

文章编号: 1003-501X(2010)06-0108-05

# 大口径 SiC 反射镜组件研制技术

闫 勇, 王 栋, 金 光

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 目前大口径 SiC 反射镜组件的研制是当前轻小型化相机研制中亟待解决的关键技术之一。针对该类反射镜的研制特点, 本文以某轻型相机大口径 SiC 反射镜组件的工程研制为例, 从方案设计、力学样机设计与分析及地面试验三方面, 系统地阐述了大口径 SiC 反射镜组件进行合理、高效、高可靠性设计的主要研制技术路线。有关试验结果表明, SiC 反射镜组件一阶频率保持在 340 Hz 左右, 与有限元分析结果相差约 8.5%; 振动试验前后反射镜面形 RMS 相差为  $0.009\lambda$ , 该结构满足使用要求。该反射镜组件研制技术路线完全适用于其它大口径反射镜组件的工程研制, 并可有效提高结构的稳定性, 缩短研制周期。

**关键词:** 大口径; SiC 反射镜; 轻型相机

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.06.019

## Design and Fabrication Technology of Large Aperture SiC Mirror Assembly

YAN Yong, WANG Dong, JIN Guang

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

**Abstract:** Now the design and fabrication technology of large aperture SiC mirror assembly is the key point during the process of lightweight of the camera. The design process of a large aperture SiC mirror assembly is shown, which is the key structure of a lightweight camera, and a main flowchart of design techniques of a highly reliable, efficient and reasonable large aperture mirror assembly is given from the aspects of the principle prototype design, dynamic prototype design and ground test. Experimental results indicate that the 1st natural frequency of the SiC mirror assembly is 340Hz. There is 8.5% difference between the Finite Element Analysis (FEM) analysis results and the experimental results. At the same time, the difference of the mirror synthesis face figure error RMS was  $0.009\lambda$  before and after the vibration experiment. All the experimental results show that the SiC mirror assembly satisfies the requirements of lightweight camera very well. Moreover, the design technology flowchart of the SiC mirror assembly is adaptive to the other large aperture mirror assembly design process. The result shows that it is a good method to improve the reliability of the large aperture mirror assembly and shorten the development periods.

**Key words:** large aperture; SiC mirror; lightweight camera

## 0 引言

大口径 SiC 反射镜组件的研制一直以来都是轻小型相机研制中亟待解决的关键技术之一, 其性能的优劣与相机的成像质量密切相关, 合理、高效的完成大口径 SiC 反射镜组件的工程研制是保证相机研制任务顺利完成的重要保障, 也是工程技术人员奋斗的方向。

本文以某型相机大口径 SiC 反射镜组件的工程研制为例, 从方案设计、力学样机设计与分析及地面试

收稿日期: 2010-03-02; 收到修改稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家 863 高技术研究发展技术资助项目(2007AA12Z113)

作者简介: 闫勇(1981-), 男(汉族), 山西离石人。助理研究员, 博士, 主要研究空间光学仪器一体化设计及分析。E-mail: cclyy911@163.com。

验三方面阐述了大口径 SiC 反射镜组件进行合理、高效、高可靠性设计的主要研制技术路线。

1 原理样机方案设计

在该大口径 SiC 反射镜组件的研制过程中主要遵循如下原则:

- 1) 优良的结构刚度和强度, 保证发射力学环境及光学设计要求;
- 2) 高的热稳定性, 满足相机热环境适应性;
- 3) 高轻量化率, 极大的减轻反射镜组件重量。

从镜体材料的综合性能、技术成熟度、经济合理性等因素考虑, 选用凝胶注模 RB-SiC 作为镜体材料。凝胶注模成型工艺易于制造形状复杂的镜体结构, 利于镜体的轻量化设计, 该大口径 SiC 反射镜优先采用了底部局部开口的三角形轻量化形式, 且为最大限度的减轻 SiC 反射镜的重量, 镜体采用了双弧线型结构, 在保证反射镜整体刚度不变的同时使轻量化率进一步提高, 该反射镜轻量化结构如图 1 所示。

为改善反射镜组件的热稳定性, 镜体镶嵌件选用了与 RB-SiC 热胀系数匹配的钢钢(4J36), 柔性支撑选用了性能稳定的钛合金(TC4), 镜组基板选用了新型高比刚度、高热导率、低线胀系数的高体分 SiC/Al 复合材料, 较同等刚度钛合金件相比, 该反射镜组件减重达 40%以上。本方案中, 各种材料的性能参数如表 1 所示。

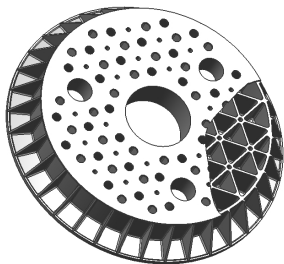


图 1 RB-SiC 反射镜轻量化结构

Fig.1 Lightweight structure of RB-SiC mirror

表 1 反射镜组件材料属性

Table 1 Material properties of the mirror assembly

| Materials | Density $\rho$<br>$/(10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-3})$ | Young's modulus<br>$E/\text{GPa}$ | Poisson's<br>ratio $\nu$ | Thermal expansion<br>$\alpha/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ |
|-----------|--|-----------------------------------|--------------------------|--|
| RB-SiC    | 3.05   | 400                               | 0.18                     | 2.5  |
| 4J36      | 8.10   | 141                               | 0.25                     | 2.5  |
| SiC/Al    | 2.94   | 180                               | 0.20                     | 8.1  |
| TC4       | 4.40   | 114                               | 0.29                     | 8.9  |

由于反射镜组件的结构参数较多, 在反射镜组件结构设计过程中, 轻量化率、刚度和热稳定性这三个主要性能指标之间通常是互相矛盾的: 提高轻量化率势必会削弱镜体的静、动态刚度, 使得镜面的自重变形增大; 同样, 高的静态刚度也并非意味着镜体同时具有较高的热稳定性。为了较好的做到这三者的平衡, 在反射镜结构设计过程中施以热优化手段, 即在保证一定的轻量化率和较小的自重变形的前提下, 以减小反射镜体的热变形为准则对某些结构尺寸参数进行二次优化设计, 从而达到提高热稳定性的目的。

为确保本方案中柔性支撑的热稳定性, 在具体方案设计中分别对柔性部位的各个参数与镜体热稳定性的影响规律作了初步的分析研究, 并在此基础上利用有限元法对该 SiC 反射镜组件进行了系统的结构-热优化设计, 图 2 所示为该大口径 SiC 反射镜组件, 图 3 所示为该反射镜组件设计优化流程图。

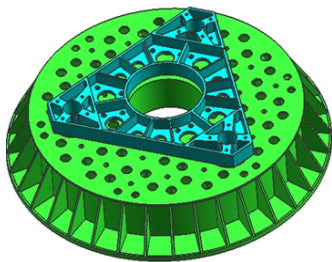


图 2 RB-SiC 反射镜组件

Fig.2 Structure of the RB-SiC mirror assembly

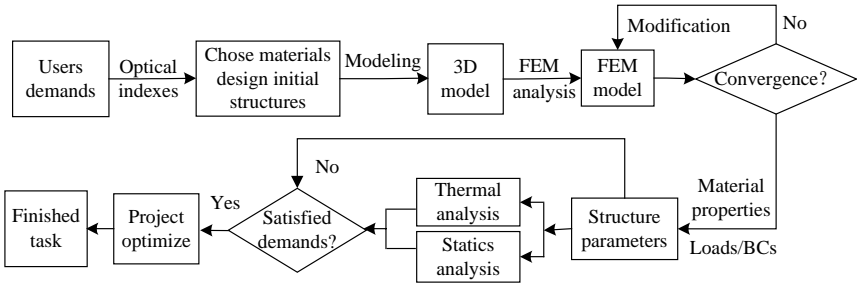


图 3 反射镜组件设计优化流程图

Fig.3 Flowchart of mirror assembly optimum design

2 力学样机设计与分析

在大口径反射镜组件的研制过程中,研究反射镜组件的动态特性,确保结构的高可靠性,尤其是光学元件的安全,是研制的首要任务。

考虑该大口径反射镜支撑结构的特点、结构件研制周期及研制费用等因素,该反射镜组件力学样机的设计与分析主要原则如下:

- 1) 样机的柔性支撑结构选用 TC4 材料,结构及尺寸精度与原理样机完全相同;
- 2) RB-SiC 反射镜由金属件代替,外形尺寸与接口方式与原理样机相同,并保证其质心与 RB-SiC 反射镜的质心一致;
- 3) 反射镜组件其余结构采用 2A12 材料,外形尺寸与接口方式与原理样机保持一致;
- 4) 样机整体尺寸、质量、接口与原理样机一致;
- 5) 样机有限元模型的质量、质心位置、质量分布尽量与实际结构等效;
- 6) 关键件的力传递路径上网格划分较密,以准确反映结构件受力情况,确保刚度等效;
- 7) 有限元分析所用的边界条件、载荷大小和作用位置尽量与试验、实际工作状态所用的支撑方式和激励形式保持一致。

图 4 所示为该 RB-SiC 反射镜组件原理样机及力学样机 FEM 模型。固有频率  $F_n$  和振型是评价结构动态刚度的重要指标,且固有频率是结构固有品质,与外界载荷无关,在反射镜组件的研制中主要关心的是前三阶固有频率及相应振型,表 2 列出了运用 MSC.Nastran 进行有限元模态分析所得的 RB-SiC 反射镜组件力学样机的固有频率及前三阶模态振型。

通过有限元分析,可初步确定反射镜组件的柔性支撑结构满足刚度设计要求,并可指导随后进行的试验模态分析中测试点的选择,在与试验模态分析数据比对、互检的基础上,可进一步对反射镜组件原理样机的分析边界条件及动态特性进行合理的修改及试验摸底和调试工作。

3 地面试验

轻小型相机发射环境恶劣,在设计初期的地面力学摸底试验是检验反射镜组件动力学响应特性及结构件能否适应恶劣发射条件的一个重要手段。在该反射镜组件的研制过程中,出于对光学元件的保护、研制周期及成本的考虑,在反射镜组件原理样机进行地面试验前,先充分利用力学样机进行了有关原理性力学摸底试验,图 5 所示为地面力学样机在 X、Y 和 Z 三个方向的振动试验图。

在对力学样机进行相关摸底试验的基础上通过对试验模态数据与有限元分析数据的比对后,对反射镜组件力学样机的有限元模型和边界条件进行了修正,以此指导 RB-SiC 反射镜组件的设计、FEM 建模及分析工作,表 3 所示为对 RB-SiC 反射镜组件 FEM 模型

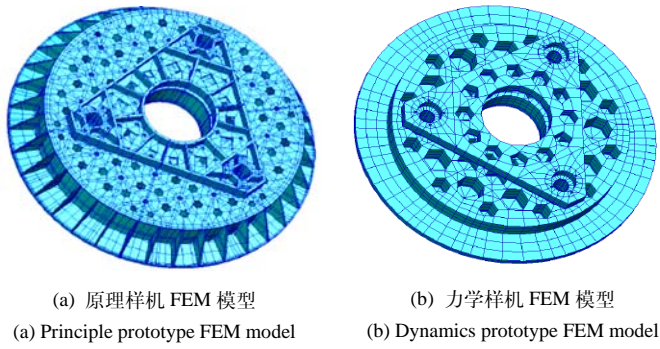


图 4 原理样机及力学样机 FEM 模型

Fig.4 Principle and dynamics prototype FEM models

表 2 力学样机前三阶频率及振型

| Table 2 Natural frequency and vibration modes of dynamic prototype |           |                     |                                |
|--|-----------|---------------------|--------------------------------|
| Ranks  | $F_n$ /Hz | Vibrations          | Remarks                        |
| 1  | 265       | Deflexion of X axis | Connection surfaces restricted |
| 2  | 272       | Deflexion of Y axis |                                |
| 3  | 386.4     | Deflexion of Z axis |                                |

表 3 原理样机前三阶频率及振型

| Table 3 Natural frequency and vibration modes of principle prototype |           |                     |                                |
|--|-----------|---------------------|--------------------------------|
| Ranks  | $F_n$ /Hz | Vibrations          | Remarks                        |
| 1  | 312.3     | Deflexion of X axis | Connection surfaces restricted |
| 2  | 312.4     | Deflexion of Y axis |                                |
| 3  | 370.98    | Deflexion of Z axis |                                |

进行修正后的固有频率及前三阶模态振型, 该反射镜组件原理样机 FEM 模型与其力学样机 FEM 模型各部件间的连接关系和边界条件保持一致。

RB-SiC 反射镜组件原理样机随后分别进行了 X、Y 和 Z 向 5 g 的正弦振动及 5.7 g 的随机振动试验, 振动前后反射镜组件的一阶频率保持在 340 Hz 左右, 与有限元分析结果相差约 8.5%, 充分说明分析模型处理得当, 边界清楚, 为后续的相机振动试验积累了工程分析和试验经验。图 6 所示为 RB-SiC 反射镜组件原理样机 FEM 模型经模型修正后前三阶振型。

在 RB-SiC 反射镜组件研制过程中为检验支撑性能的优劣, 在反射镜面形达  $0.1\lambda$  时对振动前后的镜面面形利用 Zygo 干涉仪进行了检测, 检测结果如图 7 所示。由检测结果可知, 振动前后反射镜镜面面形 RMS 相差为  $0.009\lambda$ , 说明反射镜面形振动前后稳定可靠无变化, 原理样机力学性能可靠, 可满足研制任务需要。

在 RB-SiC 反射镜组件研制阶段, 为充分提高设计的可靠性, 保证光学件的安全, 加快研制进度, 利用并行设计的方式同时对原理样机与力学样机进行了工程研制, 取得了良好的效果。图 8 所示为反射镜组件研制技术流程图。

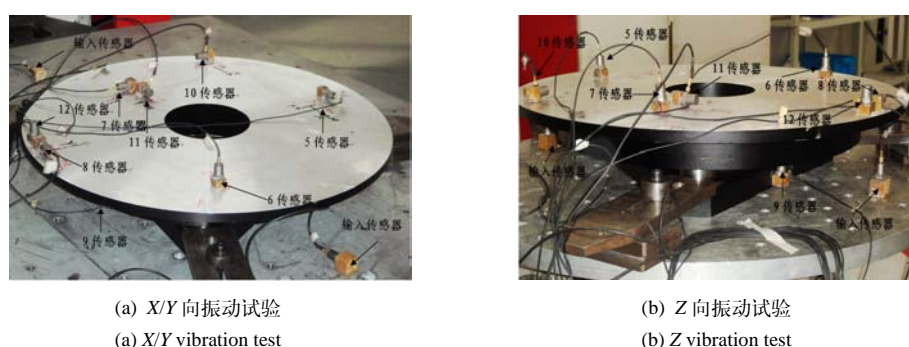


图 5 力学样机地面试验

Fig.5 Ground test of dynamic prototype

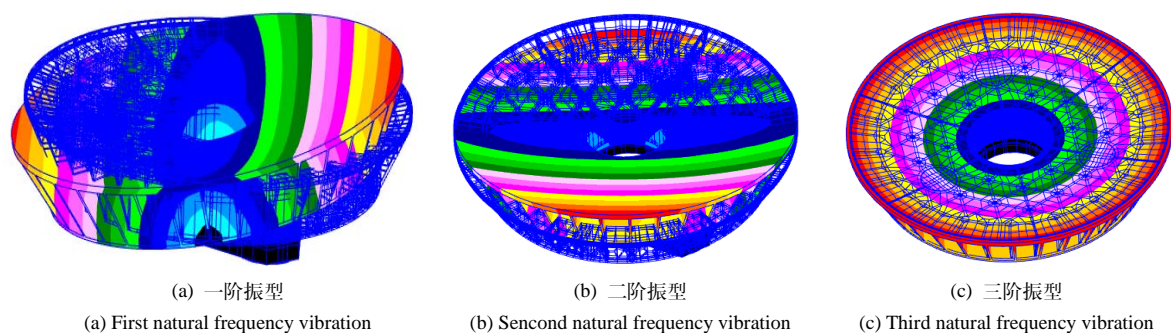


图 6 RB-SiC 反射镜组件原理样机振型

Fig.6 Vibration modes of principle prototype of RB-SiC mirror assembly

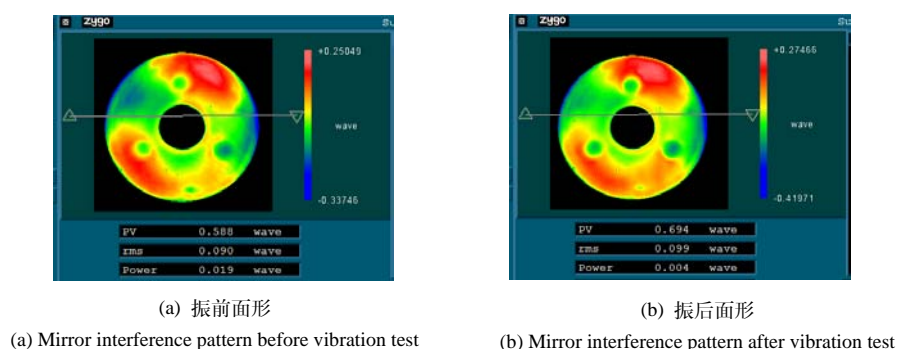


图 7 振动前后干涉图

Fig.7 Mirror interference pattern before and after vibration test



## 4 结 论

随着反射镜组件口径的增大,轻量化率的不断提高,大口径 SiC 反射镜组件的研制成为轻小型相机研制中亟待解决的关键技术之一,合理、高效的完成大口径 SiC 反射镜组件的工程研制也成为高分辨率轻小型相机研制任务顺利完成的重要技术保障。

RB-SiC 反射镜组件原理样机随后分别进行的 X、Y 和 Z 向 5 g 的正弦振动及 5.7 g 的随机振动试验表明,振动试验前后反射镜组件的一阶频率保持在 340 Hz 左右,与有限元分析结果相差约

8.5%,充分说明分析模型处理得当。同时,对面形精度达  $0.1\lambda$  的反射镜组件振动前后的镜面面形的 Zygo 干涉仪检测结果也表明,振动试验前后反射镜镜面面形 RMS 相差为  $0.009\lambda$ ,反射镜面形振动前后稳定可靠无变化,进一步说明结构设计方法合理、可行,缩短了设计周期,提高了结构设计的可靠性。

文中通过实际工程研制经验,总结并阐述了大口径 SiC 反射镜组件进行合理、高效设计的主要研制技术路线,通过原理样机与力学样机并行设计的方式,及早地暴露了反射镜组件结构形式和制造装配过程中潜在的缺陷,尽量减少了反射镜组件的早期失效率,并对反射镜组件尤其是柔性支撑结构的动力学特性进行了地面试验,充分提高了设计的可靠性,确保了光学件的安全,缩短了研制周期。

有关工程实践充分证明,该方法具有良好的可操作性和高可靠性,对轻小型大口径反射镜组件的工程研制尤其是力学环境要求更为苛刻的情况而言具有很好的借鉴和指导意义,可更好地提高设计的可靠性并缩短项目研制周期。

### 参考文献:

- [1] Yoder Jr P. **Opto-mechanical Systems Design** [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1992: 95-165.
- [2] Vukobratovich D. **Introduction to Optomechanical Design** [M]. New York: SPIE Short Course SC014, 2003: 105-181.
- [3] BARMES Jr W P. Hexagonal vs. triangular core lightweight mirror structure [J]. **Applied Optics**(S0003-6935), 1972, **11**(12): 2748-2751.
- [4] 陈世平. 空间相机设计与试验[M]. 北京: 宇航出版社, 2003: 150-260.  
CHEN Shi-ping. **Space Camera Design and Experiment** [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003: 150-260.
- [5] 许本文, 焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 100-140.  
XU Ben-wen, JIAO Qun-ying. **Mechanical Vibration and Modal Analysis Foundation** [M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 100-140.
- [6] 愈云书. 结构模态试验分析[M]. 北京: 宇航出版社, 2000: 50-80.  
YU Yun-shu. **Structural Modal Test and Analysis** [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2000: 50-80.
- [7] 闫勇, 贾继强, 金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J]. 光学 精密工程, 2008, **16**(8): 1533-1539.  
YAN Yong, JIA Ji-qiang, JIN Guang. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, **16**(8): 1533-1539.
- [8] 吴小霞, 杨洪波, 刘宏伟, 等. 航空相机的模态分析及轴承模型的修改[J]. 计算机仿真, 2008, **25**(5): 55-57.  
WU Xiao-xia, YANG Hong-bo, LIU Hong-wei, et al. Mode Analysis of the Aerial Camera and Modification of the Bearing Model [J]. **Computer Simulation**, 2008, **25**(5): 55-57.

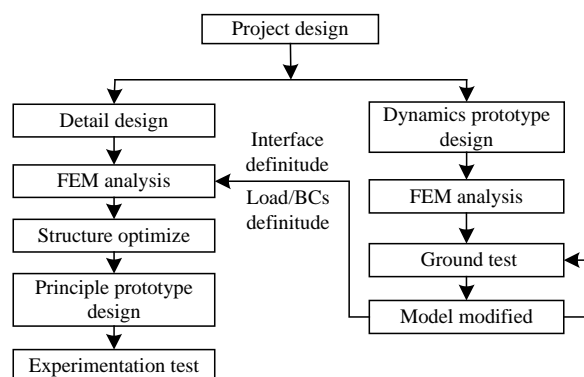


图 8 反射镜组件研制技术流程

Fig.8 Design technology flowchart of mirror assembly