫米。圆筒前端接 $\phi 70 \times 10$ 毫米 H-62 黄铜镜或 $\phi 60 \times 5$ 毫米碳化硅镜。后盖开有小孔接压力表。并有两根铠装热电偶通过后盖板与反射镜背侧相接触。

二、测量结果

(1) 压力形变

当反射镜处于水冷时, 背侧冷却水对镜体施以一均布压力负载。图2(b)是碳化硅镜($\phi 60 \times 5$ 毫米)在冷却水压力为 0.6 公斤力/厘米²时的形变干涉图。干涉环基本圆对称, 稍微的偏离是镜面光学加工误差造成的。图3、图4给出测量所得的镜面定压形变分布曲线。最大形变点在反射镜中心($R/R_0 = 0$)。形变分布与压力呈线性关系。图5为镜面最大形变与冷却水压力的关系。形变与压力关系为一曲线, 它表明最大形变与压力关系在径厚尺寸比确定后呈线性正比。

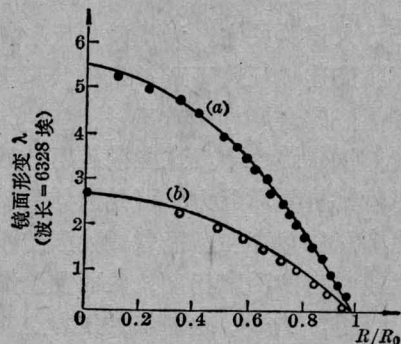


图3 碳化硅镜镜面压力形变分布

(a) — 压力负载 1.2 公斤力/厘米²; (b) — 压力负载 0.6 公斤力/厘米²; $R_0 = 30$ 毫米; $h = 5$ 毫米

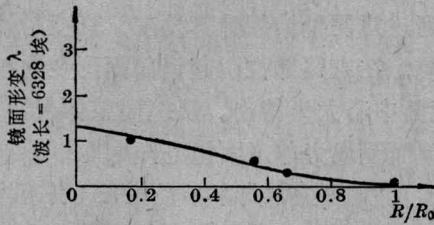


图4 铜镜镜面压力变形分布
压力负载 1.2 公斤力/厘米²; $R_0=35$ 毫米; $h=10$ 毫米

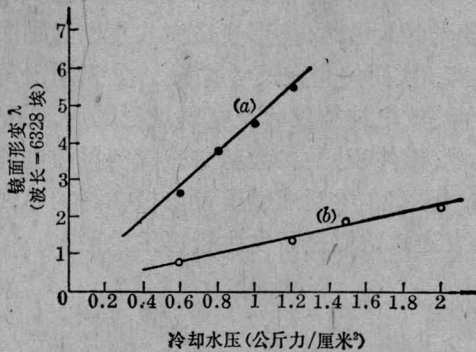


图5 反射镜背侧水冷压力与镜面最大形变 ($R/R_0=0$ 克) 的关系
(a)— $\phi 60 \times 5$ 毫米碳化硅镜; (b)— $\phi 70 \times 10$ 毫米铜镜

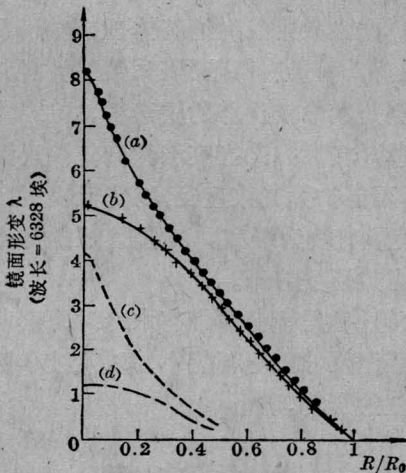


图6 碳化硅镜(反射率 82%) 在 1000 瓦激光辐照及 1 公斤力/厘米² 水冷压力负载下的镜面形变分布

$R_0=30$ 毫米; $h=5$ 毫米
辐照面积: (a)—0.72 厘米²; (b)—3.61 厘米²;
(c)—0.72 厘米², 删除压力负载;
(d)—3.61 厘米², 删除压力负载

(2) 激光热形变

激光热形变测量是在反射镜镜体达到热平衡后进行的。辐照激光功率在 400~1200 瓦之间, 辐照面积分别为 0.72 厘米² 和 3.61 厘米², 辐照部位为镜面中心。为提高测量精度, 实验测量中使碳化硅镜反射率降至一适当值, 图 2(c) 为碳化硅镜(反射率 82%) 在激光功率为 1000 瓦、冷却水压 1 公斤力/厘米² 时的形变干涉图。干涉环的不对称是由于辐照光并非恰好在镜面中心。图 6、图 7 分别给出经数据处理后的铜镜和碳化硅镜镜面因辐照负载及背侧压力负载而产生的形变分布。图中虚线为删除压力形变后的激光热形

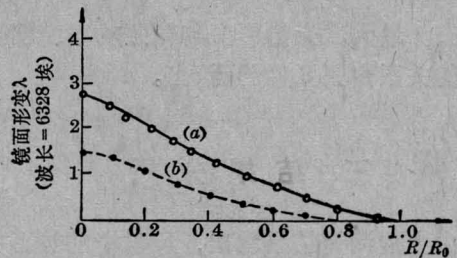


图7 铜镜(反射率 98%) 在 1000 瓦激光辐照及 1 公斤力/厘米² 水冷压力负载下的镜面形变分布
(虚线为删除压力形变)
 $R_0=35$ 毫米; $h=10$ 毫米
辐照面积: (a)—0.72 厘米²; (b)—0.72 厘米², 无压力负载

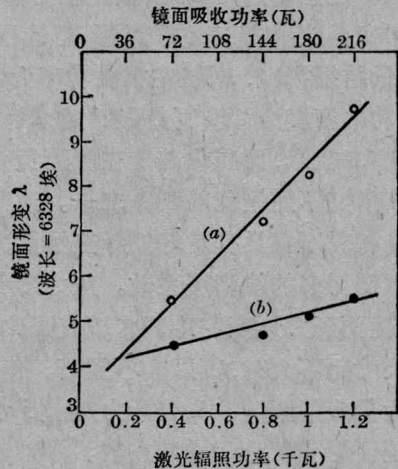


图8 碳化硅镜镜面吸收功率、辐照负载面积与镜面形变关系
(冷却水压为 1 公斤力/厘米²)
辐照面积: (a)—0.72 厘米²; (b)—3.61 厘米²

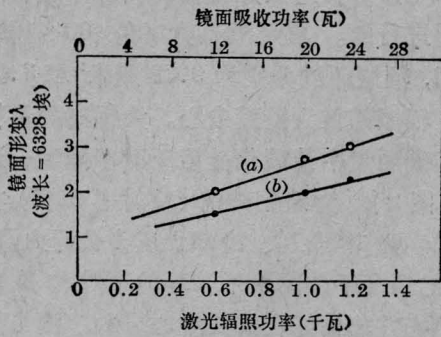


图9 铜镜镜面吸收功率、辐照面积与镜面形变关系

(冷却水压为 0.9 公斤力/厘米²)

辐照面积: (a)—0.72 厘米²; (b)—3.61 厘米²

变分布。最大激光热形变与辐照功率、辐照面积的关系由图 8、图 9 给出。

三、结果分析

由上述测量结果看出, 反射镜的热形变是由镜面吸收部分辐照光功率引起热膨胀所致。热形变与吸收功率成线性正比。热形变的分布与程度主要取决于辐照光在镜面的分布, 即镜体温度梯度的分布。辐照功率相同时, 辐照面积与最大热形变量近似为线性关系。但值得注意的是, 随着辐照面积的缩小, 形变分布变得陡峭起来(局部形变趋于严重)。测量结果指出, 铜镜在吸收功率为 200 瓦, 吸收功率密度为 280 瓦/厘米²时, 最大热形变高达 13 微米, 而碳化硅镜在相同负载下产生的热形变不到铜镜的四分之一。这归结于碳化硅材料不仅具有良好的导热性能, 而且有比铜低得多的线膨胀系数。压力形变测量表明, 镜面压力形变与冷却水压成正比, 但在径厚尺寸比不大时, 其影响不显著。例如, 径厚比为 7:1 的铜镜, 1 公斤力/厘米²水压造成的镜面形变仅为 1 微米左右。

通过对测量结果计算发现, 形变对镜面的影响, 在光照部位引起镜面面形变化较剧烈, 镜面中心尤为特出。从镜面整体来看, 形变使球面镜成为非球面镜(平面镜成为非球面凸镜), 并使镜面曲率半径拉长(引起光束畸变)。对 $\phi 70$ 毫米, 曲率半径为 2.2 米的铜镜, 当吸收功率为 200 瓦、吸收功率密度为 280 瓦/厘米²时, 其光照部位的平均曲率半径已大于 4 米。对腔长为 1.1 米的共焦腔来说, 激光器运转时, 热形变造成共焦位置的明显偏离, 从而使光束尺寸扩大。如果输出窗口尺寸、放电结构尺寸及材料均已固定, 则光斑尺寸(模体积)的扩大势必造成衍射损失的增加, 并存在激活通道壁及电极在高功率强激光束边缘的辐照下发生损坏的危险。

四、讨论

为降低激光反射镜的动态形变, 改善强光经光学传输系统后的品质以及稳定腔参数, 本文结果要求:

(1) 强激光反射镜基体应选择高热传导、高杨氏模量、低线膨胀系数的材料。碳化硅材料是其中较优秀的候选者。

(2) 在激光谐振腔和激光传输系统设计时, 尽可能扩大光束直径, 以降低辐照功率密度, 使形变较为缓和。对短焦距的共焦腔还应考虑热形变修正。

(3) 反射镜背侧带有水冷时, 应考虑使镜体径厚尺寸比尽可能小, 以期减小镜面压力形变的影响。

参 考 文 献

- [1] Claude A. Klein; *Optical Engineering*, 1979, 18, No. 6, 591.
- [2] 张新昌等; 《激光》, 1981, 8, No. 1, 5.