

文章编号: 1672-8785(2013)11-0037-06

空间遥感器反射镜组件的稳定性研究

谭进国 何 欣

(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: 空间遥感器反射镜组件的稳定性是影响光学系统成像质量的重要因素。以某型号空间遥感器的反射镜为例, 分析了研制过程中影响其稳定性的主要因素, 包括支撑结构、装配应力、胶层厚度及固化和温度变化。结合实际研制过程, 针对这四个主要因素提出了相应的解决方法, 即设计反射镜的柔性支撑结构、设计反射镜组件的微应力装配工艺及调整装置、设计合理的胶层厚度及固化工艺和设定温度及其变化范围。最后进行了力学环境试验、真空热循环试验和温度试验。结果表明, 这些方法能够有效保证反射镜组件的稳定性。

关键词: 空间遥感器; 光学系统; 反射镜组件; 稳定性

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.11.008

Research on Stability of a Reflector Assembly for Space Remote Sensor

TAN Jin-guo, HE Xin

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

Abstract: The stability of a reflector assembly for a space remote sensor is an important factor which has an influence on the imaging quality of the optical system. By taking the reflector for a certain space remote sensor as an example, the main factors which have influences on the stability of the reflector in its manufacturing process, including the supporting structure, assembling stress, thickness, solidification and temperature variation of the adhesive layer, are analyzed. In the actual manufacturing process, the corresponding solutions for the above factors are proposed. They are design of a flexible supporting structure, design of a micro stress assembling method and device for the reflector assembly, design of a reasonable adhesive layer thickness control and solidification process and setting of a temperature variation range. Finally, the mechanical test, vacuum thermal cycle test and temperature test are carried out. The test results show that these methods can meet the stability requirements of the reflector assembly.

Key words: space remote sensor; optical system; reflector component; stability

0 引言

空间遥感器通常采用离轴三反消像散非球

面光学系统, 它具有组件少、无遮拦、焦距长、视场大、波段宽、抑制杂光能力强以及调制传递函数高等优点^[1]。作为离轴三反光学系统中的

收稿日期: 2013-09-24

作者简介: 谭进国 (1978-), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士, 主要从事空间光学遥感器的结构设计工作。

E-mail: tanjinguo@126.com

重要成像元件, 反射镜的面形精度和位置精度会直接影响光学系统的成像质量。因此, 在反射镜组件的研制过程中, 必须满足光学系统对反射镜的稳定性要求, 避免由于反射镜的稳定性造成成像质量和研制周期上的风险。

本文研究某空间相机镜头成像光学系统中的第三镜, 并分析研制过程中影响组件稳定性的主要因素及其解决方法与途径, 最后通过反射镜组件的力学环境试验、真空热循环试验以及温度试验对组件的稳定性进行验证。

1 反射镜组件的介绍

反射镜为某空间相机镜头的第三镜, 采用的是 SiC 材料, 其外形尺寸为 $600\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 。根据外形特点, 该反射镜采用背部 4 点支撑方式, 选择背部开放式三角形轻量化结构, 其示意图见图 1。

反射镜采用背部支撑方式。图 2 为反射镜组件的示意图。

2 影响反射镜组件稳定性的主要因素

通过在反射镜组件的研制过程中进行分析和总结, 可以确定影响其稳定性的因素主要有以下几个方面。

2.1 反射镜柔性支撑结构的设计

反射镜支撑结构的设计要尽量减小支撑结构本身和外部环境变化对反射镜面形精度及位置精度的影响; 同时在满足支撑刚度的前提下, 要尽量减小质量, 并要保证在空间环境下具有

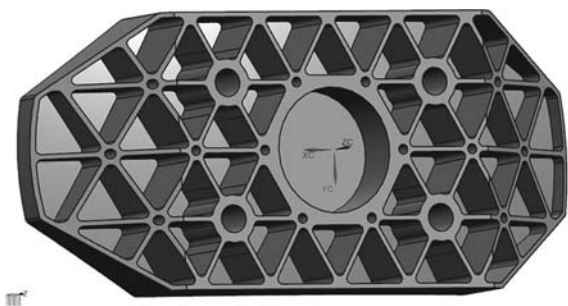


图 1 反射镜的示意图

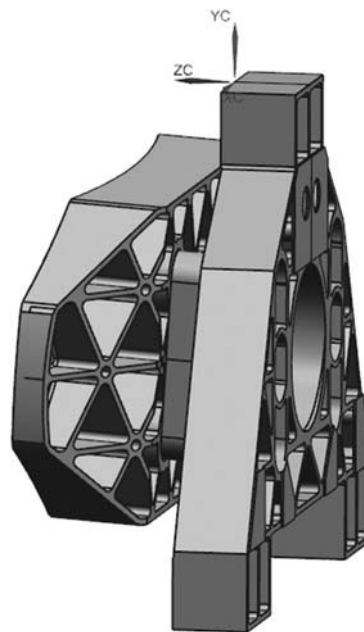


图 2 反射镜组件的示意图

良好的热尺寸稳定性。反射镜支撑结构设计的不合理将会严重影响组件的稳定性。

2.2 反射镜组件装配工艺及调整装置的设计

在反射镜组件的装配过程中, 若同一平面内各个连接面的共面度较差, 在连接螺钉时就会产生相应的装配应力; 若调整装置设计不合理, 镜面变化就会不均匀。在此状态下进行装配时, 镜面将会存在较大的变形应力。这些都将会对反射镜组件的稳定性产生不可预估的影响。

2.3 胶层厚度及胶粘固化工艺的设计

光学环氧胶通常用于光学零件与机械零件的粘接固定, 它具有色泽浅、透明度好、粘度小、折射率与玻璃相近、粘接强度大、收缩率小 (一般小于 2%) 以及稳定性好^[2]等特点。但在固化期间, 粘接层上的每个尺寸都会收缩百分之几, 这会在胶合层与粘接的元件之间形成粘接应力, 引起光学元件产生面形变化^[2]。因此, 通过设计合理的胶层厚度及胶粘固化工艺, 可以有效保证组件的稳定性。

2.4 温度设定

在第三镜组件的研制期间, 由于镜面抛光过程中环境温度不一致, 两种情况下的反射镜面形检测结果存在很大差异。由此可见, 温度设定对反射镜组件稳定性的影响很大。

3 保证反射镜组件稳定性的方法

针对上述影响反射镜组件稳定性的主要因素, 我们通过以下途径保证反射镜组件的稳定性。

3.1 设计合理的反射镜柔性支撑结构

首先选择支撑结构的材料。以材料间的匹配性作为选择基准, 尽量减小外界温度变化时不同材料间热特性的差异对反射镜面形精度的影响。选择与反射镜粘接的柔性结构件以调整线胀系数的钢 (4J32), 并将其线胀系数调整成与 SiC 的线胀系数相近; 过渡件及反射镜背板选择航天产品常用的高比刚度、高尺寸稳定性钛合金 (TC4)。表 1 列出了反射镜组件中各零件材料的属性参数。

然后对反射镜的柔性支撑结构进行设计。根据反射镜的外形特征和反射镜的支撑位置, 选择柔性环节作为支撑结构。这样做不仅可以起到隔振效果, 而且还可有效降低组件装配和材料热性能不匹配等因素对反射镜面形精度的影响^[4]。

本文中的反射镜采用背部 4 点支撑。与反射镜背部直接粘接的是 4 个钢制柔性结构件, 其中背部左侧的两个柔性结构件与过渡件 (横梁) 连接, 横梁再连接一个钛合金柔性结构件。它与另一侧的两个钢制柔性结构件构成与背板连接的 3 个连接点, 符合三点确定一个平面的原理。本文中的柔性结构件是一种双轴圆弧柔性铰链结构。此种铰链具有体积小、无机械摩擦、无空回以及运动灵敏度高等优点^[4]。

表 1 材料属性^[3]

参数	密度 ρ (10^3kg/m^3)	弹性模量 E (GPa)	比刚度 E/ρ (10^6m)	线胀系数 α ($10^{-6}/\text{K}$)	导热率 λ (W/mK)	热畸变 α/λ (10^{-8}m/W)	比热 C_p (J/kg/K)	热扩散率 D ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
SiC	3.14	420	13.6	2.4	180	1.2	680	84.3
4J32	8.03	145	1.84	2.5	23.8	3.9	—	3.4
TC4	4.43	110	2.53	8.8	7.2	122	565	2.9

表 2 由 5℃ 温升和自重变形引起的反射镜误差

重力方向	镜面刚体位移 (mm)			镜面倾斜角 (")			PV(nm)	RMS(nm)
	Δx	Δy	Δz	θ_x	θ_y	θ_z		
X	1.2	0.1	0.3	0.6	0.5	0.3	11.3	2.2
Y	0.08	1.5	0.2	0.6	0.3	0.4	15.8	2.4
Z	0.59	0.55	2.2	0.31	1.18	1.85	60.6	10.8
允差	20	20	40	10	10	10	63.3	12.66

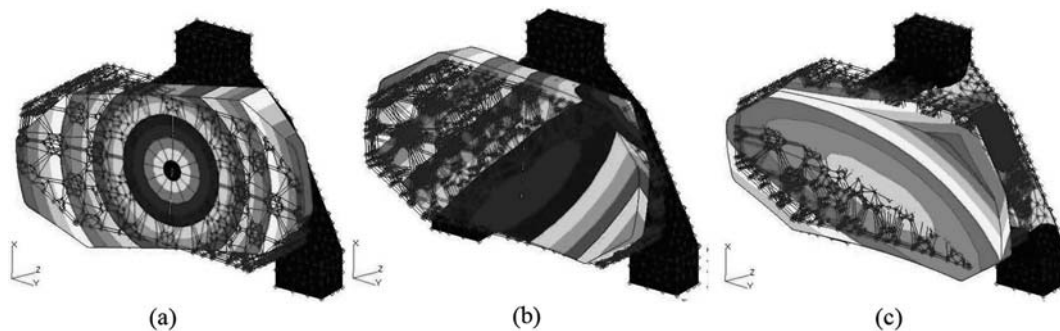


图 3 反射镜组件的约束模态分析图

表 2 列出了有限元分析结果,其数据是在最严苛的工况条件下计算得出的。结果表明,反射镜的面形和位置精度均满足指标要求。

图 3 和表 3 所示为反射镜组件的前三阶约束模态分析结果。其中,反射镜组件的一阶固有频率为 230 Hz,远高于遥感器整机和卫星的固有频率。反射镜组件具有足够大的动态刚度。

表 3 反射镜组件的约束模态

阶 数	频 率
1	230
2	360
3	425

由有限元分析结果可知,反射镜的支撑结

构设计满足指标要求。反射镜组件的稳定性需要后续的力学环境试验、真空热循环试验和温度试验加以验证。

3.2 设计合理的反射镜组件装配工艺及调整装置

根据反射镜的加工流程,首先对反射镜镜坯进行成型加工,包括对外形、粘接孔和镜面非球面的加工;第二步进行镜面细磨,当镜面的面形精度 RMS 值达到 $\lambda/10$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) 时进行表面改性,然后对反射镜组件进行装配^[3]。结合反射镜的实际研制情况,设计了反射镜组件的装配流程(见图 4)。

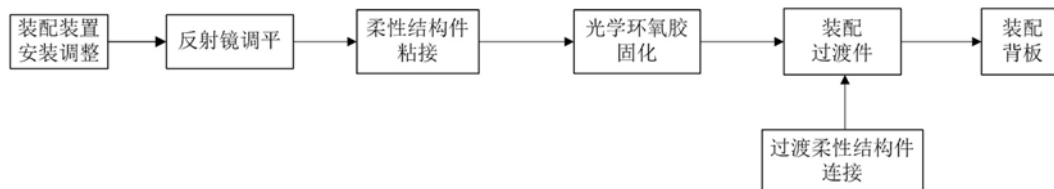


图 4 反射镜组件的装配流程

在反射镜组件的装配过程中,同一平面内的各零件连接面的共面度要优于 0.005 mm,以尽量减小因接触面平面度较低而产生的连接应力对镜面的影响。

在反射镜组件的装配过程中,为确定调整垫的修研量,需要将反射镜镜背向上放置,并以镜背为基准多次测量各零件连接面的高度差^[3]。为了保证反射镜镜面在装配过程中均匀变形,需要设计合理的反射镜装配调整装置,以满足反射镜镜背调平的需要。

根据以上原则,我们设计了图 5 所示的反射镜组件装配装置。该装置有 4 个支撑点,与反射镜镜背支撑点的位置相对应;支撑点结构件采用聚四氟乙烯材料以避免划伤镜面;同时,支撑点结构件为球铰结构,具备自适应调节角度功能,可避免其与镜面发生局部接触^[3]。与左侧两个支撑点相连接的是一个只在反射镜宽度方向上提供旋转功能的组件,它在竖直方向上并

无调整功能;右侧两个支撑点与底板之间是两个旋转螺柱,它们只在竖直方向上具有调整功能。



图 5 反射镜组件的装配调整装置

在完成反射镜组件装配后,对反射镜面形进行了复测,结果是反射镜的面形 RMS 值与装配前一致。然后按照反射镜组件装配工艺,采用装配调整装置进行组件装配,实现了反射镜组件的微应力装配。

3.3 设计合理的胶层厚度及胶粘固化工艺

在反射镜组件的装配过程中,钢钢柔性结

构件与反射镜之间需要通过胶粘固化固定。因此存在光学材料、机械材料和粘结材料的热膨胀系数不匹配等问题, 易使反射镜内部产生径向热应力, 从而影响反射镜反射面的面形^[7]。通过计算合适的胶粘厚度和设计合理的固化工艺, 可以减小甚至消除热应力的影响。

用中蓝晨光化工研究院生产的 GHJ-01 (Z) 光学环氧胶对柔性结构件与反射镜进行了粘接。胶层厚度 h 是按式 (1) 计算的^[5]:

$$h = \frac{r_0(\alpha_c - \alpha_0)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{v}{1-v} \left[\left(2 - \frac{h}{2L} \right) \alpha_b - \frac{3}{4}(\alpha_0 + \alpha_c) \right]} + \Delta h \quad (1)$$

式中, r_0 为柔性结构件的半径; α_0 为柔性结构件的线胀系数; α_b 为胶的线胀系数; α_c 为反射镜的线胀系数; L 为胶层宽度; v 为胶的泊松比; $\Delta h = \frac{t_0 + t_c}{2} + \frac{c_0 + c_c}{2}$, t_0 为柔性结构件的垂直度, t_c 为反射镜粘接孔的垂直度, c_0 为柔性结构件的圆柱度, c_c 为反射镜粘接孔的圆柱度。

但是大多数胶粘剂的粘接强度都会随着胶层厚度的增加而降低, 而胶层过薄也会造成缺胶或者胶层不连续, 进而降低强度和刚度。考虑到实际操作性, 经过拉伸试验验证, 最后将胶层厚度取为 0.03 mm。为了保证胶层厚度, 需要对柔性结构件的粘接部位进行加工修正。

前期试验已经验证光学环氧胶的固化工艺是一种比较成熟的工艺。先进行低温固化, 然后再进行后固化, 可以在前期降低反应活性, 而在后期进一步提高固化程度。其具体的工艺路线如下^[2]:

- (1) 在室温 (20 ℃) 下固化 7 天;
- (2) 转入加热炉;
 - (a) 升温至 30 ℃, 保温 2 h;
 - (b) 升温至 40 ℃, 保温 12 h;
 - (c) 降温至 30 ℃, 保温 2 h;
 - (d) 降温至 20 ℃, 出炉。
- (3) 室温 (20 ℃) 下, 静置 24 h。

3.4 温度的设定及控制变化范围

由于构成反射镜组件的各零部件的材料不同, 线胀系数亦不同。当温度发生变化时, 需要用柔性支撑结构微量调节各零部件间产生的相对变形来保证反射镜的面形精度。若温度的变化范围超过柔性支撑结构的调节范围, 这些变形就会传导至反射镜进而影响镜面精度。在本文所讨论的反射镜镜面抛光过程中, 当温度为 24 ℃ 时, 面形检测 RMS 值为 $\lambda/40$ ($\lambda=632.8$ nm); 当室温调整到 20 ℃ 时, 面形检测 RMS 值为 $\lambda/30$ ($\lambda=632.8$ nm), 而且镜面面形存在明显的对称像散。因此, 在反射镜成型加工、组件装配以及镜面抛光等过程中, 需要严格控制温度及变化范围。建议将温度控制在 20 ℃ $\pm$ 1 ℃。

4 试验验证

反射镜组件装配完成后, 面形复测的 RMS 值和面形分布趋势与装配前相比并未发生变化。在装配环节中, 采用反射镜组件装配装置按照装配工艺实施, 保证了组件的稳定性。

为了进一步验证反射镜支撑结构、胶层厚度、固化工艺的合理性以及释放装配过程中所产生的装配应力, 我们对反射镜组件的固有频率和响应特性进行了测试, 并对反射镜组件进行了力学环境试验和真空热循环试验。

力学环境试验进行的是 X、Y 两个方向上的振动试验。首先进行 X 向 0.2 g 的力学特性扫描, 然后进行随机振动试验; 接着再进行 0.2 g 的力学特性回扫。X 向试验完成后, 进行 Y 向试验, 试验顺序相同。通过对比同向两次 0.2 g 扫描数据, 发现主振方向上的响应频率及放大倍率的变化均小于 5%, 满足力学试验要求。

真空热循环试验就是在真空度不大于 1.3×10^{-3} Pa 的真空罐中进行 2.5 次冷热循环试验。

在力学环境试验和真空热循环试验完成后, 分别检测镜面面形并将其与试验前的测试结果进行对比。面形 RMS 值和面形分布趋势均与试验前相同, 因此反射镜组件的稳定性满足环境试验要求。

在反射镜的镜面抛光完成后, 镜面面形 RMS 值达到 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm)。接着进行温度影响试验。在将实验室的温度由 20 ℃ 降至 16 ℃ 时, 反射镜的镜面面形 RMS 值由 $\lambda/50$ 降至 $\lambda/40$ ($\lambda=632.8$ nm), 说明过大的温度变化会对反射镜组件的稳定性产生较大影响。当温度回升至 20 ℃ 时, 镜面面形 RMS 值也恢复至 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm), 说明该反射镜组件的稳定性允许存在一定范围的温度波动。

5 结束语

本文讨论了影响空间遥感器反射镜组件稳定性的几种主要因素, 包括支撑结构、装配应力、胶层厚度及固化和温度变化。以某空间相机镜头的第三镜为例, 结合实际研制过程, 提出了一些通过设计反射镜柔性支撑结构、反射镜组件微应力装配工艺及调整装置、胶层厚度及固化工艺以及严格控制温度及其变化范围来解决

反射镜组件的稳定性问题的方法和途径。最后通过力学环境试验、真空热循环试验和温度影响试验验证了这些方法对保证反射镜组件稳定性的有效性。结果表明, 这些方法和途径对其他空间遥感器反射镜组件的研制工作具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘强, 何欣. 反射镜用光学环氧胶粘接固化工艺研究 [J]. *机械设计与制造*, 2011, **2**(3): 118–120.
- [3] 谭进国, 何欣, 刘强. 空间遥感器反射镜组件微应力装配技术 [J]. *红外*, 2012, **33**(7): 16–19.
- [4] 谭进国, 何欣, 刘强. 空间遥感器长条形反射镜背部支撑技术 [J]. *红外*, 2012, **33**(8): 16–21.
- [5] 刘强, 何欣, 张峰, 等. 反射镜无热装配中胶层厚度的计算及控制 [J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(10): 2229–2236.
- (上接第 17 页)
- [30] Kang L T, Gao Y F, Chen Z, et al. Pt/VO₂ Double-layered Films Combining Thermochromic Properties with Low Emissivity [J]. *Solar Energy Mater an Solar Cells*, 2010, **94**(12): 2078–2084.
- [31] Yuan H T, Feng K C, Wang X J, et al. Research on Optical Property of Phase Transition PcNi/VO₂ Films [J]. *Applied Surface Science*, 2005, **243**(1): 36–39.
- [32] Wu J, Huang W X, Shi Q W, et al. Effect of Annealing Temperature on Thermochromic Properties of Vanadium Dioxide Thin Films Deposited by Organic Sol-gel Method [J]. *Applied Surface Science*, 2013, **268**: 556–560.
- [33] Xu Y J, Huang W X, Shi Q W, et al. Synthesis and Properties of Mo and W ions Co-doped Porous Nano-structured VO₂ Films by Sol-gel Process [J]. *Journal of Sol-gel Science and Technology*, 2012, **64**(2): 493–499.
- [34] Huang Z L, Chen S H, Lv C H, et al. Infrared Characteristics of VO₂ Thin Films for Smart Window and Laser protection Applications [J]. *Applied Physics Letter*, 2012, **101**(19): 191905.
- [35] Jin P, Xu G, Tazawa M, et al. A VO₂-based Multifunctional Window with Highly Improved Luminous Transmittance [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, **41**(3A): L278–L280.
- [36] Wang B Q, Chen S H, Huang Z L, et al. Optical Non-linearities of Nanostructured VO₂ Thin Films with Low Phase Transition Temperature [J]. *Applied Surface Science*, 2012, **258**(14): 5319–5322.
- [37] 朱慧群, 李毅, 王海方, 等. 热致变色纳米节能薄膜红外光学特性 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2794–2799.
- [38] 刘涛, 李合琴, 刘丹, 等. TiO₂ 缓冲层对掺钨氧化钒热敏智能玻璃的制备及性能影响 [J]. *真空*, 2011, **48**(6): 21–24.
- [39] 梁继然, 胡明, 王晓东, 等. 纳米二氧化钒薄膜的制备及红外光学性能 [J]. *物理化学学报*, 2009, **25**(8): 1523–1529.
- [40] Kim H, Kim Y, Kim K S, et al. Flexible Thermochromic Window Based on Hybridized VO₂/graphene [J]. *ACS Nano*, 2013, **7**(7): 5769–5776.