

## 航天光学遥感器指向镜用胶选择

刘 强,何 欣,张 峰

(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:** 航天光学遥感器指向镜的稳定性对提高图像几何精度起着至关重要的作用,而指向镜的胶粘剂决定了指向镜的指向稳定性,首先分析了遥感器对指向镜高稳定性指向的使用要求,然后对航天中常用的三种胶粘剂进行了全面对比,结合指向镜的实际使用要求,选择了 HY914 和 SE-14-80 两种胶粘剂进行粘接应力比较,通过为这两种胶粘剂制定合理的固化工艺路线,在相同的条件下进行了胶粘前后指向稳定性试验验证,试验结果表明,采用特定的固化工艺,使用 SE-14-80 粘接剂的指向镜粘接前后指向偏差约为 1",是航天光学遥感器指向镜胶粘剂的最优选择。鉴于其优异的粘接性能,此胶粘剂已在某在研项目中应用。

**关键词:** 指向镜; HY914; SE-14-80; 指向稳定性; 固化工艺

**中图分类号:** TH122    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)S-0183-05

## Choice of adhesive applying in pointing prism for aerospace optics remote sensor

Liu Qiang, He Xin, Zhang Feng

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

**Abstract:** The stability of space remote pointing mirror plays a vital role in improving image geometric accuracy, and it is determined by adhesives. First of all, the requirement of remote sensor to pointing mirror's stability was analyzed in this paper. Then the three commonly used for aerospace adhesive were compared comprehensively. Combining with the actual requirements of pointing mirror, HY914 and SE-14-80 adhesives were chose to compare the stress of glue bonding. By setting a reasonable curing process for both adhesives, and under the same conditions, the pointing stability was examined before and after the test verification. Experimental results show that with the specific curing process, the pointing error of pointing mirror using SE-14-80 adhesive was 1" before and after bonding, and SE-14-80 is more suitable for use in bonding in space optical remote sensor pointing mirror. Given its excellent adhesion, this adhesive is applied in a research project.

**Key words:** pointing prism; HY914; SE-14-80; pointing stability; curing process

收稿日期:2014-10-08; 修订日期:2014-11-10

基金项目:中国科学院三期创新工程(074Z3JN70)

作者简介:刘强(1981-),男,博士,主要从事空间光学遥感器结构设计、光学装调等方面的研究。Email:liudequ @126.com

## 0 引言

光学遥感器指向镜的稳定性是光学遥感图像几何精度的重要保证,图像的几何精度由卫星姿态控制、星敏感器与遥感器的指向镜确定<sup>[1]</sup>,卫星姿态的确定,首先要通过星敏感器测量得到星敏测量坐标系在惯性坐标系中的姿态,然后通过星敏测量坐标系与自身指向镜的关系转换矩阵、星敏指向镜与遥感器指向镜的安装矩阵以及遥感器指向镜与遥感器坐标系的转换矩阵,求得遥感器坐标系在惯性坐标系中的姿态,最后得出卫星姿态的调整参数<sup>[2]</sup>。可以看出,遥感器的指向镜是姿态确定过程中比较重要的环节,如何粘接光学件与支撑件、选用何种粘接剂、采用何种工艺粘接来保证指向镜的指向稳定度至关重要。

吴国栋<sup>[3]</sup>等介绍了一种测绘相机坐标系与立方镜之间关系的标定方法;黄桂平<sup>[4]</sup>等就星敏感器立方镜与测绘相机立方镜间坐标系转换的标定方法和试验进行阐述,他们提出了有效测试指向镜指向精度的方法,但还没有文章对指向镜的安装进行深入研究,工程实际中,往往指向镜的设计精度、标定精度要求很高(高精度标定可优于 2"),但是由于胶粘剂的选用不当引起的变形指向误差可能会大大超过零件自身精度和标定精度,因此有必要对指向镜的胶粘剂做细致分析和试验验证,总结出比较适合航天遥感器指向镜选用的胶粘剂及固化工艺。针对上述问题,文中从指向镜影响遥感器图像几何精度的角度出发,细致分析了指向镜粘接剂的选取,并选择了合适的胶粘剂固化工艺,通过试验验证所选用胶适合航天光学遥感器的实际工程应用。

## 1 指向镜使用要求分析

相机指向镜坐标系与星敏感器指向镜坐标系的转换矩阵为:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\beta_1 & \cos\gamma_1 \\ \cos\alpha_2 & \cos\beta_2 & \cos\gamma_2 \\ \cos\alpha_3 & \cos\beta_3 & \cos\gamma_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\gamma_1$ 为相机指向镜坐标系 X 轴与星敏感器指向镜坐标系 X 轴、Y 轴、Z 轴的夹角; $\alpha_2$ 、 $\beta_2$ 、 $\gamma_2$ 为相机指向镜坐标系 Y 轴与星敏感器指向镜坐标系

X 轴、Y 轴、Z 轴的夹角; $\alpha_3$ 、 $\beta_3$ 、 $\gamma_3$ 为相机指向镜坐标系 Z 轴与星敏感器指向镜坐标系 X 轴、Y 轴、Z 轴的夹角。

由参考文献[3]可知,指向镜与遥感器的指向偏差测试精度优于 1",因此指向镜的稳定性精度要求应保证在 2"以内才能保证遥感器的几何图像质量。因此设计时在考虑粘接强度的基础上,还要着重考虑粘接后指向镜的偏转角度,以满足遥感器的指向精度要求。

## 2 胶粘剂及固化工艺选择

遥感器指向镜是保证遥感器光轴和星敏感器指向对准的光学元件,因此对保证指向镜指向的胶粘剂提出如下两点要求:

(1) 粘接剂要由足够的粘接力,保证指向镜粘接后在经历力学、高低温试验时不脱落;

(2) 保证粘接后指向镜与星敏感器的光轴指向稳定性。粘接剂的粘接应力对指向稳定性的作用较大,粘接剂固化后残存的粘接应力会在指向镜受到外在热载荷时产生作用,直接破坏指向镜的指向稳定。

由于粘接力的实测数值已经由厂家给出,设计时按要求选用即可,文中主要考虑胶粘前后指向镜的指向稳定性。

### 2.1 不同胶粘剂性能比较

常用航天用的结构胶包括 SE-14-80 和 GHJ-01(Z)、HY914 胶等,表 1 给出了各项参数的对比。

表 1 粘接剂性能对比

Tab.1 Contrast of adhesive performance

Adhesive types	Bonding strength/MPa	Operating temperature range/°C	Curing time (room temperature)
SE-14-80	11-15	-60-80	20 °C/5 h or 25 °C/3 h
GHJ-01(Z)	12-15	-60-80	25 °C/7 d or 40 °C/2 d
HY914	22-25	0-120	25 °C/3 h or 20 °C/5 h

由表 1 中可以看出 HY914 的粘接强度最高,但是考虑到航天遥感器所用的粘接强度超过 10 MPa 即可,同时遥感器的周围温度在 5~25 °C,上述三种

胶粘剂粘接强度及使用温度均可以满足要求;固化时间 GHJ-01(Z)最长, HY914 和 SE-14-80 固化时间较为相近;下面对这三种胶进行详细分析。

三种胶均为双组份,其中 GHJ-01(Z)为光学环氧胶,色泽浅,透明度好,粘度小,其折射率与玻璃相近,因此适合光学玻璃之间的胶合以及光学件与结构件之间的粘接,其性状为液态,流动性好。但对于指向镜的安装方式而言,胶层的厚度很难保证,且拆胶比较困难,因此不能选用。

HY914 粘接剂对金属、陶瓷、玻璃、胶木等材料均具有较好的粘接力。玻璃化温度较高,可用于 60℃ 条件下使用的金属或某些非金属部件小面积快速粘接。但其和 GHJ-01(Z)一样,拆胶困难,且不能用于承受冲击力较大的部件粘接。

SE-14-80 在温度超过 80℃ 时,已经固化的胶具备可拆卸性,这给实际工程应用带来较大便利。

经过以上分析可知,在光学指向镜的用胶选择上, GHJ-01(Z) 不建议使用, HY914 和 SE-14-80 比较适宜。

## 2.2 固化工艺选择

两种粘接剂按照厂家给出均为室温固化,同时提高温度可以加速固化,加速固化带来的副作用是内应力较大;考虑到粘接的固化过程是一个复杂的过程,对于航天传感器来说,在粘接剂的使用过程中,最希望达到固化零应力,进而减小粘接剂在固化过程中产生的内应力对支撑部件的影响,即尽可能地消除残存内应力,从而减小对光学件面形产生影响<sup>[5-6]</sup>。

固化过程分为初固化(凝胶阶段)、基本固化和后固化。而固化过程三要素包括温度、压力、时间,综合考虑工程中的时间要求和一般实验室具有的条件,从可行性角度出发,结合成熟的工程经验和相关资料,并综合考虑 HY914 和 SE-14-80 胶粘剂在室温下的初固化速度,两种胶粘剂均选择了常温常压初固化、常温常压基本固化,真空变温后固化这样一条固化工艺路线<sup>[7-8]</sup>。

具体固化工艺的具体流程如下。

(1) 初固化 室温 20℃, HY914 固化 1h, SE-14-80 固化 3h; (2) 基本固化 室温 20℃, 通风, 固化至 8h; (3) 真空变温后固化 先抽真空至  $1 \times 10^{-3}$  Pa, 在真空环境下经 12h 的温度循环(20~50℃), 后固化完成; (4) 室温 20℃, 静置 12h 后, 粘接剂的固化完成。

## 3 试验验证及讨论

传感器上指向镜的关键是保证指向稳定性,可以通过建模分析或试验得出结果,但由于胶膜较薄,有限元建模分析比较困难,并且得出的结果精度很低,通常工程上对胶的分析主要通过试验来确定;因此针对 HY914 和 SE-14-80 两种胶进行粘接应力试验,重点考察指向镜粘接前后的指向稳定性,从而对两种胶做出选择。

首先需要考虑的是反射镜与镜座之间的间隙大小<sup>[9-10]</sup>,即胶层厚度,由参考文献[9]可知,胶层厚度的计算公式为:

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

式中:  $h$  为胶层厚度;  $L$  为粘接高度;  $a_0$  为反射镜的边长;  $\alpha_0$  为反射镜的热膨胀系数;  $\alpha_c$  为镜框的热膨胀系数;  $\alpha_b$  是弹性胶的热膨胀系数;  $v$  为胶的泊松比。

文中材料选择<sup>[11]</sup>: 镜座的材料为低膨胀系数合金 4J32, 热膨胀系数  $\alpha_c = 0.05 \times 10^{-6}$ , 粘接宽度  $L = 5$  mm; 指向镜材料为 K9 玻璃, 热膨胀系数  $\alpha_0 = 0.21 \times 10^{-6}$ , 外形尺寸为 60 mm × 60 mm; 胶粘剂为 HY914 和 SE-14-80, 热膨胀系数差别不大, 约为  $\alpha_b = 236 \times 10^{-6}$ 。将上述参数代入公式计算胶层厚度, 通过计算得出  $h \approx 0.03$  mm, 从而确定胶层厚度为 0.03 mm。

### 3.1 粘接应力试验

粘接应力的试验过程为: 指向镜与底座未使用胶粘剂粘接时定为工况 1, 此时将指向镜组件(组件含指向镜和底座)安装在试验工装件上(不用粘接剂, 通过柔性压片压紧), 如图 1 所示, 测试指向镜与试验工装件上的基准反射镜间的夹角, 多次记录夹角

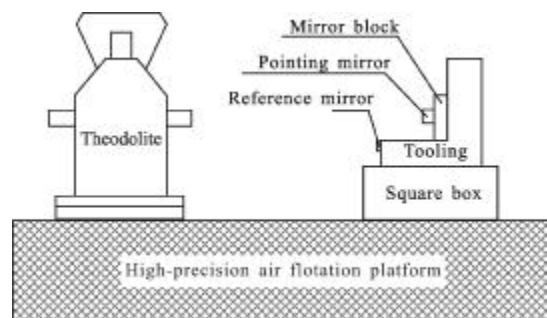


图 1 搭建的精密检测系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of precision measurement system

值;工况 2:指向镜和底座用胶粘剂粘接,室温固化后(约 12 h),测试指向镜与试验工装件上的基准反射镜间的夹角,多次记录夹角值。

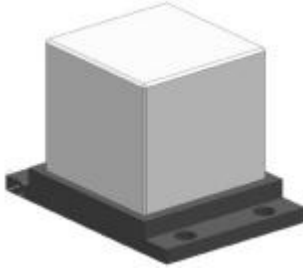


图 2 指向镜示意图

Fig.2 Principle diagram of pointing prism

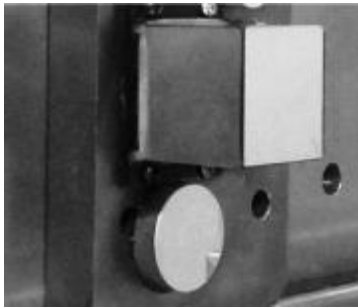


图 3 实物图

Fig.3 Pictorial diagram

### 3.2 试验结论

通过多次测量得出指向镜与基准平面镜的指向角度差值,考察竖直和水平两个方向。两种胶粘剂得出的角度差值分别如表 2 和表 3 所示,每个表格需要比较的是工况 1 与工况 2 的差值。

表 2 SE-14-80 试验结果角度差值对比

Tab.2 SE-14-80 experimentation result

	SE-14-80	Pointing mirror	Reference mirror	$\Delta$
Condition 1	Horizontal	0°0'0"	359°59'46"	14"
	Vertical	89°38'47"	89°41'04"	2'17"
Condition 2	Horizontal	0°0'0"	359°59'45"	15"
	Vertical	89°36'38"	89°38'56"	2'18"

表 3 HY914 试验结果角度差值对比

Tab.3 HY914 experimentation result

	HY914	Pointing mirror	Reference mirror	$\Delta$
Condition 1	Horizontal	359°59'2"	0°0'0"	58"
	Vertical	89°52'17"	89°40'54"	11'22"
Condition 2	Horizontal	359°59'	0°0'3.6"	61"
	Vertical	89°50'20"	89°38'59"	11'21"

试验结果表明, HY914 和 SE-14-80 两种胶选择同样的固化工艺,在试验前后的角度变化值在水平变化和竖直变化比较均匀,但是 HY914 的竖直方向变化较大,多次试验趋势均一致,按轨道高度 500 km 来计算, 遥感器指向镜 1"的变化会带来 2.4 m 地面定位误差<sup>[12]</sup>,指向镜的指向稳定性越高越好,同时 SE-14-80 的粘接能力也足够,因此胶粘剂 SE-14-80 更加适合航天遥感器指向镜的粘接使用。

## 4 结论

航天光学遥感器指向镜的稳定性对提高图像几何精度起着至关重要的作用,而指向镜的胶粘剂对指向镜的指向稳定性起着不可忽视的影响,在航天遥感器的研制过程中不乏因胶粘剂的选用不当导致测试或试验失败的案例,文中通过对 SE-14-80 粘接剂的性能进行详细研究、制定特定的固化路线并通过胶粘试验说明,SE-14-80 粘接剂粘接应力小,指向镜粘接前后指向误差小(指向偏差约为 1"),是适合做为航天光学遥感器指向镜的胶粘剂。正是由于 SE-14-80 粘接剂粘接强度高,配合特定的固化工艺可以实现粘接应力小,并且容易拆胶,因此在航天光学遥感器中各类反射镜的胶粘剂的选择应用上有着比较广泛的前景。

### 参考文献:

[1] Wang Zhi, Wu Guodong. Calibration of transition matrix on cubic prisms in mapping camera and star sensor [J]. Opt Precision Eng, 2012, 20(1): 96-101. (in Chinese)  
王智, 吴国栋. 测绘相机立方镜与星敏立方镜转换矩阵的标定[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(1): 96-101.

[2] Wei Xinguo, Li Yanpeng, Li Jian, et al. Autonomous orientation for LEO spacecraft using multi-FOV star tracker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1812-1817. (in Chinese)  
魏新国, 李延鹏, 李健, 等. 多视场星敏传感器近地轨道自主定位导航方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1812-1817.

[3] Wu Guodong, Song Dan. Calibration of mapping camera and cubic prisms coordinat system [J]. Opt Precision Eng, 2007, 15(11): 1727-1730. (in Chinese)  
吴国栋, 宋丹. 测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(11): 1727-1730.

- [4] Huang Guiping, Qin Guiqin, Ma Kaifeng. Attitude calibration on three-line array CCD camera of space stereo mapping [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2013, 33(4): 17-20. (in Chinese)  
黄桂平, 钦桂勤, 马开锋. 星载立体测绘相机立方镜间姿态标定[J]. *宇航计测技术*, 2013, 33(4): 17-20.
- [5] Zhang Kai, He Xin, Cui Yongpeng. Assembly technology of frame structure of space camera's body [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 91-95. (in Chinese)  
张凯, 何欣, 崔永鹏. 空间相机机身桁架装配工艺[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 91-95.
- [6] Yang Liang, Li Zhaohui, Qiao Ke. Support structure and assembling technique of a space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 91-95. (in Chinese)  
杨亮, 李朝辉, 乔克. 某空间反射镜支撑装调技术[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 91-95.
- [7] Liu Qiang, He Xin. Investigation on solidification technics of pastern in space Mirror [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2011, 31(2): 118-120. (in Chinese)  
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, 31(2): 118-120.
- [8] Zheng Ruiqi. Influence of adhesive thickness for adhibit capability[J]. *Adhinition*, 1990, 11(14): 33-35. (in Chinese)  
郑瑞琪. 胶层厚度对胶接性能的影响[J]. *粘接*, 1990, 11(14): 33-35.
- [9] Paul Mammini, Alison Nordt. Sensitivity evaluation of mounting optics using elastomer and bipod flexures [C]// *Proceedings of SPIE on Optomechanics*, 2003, 5176: 26-32.
- [10] Fan Zhigang, Chang Hong, Chen Shouqian, et al. Design of bonding layer in lens athermal mount [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(11): 2573-2581. (in Chinese)  
范志刚, 常虹, 陈守谦, 等. 透镜无热装配中粘结层的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2573-2581.
- [11] Liu Qiang, He Xin, Zhang Feng, et al. Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount[J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(10): 2229-2236. (in Chinese)  
刘强, 何欣, 张峰, 等. 反射镜无热装配中胶层计算及控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2229-2236.
- [12] Jin Tao, Li Zhen, Li Ting, et al. System design and analysis for improving geometric accuracy of high-resolution optical remote sensing satellite image [J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(8): 1159-1165. (in Chinese)  
金涛, 李贞, 李婷, 等. 提高光学遥感卫星图像几何精度总体设计分析[J]. *宇航学报*, 2013, 34(8): 1159-1165.