

doi: 10.3788/gzxb20164511.1122001

# 气动驱动变厚变曲率反射镜技术

赵惠<sup>1</sup>, 解晓蓬<sup>1,2</sup>, 许亮<sup>1</sup>, 丁蛟腾<sup>1</sup>, 刘美莹<sup>1</sup>, 樊学武<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学应用研究室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘 要:**以环形线负载驱动模型为基础,分析了环形线负载驱动变曲率反射镜难以兼顾大中心形变与高精度面形保持的原因;从薄板弹性理论出发,得到了一种气动驱动变厚变曲率反射镜物理模型.理论分析表明,将反射镜的厚度分布从等厚改为变厚,并采用气压均匀驱动替代推力环驱动,反射镜不仅能产生大的中心形变,而且在形变过程中的面形精度也远高于环形线负载驱动变曲率反射镜的.基于超硬铝反射镜样片的试验验证了对变厚变曲率反射镜的理论分析;试验中,反射镜初始面形精度接近 $\lambda/50$ (632.8 nm),施加 0.032 MPa 驱动气压产生约 22  $\mu\text{m}$  中心形变时,反射镜面形精度依然优于 $\lambda/20$ (632.8 nm),证明该气动驱动结合变厚设计这一技术具有较大的应用潜力.

**关键词:**变曲率反射镜光学设计;光学变焦;无运动部件变焦;气动驱动;变厚;薄板弹性理论

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)11-1122001-8

## Pressurization Actuation Based Variable Curvature Mirror Having Variable Thickness

ZHAO Hui<sup>1</sup>, XIE Xiao-peng<sup>1,2</sup>, XU Liang<sup>1</sup>, DING Jiao-teng<sup>1</sup>, LIU Mei-ying<sup>1</sup>, FAN Xue-wu<sup>1</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Space Optics Lab, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on the model of annular force based actuation, the reasons why it is hard for annular force based variable curvature mirror to obtain a large saggitus variation and maintain a high-accuracy surface figure simultaneously were analyzed. From the elasticity theory of thin plate, a physical model of variable curvature mirror in which pressurization actuation and variable thickness design are combined together was proposed. The theoretical analysis results show that, by making the mirror thickness be variable from the center to the periphery portion and adopting the pressurization actuation, the large saggitus variation can be obtained while the surface figure accuracy can be maintained and higher than the annular line load variable curvature mirror. A duralumin prototype mirror was designed, fabricated and tested. The surface figure accuracy of the mirror before curvature variation is superior to  $\lambda/50$  (632.8 nm). When a pressure of about 0.032 MPa is imposed, the mirror can provide a saggitus variation exceeding 22  $\mu\text{m}$  and at the same the corresponding surface figure accuracy is still superior to  $\lambda/20$  (632.8 nm), which verifies the theoretical analysis about variable thickness mirror and proves that the design combination integrating pressurization actuation and variable mirror thickness is a promising technical way to construct an applicable variable curvature mirror.

**Key words:** Variable curvature mirror optical design; Optical zooming; Zooming without macroscopic moving elements; Pressurization actuation; Variable mirror thickness; Elasticity theory of thin plate

**OCIS Codes:** 220.0220;220.2740;230.4040

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61107008, 61105017)、国家高技术研究发展计划和中科院西部青年学者项目(No. XAB2015A09)资助

第一作者:赵惠(1981-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光学成像技术及图像处理技术. Email: zhaohui@opt.ac.cn

收稿日期:2016-06-01;录用日期:2016-08-01

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

常规光学元件受镜面材料特性和制造工艺的限制,只能提供固定的光焦距,所以根据几何光学原理<sup>[1]</sup>、传统变焦技术(包括光学补偿式变焦与机械补偿式变焦)只能依靠光学元件或组件之间的相对运动实现变焦,对运动部件的依赖限制了变焦技术在特定场合的应用.近年来,随着交叉学科快速发展,出现了一种新型的变焦技术,将能够改变自身曲率半径的主动光学元件—变曲率反射镜与光学杠杆放大效应相结合,就可以不依赖宏观运动部件实现系统焦距的改变<sup>[2-5]</sup>.这种新型的无运动部件变焦技术具有广阔的应用前景,因而成为了研究的热点之一<sup>[6-8]</sup>.

作为实现无运动部件变焦的关键器件,变曲率反射镜并非新概念器件,其原型最早可以追溯到1973年耶路撒冷希伯来大学(Hebrew University of Jerusalem)研制的样片镜<sup>[9]</sup>.自此以后,国内外众多科研机构都开展了变曲率反射镜技术研究,但是包含希伯来大学研制的样片在内,绝大多数研究都致力于解决高能固体激光器由热透镜效应带来的输出光束品质下降问题<sup>[10-15]</sup>,将其应用于光学变焦成像则是全新的尝试.由于激光器的工作波段较长(比如典型的1 054 nm),所以对反射镜的面形精度要求相对较低,相关研究所关注的重点在于反射镜是否能够提供足够大的中心形变以补偿热透镜效应产生的离焦和球差.然而在应用于光学成像时,对变曲率反射镜的初始面形精度及形变过程中的面形精度保持的要求大大提高.产生较大中心形变的同时始终使面形精度满足高品质成像的要求就成为变曲率反射镜得以实用化的关键因素之一.

从环形线负载驱动机理出发构建的推力环支撑环两环结构是实现曲率变化的最简单方式,美国Sandia国家实验室联合海军实验室所开展的研究工作就是一个典型.研究人员于2006年研制了两块口径为25.4 mm、厚度分别为1 mm和3.2 mm的变曲率反射镜样片.前者在极限18.4  $\mu\text{m}$ 中心形变以内,其面形精度RMS(Root-Mean-Squares)可优于在 $\lambda/10$ (1 054 nm);后者在极限1.87  $\mu\text{m}$ 中心形变以内,其面形精度RMS可接近 $\lambda/50$ (1 054 nm)<sup>[10]</sup>.此后,国内科研人员也开展了类似的研究工作,并将反射镜的口径增大.2010年,中科院长春光机所研制了口径为100 mm/厚度为8 mm的平面硅材料变曲率反射镜,在225 N的作用力下实现了最大3  $\mu\text{m}$ 的中心形变<sup>[14]</sup>.2012年,中科院大连化物所研制了口径为100 mm、厚度为5 mm的平面单晶硅材料变曲率反射镜,在400 N的作用力下实现了接近1  $\mu\text{m}$ 的中心形变<sup>[15]</sup>.2013年~2014年,中科院西安光机所研制了口径为100 mm、

厚度为2 mm的球面铍青铜变曲率反射镜,实现了超过30 $\lambda$ ( $\lambda$ 为632.8 nm)接近19  $\mu\text{m}$ 的中心形变<sup>[16-17]</sup>.

研究表明,环形线负载驱动虽然能够实现较大的中心形变,但其面形精度很快就退化到无法成像<sup>[16-17]</sup>,当反射镜口径和径厚比逐渐增大时这种情况更加凸显.因此,是否存在一种适用于更大口径的可以兼顾大形变与高精度面形保持的曲率变化物理模型成为本文研究的重点.在分析环形线负载驱动机理的产生根源及其存在缺陷的基础上,同样以薄板弹性理论作为工具,推导并获得了一种均匀压力驱动结合变厚反射镜结构的曲率变化模型,研制了原型样片并进行了实测试验.结果表明,这种新型的变曲率反射镜不但能提供超过20  $\mu\text{m}$ 的中心形变,而且在极限形变时的面形精度也能够优于 $\lambda/20$ (632.8 nm),远好于环形线负载驱动的面形精度保持效果.

## 1 环形线负载驱动机理及缺陷分析

美国<sup>[10]</sup>及国内机构<sup>[14-17]</sup>研究的环形线负载驱动曲率变化结构如图1,与之相对应的经过抽象的模型如图2,有两个特点:1)反射镜的厚度恒定不变;2)反射镜与支撑结构之间相互独立.由于较大径厚比反射镜可以被当作圆形薄板;同时,由于其所能提供的中心形



图1 参考文献[10, 14-17]中设计的变曲率反射镜结构  
Fig. 1 Annular force based prototype variable curvature mirror designed in literatures [10, 14-17]

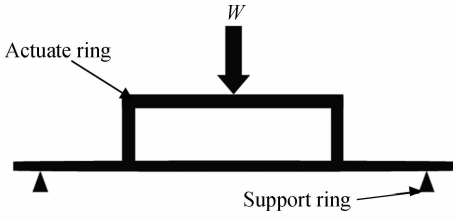


图2 环形线负载驱动曲率变化模型

Fig. 2 Model of curvature varying with annular line load 变也远小于其中心厚度,所以如图2的环形线负载驱动曲率变化机理可以从薄板弹性理论分析得到<sup>[18-20]</sup>。

令 $Z(r)$ 代表反射镜薄板光学表面在极坐标系 $(r-\theta)$ 下的起伏情况。对于恒定厚度为 $t$ 的反射镜来说,其各个位置的刚度 $D=Et^3/[12(1-\nu^2)]$ 都是一致的,其中 $E$ 和 $\nu$ 分别代表反射镜材料的弹性模量和泊松比。当对反射镜施加3种可能的外部驱动力时,其面形形变 $Z(r)$ 都可以由双拉普拉斯 Poisson 公式 $\nabla^2 \nabla^2 Z=0$ 的通解表示,如式(1)。这3种可能的不同类型的外部驱动力分别为:1)在反射镜的中心直接施加点状驱动力;2)在与反射镜同心的圆环上施加均匀分布的环状驱动力;3)在反射镜的边缘位置对其施加弯曲力矩。

$$Z(r)=B_{20}+C_{20}\ln r+D_{20}r^2+E_{20}r^2\ln r \quad (1)$$

式中, $B_{20}$ 、 $C_{20}$ 、 $D_{20}$ 以及 $E_{20}$ 综合起来表征反射镜薄板在受压情况下的面形起伏。

纯粹的曲率变化意味着式(1)中除 $D_{20}$ 以外,其他的系数都应该为0或者与 $D_{20}$ 相比可以忽略不计。如果以反射镜的顶点中心作为形变坐标系的原点,那么式(1)中的 $B_{20}$ 就等于0。此时, $C_{20}$ 和 $E_{20}$ 存在与否与所采用的外部驱动力的类型紧密相关。如果存在一种驱动方式使 $C_{20}$ 与 $E_{20}$ 均等于0或者小到可以忽略不计,那么反射镜的形变就将仅仅产生曲率变化 $D_{20}$ 这一种模式。

在已知反射镜形变公式 $Z(r)$ 的前提下,单位长度径向剪力,即剪切应力可表示为

$$Q_r=-D\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dZ}{dr}\right)\right)=-4E_{20}D\frac{1}{r} \quad (2)$$

可以看到,剪切应力的表达式仅与反射镜形变公式中的 $E_{20}$ 项有关。这就表明,如果反射镜在外力驱动下发生形变的时候能够不产生或者产生很小的剪切应力,那么此时 $E_{20}$ 就近似为0。当采用上述3种外部驱动方式中的点状驱动或同心圆环状驱动方式时,施加在其表面的驱动力必将分解为沿表面法线方向的正压力和沿垂直法线方向的切平面上的剪力,而且随着外部驱动力的增大,与反射镜表面相切的剪力也将逐渐增加,从而导致剪应力的增加而无法消除形变公式中 $E_{20}$ 项的影响。因此,只有在反射镜的边缘位置对其施加弯曲力矩时才能避免剪应力的产生,从而消除 $E_{20}$ 项的

影响。

根据薄板弹性理论,当反射镜薄板被仅仅施加弯曲力矩时(此时式(1)描述的反射镜形变公式中的系数 $B_{20}$ 和 $E_{20}$ 均等于0),径向单位长度弯曲力矩可表示为式(3)。在一个更加通用的假设下,即当半径为 $a$ 的圆盘中心存在一个半径为 $b$ 的孔洞时,此时 $C_{20}$ 和 $D_{20}$ 就能够由传导到内孔边缘的弯曲力矩 $M_r(b)$ 和传导到薄板外围边缘的弯曲力矩 $M_r(a)$ 决定,即

$$M_r=D\left(\frac{d^2Z}{dr^2}+\frac{\nu}{r}\frac{dZ}{dr}\right)=D\left[2(1+\nu)D_{20}-(1-\nu)C_{20}\frac{1}{r^2}\right] \quad (3)$$

$$C_{20}=\frac{1}{1-\nu}\frac{a^2b^2[M_r(a)-M_r(b)]}{D(a^2-b^2)}$$

$$D_{20}=\frac{1}{2(1+\nu)}\frac{a^2M_r(a)-b^2M_r(b)}{D(a^2-b^2)} \quad (4)$$

由于这里所讨论的反射镜圆盘没有中心孔洞,所以其半径 $b$ 等于0,因此由式(4)可知, $C_{20}$ 也天然地等于0。因此,综合式(2)~(4)可以得到,如果仅仅对反射镜的边缘施加弯曲力矩,那么就能够使 $C_{20}$ 以及 $E_{20}$ 均等于0,而与曲率变化相对应的系数 $D_{20}$ 就可以被表示为 $D_{20}=\frac{1}{2(1+\nu)}\frac{M_r(a)}{D}=6(1-\nu)\frac{M_r(a)}{Et^3}$ 。此时,表面形变 $Z(r)$ 就能够被具体化为

$$Z(r)=6(1-\nu)\frac{M_r(a)}{Et^3}r^2 \quad (5)$$

由此可知,只有在反射镜的边缘仅仅施加弯曲力矩时,反射镜才能够产生纯粹的曲率变化,然而由于这种方式很难完全消除形变过程中剪切应力对曲率变化模式的破坏,在物理上很难实现。所以,才利用如图1推力环支撑环环形线负载结构,通过内外环产生的轴向驱动力之间的差异来产生与弯曲扭矩等效的效果,这就是环形线负载结构实现曲率变化的材料力学机理。

作为对薄板边缘施加纯粹弯曲扭矩的替代,尽管环形线负载驱动作用于等厚反射镜能够实现变曲率效果,但是研究表明,图1与图2结构设计难以兼顾大形变和面形精度保持。原因有2个:

1)恒定的反射镜厚度意味着镜体任意位置处的刚性是固定不变的,也就是说镜面各个位置抵抗因外力引起的变形响应是相同的。研究表明,当施加环形驱动时,由于作用力集中于推力环与反射镜背部的接触区域,所以推力环附近及其所覆盖的镜面区域的压应力响应也相对较为集中。图3给出了典型环形线负载驱动结构的压应力有限元分析,可以看到,集中应力响应正好位于推力环所覆盖的区域。此时由于反射镜恒定刚性的限制,反射镜无法选择性对抗外部驱动力导致的变形,所以应力响应集中的区域会产生较大的变形,

而应力响应较小的区域则产生较小的变形,从而导致整个面形发生巨大改变,直接引起反射镜的面形精度迅速退化。

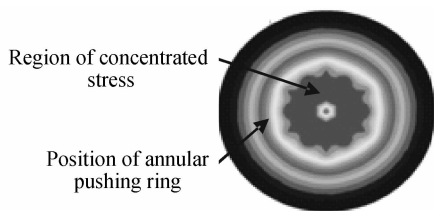


图3 环形线负载驱动等厚反射镜变形时的压应力分布  
Fig. 3 Pressure stress generated by annular force based actuation

2) 根据薄板弹性理论,环形线负载驱动要实现较大的中心形变,反射镜的边缘必须处于一种近似无约束的简单支撑状态,即反射镜产生形变时沿径向可以伸缩.实现筒支无约束状态最简单的方法就是令反射镜与支撑结构之间相互独立.然而,这种方式的弊端在于反射镜的空间位置完全由前表面的支撑和后表面的推力环通过挤压来保证.由于反射镜与支撑结构是相互独立的两个部件,所以反射镜形变时产生的径向收缩会使其与支撑结构之间出现空隙.如果部件加工或者安装不同心或者施加的推力非对称,那么这个空隙就不是均匀的,意味着反射镜将侧向滑动,即有些位置处的空隙越来越大,而有些位置处的空隙越来越小,从而引起支撑结构对反射镜边缘产生非均匀挤压,进而导致反射镜的面形同样迅速劣化。

因此,如果反射镜的厚度设计可以与压应力响应相适应以抵消镜面有效口径之内的集中应力,并且通过改进结构设计在满足筒支条件的基础上保持反射镜空间位置,那么就有可能构建出能兼顾大变形和高精度面形保持的新型变曲率反射镜模型。

## 2 气动驱动变厚变曲率反射镜设计及分析

假设反射镜的厚度并非恒定,那么其刚度将随径向坐标的变化而变化,即

$$D(r) = E[t(r)]^3 / [12(1-\nu^2)] \quad (6)$$

根据薄板弹性理论<sup>[18-20]</sup>,无论是厚度渐变还是厚度恒定,反射镜形变过程中所承受的径向弯曲力矩和切向弯曲力矩都可以分别表示为  $M_r$  和  $M_t$ ,即

$$\begin{aligned} M_r &= D \left( \frac{d^2 Z}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dZ}{dr} \right) \\ M_t &= D \left( \nu \frac{d^2 Z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dZ}{dr} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

在形变过程中,在薄板的某一个位置  $r$  处的径向弯曲力矩、切向弯曲力矩以及剪切力之间存在静态的平衡,可以表示为

$$M_r + r \frac{dM_r}{dr} - M_t + rQ_r = 0 \quad (8)$$

将式(7)带入式(8),并给式(8)的两边都除以  $rD$ ,就可以得到

$$\frac{d^3 Z}{dr^3} + \left( \frac{1}{D} \frac{dD}{dr} + \frac{1}{r} \right) \frac{d^2 Z}{dr^2} + \left( \frac{\nu}{rD} \frac{dD}{dr} - \frac{1}{r^2} \right) \frac{dZ}{dr} = -\frac{Q_r}{D} \quad (9)$$

将  $\nabla^2 Z(r) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dZ}{dr} \right)$  带入式(9),式(9)又可以进一步简化为

$$D \frac{d}{dr} (\nabla^2 Z) + \left( \frac{d^2 Z}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dZ}{dr} \right) \frac{dD}{dr} = -Q_r \quad (10)$$

根据式(10)就可以得到薄板,即反射镜的刚度  $D$  随径向坐标变化的关系式,即

$$\frac{dD}{dr} = -\frac{Q_r}{2(1+\nu)A_{20}} \equiv -\frac{R}{1+\nu} Q_r \quad (11)$$

可以看到,反射镜刚度  $D$  沿径向的变化与形变过程中的单位长度剪切力  $Q_r$  直接相关.当在反射镜的背部施加一个均匀的单位面积作用力  $q$  时,反射镜的边缘位置由于结构的约束会产生相应的剪切力,此时在沿径向的任何一个位置都满足动态平衡条件,即

$$\pi r^2 q + 2\pi r Q_r = 0 \quad (12)$$

此时,由式(12)可以获得单位长度剪切力的表达式,将其带入式(11)并且进行积分之后就可以获得反射镜刚度的解析表达式为

$$D = -\frac{qR}{4(1+\nu)} (\text{constan } t - r^2) \quad (13)$$

可以看到,厚度渐变分布带来的最大好处就是不需要在反射镜的边缘引入一个弯曲力矩,而仅仅通过为其背部施加一个均匀的单位面积作用力  $q$  就能够实现曲率的变化.令  $D(a)$  等于 0,那么刚度  $D$  随径向变化的函数就重新表示为

$$D = -\frac{qa^2 R}{4(1+\nu)} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (14)$$

此时,反射镜厚度分布就可以表示为

$$t = -\left[ 3(1-\nu) \frac{qR}{Ea} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \right]^{1/3} a = -C \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/3} \quad (15)$$

式中,  $C$  是一个可以控制厚度分布的综合因子。

总之,当反射镜的厚度分布按照式(15)从中心向边缘逐渐减小时,通过在反射镜的背部均匀地施加作用力就能够产生曲率的变化.由于每一个  $r$  所处的位置其剪切力与作用力之间都进行了相应的平衡,而且这个平衡的强度与不同  $r$  处不同的刚度  $D$  有关,所以反射镜工作表面因残余应力而导致的面形精度劣化就可以得到有效控制。

要施加均匀的作用力,最简单的方法就是采用气动驱动.为了形成密闭的气腔,反射镜与支撑结构最好做成一个整体.如图4所示,厚度渐变反射镜的边缘通过超薄环壁结构与支撑底盘连接为一个整体.这样不但能可靠地形成一个密封的气腔,而且可以保证反射镜受压形变时的空间位置稳定.以图4结构为基础,利用有限元工具进行了应力应变分析,如图5.可以看

到,该结构能够实现良好的曲率变化,与此同时,由图5与图3的对比可知,环形线负载驱动在镜面的有效区域内会产生非常集中的压应力,而图4的一体化结构则将集中应力转移到了超薄连接环上,从而为形变过程中高精度面形的保持提供了保障.

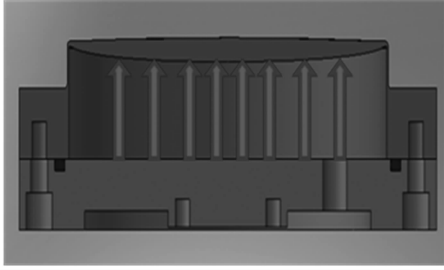


图4 气动驱动变厚变曲率反射镜结构

Fig. 4 Structure design of pressurization actuation based variable curvature mirror having variable thickness

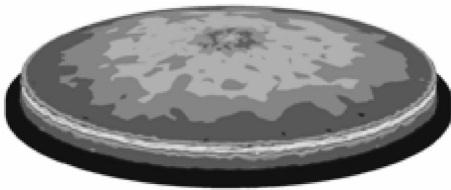
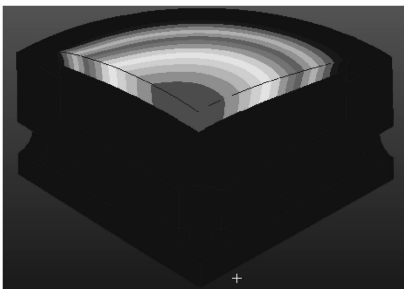


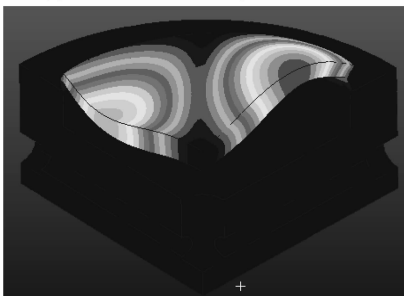
图5 气动驱动变厚反射镜应力分布情况

Fig. 5 Pressure stress analysis of pressurization actuation based variable curvature mirror having variable thickness

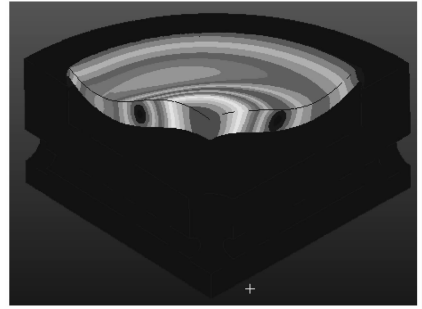
由图4可知,这种渐变厚度的反射镜除了边缘存在环形支撑以外,其他位置均处于无支撑状态,这就意味着这种器件对振动的影响可能会比较敏感.为此,利用有限元软件对图4的变曲率反射镜整体结构进行了模态分析.如图6所示,1阶、2阶以及3阶模态振型的固有频率分别为2 148.1 Hz、9056.8 Hz以及10 951 Hz,因此该结构反射镜对振动有着较强的抵抗能力.



(a) 1st order mode analysis: 2148.1Hz



(b) 2nd order mode analysis: 9056.8Hz



(c) 3rd order mode analysis: 10951Hz

图6 渐变厚度变曲率反射镜结构振型分析

Fig. 6 Mode analysis of variable curvature mirror structure with variable thickness

### 3 气动驱动变厚变曲率反射镜样片研制及形变试验

#### 3.1 变曲率反射镜样片的研制

变曲率反射镜样片的研制包含两大部分.其一是带有支撑结构的渐变厚度反射镜本体及支撑底盘的研制,其二是气动驱动系统的研制.

##### 1) 渐变厚度反射镜

考虑到铝合金材料易于成型和加工的特性可以较为方便地制造复杂镜面结构,这里采用超硬铝 LC4 作为镜面材料,同时为了消除异种材料之间热膨胀系数不匹配对反射镜的影响,支撑底盘也采用与反射镜相同的超硬铝材料.

拟研制的反射镜样片全口径为 135 mm,有效口径为 120 mm,中心厚度为 8 mm,初始曲率半径为 2 807 mm,经有限元分析优化后的表征厚度分布的式(15)中的控制因子  $C$  等于 0.86. 获得最佳控制因子  $C$  的流程简述如下:首先,利用 ANSYS 软件,按照点→线→面→体的 CAD 建模方法创建反射镜模型,在镜体内下表面、内侧面与支撑底盘上表面模拟压力作用,而将反射镜的外侧面与底板下表面 6 个自由度全部约束.其次,利用 ANSYS 计算在给定结构参量条件下的反射镜形变,并将提取到的镜体工作表面面形数据输入 Matlab 进行处理,进而给出在不同充气压强下镜体工作表面的 RMS 值和对应的曲率半径. ANSYS 与 Matlab 之间的协同工作无需人工干预,两者之间的迭代交互过程将以 RMS 的最小化作为结束依据,并最终给出最佳控制因子  $C$ .

根据镜面材料的特点,渐变厚度反射镜本体的研制流程如图 7.

由于反射镜的工作表面为球面而反射镜的厚度分布为抛物线,所以反射镜的背部就形成一个非球面,其成型精度将对反射镜的厚度分布产生影响,从而对最终的曲率变化效果产生影响.因此,在拿到超硬铝反射镜的镜坯之后,首先,在三坐标系统的监控下,使用

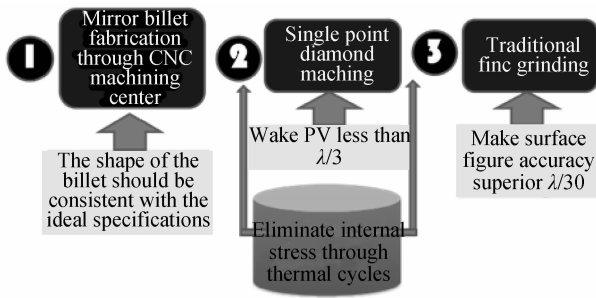


图7 超硬铝渐变厚度反射镜研制流程

Fig. 7 Fabrication procedure of LC4 variable thickness mirror

数控加工中心分别对反射镜的工作表面和背面进行成型加工,使实际加工获得的面形与理想模型之间的偏差最小,其次,考虑到金属材料与玻璃材料相比,直接抛光到高精度光学表面更加困难,所以经过粗加工研磨以后,就利用单点金刚石车削加工技术快速达到适合精密抛光的水平.此时需要注意的是,包括铝合金材料在内的许多金属材料与玻璃类材料相比都具有较大的热膨胀系数,所以在进入金刚石车削加工之前必须利用如表1的热处理流程通过多次处理来消除粗加工阶段引入的应力,使得反射镜在后续抛光和使用的时候不会因为温度变化而影响几何及光学面形.再次,完成单点车削加工之后,将反射镜本体与支撑底盘粘接并在高温下快速固化达到稳定状态.最后,采用古典应力盘抛光方法将与支撑底盘粘接的渐变厚度反射镜本体加工直至达到光学表面要求.

表1 高低温循环消应力处理流程

Table 1 Thermal recycles based inner pressure elimination procedure

A	Put the variable curvature mirror in liquid nitrogen of $-196^{\circ}\text{C}$ for 2 h
B	Take the variable curvature mirror out of the liquid nitrogen and keep it in room temperature for 1 h
C	Put the variable curvature mirror in thermostat of $70^{\circ}\text{C}$ for 2 h
D	Take the variable curvature mirror out of the thermostat and keep it in room temperature for 1 h

图8给出了完成抛光之后的反射镜实物.与此同



图8 完成抛光的反射镜

Fig. 8 Mirror after fine polishing

时,图9给出了 Zygo 干涉仪下的面形精度测量结果.可以看到,面形精度 RMS 已经达到了  $\lambda/50$ . 这就表明,图4的渐变厚度反射镜具有良好的刚度,能够在背部无任何支撑的条件下实现高精度的光学镜面加工.此外,在完成反射镜的加工以后进行了约1个月的稳定性监测,由于进行了充分的热循环消应力处理,面形精度始终保持在  $\lambda/50$  左右.

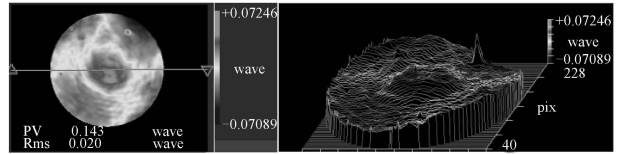


图9 渐变厚度反射镜面形精度检测结果

Fig. 9 Testing result of surface figure accuracy of fabricated variable thickness mirror

### 2) 气动驱动系统

气动驱动系统由产生压缩空气的空气压缩机、监测反射镜密闭气腔压力数值的压力传感器、控制压缩空气进气量的高精度比例伺服阀以及控制气动驱动系统的工控机及开关阀等部件组成,各部件实物图如图10,工作流程则由图11给出.可以看到,压力传感器

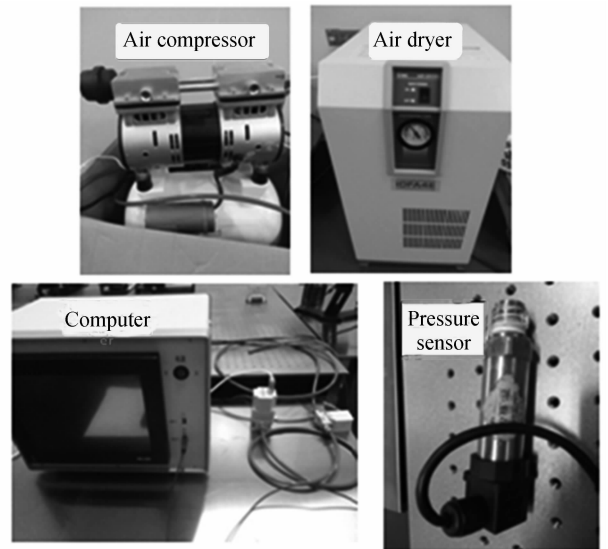


图10 气动驱动系统部件

Fig. 10 Components of pressurization based actuation system

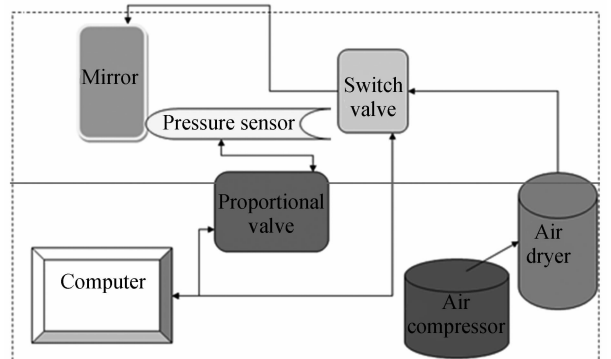


图11 气动驱动系统工作流程

Fig. 11 Working procedure of pressurization actuation system

将使气动驱动系统形成闭环,可以高精度地稳定在设定的压力数值.表 2 则给出了驱动系统的主要性能参量.

表 2 气动驱动系统主要性能参量

Table 2 Specifications of pressurization actuation systems

Ultimate pressure	0.1 MPa
Pressure precision	0.008 MPa

渐变厚度反射镜本体在与气动驱动系统连接之后的状况如图 12,下一小节中就将利用此系统进行曲率变化性能及面形精度保持能力的试验.

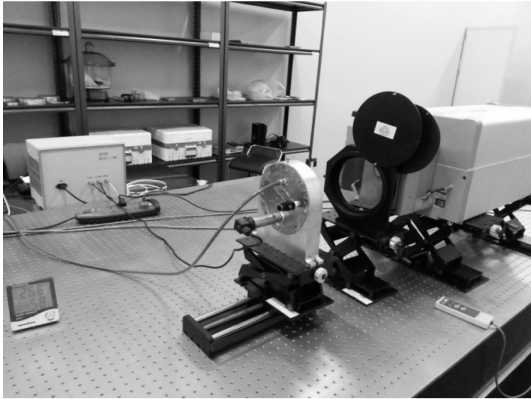


图 12 变曲率反射镜性能检测装置

Fig. 12 Detecting apparatus used for performance evaluation of variable curvature mirror

这里需要注意的是,气动驱动系统需要气腔的密闭性足够好才可以保证测量的精确性.如果在加压的情况下存在漏气现象,那么在气动驱动系统自身闭环补偿的作用下必然存在反复充放气的现象,从而导致干涉条纹无法稳定下来,进而影响每一档驱动压强对应的面形精度的测量准确程度.因此,除了要将反射镜各个连接结构位置处进行胶封密闭处理以外,还需要将图 11 中各个部件之间的接口处进行细致的密封处理,以此杜绝漏气现象,为高精度的面形精度检测提供保证.

### 3.2 曲率变化与面形精度保持能力试验

如图 12,曲率变化与面形精度保持能力的试验将基于 Zygo 干涉仪进行,其中利用干涉仪获得反射镜动态曲率变化数值的原理如图 13.

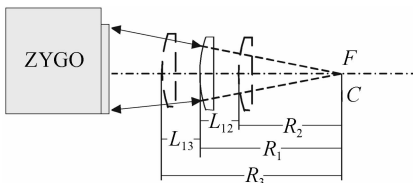


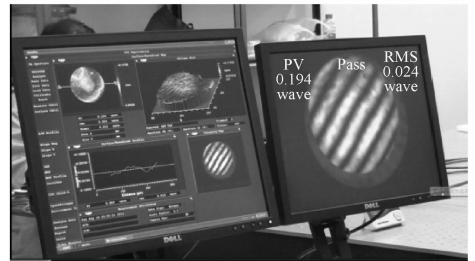
图 13 基于 Zygo 的动态曲率半径测量原理

Fig. 13 Measurement principle of dynamic curvature radius based on the Zygo interferometer

在图 13 中,未加压形变之前的反射镜曲率半径为  $R_1$  (2 807 mm).当反射镜向右平移  $L_{12}$  的距离时,通过气压驱动引起的曲率变化使干涉仪测量数据中的

Power 量值逐步接近零,就认为新位置处的干涉仪焦点与半径为  $R_2$  的凸面曲率中心重合,那么  $R_2 = R_1 - L_{12}$ .同理如果反射镜向左平移  $L_{13}$  的距离,通过气压驱动引起的曲率变化使干涉仪测量数据中的 Power 量值逐步接近零,干涉仪焦点与半径为  $R_3$  的凸面曲率中心重合,那么  $R_3 = R_1 + L_{13}$ .

在初始未加压状态下,干涉条纹应为平直条纹,加压之后就会转变为同心对称环状条纹,反射镜与干涉仪之间距离的变化可以将环状条纹重新拉直,图 14 给出了一个实例.根据上述原理,以未加压状态为参考,按照表 2 所给出的最小压力增量逐渐加压驱动反射镜形变,之后通过改变反射镜与干涉仪之间的距离对曲率变化引起的离焦进行补偿,并由此获得每一档驱动气压对应的曲率半径及面形精度.图 15 给出了反射镜在 0.032 MPa、0.04 MPa 以及 0.048 MPa 驱动气压下形变引起的离焦经补偿后的面形精度测量结果,与之相对应的数据由表 3 给出.



(a) Before pressurization



(b) After pressurization

图 14 加压前后干涉条纹对比

Fig. 14 Comparison of interference pattern before and after pressurization

表 3 试验数据

Table 3 Experimental results

Pressure /MPa	Distance variation between mirror and interferometer /mm	Ultimate radius of curvature /mm	Center deflection / $\mu\text{m}$	Surface accuracy / $\lambda$
0	0	2807	0	0.02
0.032	58.27	2748.73	17.08	0.038
0.040	72.89	2734.11	21.49	0.050
0.048	86.78	2720.22	25.71	0.060

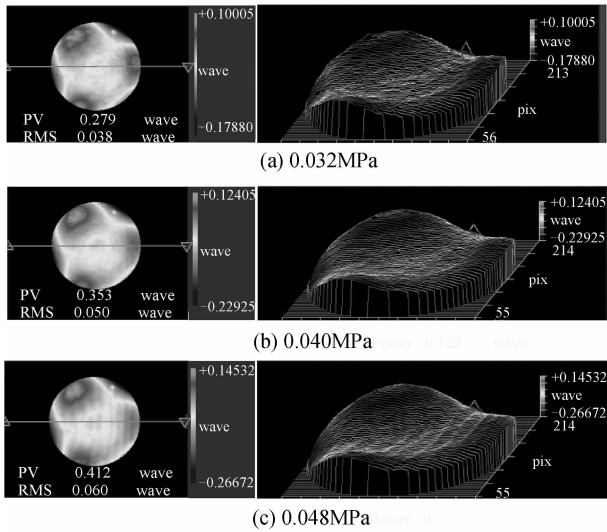


图 15 不同驱动气压对应的面形精度测量结果  
Fig. 15 Measurement results of the corresponding surface figure accuracy under different pressure

可以看到,当中心矢高变化量接近  $22\ \mu\text{m}$  时,反射镜的面形精度依然优于  $\lambda/20$  ( $632.8\ \text{nm}$ ),与环形线负载驱动达到同等量级形变时的面形精度相比大大提高<sup>[16-17]</sup>.由此证明,气动驱动结合厚度渐变的设计能够兼顾大的中心形变与高精度的面形保持,具有应用于可见光波段无运动部件变焦成像的潜力.

## 4 结论

本文围绕可应用于无运动部件变焦成像的变曲率反射镜技术开展研究工作.在对常见的环形线负载驱动曲率变化模型的产生根源及缺陷进行分析的基础上,利用薄板弹性理论推导并获得了一种气动驱动球面变厚曲率变化模型.当反射镜的厚度从等厚变为变厚,反射镜与支撑结构通过环形超薄壁连接为一体,并且用均匀气压驱动替代环形驱动以后,反射镜不仅能实现良好的曲率变化,而且集中的压应力分布被有效转移到了远离镜面区域的结构上,从而允许其实现形变过程中的面形精度保持.基于超硬铝反射镜样片的试验取得了预期的结果,在获得接近  $22\ \mu\text{m}$  中心矢高变化的前提下,135 mm 口径反射镜的面形精度依然优于  $\lambda/20$  ( $632.8\ \text{nm}$ ),由此证明了气动驱动变厚变曲率反射镜的应用潜力.

在接下来的研究中,将探索新的、更优的渐变厚度反射镜结构,在追求更大形变的同时能够进一步提升曲率变化后的面形精度,并通过变焦试验对气动驱动变厚变曲率反射镜兼顾大形变与高精度面形保持的效果进行验证.

## 参考文献

- [1] 李晓彤. 几何光学与光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1997.
- [2] BARRY J R, JAMES B H, BURLESON T. All-reflective four-element zoom telescope: design and analysis[C]. SPIE, 1990, **1354**: 669-675.
- [3] SEIDL K, RICHTER K, KNOBBE J, *et al.* Wide field-of-view all-reflective objectives designed for multispectral image acquisition in photogrammetric applications[C]. SPIE, 2011, **8172**: 817210.
- [4] SEIDL K, KNOBBE J, GRUGER H. Design of an all-reflective unobscured optical-power zooming objective [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(21): 4097-4107.
- [5] WICK D V, MARTINEZ T Y, PAYNE D M, *et al.* Active optical zoom system[C]. SPIE, 2005, **5798**: 151-157.
- [6] BAGWELL B E, WICK D V, COWAN W D, *et al.* Active zoom imaging for operationally responsive space[C]. SPIE, 2007, **6467**: 64670D.
- [7] LIN Y H, LIU Y L, SU G. Optical zoom module based on two deformable mirrors for mobile device application[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(11): 1804-1810.
- [8] ZHAO Hui, FAN Xue-wu, ZOU Gang-yi, *et al.* Prototype design of an all-reflective non-coaxial optical zooming system for space camera application without moving elements based on deformable mirror[C]. SPIE, 2012, **8557**: 855713.
- [9] BIN N E, DOTHAN D F. Mirror with adjustable radius of curvature[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1973, **44**(4): 512-513.
- [10] SCHWARZ J, RAMSEY M, HEADLEY D, *et al.* Thermal lens compensation by convex deformation of a flat mirror with variable annular force[J]. *Applied Physics*, 2006, **B82**: 275-281.
- [11] GREINER U J, KLINGENBERG H H. Thermal lens correction of a diode-pumped Nd:YAG laser of high TEM<sub>00</sub> power by an adjustable-curvature mirror[J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(16): 1207-1209.
- [12] APOLLONOV V V, VDOVIN G V, OSTROVSKAYA L M, *et al.* Active correction of a thermal lens in a solid-state laser. I. Metal mirror with a controlled curvature of the central region of the reflecting surface [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1991, **21**(1): 116-118.
- [13] 清华大学. 一种调节反射镜曲率半径的装置: 中国, CN 102684055 A[P]. 2012-09-19.
- [14] FENG Zhi-qing, BAI Lan, ZHANG Zeng-bao, *et al.* Thermal deformation compensation of high-energy laser mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1781-1787.
- [15] 冯志庆, 白兰, 张增宝, 等. 高能激光反射镜热变形补偿[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(8): 1781-1787.
- [16] 中国科学院大连化学物理研究所. 一种可变曲率反射镜装置: 中国, CN 102147524 A[P]. 2011-08-10.
- [17] ZHAO Hui, XIE Xiao-peng, WEI Jing-xuan, *et al.* Annular force based variable curvature mirror aiming to realize non-moving element optical zooming[C]. SPIE, 2015, **9678**: 967807.
- [18] XIE Xiao-peng. Study of variable curvature mirrors technology for optical zoom without macroscopic moving elements[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2015. 解晓蓬. 用于无运动部件变焦的变曲率反射镜技术研究[D]. 硕士学位论文, 内蒙古大学, 2015.
- [19] TIMOSHENKO S P, KRIEGER S W. Theory of plates and shells [M]. 2nd edition. Singapore: McGraw-Hill Book Company, 1959.
- [20] YOUNG W C, BUDYNAS R G. Roark's formulas for stress and strain[M]. 7th Edition, the United States of America: McGraw-Hill Companies, 2002: 487-488, 491-492.
- [21] LEMAITRE G R. Astronomical optics and elasticity theory [M]. Springer, 2009.