

光学系统主镜组件的轻量化设计及结构-热分析

韩杰才, 韩媛媛*, 张宇民, 张剑寒, 姚 旺, 周玉锋

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:根据某型卡塞格林系统主反射镜组件的设计要求,在遵循主镜支撑结构材料的线膨胀系数与主镜材料相匹配原则的基础上,采用有限元分析和参数优化设计相结合的方法,设计并分析了 3 套主镜组件方案。结果表明,在结构参数相同情况下,SiC 主镜的静态、动态性能优于熔石英和 K9 主镜。对 SiC 主镜进行轻量化参数优化后,得到了直径为 256 mm、质量仅为 1.22 kg 的镜体。通过对 3 种方案主镜组件的结构-热分析表明,主镜及其支撑结构均采用 SiC 材料的第 3 种主镜组件方案,消除了材料间的热膨胀错配,主镜面的变形误差完全满足设计要求,综合性能优于其它两种方案。

关键词:主镜; 支撑结构; 轻量化; 有限元; 热膨胀错配

中图分类号:TH751+.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2007)02-0187-03

Lightweight Design and Structure/Thermal Analysis of Primary Mirror Assembly in Optical System

HAN Jie-cai, HAN Yuan-yuan*, ZHANG Yu-min, ZHANG Jian-han, YAO Wang, ZHOU Yu-feng

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: According to the design requirement of a certain primary mirror assembly in Cassegrain system, based on the principle that the thermal expansion coefficient of the support structure should match with that of the mirror, three primary mirror assembly schemes are designed and analyzed by finite element analysis and parameter optimization method. The results show that with the same structural parameters the SiC mirror has the better static and dynamic properties than the fused silica mirror and the K9 mirror. After the lightweight structure optimization, the mass of the SiC mirror with 256 mm aperture is only 1.22 kg. The structure/thermal analysis of the three schemes indicate that the third scheme, where both of the mirror and the support structure in the primary mirror assembly are made by the SiC material, has the better over-all properties than that of the other schemes. Moreover, the thermal expansion mismatch between the materials can be eliminated, and the SiC mirror surface is satisfactory with the design requirements in the third scheme.

Key words: primary mirror; support structure; lightweight; finite element; thermal expansion mismatch

1 引 言

随着光学遥感系统分辨率的提高,反射镜的口径逐渐增大,从而带来了一系列技术难题^[1]:大口径反射镜的自重引起的镜面变形不容忽视;当空间环境温度发生变化时,温度梯度引起象差;系统的运行和发射成本大幅度增加。因此,大口径反射镜及其支撑结构(统称为反射镜组件)的轻量化成为光学系统发展的必然趋势^[2,3]。

实现反射镜组件轻量化的主要途径有 2 种:1) 选择轻质的材料;2) 选择轻量化的结构形式。传统的反射镜材料主要有微晶玻璃、铍和铝等^[4],轻量化反射镜通常有开口式和三明治式 2 种蜂窝结构型式^[5]。为了减小温度变化时反射镜与其支撑结构间的热错配,通常选用热膨胀系数较小

的金属材料作为反射镜支撑结构材料,其中以殷钢为代表,但是传统的光学系统仍然存在着反射镜与其支撑结构的热膨胀不匹配引起镜面发生变形的问题^[6]。

本文以实现反射镜组件的轻量化以及消除反射镜与支撑结构间的热错配为目的,设计了某型卡塞格林式光学系统的主镜组件,并进行了结构-热分析。

2 主反射镜组件的设计

2.1 设计要求

设计分析的对象为某型卡塞格林系统的主反射镜组件,系统光路如图 1 所示。主反射镜的主要设计要求为:圆形形状,口径为 256 mm,中心孔径为 77 mm;非球面面形,平背、后开式结构;背部三点式支撑方式;1 g 重力作用下,

镜面法向变形 $PV < \lambda/5 (\lambda = 632.8 \text{ nm})$ 。

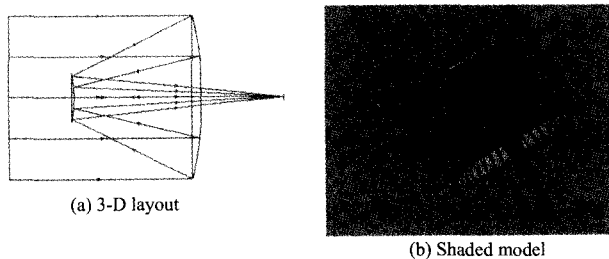


图1 卡塞格林系统光路图

Fig. 1 Ray trace of the Cassegrain system

2.2 材料选择

综合考虑反射镜的机械性能、物理性能、加工工艺以及成本等因素,选定主镜的材料为熔石英(fused silica)、光学玻璃 K9 以及 SiC。在保证力学性能的前提下,根据反射镜的支撑结构遵循材料线膨胀系数与反射镜材料相匹配的原则,柔性支撑结构材料选用铁镍合金(4J45、4J32),支撑背板材料选用机械性能良好、密度较小的铸钛合金(ZTC4)。设计了3种主镜组件方案:方案1为熔石英主镜+4J32 柔性支撑+ZTC4 支撑背板;方案2为 K9 主镜+4J45 柔性支撑+ZTC4 支撑背板;方案3为 SiC 主镜+SiC 刚性支撑背板。各方案中,材料的性能参数见表1^[7]。

表1 主镜组件材料性能

Tab. 1 Properties of the primary mirror assembly materials

Materials	Mass /($10^{-6} \cdot \text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)	Young's modulus /GPa	Pisson's ratio	Thermal expansion coefficient /($10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)	Heat conductivity /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Specific heat /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Fused silica	2.20	74	0.17	0.56	1.38	787
4J32	8.06	140	0.25	0.54	13.90	515
K9	2.53	81	0.21	7.50	1.21	858
4J45	8.18	150	0.30	7.50	15.00	502
SiC	3.08	350	0.18	2.50	185.00	700
ZTC4	4.40	112	0.29	8.90	8.80	557

2.3 反射镜的轻量化结构

反射镜的轻量化结构形式有扇形、三角形和六边形等,通过计算比较3种轻量化孔对镜体静态、动态性能的影响,并综合考虑加工工艺性,确定选用三角形轻量化结构形式。根据主反射镜的形状及尺寸,为确保反射镜的成像质量,确定采用背部三点支撑方式,3个支撑点均匀分布,彼此间的夹角为 120° ,约束方式为3点全约束,1 g 重力方向沿反射镜轴向方向。根据反射镜的尺寸、加工工艺性的限制以及玻璃镜的径厚比为 $6 \sim 8$ 的原则,设定主反射镜的初始结构主要参数,镜体厚度为 35 mm,面板厚度为 5 mm,筋厚度为 5 mm,3种方案中主反射镜的性能见表2。可以看出,在相同的结构参数下,SiC 反射镜 1 g 重力下镜面法向的最大变形比其它2种反射镜小3倍多,说明在加工能力允许的范围内,进一步减小 SiC 反射镜的结构参数,得到更轻更薄的

结构也能满足镜体的刚度和面形的要求。因此,综合运用有限元分析方法和参数优化设计的手段,特别对 SiC 反射镜进行了结构优化设计,参数化有限元模型如图2(a)所示,经过11次迭代,得到了 SiC 反射镜的最优结构参数,镜体厚度为 25 mm,面板厚度为 3 mm,筋厚度为 3 mm。经过优化后,SiC 反射镜的质量为 1.22 kg,与初始方案相比,轻量化率为 52.5%,镜面的最大变形为 34.0 nm,如图2(b)所示,仍能满足光学要求。在下面的分析中,方案3中的 SiC 反射镜将采用优化的结构参数,其它2方案中的玻璃镜仍采用初始结构参数。

表2 3种方案主反射镜的性能比较

Tab. 2 Properties of the primary mirror of the three schemes

Schemes	Mass/kg	Lightweight ratio /%	Maxium displacement of the faceplate/nm	First- order natural frequenc /Hz	Von mises stress/MPa
1	1.48	36.2	52.1	2392.2	0.017
2	1.71	36.0	55.1	2323.1	0.020
3	2.08	36.0	15.5	4391.9	0.024

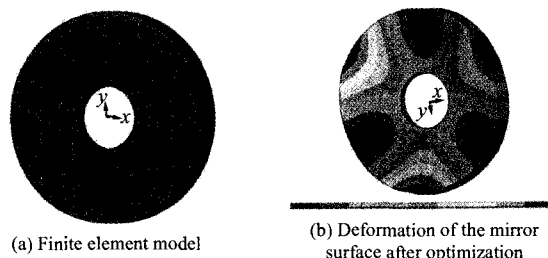


图2 SiC 主反射镜

Fig. 2 SiC primary mirror

2.4 反射镜的支撑结构

反射镜支撑结构设计的合理与否,直接关系到主镜工作环境下面形精度的好坏。因此,反射镜支撑结构不仅要具有一定的刚度,当反射镜与支撑结构材料不同时,一般还要在适当的位置设置柔性环节,起到隔离振动和变形的作用。设计的主镜组件的前2个方案均选用了柔性支撑,在主镜背部3个支撑点处加工盲孔,采用胶结方式,在盲孔处放置与主镜线膨胀系数相匹配的柔性支撑结构;第3个方案选用了刚性支撑,支撑背板与主镜直接固连,选用的材料是与主镜相同的 SiC 材料。为了提高支撑背板的刚度且减小其重量,采用了加强筋的设计思想,在相同的结构参数条件下通过有限元计算得出,传统的 ZTC4 支撑背板的质量为 0.45 kg,一阶固有频率为 1446.1 Hz,而 SiC 支撑背板的重量为 0.32 kg,且一阶固有频率提高了2倍,为 3028.9 Hz。因此,以 SiC 材料作为支撑背板的方案是可行的。

3 主镜组件的有限元分析

根据主镜组件的空间几何尺寸,建立了有限元模型,如图3所示。对支撑背板的3个支撑点进行6自由度全约束,进行了3种工况的计算,工况1为在沿反射镜轴向方向施加 1 g 重力;工况2为 5 K 均匀升温,参考温度设为 293

K;工况3为5 K均匀降温。对主镜组件的一阶固有频率和镜面面形变化进行了分析,见表3示。工况2下3个方案的主镜面最大变形如图4所示。由表3可知,在影响反射

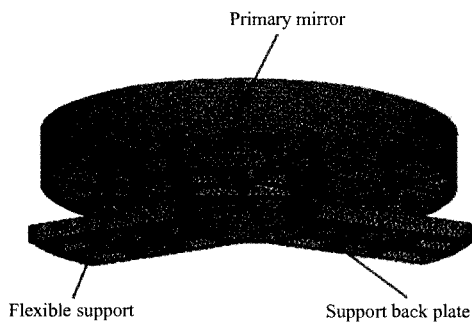


图3 主镜组件的有限元模型

Fig.3 Finite element model of the primary mirror assembly

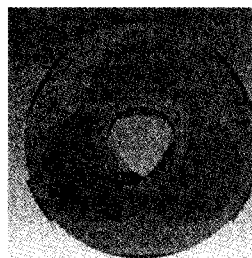
表3 3个方案主镜组件3种工况下的性能

Tab.3 Properties of the three primary mirror assembly under three load cases

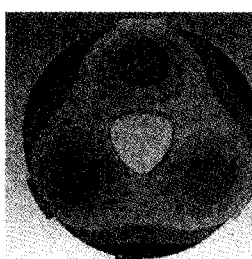
Schemes	Mass /kg	First-order natural frequency/Hz	Maxium displacement/ μm		
			Load case 1	Load case 2	Load case 3
1	2.12	1130	0.053	0.8	0.8
2	2.34	1131	0.058	5.8	5.8
3	1.54	2862	0.021	1.8	1.8



(a) First scheme



(b) Second scheme



(c) Third scheme

图4 5 K均匀升温环境下第3方案的镜面变形

Fig.4 Deformation of the mirror surface under the second load case

镜成像质量的因素中,温度变化引起的镜面变形比由重力产生的镜面变形大得多而成为主要的影响因素,当均匀变化相同的温度时,镜面的变形量相同,熔石英镜面变形最小,其次是SiC镜面,但是SiC主镜组件的质量最小、一阶固有频率最高,温度变化时的面形误差仍能满足光学要求,而且采用刚性支撑的刚体位移远小于采用柔性支撑的2个方案。因此,SiC刚性支撑主镜组件综合性能最好,是最佳的主镜组件方案。在热设计选材时,在保证结构性能及光学性能、成本允许的情况下,应尽量选取高比刚度、热变形系数小的材料作为主镜;同时,柔性支撑材料或刚性背板材料一定要与主镜材料的热膨胀系数相匹配,当温度升降时,主镜组件中的各元件将同步收缩、膨胀,消除温度间隙和由于温度改变引起的焦点移位。

4 结论

对于光学系统的主反射镜组件,轻量化以及减小温度变化引起的主镜面变形是2大技术重点和难点。采用有限元方法分析了结构参数相同情况下的熔石英、K9和SiC主镜的性能,对综合性能最好的SiC主镜进行了结构参数优化设计,得到了直径256 mm、质量仅为1.22 kg、轻量化率达到52.5%和面形精度满足光学要求的主反射镜。

在遵循主镜支撑结构材料的线膨胀系数与主镜材料相匹配原则的基础上,设计了3种主镜组件方案,分析了1 g重力和 ± 5 K均匀变温工况下主镜组件的性能。结果表明,主镜及其支撑结构均采用SiC材料的刚性支撑方案,消除了由于材料热膨胀系数差异引起的热错配,综合性能最好,整个主镜组件的质量仅为1.54 kg,固有频率为2862 Hz,而且工作条件下镜面变形误差完全满足设计要求,是最佳的主镜组件方案。该方案的各部件性能,还需要在实际工程测试中进一步验证。

参考文献:

- [1] QI Ya-fan, FANG Jing-zhong, YANG Li, et al. Investigated and development of lightweight mirror[J]. *Optical Technology*, 1998, (3): 49-52. (In Chinese)
- [2] ZHANG Yu-min, LIU Dian-kui, HAN Jie-cal, et al. Optimization of the optical mirror structural materials[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2001, 22(6): 78-82. (In Chinese)
- [3] Hamelin C J, Beddoes J, Lo J. Materials and structural design for lightweight primary mirrors[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2004, 11(2-3): 103-110.
- [4] Paquin R A. Materials for mirror systems; an overview[A]. *SPIE[C]*. 1995, 2543: 2-6.
- [5] YANG Li. *Manufacture Technology of the Advanced Optics* [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2001. (In Chinese)
- [6] DING Yan-wei, YOU Zheng, Lu Eh. Influences of temperature change on dimension stability of sensor opto-structural system [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2004, 15(10): 1170-1173. (In Chinese)
- [7] LI Xiao-feng. Finite element analysis of mirror thermal distortion in spatial environment[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2005, 16(8): 906-909. (In Chinese)

作者简介:

韩杰才(1966—),男,教授,主要从事特殊光学材料设计与制备的研究。