

在柔性变焦系统中的压力变焦镜

张耀宁 库 耕 程祖海 杜泽明 李 锋

(华中理工大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

提要 从理论上和实验上对水冷镜的镜面曲率半径随压力变化的规律作了研究。对压力变形后镜面对球面作了波像差分析,分析表明压力变焦镜用于中红外激光系统是合适的。

关键词 变焦, 挠变形, 波像差

可变焦距的反射镜在很多场合都有用,例如激光谐振腔的腔镜、激光发射系统、激光加工机床中的聚焦镜等。目前大多用调整镜子的几何位置的机械方法进行调焦,这种方法对调焦装置的机械加工的精度要求很高。这里叙述的一种方法是通过改变注入反射镜压力改变反射镜曲率半径,从而改变其焦距,这种柔性调焦系统在性能上比机械方法调焦要好得多。M. Bea 报道了他们利用压力调焦镜在激光加工机床的柔性调焦系统上的研究工作^[1]。由于激光束从激光器到聚焦系统的距离是变化的,因此按激光束通过透镜的变换规律,焦点、焦深都在变化。柔性调焦系统在这一场合中是很有必要的。

本文就水冷压力变焦镜镜面曲率半径随水压变化的规律,在理论上和实验上作了研究。并对压力调焦后镜子镜面面形相对于理想球面的波像差作了分析。

1 镜子的压力变形

对于镜面的径厚比大于 10 的水冷铜镜,它的压力变形是很显著的。它的面形变化在弹性力学中已有严格处理,也就是通过对挠度方程求解,获得镜面在压力载荷下的挠变形。对于圆形铜镜,当镜面为等厚或接近等厚,压力载荷均匀分布在镜面背后,挠度方程^[2]

$$D \nabla^4 w = q \quad (1)$$

式中 D 为镜面的刚度

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

这一微分方程可得解析解。当周边固定的圆形铜镜,其解为

$$w = \frac{qa^4}{64D} \left[1 - \frac{r^2}{a^2} \right]^2 \quad (3)$$

在铜镜中心处挠度最大

$$w_{r=0} = \frac{qa^4}{64D} \quad (4)$$

式中 q 为压力载荷, δ 为镜面厚度, a 为镜面半径。当铜镜为简支状态

$$w = \frac{qa^4}{64D} \left[1 - \frac{r^2}{a^2} \right] \left[\frac{5 + \nu}{1 + \nu} - \frac{r^2}{a^2} \right] \tag{5}$$

同样, 在中心处挠度最大

$$w_{r=0} = \frac{(5 + \nu)qa^4}{64(1 + \nu)D} \tag{6}$$

以上式中 E 为铜材的扬氏模量, ν 为铜材的泊松比。对于不等厚度镜面, 可用差分法或有限元法作数值求解。

由式(3)和式(5), 可知压力变形和注入铜镜的压力成正比。为了验证这一理论, 我们研制了一块压力变焦镜。图 1 为其结构示意图, 镜面厚度为 2 mm, a 为 15 mm, 材料为黄铜。在水压作用下镜面的压力变形的检测用镜面微变形测试系统。这一测试系统主要是由泰曼-格林干涉仪和图像采集处理系统组成。测试系统的光路图如图 2 所示。采集到各种压力下的干涉图像如图 3 所示。

图中给出了几种压力下镜面的干涉条纹及其细化图像。经处理后得到的镜面挠变形和理论计算的结果示于图 4^[3]。镜面中心处挠度随压力变化的实验和理论计算的结果列于表 1。

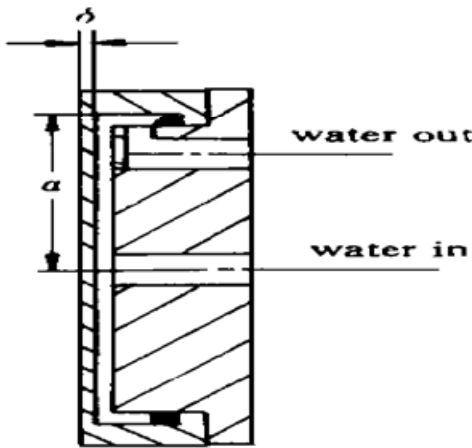


图 1 压力变焦镜结构简图

Fig. 1 The schematic of the structure of the focus variable mirror with varying pressure

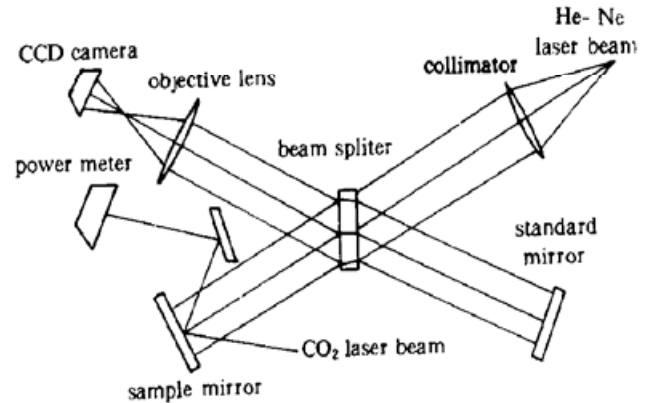


图 2 测试系统光路图

Fig. 2 The schematic of the test system

表 1 不同水压下镜面的挠变形 $w(r=0)$

Table 1 The deflection $w(r=0)$ of the mirror at different pressures

P /MPa	Experimental values / μm	Theoretical values/ μm	
		Clamped with edge	Simple support
0.05	1.39	0.44	1.75
0.10	2.62	0.88	3.50
0.15	3.98	1.32	5.25
0.20	5.36	1.76	7.01

从表 1 及图 4 可见, 用薄板弹性力学的理论来计算镜面的压力变形是合适的。而且这种夹持方式是介乎二者之间, 接近简支状态, 这可以从挠变形沿 r 的分布更接近于简支方式的理论曲线看出。

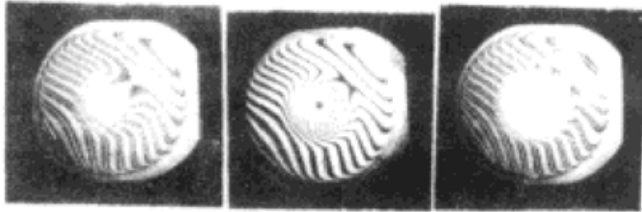


图 3 不同水压下的镜面干涉条纹

Fig. 3 The interference patterns at different water pressures

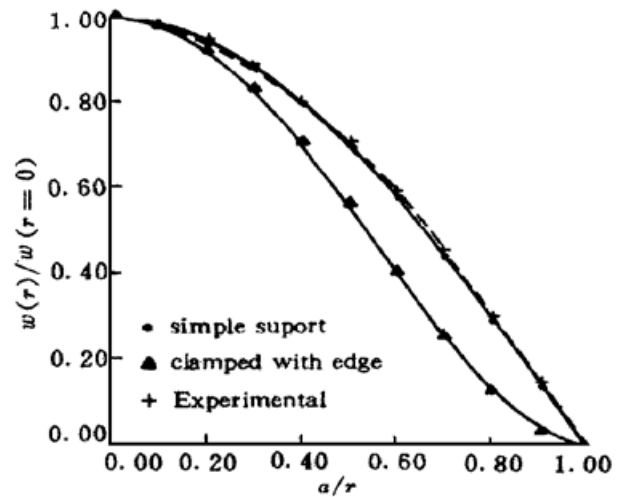


图 4 沿 r 方向镜面挠变形分布的理论曲线和实验曲线的比较

Fig. 4 The theoretical values of the deflection distributing on r in comparison with the experimental values

2 压力变形后镜面曲率半径的变化

按球面镜曲率半径的变化为例,由简单的几何关系可以得到

$$R = \frac{a^2 + H^2}{2H} \tag{7}$$

式中 H 为球冠高,原球冠高可通过

$$H = R - \sqrt{R^2 - a^2} \tag{8}$$

算出。变形后参考球面的球冠高 $H' = H - \Delta H$, ΔH 为镜面中心处的挠变形。以实验研究的压力调焦镜为例: $a = 15 \text{ mm}$; 镜面厚 2 mm ; 凹面镜常用的曲率半径 R 为 6 m 及 0.6 m 。则可算出在压力调焦时镜面的曲率半径的变化如表 2 所示。

表 2 水压作用下镜面曲率半径的改变

Table 2 The changes of the curvature of the mirror's surface by pressures

P /MPa	Theoretical values/mm			
	Clamped with edge		Simple support	
0	600.0	6000.0	600.0	6000.0
0.10	602.9	6295.1	611.5	7378.4
0.15	604.3	6453.8	617.4	8335.8
0.20	605.8	6620.7	623.4	9578.9

这说明仅用 0.2 MPa , 对于周边固定夹持的镜子, 压力可使 6000 mm 调焦镜的曲率变为 6620.7 mm , 对于简支方式夹持的镜子可使曲率半径增大到 9578.9 mm 。也即这一柔性调焦镜在压力变化范围为 $0 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 时, 焦距可在 $f = 3000 \text{ mm}$ 到 $f = 4789.45 \text{ mm}$ 之间调节。对曲率半径为 600 mm 的调焦镜, 则它的调焦范围就小得多。但从式(4)和式(6)可知压力变形量和镜面厚度的三次方成正比, 为了达到所需的压力调焦范围可减薄镜面厚度。

3 变形后镜面的光学成像质量

按照弹性力学,薄板的挠变形沿 r 的分布是 r 的四次幂函数,如式(3),式(5)所示。使用压力调焦的方法,镜面的成像质量会不会受影响?下面用应用光学的波像差理论分析。

图 5 为压力调焦镜面面形、变形后面形及以中心处最大挠变形为顶点的理想球面面形的示意图。图中粗实线画的球面面形曲线为原面形,细实线画的是以 T' 为顶点理想球面面形曲线。它们的球心分别为 o 及 o'' ,曲率半径分别为 R 及 $R + \Delta R$ 。由于挠变形,中心处由 T 变形到 T' ,球冠高改变为 $H - \Delta H$ 。图中虚线表示为原镜面在压力变形后的面形曲线。球面的面形曲线在以球心为坐标原点的坐标系中为

$$R^2 = x^2 + y^2 \tag{9}$$

现作坐标变换,将坐标原点移到 o' 上,则原球面的面形曲线和以 T' 为顶点的理想球面的面形曲线分别为

$$(y)^2 + (x' + R - H)^2 = R^2 \tag{10}$$

$$(y)^2 + [x' + (R + \Delta R) - (H - \Delta H)]^2 = (R + \Delta R)^2 \tag{11}$$

求解沿 y 各处的值,就得到在同一坐标体系中两面形曲线的值。将 $x'(y)$ 减去按式(3)或式(5)算出的沿 y 轴(即镜子半径 r 方向)上各处的挠变形值,得到了虚线所示的压力变形的面形曲线 $x''(y)$ 。 $x''(y)$ 和 $x'''(y)$ 差的计算结果如表 3 所示。

表 3 在 0.2 MPa 水压下,曲率半径 $R=6000$ mm 镜子挠变形后的面形曲线和相应的球面面形曲线的比较

Table 3 Surface shape curve of a mirror with $R=6000$ mm after 0.2 MPa pressure deformation in comparison with the spherical curve

Y/mm		0.0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0
$x''(y) - x'''(y)$ / μm	C	0.00	-0.02	-0.07	-0.14	-0.24	-0.33	-0.40	-0.44	-0.40	-0.27	0.00
	S	0.00	-0.02	-0.07	-0.15	-0.24	-0.33	-0.41	-0.44	-0.41	-0.27	0.00
	E	0.00	-0.04	-0.14	-0.15	-0.26	-0.29	-0.29	-0.43	-0.36	-0.26	0.00

C: Clamped with the edge; S: Simple support; E: Experimental.

引入一平面波入射,由镜面反射回的球面波与理想球面镜反射回的球面波在波面法线上的程差,就是调焦镜的波像差^[4]。为计算反射回的球面波波前,将镜面离散为若干面元,每个面元以平面镜近似,分别计算各子波面波前。然后再将各子波面重构成反射回的球面波波前。从上述镜面相对于理想球面镜各处的变形量数据,可知压力变形后,实际镜面与理想球面相应面元的法线夹角很小,计算表明对各子波面两者法线夹角小于 0.01° 。反射波在波面法线上的程差正好是各镜面面元在 x 轴上的差的两倍。例如 $y = 0 \sim 1.5$ mm 面元在 x 轴上理想球面面元中点在实际镜面面元中点的前方 $0.01 \mu\text{m}$ 处。算出的反射波的光程差为 $-0.02 \mu\text{m}$ 。表 4 给出

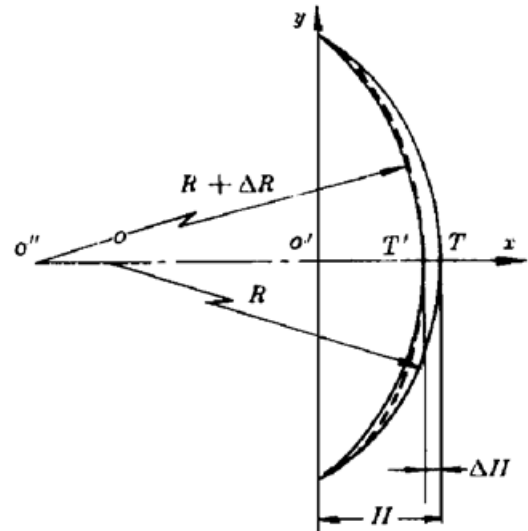


图 5 压力变焦镜挠变形后镜面面形曲线

Fig. 5 Surface shape curve of the focus variable mirror with varying pressure after deformation

The original spherical curve is shown as thick line, The surface shape curve after deformation is shown as dashed line. The correspondent spherical curve is shown as thin line

了各种压力下, $R = 6000 \text{ mm}$ 调焦镜在压力变形后产生的波像差峰谷值、均方根值。

表 4 不同水压下曲率半径 $R = 6000 \text{ mm}$ 镜子波像差的峰谷值和均方根值

Table 4 The PV and RMS of wavefront aberration of a $R = 6000 \text{ mm}$ mirror at different pressures

P /MPa	Simple support/ μm		Clamped with edge/ μm	
	PV	RMS	PV	RMS
0.10	0.42	0.26	0.42	0.26
0.15	0.64	0.39	0.63	0.39
0.20	0.85	0.53	0.84	0.52

$R = 600 \text{ mm}$ 调焦镜的波像差在上述压力下和 $R = 6000 \text{ mm}$ 调焦镜相仿。从波像差分析结果可知:

- (1) 两种夹持方式的调焦镜产生的波像差差别不大;
- (2) 随水压增大, 镜面曲率半径改变量增加, 波像差也随之加大;
- (3) 在 0.25 MPa 水压下波像差峰谷值约为 $1 \mu\text{m}$ 。对中红外激光器在足够的压力调焦范围内, 波像差是小于 $1/4$ 工作波长, 变焦后的反射镜仍有好的光学成像质量。

4 小 结

本文在实验上和理论上分析了压力调焦镜的调焦规律, 并分析了压力调焦镜在变焦后的光学成像质量。按照分析结果, 反射镜焦距可随注入水压线性调节; 对于中红外激光器这种压力调焦镜有较好的光学成像质量, 对于可见光激光器, 要考虑设计变镜面厚度的压力调焦镜以改善其光学成像质量。

参 考 文 献

- 1 M. Bea, A. Giessen, H. Hügel. On-line control of the focus geometry by coupled adaptive systems. *Laser und Optoelektronik*, 1994, **26**(2): 43~ 49
- 2 S. Timoshenko. Treory of plates and shells. New York: McGRAW-HILL Book COMPANY. INC., 1959. 51~ 57
- 3 Zhang Yaoning, Cheng Zhuhai, Ku Gen *et al.*. Superthin multilayer mirror. *SPIE*, 1996, **2889**: 375
- 4 Wang Ziyu. Geometrical Optics and Optical Design. Hangzhou: Zhejiang Publishing House, 1989. 305~ 311 (in Chinese)

The Focus Variable Mirror with Varying Pressure in the Flexible Focus Variable System

Zhang Yaoning Ku Geng Cheng Zhuhai Du Zheming Li Feng
(National Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The varying character of the curvature of a water-cooled mirror's surface with varying coolant pressure has been studied. The wavefront aberration of the mirror after pressure deformation has also been analyzed. It is shown that the focus variable mirrors with varying coolant pressure are suitable for the middle infrared laser system.

Key words focus variable, deflection, wavefront aberration