

文章编号 2095-1531(2015)01-0099-08

空间遥感器高体份 SiC/Al 复合材料 反射镜组件设计

齐光*, 王书新, 李景林

(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:为消除反射镜与支撑结构材料线胀系数差异产生的热变形对反射镜面形精度、系统成像质量的影响,采用高体份 SiC/Al 复合材料作为新型反射镜组件的材料。首先,通过合理的结构设计及有限元分析比较,确定了 $\Phi 600$ mm 口径反射镜结构参数,然后,对反射镜组件进行了静力学和动力学分析,在 1 g 重力载荷作用下,反射镜 X、Y、Z 方向去除刚体位移后的镜面变形 RMS 值分别为 12.6, 12.7, 12.6 nm, 达到了 $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8$ nm)。最后,为了验证高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件的结构性能及检验结构在振动条件下的抗干扰能力,对反射镜组件进行了力学试验,反射镜组件的一阶谐振频率为 556.6 Hz。力学试验前后,反射镜镜面面形误差 RMS 分别为 0.021λ 、 0.025λ , 没有明显变化。实验结果表明:高体份 SiC/Al 复合材料反射镜达到了与 SiC 材料反射镜相同的设计指标要求,能够满足空间应用。

关键词:空间遥感器;空间反射镜;高体份 SiC/Al 复合材料;有限元分析

中图分类号:V445.8; TH16 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20150801.0099

Design of high volume fraction SiC/Al composite mirror in space remote sensor

QI Guang*, WANG Shu-xin, LI Jing-lin

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

* Corresponding author, E-mail: ygw01@163.com

Abstract: The difference of linear expansion coefficient between a mirror and its support structure causes mirror thermal deformation which influences the surface accuracy of mirror and the image quality of optical system. In order to avoid above influence, the high volume fraction SiC/Al composite is chosen as the only material of a $\Phi 600$ mm mirror component. The $\Phi 600$ mm mirror structure parameters are specified by the reasonable mechanical design and finite element analysis. Using finite element analysis method, the static and dynamic characteristics of the mirror component are analyzed. Under the gravity load of 1 g, the surface figure accuracy of the high volume fraction SiC/Al composite mirror reaches RMS 12.6 nm, 12.7 nm, 12.6 nm, in X, Y, Z respective direction, nearly $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8$ nm). The mechanical dynamic test results verify the structural performance and the capability of vibration resistance. The 1st order natural frequency of the mirror component is 556.6 Hz. After the test, the surface figure accuracy changes from RMS 0.021λ to 0.025λ , not showing obvious changes. The high volume fraction SiC/Al mirror can reach the same design indexes as SiC

收稿日期:2014-10-18;修订日期:2014-12-16

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

mirror and meet the space application requirements.

Key words: space remote sensor; space mirror; high volume fraction SiC/Al composite; finite element analysis

1 引言

空间遥感器在对地观察、太空观测等领域具有重要的科学和军事意义。伴随着人们对空间遥感器大口径、宽覆盖、长焦距、高分辨率、质量轻等要求的不断提高,空间遥感器光学系统经历了从折射到反射、从共轴到离轴的发展过程^[1]。空间遥感器反射镜材料、主支撑结构材料的选择也随着空间遥感器的发展而发生变化。目前, SiC 反射镜材料, 以及 SiC/Al 反射镜支撑结构、遥感器主支撑结构在航空航天领域得到广泛应用和认可。

在轨工作环境下, 由于热控的限制, 遥感器的环境温度水平总是在一定范围内波动, 反射镜支撑结构、遥感器主支撑结构与反射镜镜体材料选用不一致, 材料线胀系数的差异将引起反射镜镜面局部的膨胀或收缩, 导致反射镜相对于理想工作状态产生一定程度的热变形, 这种热变形最终将降低反射镜的面形精度, 进而导致系统成像质量下降, 甚至无法成像^[2-3]。

SiC 材料具有优异的力学和热性能。但 SiC 属于陶瓷材料, 脆、易碎, 不能采用在镜体上直接打孔、攻丝的加工方式, 并且由于 SiC 材料烧结温度高, 也不可以采用在镜体上预埋结构件的处理方式。常用的解决办法^[4-6]是: 将与 SiC 线胀系数相匹配的钢(4J32)镶嵌件深入 SiC 镜体内部连接孔内, 用无膨胀结构胶与 SiC 镜体粘接, 钢(4J32)镶嵌件上可以打孔、攻丝, 用于连接 TC4 柔性支撑环节, 最后把 TC4 柔性支撑环节与 SiC/

Al 复合材料支撑结构连接在一起。反射镜镜体背部增加了支撑孔, 增大了反射镜镜体结构烧结、加工难度; 支撑孔内的钢(4J32)镶嵌件, 增加了反射镜组件结构复杂程度; 镜体背部支撑孔与钢(4J32)镶嵌件需用结构胶粘接, 结构胶固化时间约 30 天, 延长了加工周期、降低了反射镜组件的可靠性。

为消除线胀系数差异产生的热变形对反射镜面形精度、系统成像质量的影响, 本文采用高体份 SiC/Al 复合材料作为新型反射镜组件的材料, 无需镜体上与镶嵌件连接的支撑孔和组件中的镶嵌件, 可以缩短加工周期, 提高反射镜组件的可靠性。通过合理的结构设计、有限元分析, 确定了 $\Phi 600$ mm 口径反射镜结构参数, 并通过力学实验及光学检测验证高体份 SiC/Al 复合材料反射镜满足空间应用需求。

2 SiC/Al 材料的制备及应用

2.1 SiC 材料的制备

在国内外作为载荷主支撑结构、反射镜支撑结构的高体份 SiC/Al 复合材料已经得到应用^[7-8]。从表 1 中可以看出, 高体份 SiC/Al 复合材料在性能上仅次于铍和 SiC, 也具有高比模量、高导热、低膨胀、高尺寸稳定性等优点。而同 SiC 相比, 高体份 SiC/Al 复合材料尤为突出的一点是, 由于 Al 基体的作用, 使得材料具备金属易于加工的特点, 制作、加工手段多样化, 可以电火花线切割、电火花成形加工、磨削、铣削、预埋结构件等。

表 1 常用反射镜材料的性能

Tab. 1 Performance of rational materials for mirror

光学材料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$)	弹性模量/ Gpa	比刚度	热膨胀系数 $10^{-6}/\text{K}$	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热稳定性
铍	1.85	287.00	155.14	11.40	216.00	1 925	18.95
硅	2.33	131.00	56.22	2.60	137.00	710.00	52.69
碳化硅	3.20	400.00	125.00	2.40	155.00	650.00	64.58
高体份 SiC/Al	3.00	180.00	60.00	8.00	225.00	715.00	28.13

国内采用无压浸渗制备工艺流程,已经获得完整、致密、高质量的高体份 SiC/Al 复合材料坯锭^[9]。目前,即将具备制造平面尺寸接近 $\Phi 1\ 500\ \text{mm}$ 或 $1\ 100\ \text{mm} \times 1\ 100\ \text{mm}$ 、厚度尺寸接近 $130\ \text{mm}$ 的大型结构件的能力,使得大口径 SiC/Al 复合材料反射镜的制备成为可能。

2.2 SiC/Al 反射镜的制备

针对高体份 SiC/Al 复合材料能否作为光学级反射镜展开了相关的技术研究。加工的 $\Phi 50\ \text{mm}$ 口径高体份 SiC/Al 复合材料马蹄镜^[10]如图1所示。通过改性、抛光、镀膜检测,得到表面粗糙度小于 $5\ \text{nm}$,面形误差 RMS 值达 $1/50\lambda$ ($\lambda = 632.8\ \text{nm}$) 的马蹄镜。在 $500 \sim 600\ \text{nm}$ 范围内,其反射率在 90% 以上,在 $600 \sim 800\ \text{nm}$ 范围内,反射率在 95% 以上,能够满足光学传感器反射镜的精度要求。

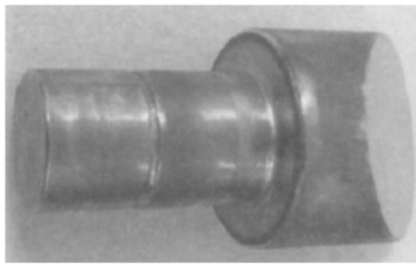


图1 马蹄镜

Fig. 1 Water chestnut mirror

3 $\Phi 600\ \text{mm}$ 口径反射镜结构设计

3.1 径厚比的确定

反射镜径厚比直接影响到反射镜的轻量化能力,径厚比的选择与材料自身的力学属性、反射镜背部支撑结构及镜体背部轻量化形式等有直接关系。对于圆柱形实体反射镜,Roberts 等人研究了反射镜径厚比 $dr(D/t)$ 与自重条件下变形的关系^[11],并总结出径厚比计算公式:

$$\delta = \frac{3\rho g a^4}{16Et^2} = \frac{3\rho g dr^2 D^2}{256E}, \quad (1)$$

式中: δ 为反射镜镜面自重条件下最大变形, ρ 为反射镜镜体材料密度, g 为重力加速度, a 为圆柱形反射镜镜面半径, $a = D/2$, E 为反射镜镜体材

料弹性模量, t 为圆柱形反射镜厚度。当反射镜符合空间应用设计指标要求,即 $0.063\ 28\ \mu\text{m}(\lambda/10, \lambda = 632.8\ \text{nm})$ 时,得出最佳的反射镜径厚比为 $6:1$ 。因此,最初设定 $\Phi 600\ \text{mm}$ 孔径反射镜镜体厚度为 $100\ \text{mm}$ 。需经过有限元分析软件 Hypermesh 计算、比较,才会得到反射镜镜体厚度的最终尺寸。

3.2 支撑形式的确定

反射镜的支撑形式通常有两种^[12]:一种是将反射镜放置于镜室或镜框中间,在镜体外边缘涂抹结构胶,将两者粘接固定在一起;另一种是在反射镜镜体背部预留出一个或多个(不少于3个)支撑孔,这些支撑孔或者与背板直接连接成组,或者通过过渡环节逐层转变成3个连接点,再与背板连接。

镜体背部支撑孔数量超出3个时,若采用镜体直接与背板连接,组件的力学性能虽然能够提高,但带来的问题是对反射镜、背板的加工工艺、加工精度提出非常高的甚至是无法达到的要求;若通过过渡环节将多个连接点逐层逐渐减小到3个,加工工艺、加工精度的要求相对降低了,但一层的过渡连接结构降低了反射镜组件的动态刚度。本文采用直接背部支撑的方式,并尽量减少镜体背部支撑孔的数量。

3.3 支撑孔数量的确定

在复杂、苛刻的力学及热环境条件下,应采用尽可能少的支撑定位点数量来达到反射镜镜面变形量最小的设计要求。最优的反射镜镜体支撑设计方案是镜体背部3点支撑定位。Hall 提供了圆柱形实体反射镜最少支撑点数量 N 的计算公式^[13]:

$$N = \frac{1.5r^2}{t} \sqrt{\frac{\rho g}{E\delta}}, \quad (2)$$

式中: r 为圆柱形反射镜镜面半径, t 为圆柱形反射镜镜体厚度, ρ 为反射镜镜体材料密度, g 为重力加速度, E 为反射镜镜体材料弹性模量, δ 为反射镜镜面自重条件下最大变形。反射镜满足重力变形小于 $0.063\ 28\ \mu\text{m}(\lambda/10, \lambda = 632.8\ \text{nm})$ 时由此公式计算所得 $N = 2.25$,实际应用时,反射镜应取3点支撑方案,支撑点位置的选取尽量靠近轻量化设计后的反射镜质心所在圆环均匀排布。最

终确定的支撑点位置为 $\Phi 400$ mm 圆周 3 点均匀分布,见图 2。

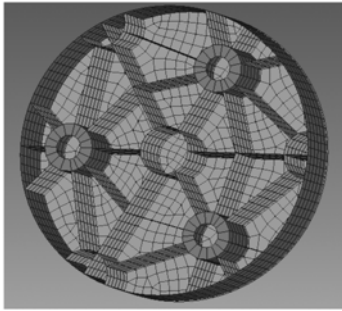


图 2 反射镜有限元模型
Fig. 2 FEM model of the mirror

4 反射镜有限元分析

4.1 反射镜镜体厚度分析

选取 8 种不同的镜体厚度,尺寸从 100 mm 开始,以 10 mm 公差递增到 170 mm。对每一镜体厚度的反射镜,改变反射镜面板厚度,调整范围从 3.0 mm 开始,以 0.5 mm 的公差递增到 6.5 mm。利用有限元分析软件 Hypermesh 建造模型,并分析计算,得到不同反射镜镜体厚度、不

同镜面板厚度的高体份 SiC/Al 复合材料反射镜重力载荷作用下自重变形 PV 值。面形分析统计结果如表 2。

曲线拟合表 2 中的有限元分析结果,得到重力载荷作用下不同镜体厚度尺寸、不同反射镜面板厚度尺寸的高体份 SiC/Al 复合材料自重条件下反射镜镜面变形变化趋势图,如图 3。

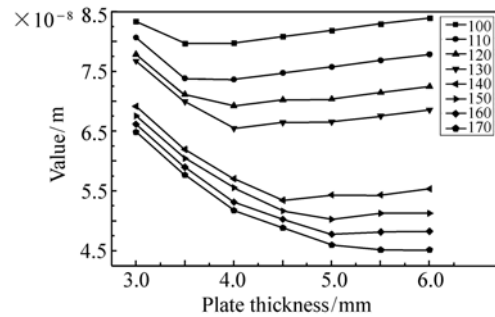


图 3 不同镜体厚度、面板厚度的反射镜镜面面形变化曲线

Fig. 3 Curves of mirror deformation with different mirror thickness and plate thickness

反射镜的镜体厚度尺寸调整 10 mm,反射镜质量伴随改变 2.1 kg;反射镜面板厚度调整 0.5 mm,反射镜质量伴随改变 0.42 kg。

表 2 不同反射镜厚度、面板厚度面形分析统计

Tab. 1 Mirror surface figure of different plate and mirror thickness

(Unit: nm)

面板厚度/mm	反射镜厚度/mm							
	100	110	120	130	140	150	160	170
3.0	8.34	8.07	7.79	7.68	6.92	6.76	6.62	6.49
3.5	7.97	7.39	7.12	7.00	6.2	6.05	5.90	5.77
4.0	7.98	7.37	6.93	6.55	5.71	5.56	5.32	5.18
4.5	8.09	7.48	7.03	6.65	5.35	5.17	5.03	4.89
5.0	8.19	7.58	7.04	6.66	5.437	5.03	4.78	4.60
5.5	8.30	7.69	7.15	6.76	5.437	5.13	4.82	4.52
6.0	8.40	7.79	7.25	6.86	5.54	5.13	4.83	4.52
6.5	-	-	-	-	-	-	-	4.63

从图表中可以得出以下结论:

(1)对于同一面板厚度的反射镜而言,随着反射镜镜体厚度的增加,重力载荷作用下的镜面变形 PV 值在逐渐变小;但考虑到镜体厚度增加时反射镜质量的增加,镜体厚度不可能无限的

增大。

(2)对于同一镜体厚度的反射镜而言,随着反射镜面板厚度的增加,重力载荷作用下的镜面变形 PV 值经历了先减小再增大的过程。

确定反射镜镜体结构参数,既要考虑重力载

荷作用下的镜面变形 PV 值,又要兼顾反射镜质量。本文选取面板厚度 4.5 mm,镜体厚度 140 mm 的方案进行筋板厚度的确定。

4.2 反射镜筋板厚度分析

反射镜筋板厚度从 2 mm 开始,以 0.5 mm 的公差递增到 7.5 mm。建立有限元模型,计算不同厚度筋板重力载荷作用下的面形 PV 值,得到的结果如表 3。

表 3 不同筋板厚度面形分析统计

Tab. 3 Mirror surface figure of different rib thickness

筋板厚度/mm	面形 PV 值/ 10^{-8} m
2	5.664
2.5	5.439
3	5.432
3.5	5.437
4	5.432
4.5	5.339
5	5.432
5.5	5.435
6	5.538
6.5	5.536
7	5.540
7.5	5.645

筋板厚度增加 0.5 mm 质量增加 0.86 kg。从图 4 表 3 中可以得出以下结论:随着反射镜筋板厚度的增加,重力载荷作用下的镜面变形 PV 值经历了先减小再增大的过程;在筋板厚度为

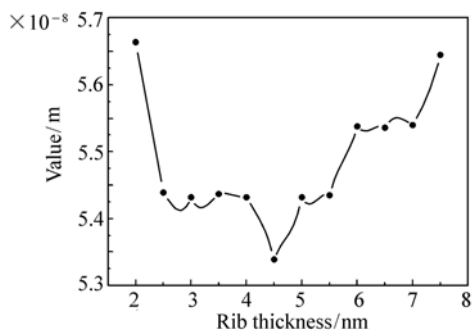


图 4 镜面面形随不同筋板厚度的变化曲线

Fig. 4 Curve of mirror deformation with different rib thickness

4.5 mm 时重力载荷作用下的镜面变形 PV 值最小,为最佳方案。

4.3 静力学分析

定义反射镜背部连接面结点六自由度全约束,光轴分别沿水平(X向)、垂直(Y向)、竖直(Z向)方向放置,施加 1 g 重力载荷。反射镜 X、Y、Z 方向去除刚体位移后的镜面变形图 5、6、7,变形

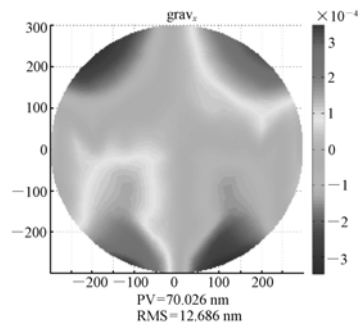


图 5 X 方向镜面变形图

Fig. 5 Deformation of mirror in X direction

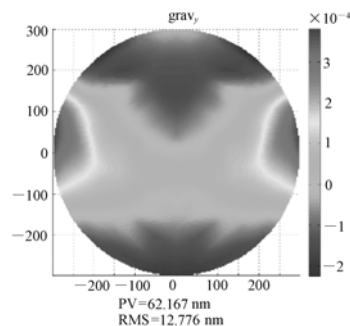


图 6 Y 方向镜面变形图

Fig. 6 Deformation of mirror in Y direction

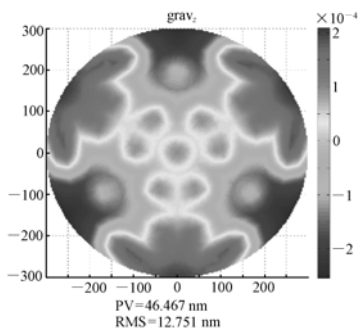


图 7 Z 方向镜面变形图

Fig. 7 Deformation of mirror in Z direction

量 RMS 值分别为 12.6, 12.7, 12.6 nm, 达到 $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 能够满足光学遥感器反射镜的设计指标要求。

4.4 反射镜组件力学分析

设计反射镜柔性支撑环节、反射镜背部支撑结构, 并建造反射镜组件有限元模型(图 8)。为消除不同材料的线胀系数差异产生的热变形对反射镜面形精度、系统成像质量的影响, 组件材料均选取高体份 SiC/Al 复合材料。

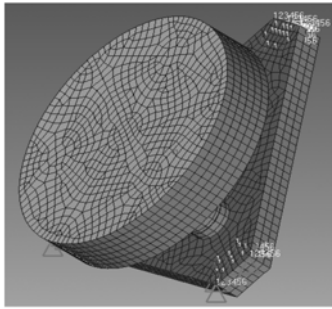


图 8 反射镜组件有限元模型

Fig. 8 FEM model of mirror component

定义反射镜背部支撑机构连接面结点六自由度全约束, 施加 1 g 重力载荷; 进行反射镜组件在约束状态下的模态分析, 考查反射镜组件的动态刚度。

高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件 Z 方向 1 g 重力载荷作用下, 变形量 RMS 值为 11.777 nm (如图 9)。

反射镜组件前 3 阶模态及振型如表 4 所示。

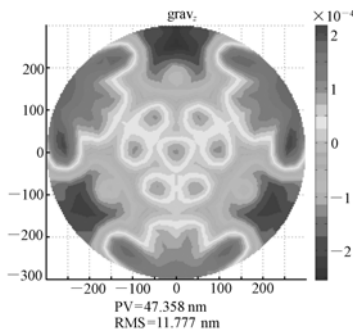


图 9 反射镜组件 Z 方向镜面变形图

Fig. 9 Deformation of mirror component in Z direction

表 4 反射镜组件前 3 阶模态

Tab. 4 First 3-order modes of mirror component

阶次	频率/Hz	振型
1	591	反射镜沿着 x 轴摆动
2	662	反射镜绕着 x 轴转动
3	666	反射镜绕着 y 轴转动

从模态分析结果可见, 反射镜组件一阶固有频率为 591 Hz, 远远高于运载工具和整机一阶固有频率, 在发射运载阶段的动力学环境中不会发生共振, 结构动态刚度足够高。

5 检验及试验验证

为了验证高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件(图 10)的结构性能, 检验结构在振动条件下的抗干扰能力, 对本反射镜组件进行了 0.2 g 正弦扫频试验、正弦振动试验。通过 0.2 g 正弦扫频

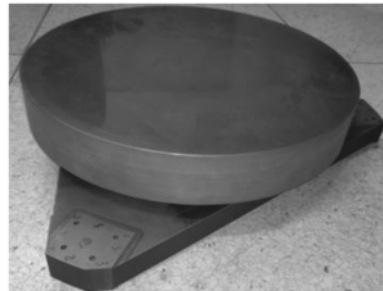


图 10 高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件

Fig. 10 High volume fraction SiC/Al mirror component

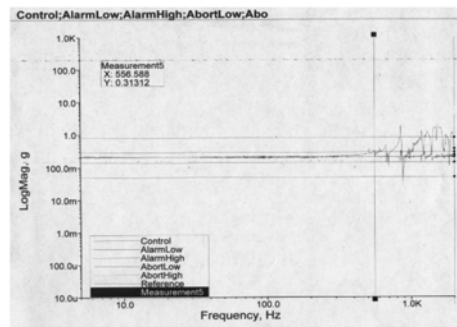


图 11 反射镜组件加速度响应曲线

Fig. 11 Response curves of acceleration of mirror component

试验可以测试 0 ~ 2 000 Hz 频段范围内的所有结构频率特性,通过正弦振动试验可以测反射镜组件的最大加速度响应。图 11 为反射镜组件 0.2 g 特征试验曲线,组件在 556.6 Hz 时发生共振响应,说明反射镜组件的一阶谐振频率为 556.6 Hz。



图 12 反射镜组件振动前镜面检测

Fig. 12 Surface figure test of mirror component before vibration



图 13 反射镜组件振动后镜面检测

Fig. 13 Surface figure test of mirror component after vibration

在正弦振动试验前后利用 ZYGO 干涉仪对反射镜面形精度进行光学检测。振动前面形检测结果(图 12)为:PV 值 0.564λ 、RMS 值 0.021λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$);振动后面形检测结果(图 13)为:PV 值 0.519λ 、RMS 值 0.025λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),无明显变化。

6 结 论

本文在光学传感器反射镜选材上做出了新的尝试,选择高体份 SiC/Al 复合材料,以期降低反射镜与其支撑结构、载荷主支撑结构之间存在的线胀系数差异而引起的反射镜热变形。通过合理的结构设计、有限元分析弥补材料高体份 SiC/Al 复合材料在结构性能上相对于 SiC 材料的不足,以达到与 SiC 材料反射镜相同的设计指标要求。通过计算、分析、比较,确定了高体份 SiC/Al 复合材料 $\Phi 600 \text{ mm}$ 口径反射镜的结构参数。有限元分析结果表明:反射镜在 1 g 重力载荷作用下,反射镜 X、Y、Z 方向去除刚体位移后的镜面变形 RMS 值分别为 12.6, 12.7, 12.6 nm, 达到 $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),组件一阶固有频率为 591 Hz。并对分析结果进行了光学检验及 0.2 g 正弦扫频试验、正弦振动试验验证。反射镜组件的一阶谐振频率为 556.6 Hz, 远远高于运载工具和整机一阶固有频率,结构动态刚度足够高;振动试验前后,反射镜镜面面形误差 RMS 分别为 0.020λ 、 0.025λ ,变化不明显。

实验结果验证了有限元分析的准确性,表明高体份 SiC/Al 复合材料反射镜能够达到与 SiC 材料反射镜相同的设计指标要求,满足光学传感器反射镜的设计指标要求及空间应用的要求。

参考文献:

- [1] 宋岩峰,邵晓鹏,徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 706-709.
SONG Y F, SHAO X P, XU J. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 706 ~ 709. (in Chinese)
- [2] 徐宏,关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1488-1495.
XU H, GUAN Y J. Structural design of 1m diameter space mirror component of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1488-1495. (in Chinese)
- [3] 辛宏伟,杨近松,高明辉,等. 高分辨力空间传感器次镜支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1725-1731.
XIN H W, YANG J S, GAO M H, et al. Support design for secondary mirror of high resolution space telescope[J]. *Infra-*

- red and Laser Engineering,2011,40(9):1725-1731. (in Chinese)
- [4] KANEDA H, ONAKA T, KAWADA M, *et al.*. Cryogenic optical testing of sandwich-type silicon carbide mirrors[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(4): 708-714.
- [5] 李志来, 徐宏. 长条形空间反射镜及其支撑结构设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1039-1047.
LI ZH L, XU H. Design of rectangular space mirror and its support structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1039-1047. (in Chinese)
- [6] 关英俊, 辛宏伟. 长条形空间反射镜轻量化及其支撑结构设计[J]. 激光与红外, 2010, 40(11): 1245-1249.
GUAN Y J, XIN H W. Lightweight and support design for rectangular space mirror[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(11): 1245-1249. (in Chinese)
- [7] 王永宪, 李景林, 许艳军, 等. 高体份 SiC/Al 复合材料在星载遥感器中应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1299-1304.
WANG Y X, LI J L, XU Y J, *et al.*. Application of high volume fraction SiC/Al composite material in satellite remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 40(7): 1299-1304. (in Chinese)
- [8] 程志峰, 张葆, 崔岩, 等. 高体份 SiC/Al 复合材料在无人机载光电稳定平台中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2820-2827.
CHENG ZH F, ZHANG B, CUI Y, *et al.*. Application of high volume fraction SiC/Al composites to unmanned airborne photoelectric platforms[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2820-2827. (in Chinese)
- [9] 崔岩, 李丽富, 李景林, 等. 制备空间光机结构件的高体份 SiC/Al 复合材料[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1175-1180.
CUI Y, LI L F, LI J L, *et al.*. High volume fraction SiC/Al composites for space_based optomechanical structures[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1175-1180. (in Chinese)
- [10] 高明辉, 张军, 李景林, 等. 高体份 SiC/Al 反射镜在空间光学应用可行性的分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1803-1807.
GAO M H, ZHAN J, LI J L, *et al.*. Feasibility analysis of high volume fraction SiC/Al mirror application in space optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1803-1807. (in Chinese)
- [11] YODER P R. *Opto-Mechanical System Design*[M]. New York: Cooperate Marcel Dekker Inc, 1993.
- [12] 辛宏伟, 关英俊, 李景林, 等. 大孔径长条反射镜支撑结构的设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 19(7): 1560-1568.
XIN H W, GUAN Y J, LI J L, *et al.*. Design of support for large aperture rectangular mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1560-1568. (in Chinese)
- [13] FIREDMAN E. *Photonics Rules of Thumb*[M]. New York: McGraw Hill, 2003.

作者简介:



齐光(1981—),男,吉林白城人,硕士研究生,助理研究员,2005年于天津大学获得学士学位,主要从事空间光学仪器光机结构设计方面的研究。E-mail: ygw01@163.com



李景林(1963—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,1987年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间相机光机结构方面的研究。E-mail: aq0183@126.com



王书新(1981—),男,吉林白城人,博士,助理研究员,2004年、2006年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学仪器光机结构设计方面的研究。E-mail: surrey@139.com