

低温反射镜组件结构设计与支撑特性分析

沈凯^{1,2}, 何欣¹, 张星祥¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 红外光机系统在低温环境工作能够抑制背景噪声提高探测灵敏度, 也提高了反射镜组件结构设计难度。低温反射镜支撑结构设计主要问题是由反射镜与连接件热膨胀系数不同导致的温度变化工况下的面形变化。对工作于 240 K 的 $\phi 450$ mm 反射镜组件进行结构设计, 反射镜材料为 SiC, 连接件材料为殷钢, 采用背部中心单点支撑形式与三角形轻量化形式, 并设计柔性连接件提高低温面形表现。对主要设计参数进行优化分析, 得到各参数对面形的影响曲线。优化后, 反射镜光轴方向重力面形为 8.585 nm, 径向重力面形 3.710 nm, 240 K 低温面形 5.086 nm, 一阶模态 277 Hz, 轻量化率 89.4%。

关键词: 有限元分析; 低温反射镜; 背部中心支撑; 支撑特性

中图分类号: TH703

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2021)12-1172-05

Structural Design and Support Characteristics Analysis of Cryogenic Mirror Assembly

SHEN Kai^{1,2}, HE Xin¹, ZHANG Xingxiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The infrared opto-mechanical system can improve detection sensitivity by working in a cryogenic environment to reduce background radiation, which causes many technical challenges for mirror assembly structure design. In a cryogenic environment, different coefficient of thermal expansion (CTE) of the mirror and the connector cause the surface accuracy change to be the main problem. Design the structure of the $\phi 450$ mm mirror assembly working at 240 K. The mirror material is SiC, and the connector material is Invar. The support method is rear support in the center. Great flexibility is designed for the connector to improve surface accuracy. Further, the main design parameters are optimized and analyzed. The influence curves on the surface accuracy are obtained. The root mean square (RMS) of gravity along the optical axis is 8.585 nm, the RMS along the radial direction is 3.710 nm, and the RMS is 5.086 nm working at 240 K. The first order frequency is 277 Hz, and the lightweight rate is 89.4%.

Key words: finite element analysis, cryogenic mirror, support in center, supporting characteristics

0 引言

红外遥感技术是一种通过探测目标所辐射或反射的红外辐射能量获取目标信息的遥感手段。根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 物体自身辐射的辐射通量密度与绝对温度的四次方成正比。对红外光学系统而言, 通过降低光机系统温度来减少辐射强度能够有效提高探测灵敏度。

鉴于低温光学在红外探测中的重要作用, 自 20

世纪 60 年代以来, 国外已经开展相关研究。例如, 由美国研制的 IRAS^[1]采用全铍材料设计镜体与支撑结构, 实现 2~5 K 温度下稳定成像; 欧洲航天局 (European space agency) 研制的 Herschel 望远镜^[2-3]光机结构都采用碳化硅材料, 实现 85 K 低温成像; 日本的 AKARI 望远镜^[4-5]镜体由碳化硅材料制造, 采用殷钢材料进行柔性设计, 并通过 3 个 bipod 连接件将反射镜连接到背板上, 实现 35 K 低温成像, 面形指标为 60 nm; 目前正在研制的詹姆斯·韦伯空间望远

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-01-26.

作者简介: 沈凯 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为低温反射镜支撑技术。E-mail: shenkai2018@163.com.

通信作者: 何欣 (1970-), 男, 研究员, 从事空间反射镜支撑结构研究, E-mail: hexinxp@163.com.

基金项目: 国家重大基础条件建设项目 (Y9621XY/Y9611XU).

©1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

镜 (James Webb space telescope) [6-7]采用铍材料制作镜体,拟在 7 K 低温下成像。近些年,国内对低温反射镜支撑技术的研究也在逐渐展开,邱成波[8]采用 SiC 材料做反射镜镜体,支撑结构的材料选用殷钢,采用 9 点 kindle 支撑,通过柔性铰链与主动调整技术,在 90 K 低温下面形为 39.595 nm;北京空间机电研究所的李晟[9]对低温碳化硅反射镜背部三点支撑与侧边三点支撑进行对比研究,同时确定了侧边三点支撑方式、支撑材料、热线胀系数对反射镜面形的影响。

一般低温红外系统面形指标为 30~60 nm,本文针对某后光路反射镜结构组件的面形指标为 13 nm

($\frac{\lambda}{50} @ \lambda=632.8 \text{ nm}$), 相对一般设计指标更为严苛。

本文对 240 K 低温的 $\phi 450 \text{ mm}$ 圆形反射镜组件进行初步设计,并进一步优化分析各结构参量对反射镜自重与低温面形影响,根据分析结果选定设计参数,提高反射镜在低温 240 K、光轴重力、径向重力工况下的面型精度与模态,且具备较高轻量化率。

1 反射镜组件结构设计及仿真

反射镜组件在加工制造装调时,处于常温重力工况,在轨工作时,处于微重力低温工况,反射镜受“重力释放”与环境温度变化影响,镜面面形发生变化,为保证反射镜在轨工作时面形表现,需对反射镜组件进行结构设计。最终设计结果应满足 1g 重力工况下 $\text{RMS}<13 \text{ nm}$,低温环境下 $\text{RMS}<13 \text{ nm}$,一阶模态 $>120 \text{ Hz}$,同时应尽量降低反射镜质量,减少发射成本。

1.1 反射镜组件材料选择

低温光学系统要求反射镜具有:优良的加工性能与良好的抛光度来保证镜面能够加工成型,足够的尺寸稳定性能够长时间保证反射镜面形,足够高的比刚度来提高轻量化率降低发射成本,高热导率使反射镜能够迅速降到工作温度并在环境温度变化时快速实

现镜面温度平衡,较小的热线胀系数来减小反射镜镜体的热变形量,材料性能具有各向同性特别是热线胀系数。目前常见的空间反射镜材料包括碳化硅、硅、微晶玻璃、铝、铍、熔石英、超低膨胀玻璃 (Ultra-low expansion glass, ULE), 其力热性能见表 1[10]。碳化硅材料性能稳定、热线胀系数较小、导热率高、比刚度高、材料为各向同性,是良好的低温反射镜材料,同时国内碳化硅反射镜制备工艺成熟,因此本文选用碳化硅作为反射镜镜体材料。

低温光学的首选是光机结构采用同一种材料实现无热化,能够极大降低结构设计难度及热控要求,但国内的高精度复杂碳化硅零件的成型加工技术还不够成熟,因此选择与反射镜材料热线胀系数相近的材料制造连接件,并对连接件进行柔性设计以减少对反射镜面形的影响。殷钢材料根据内部合金元素比例可以调节其热线胀系数,减小反射镜材料与连接件材料热线胀系数差,因此本文选用殷钢作为连接件材料。但材料热线胀系数随工艺、批次不同难以精准确定,殷钢热线胀系数的范围选定在 $(2.4 \pm 0.3) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,以保证实际工程实践中热线胀系数在设计范围内。

1.2 反射镜组件结构设计

1.2.1 反射镜背部结构设计

常见反射镜支撑方式有周边支撑、侧边支撑、背部多点支撑、背部单点支撑[9,11-12]。背部多点支撑有利于保证重力工况下特别是光轴方向重力的反射镜面形,因此通常应用于中大口径反射镜。但背部多点支撑热适应性较差,低温时支撑点变形相互影响,难以保证低温反射镜面形精度。背部中心支撑结构简单、支撑刚度高,在低温工作时,背部中心支撑结构变形相对简单,能够避免多点支撑热变形导致的相互干涉,有效降低反射镜受支撑结构不均匀热应力所造成的面形变化[13]。因此本文采用背部单点支撑方式。

表 1 常用反射镜材料的性能和品质因数

Table 1 Performance and quality factors of rational materials for mirror

Material	Density $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	Young's modulus $E/(\text{GPa})$	Specific stiffness $E/\rho(10^{-6}\cdot\text{GNm}/\text{g})$	CTE $\alpha(10^{-6}/\text{K})$	Thermal conductivity $\lambda[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	Thermal distortion ratio $\lambda/\alpha(10^6 \text{ W}/\text{m})$
Fused silica	2.19	72	32.88	0.50	1.4	2.8
Zerodur	2.53	91	35.97	0.05	1.64	32.8
Al	2.70	68	25.19	22.50	167.00	7.42
Be	1.85	287	155.14	11.40	216.00	18.95
SiC	3.2	400	125.00	2.40	155.00	64.58
Si	2.33	131	56.22	2.60	137.00	52.69
ULE	2.21	67	30.32	0.01	1.31	131

根据 Roberts 实体反射镜设计经验公式：

$$\delta=\frac{3\rho g\Delta^2D^2}{256E}$$

(1)

式中： δ 为最大自重变形，m； ρ 为材料的密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度， m/s^2 ； D 为反射镜直径，m； E 为材料弹性模量，Pa； Δ 为径厚比。计算径厚比为 8.3，反射镜厚度为 54 mm。本文结构背部支撑形式为背部开放式，并取厚度安全系数 1.2，最终确定反射镜厚度为 80 mm。

三角形轻量化孔具有较高的刚度和较好的轻量化率，能够很好地保证反射镜面形，因此本文选用三角形轻量化形式。并对背部筋板做两次倒角处理，减轻反射镜边缘质量，提高光轴重力面形。

综合以上，反射镜背部支撑方案如图 1。

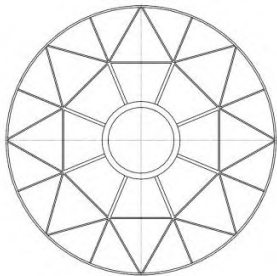


图 1 反射镜背部结构

Fig.1 Support structure of mirror

1.2.2 柔性连接件结构设计

由于材料线胀系数不匹配，连接件与中心孔在无约束情况下低温变形量不一致。中心孔在径向发生较大变形，并引起光轴方向变形，从而影响反射镜面形，因此需要对连接件进行柔性设计。设计“己”字形柔性结构，释放径向压力，使连接件吸收大部分变形能，减小对反射镜面形影响。柔性连接件结构见图 2。

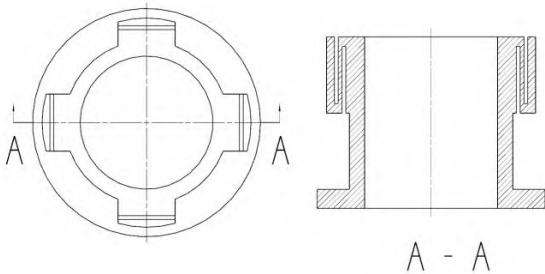


图 2 柔性连接件结构

Fig.2 Flexible connector structure

在该结构中可将柔性支撑结构看作两组悬臂梁结合，根据悬臂梁均布载荷挠度公式：

$$\omega=\frac{-ql^4}{8EI}=\frac{-ql^4}{8E\frac{a^3b}{12}}$$

(2)

式中： ω 为悬臂结构挠度； q 为均布载荷； L 为柔性悬

臂支撑结构的有效长度； a 和 b 分别为悬臂结构截面的厚度和宽度； I 为截面惯性矩， $I=\frac{a^3b}{12}$ 。该公式不

能用来准确计算“己”字结构挠度，但反映出随支撑壁厚 l 变长、壁厚 a 变小、宽度 b 变小反射镜柔性结构挠度 ω 会变大，调节这些参数能够有效提高低温面形表现。但 a 、 b 、 l 取值还需同时考虑重力面形、反射镜组件动力学性能与实际加工装调。

1.3 反射镜组件仿真结果对比

将反射镜与连接件装配（见图 3），进行有限元仿真；并对另一组没有径向柔性设计的反射镜组件进行有限元仿真作为对比。仿真时，连接件热胀系数取 $2.7\times10^{-6}\text{K}^{-1}$ 。

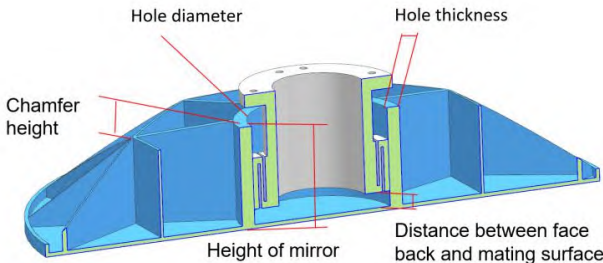


图 3 反射镜装配图

Fig.3 Mirror assembly drawing

分析结果见表 2，RMS-X、RMS-Z、RMS-T 分别为径向重力面形、光轴方向重力面形、低温 240 K 面形。根据仿真结果能够看出，将连接件进行柔性设计能够有效减小在低温面形 RMS 值，也会导致重力面形变差。

表 2 反射镜组件分析结果

Table 2 Analysis results of mirror and flexible connector

Connection type	nm		
	RMS-X	RMS-Z	RMS-T
Rigid	1.284	7.027	165.844
Flexible	5.362	9.039	9.869

2 反射镜组件参量优化

对反射镜重力工况面形与低温面形有较大影响的主要参数有反射镜镜体高度、反射镜中心孔厚与直径、镜面背部与配合面距离、反射镜背部倒角高度、连接件柔性参数、筋板厚度等。各参数对反射镜面形变化影响程度不同，面形随相关参数变化趋势也不同。本文对相关参数进行了优化分析，重力与低温面形随各参数在一定范围内变化的趋势见图 4～图 8。

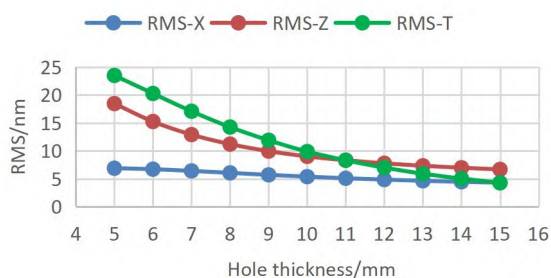


图4 面形 RMS 随中心孔厚度变化趋势

Fig.4 Surface accuracy varying with hole thickness

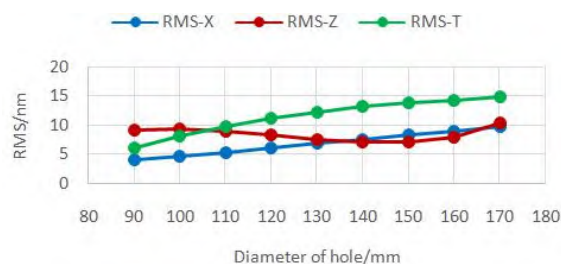


图5 面形 RMS 随中心孔直径变化趋势

Fig.5 Surface accuracy varying with the diameter of hole

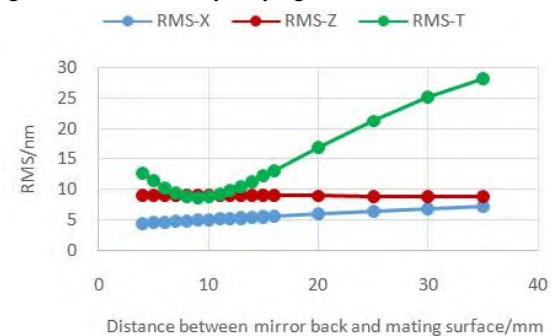


图6 面形 RMS 随镜面背部与配合面距离变化趋势

Fig.6 Surface accuracy varying with the distance between face back and mating surface

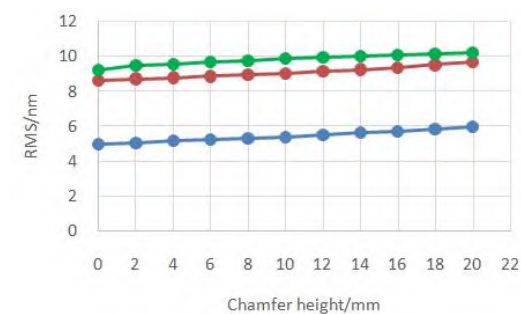


图7 面形 RMS 随倒角高度变化趋势

Fig.7 Surface accuracy varying with chamfer height

3 数据分析与参量选取

3.1 各参量对重力面形影响

反射镜背部支撑依靠连接件约束中心孔内壁,支撑住整个中心环,并依靠三角形分布的筋板均匀地控

制住反射镜镜面,保持重力面形。增大中心孔厚度提高了中心孔的刚度,提升了重力面形表现。减小倒角高度提升了筋板的刚度,重力面形表现变好,但影响幅度较小。增加镜体高度整体提高了反射镜刚度,减小面形 RMS。增大中心孔直径导致 X 方向面形变差,其主要原因在于随着中心孔变大,连接件对中心孔的约束效果变差,降低面形表现; Z 向 RMS 先变小后变大,是因为增大中心孔使得支撑面与反射镜边缘距离减小,提高了对中心孔外圈镜面面形的控制,使得 RMS 减小,但随着中心孔直径增大,中心孔内圈镜面在重力下发生的坍塌成为影响面形的主要因素,导致 RMS 增大。随配合面与镜面背部距离变大, X 重力面形变差且幅度较大, Z 向面形小幅度提升,是因为在 X 向重力下,反射镜承受倾覆力矩,支撑面距离镜面越远,力矩越大,面形表现变差。

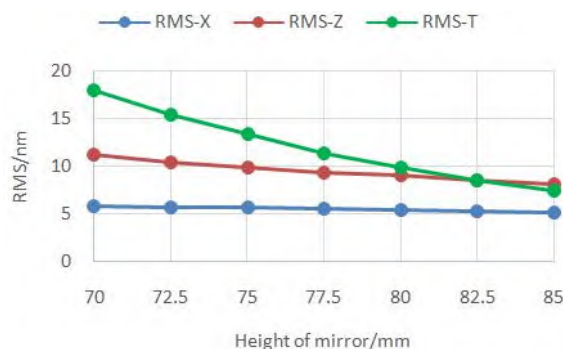


图8 面形 RMS 随镜体厚度变化趋势

Fig.8 Variation trend of surface accuracy varying with height of mirror

3.2 各参量对低温面形影响

本文中,低温无约束时,连接件变形大于中心孔变形,因此在实际结构中,中心孔内壁与连接件配合部分受径向拉力,引起中心孔壁径向与轴向变形。

随着中心孔变厚,中心环刚度变高,低温变形对中心环影响减小,面形表现变好。

根据热线胀系数之差计算公式:

$$\Delta\delta = R \times |\alpha_{SiC} - \alpha_{Invar}| \times \Delta T \quad (3)$$

式中: $\Delta\delta$ 为热线胀系数变形差值; R 为中心孔半径; α_{SiC} 与 α_{Invar} 为碳化硅与殷钢热线胀系数; ΔT 为温度差。可以看出随着中心孔直径变大,自由变形差值越大,中心环变形越大,面形表现变差。

随配合面与镜面背部距离 h 增大,低温面形先变小后变大。这是因为轴向变形使内圈面形凹陷,径向变形导致的内圈面形凸出, h 较小时,配合面距离镜面近,轴向变形导致的面形变化占据主导地位,随着 h 变大,径向变形导致的面形变化逐渐占据主导地位,所以 h 增大会使面形先变小后变大。

3.3 参量选取与分析结果

性能见表 4。

根据优化曲线，参数选取见表 3，反射镜优化后

表 3 优化参数取值

Table 3 Optimize parameter values

Parameters	Height of mirror	Diameter of hole	Hole thickness	mm	
				Distance between face back and mating surface	Chamfer height
Initial	80	110	10	12	8
Final	80	100	12	10	10

表 4 优化后反射镜性能

Table 4 Optimized mirror performance

RMS-X/nm	RMS-Z/nm	RMS-T/nm	First order frequency/Hz	Light weight rate
3.710	8.585	5.086	277	89.4%

4 结论

针对工作于 240 K 低温环境的 $\phi 450$ mm 圆形反射镜组件，本文选用碳化硅材料做反射镜镜体，殷钢材料做连接件，初步设计反射镜与柔性连接件，并进一步优化反射镜相关参数，实现低温 240 K 时反射镜面形 RMS 为 5.086 nm，光轴重力面形为 8.585 nm，径向重力面形 3.710 nm，模态 277 Hz，轻量化率 89.4%。在优化过程中得到反射镜镜体高度、反射镜中心孔厚与直径、镜面背部与配合面距离、反射镜背部倒角高度对面形的影响曲线，对低温反射镜结构设计具有参考意义。

参考文献：

[1] Neugebauer G, Habing H J, Duinen R J V, et al. The infrared astronomical satellite (IRAS) mission[J]. *Astrophysical Journal*, 1984, **278**(1): L1-L6.

[2] Göran L Pilbratt. Herschel mission overview and key programmes[J]. *Proc. SPIE*, 2008, **7010**: 701002.

[3] Sein E, Toulemon Y, Frédéric Safa, et al. A $\phi 3.5$ m SiC telescope for Herschel mission[J]. *Proc. of SPIE*, 2003, **4850**: 606-618.

[4] Kaneda H, Onaka T, Yamashiro R, et al. Optical performance of the ASTRO-F telescope at cryogenic temperatures[J]. *Proc. of SPIE*, 2003, **4850**: 230-240.

[5] Takao N, Keigo E, Masayuki H, et al. Flight performance of the AKARI cryogenic system[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2007, **59**: S377-S387.

[6] Davila P S, Bos B J, Contreras J, et al. The James webbspace telescope science instrument suite: an overview of optical designs[C]// *Proc. of SPIE*, 2004, **5587**: 611-627.

[7] Knight J S, Acton D S, Lightsey P, et al. Integrated telescope model for

the James Webb space telescope[C]//*Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering*, 2012: **8449**: 84490V.

[8] 邱成波. 低温大口径反射镜支撑装调系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

QIU Chengbo. Study on support and adjustment of large-diameter mirrors on low temperature condition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[9] 李晟, 范斌, 王伟刚, 等. 深低温 SiC 空间反射镜背部与侧面支撑结构对比[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(2): 268-277.

LI Sheng, FAN Bin, WANG Weigang, et al. Comparison of back supporting structure and side supporting structure of space mirror manufactured by silicon carbide in cryogenic environment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(2): 268-277.

[10] 任建岳, 陈长征, 何斌, 等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2537-2543.

REN Jianyue, CHEN Changzheng, HE Bin, et al. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2537-2543.

[11] 王克军, 董吉洪, 周平伟, 等. 空间遥感器反射镜背部支撑结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(7): 179-189.

WANG Kejun, DONG Jihong, ZHOU Pingwei, et al. Back support structure design of mirror of space remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(7): 179-189.

[12] 包奇红, 沙巍, 陈长征, 等. 中心支撑长条形反射镜轻型优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(7): 165-171.

BAO Qihong, SHA Wei, CHEN Changzheng, et al. Lightweight and optimization design of rectangular reflective mirror supported in centre[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(7): 165-171.

[13] 辛宏伟. 小型轻质长条反射镜挠性支撑方案研究[J]. *光机电信息*, 2010, **27**(7): 51-55.

XIN Hongwei. Design and analysis on the flexible structure of the optical reflector[J]. *Ome Information*, 2010, **27**(7): 51-55.