

# 强激光系统中铜镜微变形实验研究

夏金安 张耀宁 程祖海 丘军林

(华中理工大学激光国家重点实验室, 武汉 430074)

**提要** 利用泰曼干涉仪及图像处理系统对强激光作用下不同冷却结构镜片包括空腔、环形通道几何结构铜镜的变形进行了实验研究,对其变形规律、变形机理作了探讨和分析。设计了一种新型多层冷却结构铜镜。将这几种铜镜的变形作比较,结果表明新结构铜镜不仅热变形小,而且由冷却流体压力引起的附加变形也很小,为有效控制强激光系统中镜片表面变形提供了有效途径。

**关键词** 铜反射镜, 镜片变形

## 1 引 言

强激光照射下,镜片吸收部分能量产生局部热应力和热变形,引起光束反射光场和光斑图样变化,激光功率高,单位时间内镜片吸收的热量就多,引起的变形就大。在激光器中将导致谐振腔激光模式扰动和损耗增加,影响激光输出功率和光束特性<sup>[1,2]</sup>。严重时会造成激光输出功率和输出激光光束质量大大下降,因此,必须采取有效措施抑制镜片的热变形,使之最小或完全消除。

控制强激光照射引起的热变形,一般采取冷却镜片的方法<sup>[3,4]</sup>,但冷却过程中镜片会因冷却流体的压力产生附加变形,这就要求合理选取镜片的冷却结构或冷却方案。为此,本文利用泰曼干涉仪及图像处理系统首先在冷却条件下对激光作用后镜片的面形进行了测试,随后分别就简单空腔和环形通道结构铜镜的水冷介质压力变形和激光作用下的热变形进行探讨,同时设计了一种多层冷却结构铜镜,并将这三种结构铜镜的变形作了比较和分析。

## 2 铜镜变形实验研究

实验系统如图 1 所示,其中  $laser_1$  为强激光源, $laser_2$  为泰曼干涉仪激光源即氦氖管, $M_1$  为被测物镜, $M_2$  为参考镜, $M_3$  为普通反射镜, $E$  为扩束装置, $L$  为准直透镜, $B_1$  为半反半透分光镜,CCD 摄像机、监视器、计算机、打印机构成图像处理系统。

图 2(a), (b) 分别为简单空腔和环形通道铜镜结构示意图,这两种类型铜镜虽在某些激光系统中较为适用,但在变形要求较苛刻的系统中其变形值仍然偏高。为此,本文设计了一种多层结构新铜镜如图 2(c) 所示。实验证明,这种铜镜的变形很小。这是因为镜片变形过程中,一方面由于激光热作用引起镜片温度分布不均产生热应力和热膨胀;另一方面因冷却流体的压

力使镜片承受一定力负荷产生应变。新结构铜镜冷却效果好,镜片局部热应力小,且结构强度高,压力变形也低,因此,总的变形较小。

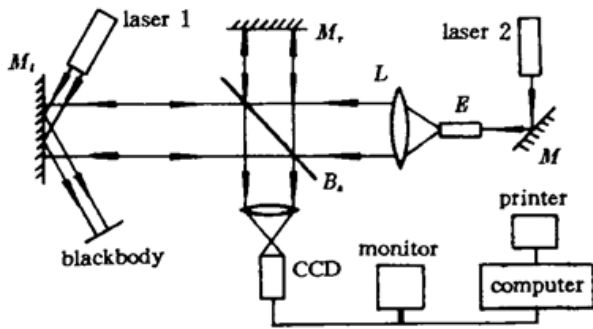


Fig. 1 Schematic of a Twyman-Green interferometer and image processing system

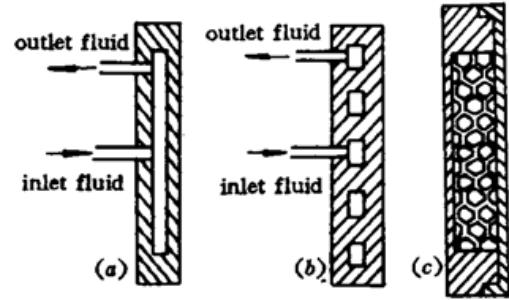


Fig. 2

(a) a cavity structure mirror; (b) an annular channel mirror; (c) a new structure mirror

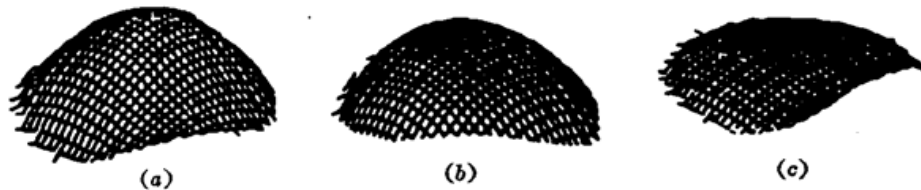


Fig. 3

(a) the deformed surface of a cavity copper mirror; (b) the deformed surface of an annular channel mirror; (c) the deformed surface of a new copper mirror

### 2.1 激光作用下镜片表面的变形规律

激光作用下镜片变形后的面形如图 3 所示,图 3(a), (b), (c) 分别为同样条件下即相同激光照射功率、相同冷却流体流量和相同压力下空腔结构、环形通道、多层结构铜镜变形后的面形。原始各铜镜表面均为平面,镜片各直径均为 68 mm,激光照射功率为 350 W,光斑直径为 25 mm,激光近似为基模,水冷压力为 0.2 MPa。由图可知,镜片表面均有凸起趋势,其中空腔结构铜镜凸起最为严重,环形通道结构铜镜次之,新结构铜镜凸起最小。这表明,空腔结构铜镜变形最为严重,环形通道结构次之,新结构铜镜变形最小,这可

由图 4 中各曲线值的相对大小和曲线位置明显看出。图 4 为各种镜片在冷却水压力为 0.2 MPa 时最大表面变形量随入射激光功率的变化曲线,其中空腔铜镜曲线的值远大于另两者的值,而新铜镜曲线值很小,就说明了这一点。图中纵坐标为镜片表面的最大变形量值,横坐标为激光入射功率。事实上,采用流体冷却方式的镜片变形主要由两个因素造成,一是激光的热作用,二是冷却流体的压力作用。

### 2.2 冷却流体压力对镜片变形的影响

图 5 为无激光作用下不同结构铜镜表面最大变形量随冷却介质压力的变化曲线,此处冷

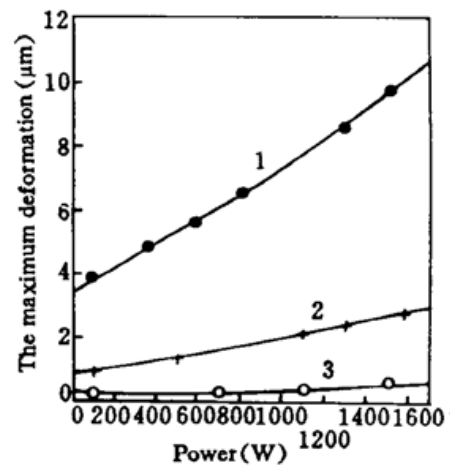


Fig. 4 The maximum deformation vs incident laser power when the cooling fluid pressure is 0.2 MPa.

1: cavity copper mirror; 2: annular copper mirror; 3: new copper mirror

却介质为水,镜片各表面直径为  $\phi 68$  mm。此图表明,各镜片表面的最大变形量几乎均随冷却介质压力的增加而呈线性增加,其中空腔结构铜镜变形量最大,且远大于另两种镜片的变形,因此设计镜片时不宜采用空腔冷却结构,虽然此镜加工简便。环形通道结构镜片的变形可得到明显改善,图 5 中曲线 2 的相对位置说明了这一点,但在变形量要求严格的谐振腔中仍不能满足要求。新镜片即多层结构镜片的变形如图 5 所示,其值很小,因此,这类镜片可有效抑制冷却介质压力引起的镜片变形。事实上,镜片冷却流体压力引起的变形大小是随镜片结构强度变化而变化的,镜片结构强度高,其流体压力造成的变形量就小,反之亦然,因此图 5 说明,新镜片结构强度较前两者高。图 5 还说明,在采用流体冷却镜片方式达到消除或控制强激光系统热变形的同时会产生附加变形即压力变形。而此变形并非激光本身作用所致,因此激光系统中选用冷却铜镜结构时必须根据实际情况作合理取舍,并尽量选用结构强度高的镜片。

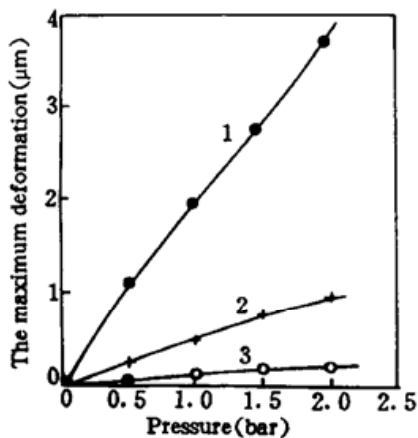


Fig. 5 The maximum deformation vs cooling fluid pressure

1; cavity copper mirror; 2; annular copper mirror;  
3; new copper mirror

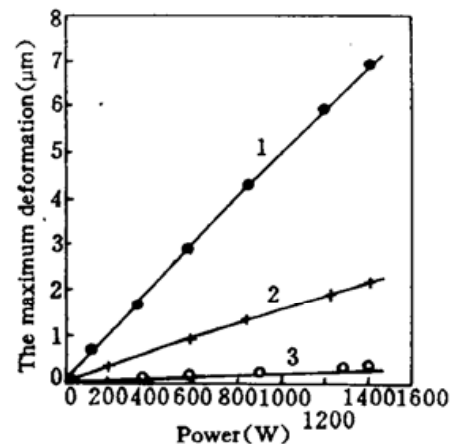


Fig. 6 The maximum deformation vs incident laser power

1; cavity copper mirror; 2; annular copper mirror;  
3; new copper mirror

### 2.3 激光作用引起的热变形

图 6 为冷却水流体压力为 0.2 MPa,激光照射下不同结构铜镜热变形随入射功率的变化曲线,其曲线为除去压力变形后的值。其中入射光束的光斑直径约为 25 mm,近似为基模,空腔镜表面反射率为 0.975,环形通道结构铜镜表面反射率为 0.98,新镜片表面反射率为 0.982,各镜片结构与尺寸均与前述相同。图 6 说明,在一定冷却条件下,镜片因激光照射引起的热变形随入射激光功率的增加而增加,功率越高,变形愈大。由图 6 中各曲线相对位置可知,空腔结构铜镜表面热变形量最大,环形通道结构铜镜次之,多层新结构铜镜表面热变形最小,这是由于不同结构铜镜的冷却效果不同所致。空腔结构铜镜冷却效果最差,环形通道结构铜镜次之,新结构铜镜的冷却效果最好。从各曲线的相对位置还可看出,与空腔结构铜镜相比,环形通道结构铜镜可明显改善镜片的冷却效果,但仍不如新结构铜镜理想,这也说明环形通道铜镜的冷却效果不如新镜的效果好。

## 3 结束语

强激光系统中,镜片因吸收部分作用在其表面上的能量而产生热应力和热变形。当变形值

超过一定的范围时,会影响系统的性能,如使激光器的输出功率下降或使激光光束质量变差。因此,必须采取有效措施控制镜片的变形,使之最小或完全消除。一般情况下,采取冷却镜片的方法达到此目的,但镜片会因冷流体的压力作用产生额外变形,因此镜片的结构应作合理取舍和设计,并力求结构强度高,冷却效果好,使之最优,否则会产生较大的变形。

本文对空腔、环形通道及多层新结构铜镜变形的实验研究表明,空腔结构铜镜的冷却效果最差,结构强度也低,其热变形和压力变形量均比较大,一般不宜采用;环形通道冷却结构铜镜可大大改善激光作用引起的热变形和冷却流体产生的压力变形,在激光功率不太高的情况下,可以有效抑制镜片的变形,但在较强高功率激光系统中或微变形要求较苛刻的条件下其变形值仍然偏高。采用新结构铜镜可达到满意效果,因新铜镜不仅结构强度高,而且冷却效果也比较好,因此激光作用引起的热变形和冷却流体压力产生的变形均很小,这为抑制强激光系统镜片的表面变形提供了有效途径。

### 参 考 文 献

- 1 周炳琨. 激光原理. 成都: 国防工业出版社, 1987. 129~133
- 2 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 第二版, 1991. 335~358
- 3 Yuen W. W., Fleishman R. V.. A Parametric Study of Mesh Enhanced Forced Convection Heat Transfer for the Cooling of High Power Density Mirror. *SPIE*, 1989, 1047: 43~55
- 4 Anthony F. M., Hopkins A. K.. Actively Cooled Silicon Mirrors. *SPIE*, 1981, 2978: 196~203

## Experimental Study on the Deformation of Copper Mirrors in a High Power Laser System

Xia Jinan Zhang Yaoning Cheng Zuhai Qiu Junlin

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** The distortion mechanism of high power laser mirrors is discussed. The deformation of water-cooled cavity copper mirror and annular channel copper mirror is tested by a Twyman-Green interferometer and image processing system. And a new kind of copper mirror is proposed. Compared with the other mirrors, the new mirror has not only a small thermal deformation caused by incident laser but also a very small pressure deformation yielded by the cooling fluid.

**Key words** copper mirror, mirror distortion