

文章编号 1004-924X(2019)07-1552-09

径向温度梯度对轻量化反射镜面形精度的影响

杨 勋*, 徐抒岩, 马宏财, 张旭升, 李晓波

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了分析径向温度梯度对轻量化反射镜面形精度的影响,以某空间相机 2 m 口径轻量化反射镜为研究对象,建立了反射镜有限元模型,分析了不同分布形式的径向温度梯度对轻量化反射镜面形 RMS 的影响程度,通过试验验证了仿真方法及结论的准确性,研究了不同轻量化结构与径向温度梯度对反射镜面形精度的耦合影响。结果表明:不同分布模式的径向温度梯度引起的面形 RMS 值最大可相差 294 倍,且径向梯度引起的面形误差无法通过优化反射镜支撑方案的方式使其减小。不同轻量化结构的反射镜面形精度对不同分布模式的径向温度梯度敏感度不同,三叶式削边和对称式削边的轻量化方式在特定径向温度场分布模式下,会对反射镜热稳定性产生极不利影响。

关键词:径向温度梯度;热变形;面形;反射镜;轻量化

中图分类号:TH751 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192707.1552

Influence of radial temperature gradient on surface figure of lightweight reflective mirror

YANG Xun*, XU Shu-yan, MA Hong-cai, ZHANG Xu-sheng, LI Xiao-bo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yangxun_ciompp@163.com

Abstract: To analyze the effects of radial temperature gradients on the surface figures of lightweight reflective mirrors, a 2-m-aperture lightweight mirror of a space camera was taken as the research object and a finite element model of the mirror was established. The effects of different radial temperature gradients and lightweight structures on the surface figure Root Mean Square (RMS) values of reflective mirrors was analyzed, and the accuracies of a simulation method and conclusions were verified through an experiment. In addition, the coupling effects of different lightweight structures and radial temperature gradients on the mirror surface figure were studied. Results show that the surface figure RMS values derived from the radial temperature gradients of different distribution modes can differ by a maximum of 294 times, and the surface shape error caused by the radial gradient is difficult to reduce when optimizing the mirror support scheme. The mirror surface figures of different lightweight structures are different for the radial temperature gradient sensitivities of different distribution modes. The lightweight methods of trefoil and symmetric chamfering are thermally stable to the mirror in a specif-

收稿日期:2019-01-15;修订日期:2019-03-01.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFE0205000);青年科学基金资助项目(No. 61705223)

ic radial temperature field distribution mode. Finally, sensitivity has an adverse effect.

Key words: radial temperature gradient; thermal distortion; reflective mirror; surface figure; light-weight

1 引 言

随着空间相机探测精度的不断提高,空间相机反射镜口径越来越大,反射镜重量也不断提高,因此空间相机反射镜的轻量化设计是大口径反射镜设计中的关键一环^[1]。为了减轻镜体质量,降低发射成本,多年来,国内外学者针对大口径反射镜轻量化设计开展了大量的研究,设计了多种结构形式的轻量化反射镜^[2-4]。

反射镜的轻量化设计多采用对比优选的方法,通过对比不同轻量化形式的轻量化率、比刚度以及热稳定性等指标,确定最优轻量化构型。张媛媛等设计了一种船型剖面、轻量化筋为三角形、加强筋为正六边形的轻量化结构,分析了重力以及均匀温升等因素引起的面形 RMS(Root Mean Square)^[5]。刘书田等以重力引起的镜面面形误差为约束,利用结构拓扑优化思想,设计了一种基于基板拓扑优化的轻量化主镜^[6]。袁建等同样以重力作用下的镜面面形 RMS 为设计约束,采用多岛遗传算法确定了反射镜轻量化参数的最优解^[7]。这些研究的重点多集中在重力作用对轻量化反射镜面形精度的影响,往往忽略了温度,特别是温度梯度对轻量化反射镜面形精度的影响程度。空间相机在轨工作期间,剧烈变化的外热流可能使得相机内部结构温度分布不均,这是空间相机在轨工作期间成像质量的主要干扰源。Pearson 等以某 2 m 口径轻量化反射镜为研究对象,分析了不同温度分布形式,包括径向温度梯度以及轴向温度梯度对主镜面形精度的影响^[8]。王富国等分析了主镜在被动支撑和自由膨胀时,恒定轴向和径向温度梯度等对主镜面形精度的影响^[9]。

以往的研究将轻量化结构形式和温度梯度对反射镜面形精度的影响分开考虑,对于两者之间的耦合作用研究较少。本文结合某空间相机的大口径轻量化主反射镜,分析了不同分布形式的径向温度梯度对轻量化反射镜面形精度的影响程度,并分析了在不同形式径向温度梯度作用下,不同轻量化结构形式的反射镜的面形精度,为大口径轻量化反

射镜的设计以及热控方案提供建议。

2 反射镜模型及面形拟合方法

2.1 反射镜有限元模型

本文以某 2 m 口径 SiC 轻量化反射镜为分析对象,轻量化孔为三角形,背部采用半封闭形式,为了提高反射镜的轻量化率,按照周向三叶形式削减镜背厚度,如图 1 所示。

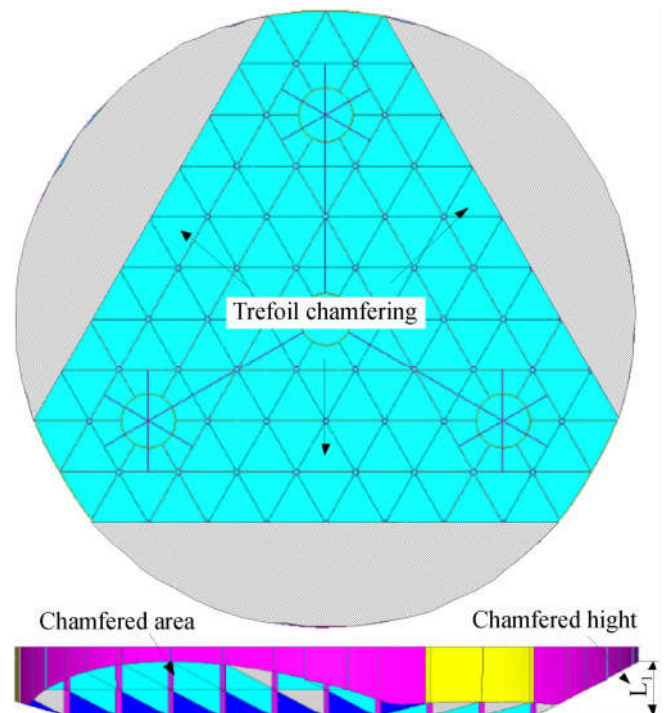


图 1 轻量化反射镜有限元模型

Fig. 1 Finite element model of SiC reflective mirror

采用板壳单元建立轻量化反射镜有限元模型,由于 SiC 的高热传导率使得反射镜表面温度与中性面的温度载荷差几乎可以忽略不计。另外采用板壳单元模拟反射镜热变形时蜂窝芯单元和面板产生的半个厚度重叠,需要对蜂窝芯单元的密度做出调整:

$$\rho^* = \rho(h_c / (t_f/2 + t_b/2 + h_c)), \quad (1)$$

式中: ρ^* 为单元等效密度; ρ 为材料密度; h_c 为蜂窝芯高度; t_f 为前面板厚度; t_b 为后面板厚度。分析前验证有限元模型网格收敛性以确定单元尺寸,当模型单元尺寸由 40 mm 减小到 20 mm 时,

仿真得到的镜面矢高、镜面曲率半径变化以及面形 RMS 值的最大相对误差小于 5%，因此确定模型单元尺寸为 20 mm。反射镜有限元模型如图 1 所示，单元数为 4.43 万，节点数为 3.99 万。模型的材料属性如表 1 所示。

表 1 SiC 反射镜材料属性

Tab. 1 Material attribute of SiC reflective mirror

弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg·m ⁻³)	热膨胀系数 /(W·(m ³ ·°C) ⁻¹)	热导率 /(K ⁻¹)
330	0.25	3 200	2.5×10 ⁻⁶	185

2.2 面形拟合方法

在工程应用中统计镜面面形精度时，通常将镜面刚体位移和曲率半径的变化去除。本文采用最小二乘法拟合镜面刚体位移，对于镜面一个给定节点 (x_i, y_i, z_i) 产生的节点刚体位移 $d\tilde{x}_i, d\tilde{y}_i$ 和 $d\tilde{z}_i$ 可以表示为：

$$\begin{aligned} d\tilde{x}_i &= T_x + z_i R_y - y_i R_z, \\ d\tilde{y}_i &= T_y - z_i R_x + x_i R_z, \\ d\tilde{z}_i &= T_z + y_i R_x - x_i R_y, \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z$ 为镜面 6 个方向的刚体位移。镜面节点的位移与节点刚体位移的偏差平方 E 可表示为：

$$E = \sum_i \omega_i [(dx_i - d\tilde{x}_i)^2 + (dy_i - d\tilde{y}_i)^2 + (dz'_i - d\tilde{z}_i)^2], \quad (3)$$

式中： ω_i 为镜面节点的面积权重系数， ω_i 的计算方法如图 2 所示，节点 i 的权重系数 ω_i 为与改节点连接的所有单元的面积和与镜面总面积之比，即在计算中考虑了网格的疏密程度不同对计算结果的影响。 dx_i, dy_i 分别为节点垂直于光轴的两个方向的位移， dz'_i 为节点的矢高位移，可表示为：

$$dz'_i = dz - \left(\frac{\partial z(r_0)}{\partial r} \right) ((dx - T_x) \cos \theta + (dy - T_y) \sin \theta). \quad (4)$$

分别对 6 个方向的刚体位移求偏导并令其等于零，得到方程组的最小二乘解即为镜面刚体位移。

镜面节点初始矢高位置可表示为：

$$S_j = S(c^0, k, r_j) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r_j^2}}, \quad (5)$$

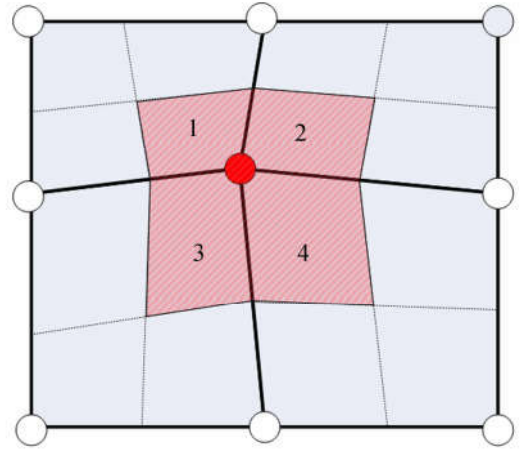


图 2 镜面节点面积加权因子

Fig. 2 Area weighted factor of node on mirror

式中： c^0 为镜面初始曲率半径； k 为二次曲面系数； r_j 为镜面节点的径向位置。变形后镜面曲率半径变化为 c^* ，球心位置为 (b_x^*, b_y^*, b_z^*) 。镜面变形后每个节点与初始节点的平方误差：

$$E = \sum_j \omega_j [S(c^0, k, r_j) + dz' - S(c^*, k, r_j^*) - b_z^*]^2. \quad (6)$$

采用基于牛顿迭代的最小二乘法求解新的曲率半径和球心位置。镜面每个节点去除刚体位移和曲率半径后的误差可表示为：

$$ds'_j = S(c^0, k, r_j) + dz' - S(c^*, k, r_j) - b_z^*. \quad (7)$$

变形后镜面矢高方向面形误差的 RMS 值为：

$$RMS = \sqrt{\sum_j \omega_j ds'^2_j}. \quad (8)$$

矢高方向面形误差的 PV 值为：

$$PV = \max(ds'_j) - \min(ds'_j). \quad (9)$$

3 径向温度梯度对反射镜面形的影响

3.1 径向温度梯度的影响

由于 SiC 材料的热传导系数较大，镜体温度分布较均匀，不易产生温度梯度，但同时 SiC 的热胀系数相对较大，即使很小的温度梯度也会引起较大的面形误差。因此，有必要考虑温度梯度对镜面面形精度的影响。径向温度梯度指沿光轴方向各个截面的温度分布相同，每个截面均是非等温面。

实际工程中，难以预测镜体产生的径向温度梯度分布形式。本文中采用 Fringe 式泽尼克多

项式来描述镜体径向温度梯度分布形式:

$$T_i(r, \theta) = K_1 + K_2(r \cos \theta) + K_3(r \sin \theta) + K_4(2r^2 - 1) + K_5(r^2 \cos 2\theta) + K_6(r^2 \sin 2\theta) + K_7((3r^2 - 2r) \cos \theta) + K_8((3r^2 - 2r) \sin \theta) + K_9(6r^4 - 6r^2 + 1), \quad (10)$$

式中: r, θ 分别表示柱坐标下镜面节点周向和径向坐标,坐标系原点为镜面顶点, Z 向为光轴方向。其中 K_1 代表镜体整体温度水平,在此不予考虑。计算 $K=1\text{ }^\circ\text{C}$ 即 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 径向温度梯度,镜面在其余 8 项温度分布模式下的热变形。

表 2 列出了不同径向梯度分布下反射镜面形的 RMS 值,其中自由释放指镜体可自由膨胀,三点约束指镜体通过三组锥套和柔节连接在安装基板上,计算时约束基板 6 个方向自由度。图 3 给

表 2 不同径向温度模式下反射镜面形

Tab. 2 Surface figure of reflective mirror under different thermal patterns with radial gradient

径向梯度模式		面形 RMS 值/nm	
		自由释放	三点约束
1	$r \cos \theta$	0.300 3	1.024
2	$r \sin \theta$	0.295 3	1.010
3	$2r^2 - 1$	285.1	297.0
4	$r^2 \cos 2\theta$	85.76	83.66
5	$r^2 \sin 2\theta$	85.79	83.56
6	$(3r^2 - 2r) \cos \theta$	156.9	164.4
7	$(3r^2 - 2r) \sin \theta$	155.6	163.3
8	$6r^4 - 6r^2 + 1$	197.5	206.7

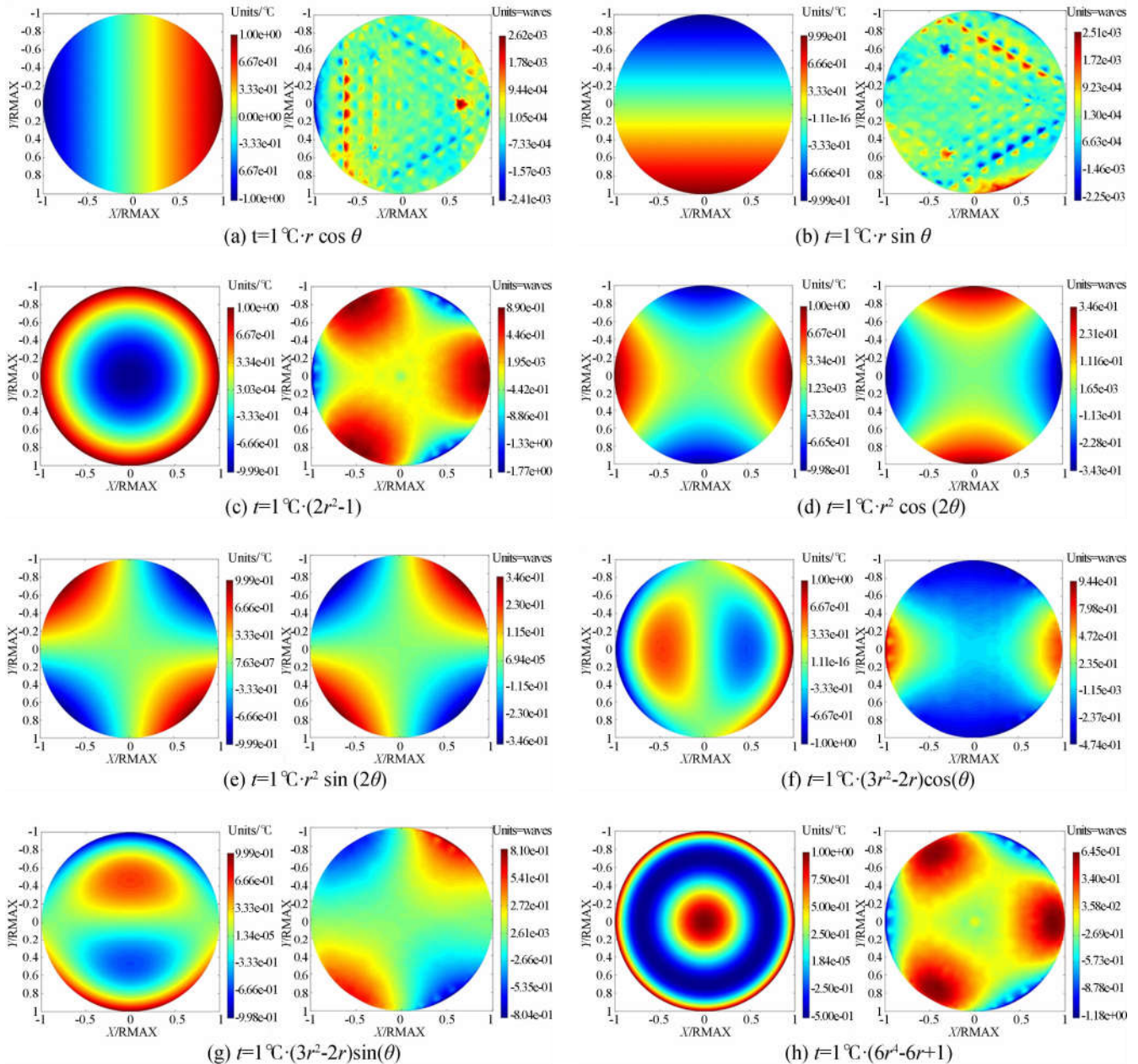


图 3 不同径向温度模式及反射镜温度分布及面形云图

Fig. 3 Thermal pattern with radial gradient and surface figure of reflective mirror

出了自由释放情况下 8 种模式的径向梯度分布形式及面形。可以看出,除第一、二分布模式外,自由释放与约束状态下,镜面面形 RMS 最大偏差仅为 4.71%,表明径向梯度引起的面形误差是由温度场和镜体结构本身决定的,受约束形式影响较小,即径向梯度引起的面形误差无法通过优化支撑方案予以消除。不同径向梯度分布形式下的面形 RMS 值相差极大,2 °C 径向梯度引起的镜面面形 RMS 最大可达到 297 nm,不同分布模式的径向温度梯度引起的面形 RMS 值最大可相差 294 倍。因此在实际工程应用中,必须要针对反射镜可能出现的温度梯度分布,特别是径向温度梯度分布予以关注。

3.2 试验验证

为了验证径向温度梯度对主镜面形的影响程度以及仿真的准确性,实施了反射镜热稳定性试验。试验对象为某 600 mm 口径 SiC 反射镜,镜体支撑形式为复合支撑,包括 A 框加切向拉杆的周边支撑和 3 组 whiffletree 组成的背部支撑,如图 4 所示。

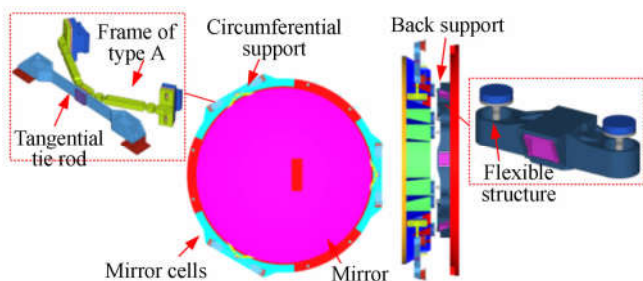
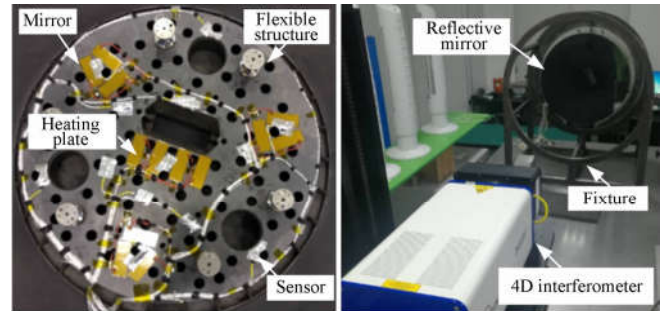


图 4 反射镜组件结构形式

Fig. 4 Structure composition of reflective mirror components

在镜体背部布置加热片及温度传感器,如图 5(a)所示。加热镜背中心的 4 片加热片,使镜体沿径向产生温度梯度,同时镜体温度水平上升并产生轴向温度梯度。首先通过仿真分析,得到镜体温度场分布,并利用传感器测得实际温度场对热分析结果进行标定,标定后镜体温度分布如图 6 所示,镜体径向最大温度梯度为 3.4 °C,温度水平较室温上升 3.5 °C。通过温度场映射,将热分析温度场映射到结构模型。试验中镜室整体安装在工装上,光轴水平放置。采用 4D 干涉仪测量 SiC 反射镜在温度水平和温度梯度作用下的面形变化,如图 5(b)所示。



(a) 镜体加热片布置 (b) 面形检测试验
(a) Heating plate arrangement (b) Face shape detection

图 5 径向温度梯度下反射镜热稳定性试验

Fig. 5 Test of surface figure of reflective mirror under thermal patterns with radial gradient

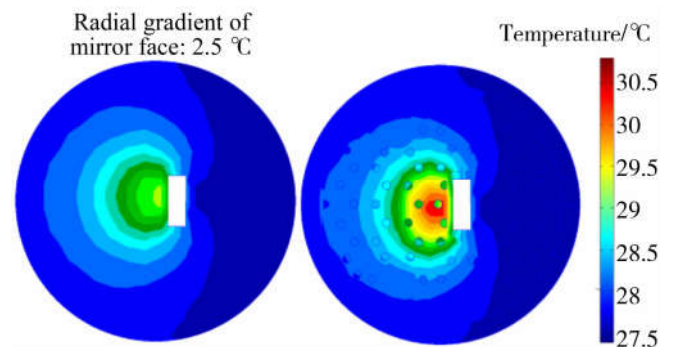
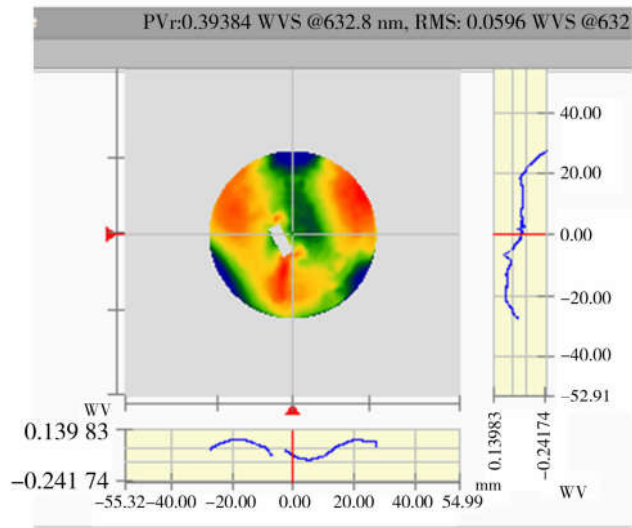


图 6 镜体温度场云图

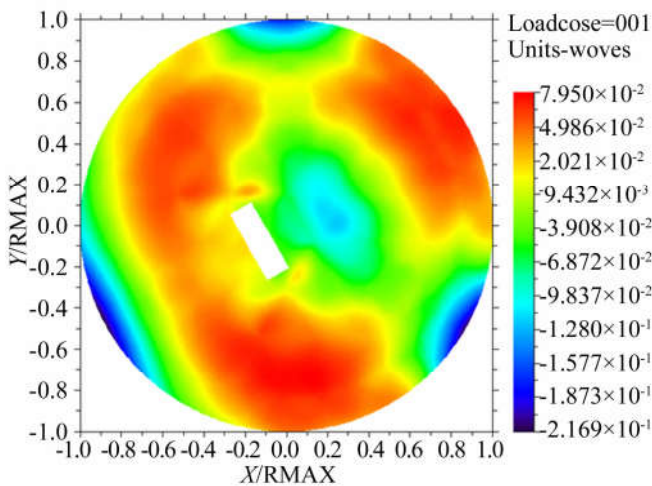
Fig. 6 Thermal pattern with radial gradient of reflective mirror

图 7 所示为试验结果和仿真结果,可以看出,试验结果和仿真结果高度吻合,镜面面形分布形式一致,试验和仿真所得的面形 RMS 值分别为 0.059 6λ 和 0.060 3λ ,相对误差小于 1.2%,证明了仿真方法和结果的准确性。

为了分析径向温度梯度、温度水平以及支撑方式对试验结果的影响程度,计算了不同工况下的反射镜镜面面形,结果如表 3 所示,其中径向温度梯度及温度水平与试验中一致。表中数据横向比对可知,径向温度梯度对镜面面形的影响程度远远大于温度水平对其的影响;表中数据纵向比对可知,与温度梯度引起的面形变化相比,支撑方式对面形的影响相对较小。通过对比可知,径向温度梯度引起的面形变化与支撑方式相关性较小,且径向温度梯度引起的面形 RMS 可能远远大于相同温度水平变化引起的面形 RMS。



(a) 试验结果 RMS=0.059 6 λ
(a) Testing result RMS=0.059 6 λ



(b) 仿真结果 RMS=0.060 3 λ
(b) Simulated result RMS=0.060 3 λ

图 7 试验、仿真结果对比

Fig. 7 Comparison between experimental result and simulated result

表 3 不同工况下反射镜面形

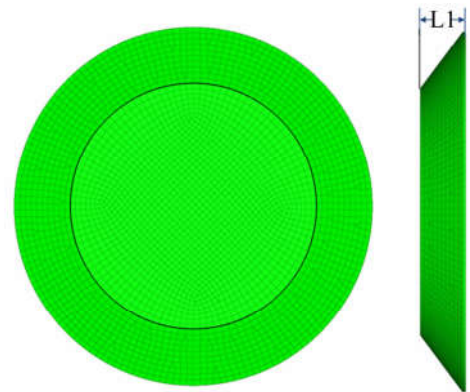
Tab. 3 Surface figure of mirror under different load case

状态	镜面面形 RMS/λ		
	径向温度梯度	温度水平	温度梯度+温度水平
自由释放	0.054 8	0.000 8	0.054 8
复合支撑	0.054 9	0.009 2	0.060 3

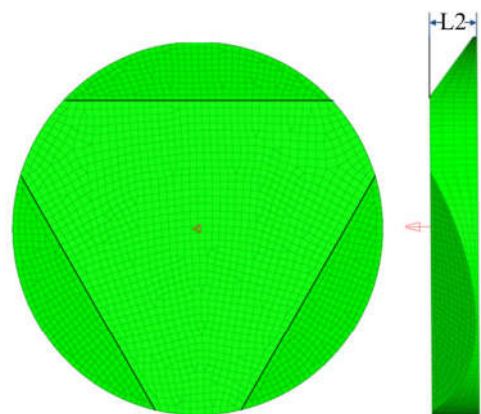
4 轻量化结构形式的影响

为了进一步分析径向温度梯度对反射镜的影响程度和规律,分别建立了 3 种不同结构形式的反射镜模型,如图 8 所示。反射镜材料为 SiC,材

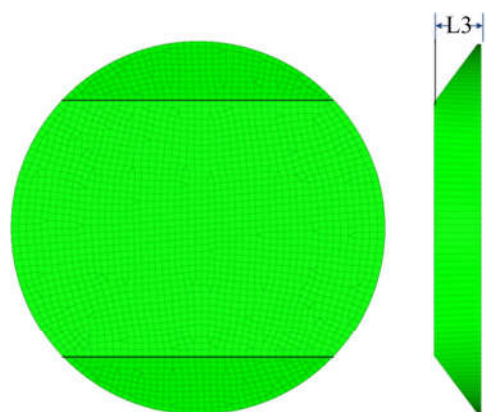
料属性如表 1 所示。反射镜口径为 2 m,镜体厚度为 260 mm,变量 L1,L2 和 L3 代表 3 种镜体削边厚度,分析中采用的 3 种削边厚度分别为 80 mm,160 mm 和 240 mm。计算径向梯度水平为 ±0.1 °C 工况下,3 种轻量化形式的镜体在式 (10) 给出的 8 种径向梯度模式下的热变形,并拟合镜面面形 RMS,结果如表 4 和图 9 所示。



(a) 周向均匀式削边方式 (L1)
(a) Uniform chamfering (L1)



(b) 三叶式削边方式 (L2)
(b) Trefoil chamfering (L2)



(c) 对称式削边方式 (L3)
(c) Symmetric chamfering (L3)

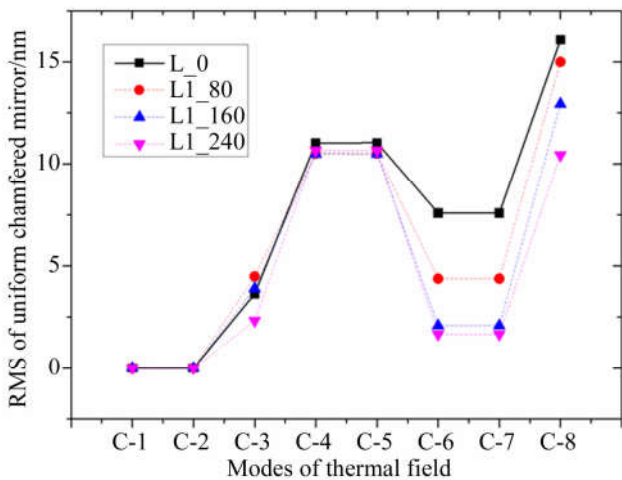
图 8 反射镜镜体不同轻量化形式

Fig. 8 Different types of lightweight reflective mirror

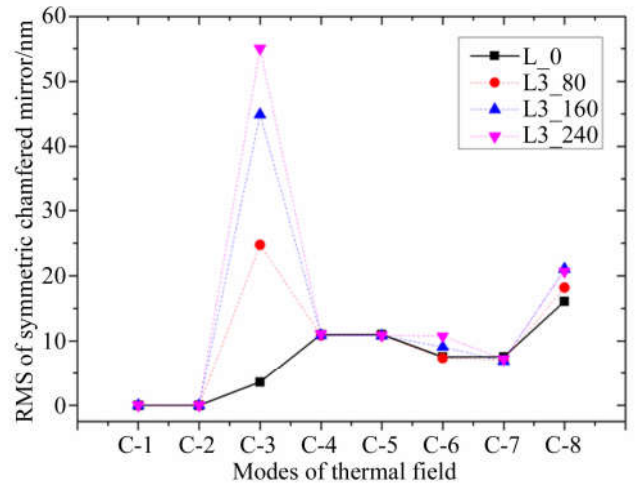
表 4 不同径向梯度模式、不同轻量化结构形式下反射镜面形 RMS

Tab. 4 Surface figure RMS of reflective mirror under different thermal patterns with radial gradient and different light-weight types

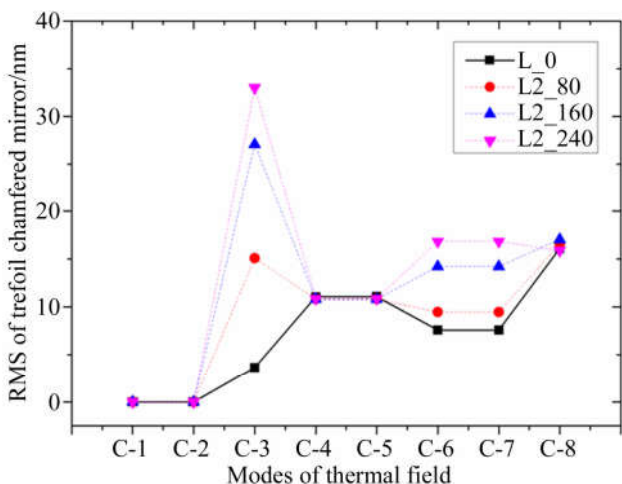
温度模式	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6	Case-7	Case-8
L_0	5.92×10^{-4}	5.83×10^{-4}	3.634	11.03	11.04	7.576	7.576	16.08
L1_80	4.23×10^{-4}	4.25×10^{-4}	4.481	10.51	10.51	4.375	4.375	15
L1_160	4.02×10^{-5}	3.99×10^{-5}	3.906	10.49	10.48	2.09	2.09	12.94
L1_240	3.92×10^{-5}	3.81×10^{-5}	2.327	10.66	10.66	1.668	1.668	10.43
L2_80	4.46×10^{-4}	5.00×10^{-4}	15.07	10.81	10.81	9.45	9.45	16.55
L2_160	4.05×10^{-5}	3.85×10^{-5}	27.07	10.77	10.77	14.21	14.20	17.03
L2_240	3.86×10^{-5}	3.73×10^{-5}	32.99	10.84	10.84	16.81	16.82	15.87
L3_80	4.07×10^{-4}	3.90×10^{-4}	24.75	10.89	10.88	7.39	7.09	18.21
L3_160	3.90×10^{-5}	3.86×10^{-5}	44.89	10.89	10.83	9.12	6.94	21.08
L3_240	4.87×10^{-5}	4.58×10^{-5}	55.05	11.07	10.88	10.76	7.23	20.69



(a) 周向均匀式削边方式
(a) Uniform chamfering



(c) 对称式削边方式
(c) Symmetric chamfering



(b) 三叶式削边方式
(b) Trefoil chamfering

图 9 不同径向温度模式、轻量化结构形式下镜面面形 RMS

Fig. 9 Surface figure RMS of reflective mirror under different thermal patterns with radial gradient and different lightweight types

表 4 中 Case-1 至 Case-8 分别代表表 2 中所示的 8 种径向温度梯度模式,可以看出,削边形式及削边厚度对面形精度影响较大,整体上周向均匀式削边方式使径向温度梯度引起的面形 RMS 有所减小,三叶式削边和对称式削边使径向温度梯度引起的面形 RMS 增大,即均匀式削边不仅提高了反射镜轻量化率,还提高了反射镜的热稳定性,

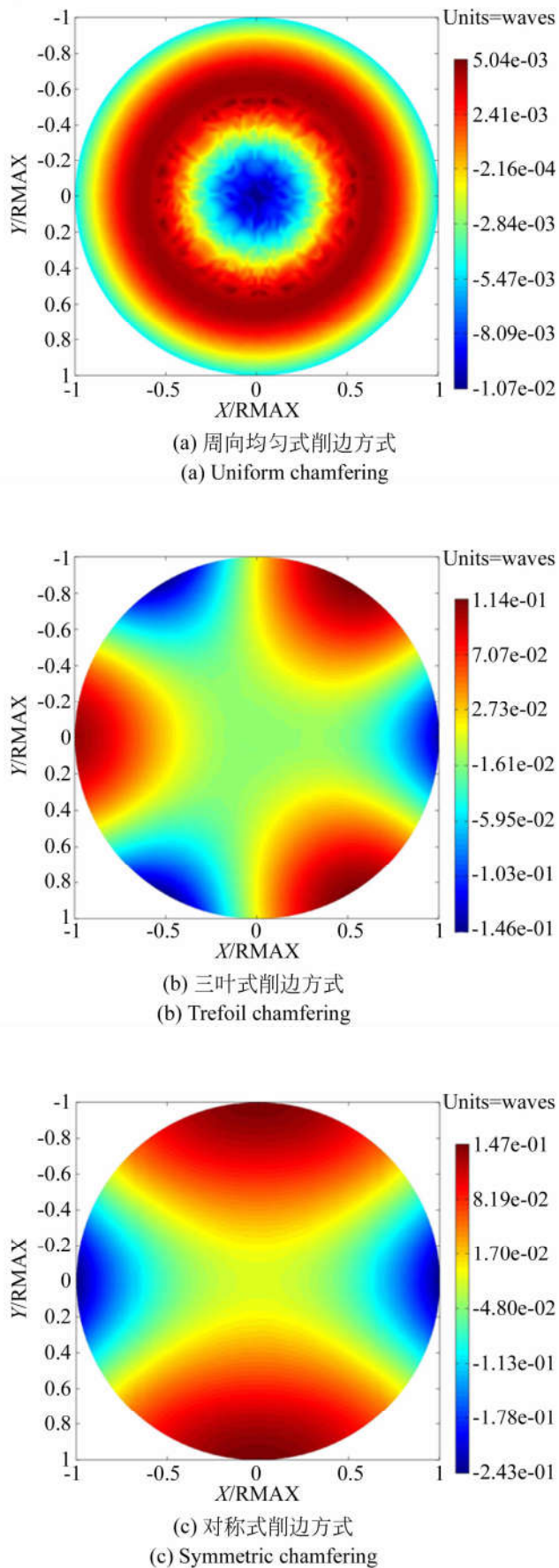


图 10 不同径向温度模式、轻量化结构形式下镜面面形

Fig. 10 Surface figure of reflective mirror under different thermal patterns with radial gradient and different lightweight types

而三叶式削边或对称式削边在提高反射镜轻量化率的同时可能会对反射镜热稳定性产生不利影响。0.2 °C 径向温度梯度、相同径向梯度分布形式下,不同轻量化结构的面形 RMS 值可相差十倍以上。

从图 9 中可以看出,不同热模式下,镜体削边量及削边形式对面形精度的影响程度不同。以第 3 种径向温度梯度模式为例,此种温度分布模式下采用对称式削边方式的削边量对面形精度的影响最大,三叶式削边方式次之,均匀式削边方式的影响最小,即在工程中采用三叶或对称式削边的轻量化形式,而镜体稳态温度分布与第 3 种温度分布类似时,随着削边量的增大,温度引起的面形 RMS 值可能增大接近十倍甚至更大。而在第 8 种热模式下,采用均匀式削边方式的削边量对面形 RMS 影响最大,对称式削边方式次之,三叶式削边方式的影响最小。这表明径向温度梯度对轻量化反射镜面形精度的影响不仅与径向梯度的分布形式有关,还与反射镜轻量化结构的构型相关。这主要是因为不同结构形式的镜体在热载荷作用下的变形模式不同,从而引起的面形也不同。图 10 所示为第 3 种热模式下,3 种不同镜体结构的面形分布,可以看出,在同一种热模式下,周向均匀式削边镜体镜面产生的主要像差为球差,三叶式削边镜体镜面产生的主要像差为一阶三叶像差,对称式削边镜体镜面产生的主要像差为一阶象散像差。在反射镜轻量化设计中,必须考虑径向温度梯度和反射镜轻量化结构形式对镜面面形精度的耦合影响。

5 结 论

本文分析了某 2 m 口径 SiC 轻量化反射镜在不同模式径向温度梯度模式下的面形,结果表明,2 °C 径向梯度引起的镜面面形 RMS 最大可达到 297 nm,不同分布模式的径向温度梯度引起的面形 RMS 值最大可相差 294 倍,且径向梯度引起的面形误差难以通过优化反射镜支撑方案的方式使其减小。实施了 SiC 反射镜热稳定性试验,验证了仿真方法和仿真结论的准确性。

分析了径向温度梯度对不同轻量化形式反射镜面形精度的影响程度及规律,结果表明,不同轻量化结构的反射镜面形精度对不同分布模式的径

向温度梯度敏感度不同,三叶式削边和对称式削边的轻量化方式在特定径向温度场分布模式下,会对反射镜热稳定性产生不利影响。在确定反射镜轻

量化结构形式时,必须要考虑径向温度梯度对反射镜热稳定性的影响,通过温度与结构影响的耦合分析,以确定合理的轻量化结构和热控方案。

参考文献:

- [1] 王富国, 乔兵, 张景旭. 2m SiC 反射镜柔性被动支撑系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2591-2598.
WANG F G, QIAO B, ZHANG J X. Flexible passive support system for 2 m SiC reflective mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2591-2598. (in Chinese)
- [2] 徐宏, 关英俊. 大口径 SiC 轻量化反射镜组件的结构设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 83-88.
XU H, GUAN Y J. Structural design of large aperture SiC mirror subassembly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 83-88. (in Chinese)
- [3] 王克军, 宣明, 董吉洪, 等. 空间遥感器反射镜组件结构设计方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 304-314.
WANG K J, XUAN M, DONG J H, *et al.*. Design method of reflector component structure of space remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 304-314. (in Chinese)
- [4] 陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 535-540.
CHEN H D, CHEN Y H, SHI T T, *et al.*. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 535-540. (in Chinese)
- [5] 张媛媛, 敬畏, 程云涛, 等. $\Phi 510\text{mm}$ SiC 超轻量化反射镜的设计与有限元分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1718-1724.
ZHANG Y Y, JING W, CHENG Y T, *et al.*. Design and finite element analysis of $\Phi 510$ mm SiC ultra-lightweight mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1718-1724. (in Chinese)
- [6] 刘书田, 胡瑞, 周平, 等. 基于筋板式基结构的大口径空间反射镜构型设计的拓扑优化方法[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1803-1810.
LIU SH T, HU R, ZHOU P, *et al.*. Topologic optimization for configuration design of web-skin-type ground structure based large-aperture space mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1803-1810. (in Chinese)
- [7] 袁健, 任建岳. 碳化硅反射镜轻量化结构的改进与优化[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 34-39.
YUAN J, REN J Y. Improvement and optimization of lightweight structure for SiC reflective mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(8): 34-39. (in Chinese)
- [8] E. Pearson, L. Stepp. Response of large optical Mirrors to thermal distributions[J]. *SPIE*, 1987, 748: 215-228.
- [9] 王富国. 温度和支撑方式对 1.2m SiC 主镜面形的影响分析[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 933-936.
WANG F G. Study on the influence of temperature and support style to the 1.2m sic primary mirror surface figure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(6): 933-936. (in Chinese)

作者简介:



杨 勋(1986—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2008年,2011年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2016年于上海交通大学获得博士学位,主要从事光机系统集成仿真与优化, E-mail: yangxun_ciomp@163.com