

文章编号 2095-1531(2016)06-0704-09

# 长条形空间反射镜无热化胶层的优化设计

李梦庆<sup>1,2</sup>, 张雷<sup>1\*</sup>, 邢利娜<sup>1</sup>, 李宗轩<sup>1</sup>

(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:**为了实现尺寸为1 200 mm × 484 mm的大长宽比长条形空间反射镜的无热装配,减小反射镜面形精度受热应力的影响,本文对环氧胶(GHJ-01(Z))胶层厚度对反射镜面形的影响及胶层在静、动力学载荷下的应力进行了研究。首先,介绍了现有的几种基于胡克定律推导的无热粘结厚度方程及其假设条件,并推导了带有锥度的背部盲孔反射镜无热粘结胶层厚度的方程,得出无热粘结胶层厚度曲线;然后,建立了6种不同胶层厚度的反射镜组件模型并进行了分析与比较。通过分析,在+5℃升温工况下,反射镜胶层厚度为0.07 mm时具有最好的面形精度,其RMS值0.0178λ,其检测方向在自重作用下的面形精度RMS值为0.0173λ,一阶频率为220.17 Hz;最后对胶层无热化设计后的反射镜组件进行了振动试验和粘结剂剪切强度试验,分析与试验表明:反射镜组件一阶频率为216.4 Hz,与有限元分析结果相对误差为1.71%;满足动静刚度要求;同时,在动力学载荷下该厚度胶层的应力均小于其固化后的抗剪强度,安全裕度为2.46;各项指标满足设计要求。

**关键词:**空间反射镜;环氧胶;无热化;有限元分析;静、动力学分析

中图分类号:TH751+.1 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20160906.0704

## Optimization design of athermal adhesive for rectangular space mirror

LI Meng-qing<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1\*</sup>, XING Li-na<sup>1</sup>, LI Zong-xuan<sup>1</sup>

(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)  
\* Corresponding author, E-mail:18686344285@163.com

**Abstract:** In order to realize the athermal assembling of rectangular special mirror with large dimension of 1 200 mm × 485 mm, and reduce the effect of hot stress on primary mirror's surface figure precision, the effect of epoxy thickness on the surface figure accuracy of the mirror and the stress of epoxy under static and dynamic conditions are researched. First of all, several already existing athermal adhesive thickness equations

收稿日期:2016-06-08;修订日期:2016-08-12

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2012AA121502)

Supported by National High-tech R&D Program of China(No. 2012AA121502)

obtained based on Hooke's law are introduced. The athermal adhesive thickness equations of the primary mirror which has blind holes with taper in the back is developed, and the curve of athermal adhesive thickness is obtained. Then six modes of mirror with different adhesive thickness are made. The result of analysis shows that the mirror's RMS are  $0.0178\lambda$  (optical value) and  $0.0173\lambda$  (gravity in detecting's directions) under  $5^\circ\text{C}$  uniform temperature rise when the epoxy thickness is 0.07 mm. Finally, vibration tests of mirror components and drawing test of epoxy are conducted. Analysis and experiment results indicate that its first order frequency is 216.4 Hz and the error between them is 1.71%. The maximum stress of epoxy under dynamic conditions is smaller than the shear strength which is 30.2 MPa, obtained through drawing test of Epoxy, and the safety margin is 2.46. All indicators meet the design requirements.

**Key words:** space mirror; epoxy adhesive; athermalization; finite element analysis; static and dynamic analysis

## 1 引言

随着空间对地观测技术的不断发展,对空间反射镜的要求也越来越高。为了满足大视场和高分辨率的需求,反射镜的尺寸也相应地不断增大,这对粘结剂的性能提出了更高的要求。光学环氧胶(GHJ-01(Z))具有粘接强度大、收缩率小(一般小于2%)、耐酸碱有机溶剂和耐腐蚀性,并且易除气泡,在室温条件下可以固化,使用方便以及毒性刺激较小等优点,特别是出色的介电性能和尺寸稳定性能使之成为目前国内较为理想的一种光机系统粘接用胶<sup>[1-3]</sup>。

长条形空间反射镜一般采用背部盲孔式支撑,反射镜通过粘结剂与镶嵌件粘接,然后镶嵌件与柔性支撑件通过螺钉固定,构成反射镜组件。在外界温度载荷作用下,反射镜、镶嵌件及胶粘剂的热膨胀系数不匹配致使反射镜组件内部产生热应力,从而使反射镜的面形精度变差,严重影响光学系统的成像质量<sup>[4]</sup>。

借助以消除径向应力为目标的无热化设计,可以通过选择合适的粘结剂和粘结厚度实现热应力最小化甚至消除热应力。Baryar<sup>[5]</sup>首先提出无热化粘结厚度问题,并推导了粘结厚度的求解方程,随后一些文章对此进行了研究,并推导了一系列无热化粘结厚度解析方程,包括改进的Baryar方程、Van Benzooijen等<sup>[6-7]</sup>。德国Claudia Reinlein等人研究了胶层无热化设计在微光机电变形反射

镜(DM)的应用<sup>[8]</sup>。Oleg Vlasenko与Alexey Zverev等人<sup>[9]</sup>研究了在热载荷下不同厚度的DP-190胶对大孔径反射镜的影响,并最终将胶层体积收缩比减少到三分之一,得到较好的面形值。中科院长春光机所关英俊等人研究了粘结位置、胶层宽度和胶层厚度对面形误差和离焦误差的影响。但在胶层厚度对长度达1.2 m量级且背部带有锥度盲孔的反射镜组件的影响方面,均未做出系统的研究。

本文研究的 $1\ 200\ \text{mm} \times 484\ \text{mm}$ 大长宽比反射镜是截止目前国内公开报道最大的长条形空间反射镜。该反射镜尺寸较大,轻量化设计后反射镜质量超过50 kG,它的盲孔和镶嵌件采用带有相同锥度的设计。该反射镜的支撑结构设计要比小型长条镜和圆形孔径反射镜更具有挑战性。光学设计对该反射镜提出的光学性能指标为:反射镜在 $+5^\circ\text{C}$ 均匀温变载荷和自重工况下面形精度满足 $PV \leq \lambda/10$ ,  $RMS \leq \lambda/50$  ( $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ );同时要求反射镜组件基频不低于150 Hz。本文首先介绍了改进的无热化粘结厚度方程,并推导了长条形空间反射镜采用该环氧胶固化后无热化胶层厚度的计算公式,求解出最小应力下胶层厚度曲线,得到最优胶层厚度和最优反射组件模型;然后分析了最优反射镜组件模型在热载荷和重力载荷工况下的面形精度;最后通过动力学分析,研究了动力学条件下胶层的应力情况。分析表明,这种胶层厚度优化之后的反射镜组件设计满足光学成像系统的设计要求。

## 2 基础理论

无热化胶层厚度设计的思路是消除粘接件之

$$\begin{Bmatrix} \sigma_\theta \\ \sigma_r \\ \sigma_z \\ \tau_{\theta r} \\ \tau_{rz} \\ \tau_{z\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{\theta r} \\ \gamma_{rz} \\ \gamma_{z\theta} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中,  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{\theta r}$ 、 $\tau_{rz}$ 、 $\tau_{z\theta}$  分别为6个方向上的应力;  $\nu$ 、 $E$ 、 $G$  分别为泊松比、杨氏弹性模量和剪切弹性模量;  $\varepsilon_\theta$ 、 $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_z$ 、 $\gamma_{\theta r}$ 、 $\gamma_{rz}$ 、 $\gamma_{z\theta}$  分别为6个方向上的应变。

由此可知径向应力可以表示为:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu)\varepsilon_r + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_\theta) \right]. \quad (2)$$

由式(2)可知, 径向应力的大小与胶层在3个方向(径向、轴向和切向)上的应变有关, 即与胶层所受到的约束条件相关。胶层在径向被约束在反射镜与镶嵌件之间, 其径向应变与粘结厚度直接相关, 因此容易得到, 但是轴向和切向的应变需要通过一定的假设条件获得<sup>[10]</sup>。径向应变  $\varepsilon_r$  是径向偏差  $\delta_h$  的函数, 径向偏差定义为温度变化时不受约束的厚度变化与实际厚度变化之差, 即:

$$\delta_h = h\alpha_h\Delta T - [(r_0 + h)\alpha_c\Delta T - r_0\alpha_0\Delta T]. \quad (3)$$

所以径向应变为:

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_h}{h} = \Delta T \left[ \alpha_b - \alpha_c - \frac{r_0}{h}(\alpha_c - \alpha_0) \right], \quad (4)$$

式中,  $\alpha_0$ 、 $\alpha_b$ 、 $\alpha_c$ 、 $h$  和  $r_0$  分别为反射镜热膨胀系数、粘结剂热膨胀系数、镶嵌件热膨胀系数、胶层厚度和镶嵌件半径。

## 3 胶层厚度的数学建模

粘结剂用于反射镜和镶嵌件之间, 粘接位置

间的径向应力, 因此求解过程中重点关注径向应力的表达式。三维线性材料的应力应变关系如式(1)所示:

如图1所示。

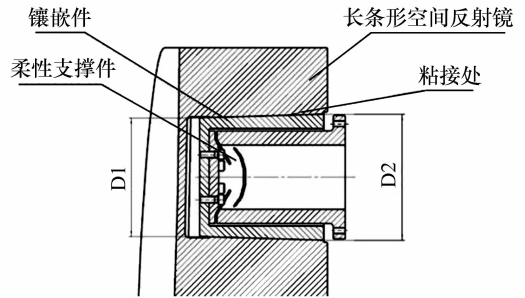


图1 粘接零部件结构图

Fig. 1 Sketch of bonded parts

由式(4)可以看出径向应变与镶嵌件半径有关, 但是由于反射镜背部盲孔及其镶嵌件带有锥度, 因此半径值  $r$  不是一个固定值, 而是关于粘接宽度  $H$  的函数, 记为  $r(H)$ , 且径向应力和轴向应力的方向分别垂直于圆锥面和平行于圆锥面。取

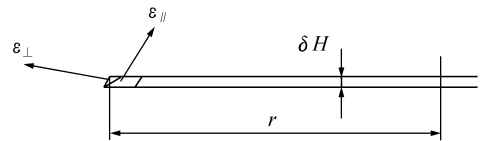


图2 胶层应力示意图

Fig. 2 Diagram of adhesive stress of epoxy layer

某一半径下  $\delta H$  厚度的粘结件, 如图2所示, 那么方程式(2)可以表示为:

$$\sigma_\perp = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu)\varepsilon_\perp + \nu(\varepsilon_\parallel + \varepsilon_0) \right], \quad (5)$$

式中,  $\sigma_{\perp}$ 、 $\varepsilon_{\perp}$ 、 $\varepsilon_{//}$ 、 $\varepsilon_0$  分别等同于半径为  $r$  时的径向应力、径向应变、轴向应变和环向应变。同样, 方程(4)可以表示为:

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\delta_h}{h} = \Delta T \left[ \alpha_b - \alpha_c - \frac{r}{h} (\alpha_c - \alpha_0) \right]. \quad (6)$$

Baryar 方程忽略了轴向和切向约束效应, 轴向和切向的应变为 0; 改进的 Baryar 方程假设轴向和切向应变等于粘接层在这两个方向上的膨胀, 两者都有明显的局限性; 最终, Van Bezooilen 方程改进了前两者的假设, 使用反射镜和镶嵌件热膨胀的平均值作为粘接层在加热条件下的约束条件<sup>[10]</sup>。

即:

$$\varepsilon_0 = \left( \alpha_b - \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{2} \right) \Delta T, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{//} = \left( \alpha_b - \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{2} \right) \Delta T. \quad (8)$$

对于完全圆周粘结, 粘接层在环向是连续和封闭的, 可以认为在这个方向上粘接层的膨胀或者收缩完全被反射镜和镶嵌件的膨胀或收缩所约束, 这样方程式(7)能表示该方向上的应变关系。但是, 在平行于锥面上的方向上胶层并没有完全被约束, 方程式(8)不能很好地反映平行于锥面方向上的应变关系。

文献[10]假设在两端自由表面中间的胶层自由膨胀或收缩, 而与粘接件接触的胶层受到两者膨胀的约束。此时, 粘接层在加热条件下的约束尺寸由粘接件的自由热膨胀共同决定, 通过 3 次求平均值获得, 即粘接层的约束尺寸为:

$$D = \frac{H\alpha_0\Delta T + H\alpha_b\Delta T}{4} + \frac{H\alpha_c\Delta T + H\alpha_b\Delta T}{4}, \quad (9)$$

$$h = \frac{r(H)(\alpha_c - \alpha_0)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{\nu}{1-\nu} \left[ \left( 2 - \frac{h}{2H} \right) \alpha_b - \frac{3}{4} (\alpha_c + \alpha_0) \right]}. \quad (13)$$

从式(13)可以看出, 随着  $r(H)$  的取值不同, 胶层厚度  $h$  的值也不尽相同。使用的环氧胶 GJH-01(Z) 属性参见表 1, 则无热化胶层厚度  $h$  的变化如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 在  $r(H)$  的取值范围为 [50 mm, 53 mm] 之间,  $h$  的值是单调递增的, 根据

即:

$$\varepsilon_{//} = \frac{\delta H}{H} = \frac{1}{H} \left( H\alpha_b\Delta T - \frac{H\alpha_0\Delta T + H\alpha_b\Delta T}{4} + \frac{H\alpha_c\Delta T + H\alpha_b\Delta T}{4} \right). \quad (10)$$

空间反射镜粘结层的实际厚度一般控制在 0.03 ~ 0.25 mm<sup>[11]</sup>, 这主要是为了避免两个极端情况: 当胶层厚度较薄时, 难以形成连续的胶膜降低了粘接强度; 当胶层较厚时, 胶层中缺陷密度上升、固化程度不均、高弹性模量金属对胶层的约束强化作用下降、内应力情况较为复杂等问题, 使得粘接强度下降<sup>[12]</sup>。对于这种厚度较薄的胶层, 其与反射镜和镶嵌件粘接的位置会受到它们的约束, 而胶层的中心位置处即不完全自由也不完全受到反射镜和镶嵌件的约束。假设粘接层在其两端的自由端面附近、与厚度尺寸相等的区域内不受约束, 其余区域皆受到约束, 设粘接层的厚度为  $h$ , 那么胶层自由面的轴向自由膨胀尺寸也是  $h$ , 于是方程(8)可以改进为:

$$\varepsilon_{//} = \frac{\delta H}{H} = \frac{1}{H} \left( H\alpha_b\Delta T - \frac{H\alpha_0\Delta T + (H-2h)\alpha_b\Delta T}{4} + \frac{H\alpha_c\Delta T + (H-2h)\alpha_b\Delta T}{4} \right), \quad (11)$$

即:

$$\varepsilon_{//} = \Delta T \left( \alpha_b - \frac{h}{2H} \alpha_b - \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{4} \right). \quad (12)$$

将式(6)、(7)、(12)代入式(5), 可得无热粘结厚度的方程为:

方程(13), 可求得胶层厚度  $h$  的取值范围为  $h \in [0.0719, 0.0762]$ , 即无热化胶层在盲孔内部体现为上端薄下端厚的梯形环形状。由于最小、最大胶层厚度值相差甚小, 为了简化分析模型, 统一取  $h = 0.07$  mm 为最优胶层厚度。

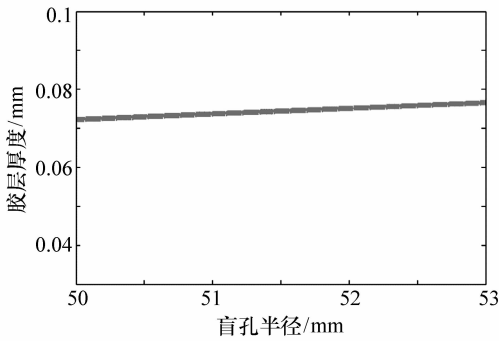


图3 胶层厚度随盲孔半径变化图

Fig. 3 Adhesive's thickness change as radius of blind hole

## 4 热、重力载荷下的面形分析

### 4.1 有限元模型及材料属性

图4为长条形空间反射镜的装配剖视图,反射镜采用轻量化设计,镶嵌件通过环形胶层与反射镜相粘接。

反射镜材料为碳化硅(SiC),该材料具有自身重力影响变形小、强度高、反射率高等优良性能,是制造反射镜的理想材料<sup>[13]</sup>;镶嵌件为钢材(4J32),柔性支撑件为钛合金(TC4),结构粘结剂为环氧胶(GHJ-01(Z)),材料系数如表1所示。

表1 材料属性参数

Tab. 1 Material property parameters

	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$\alpha/(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$\nu$
SiC	$3.05 \times 10^{-6}$	$3.30 \times 10^5$	2.7	0.27
4J32	$8.10 \times 10^{-6}$	$1.41 \times 10^5$	2.4	0.25
Epoxy	$1.22 \times 10^{-6}$	158.62(20 °C)	72( $\geq 20$ °C)	0.495
TC4	$4.40 \times 10^{-6}$	$1.09 \times 10^5$	9.1	0.34

为了减小分析误差,根据有限元理论使用体单元描述材料特性应至少用三层体单元来反应胶层真实的应力应变关系<sup>[14-15]</sup>。为了验证上节推导的无热粘接厚度方程的正确性,并比较不同胶层厚度对反射镜面形的影响,利用 Hypermesh 建立6种反射镜组件的有限元模型,分别为胶层厚0.05、0.06、0.07、0.08、0.09和0.10 mm的三层胶层单元的反射镜组件模型。

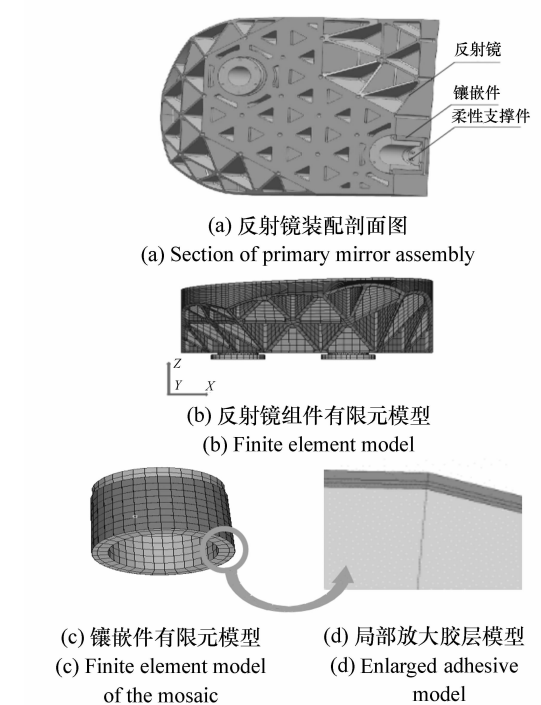


图4 (a)反射镜装配剖面图;(b)反射镜组件有限元模型;(c)镶嵌件有限元模型;(d)局部放大胶层模型

Fig. 4 (a) Section of primary mirror assembly; (b) finite element model; (c) finite element model of the mosaic; (d) enlarged adhesive model

### 4.2 热载荷下的应力与面形精度分析

由于反射镜、镶嵌件和胶层的材料不同,热膨胀系数有所差异,在温度变化的情况下反射镜组件内部会产生热应力和热应变,从而最终导致镜面面形精度的变化。本文分析了温度均匀变化+5 °C时(参考温度20 °C),不同模型中粘结处的应力以及各镜面的面形精度。采用3.1提出的6种模型,并利用 MSC Patran/Nastran 进行热分析

并得到各反射镜粘接位置的最大热应力值,利用最小二乘法原理,将得到的6组数据拟合二次曲线,如图5所示。从图5可以看出,最小热应力的胶层厚度在0.07~0.08 mm之间,从而验证了上节中无热粘结厚度方程的正确性。图6为胶层厚0.07 mm时反射镜在+5℃工况下的热应力云图。

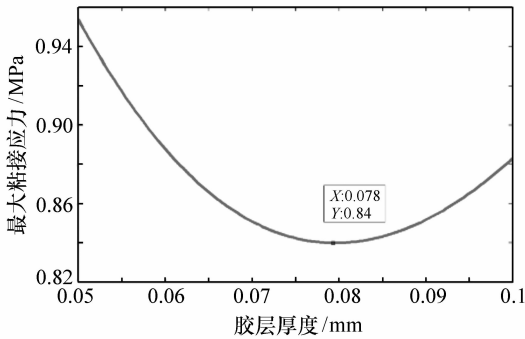


图5 不同反射镜模型粘接处最大应力拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of the maximum stresses in different mirror mode

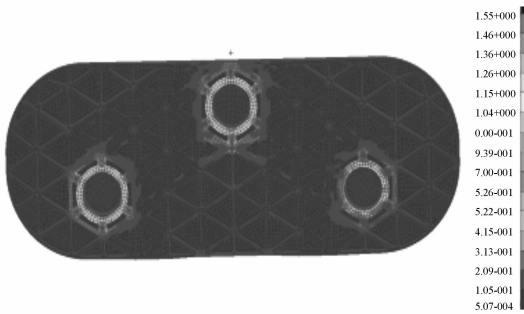


图6 胶层厚0.07 mm的反射镜热应力云图

Fig.6 Stress nephogram of mirror with 0.07 mm adhesive

联合 MSC Patran 和 Sigfit 两种软件,可以得到不同模型在+5℃工况下镜面的面形。图7为反射镜 RMS 在不同胶层厚度下的变化曲线。图8为胶层厚0.07 mm时的反射镜面形图。从图7可以看出,具有最小反射镜面形误差的胶层厚度为0.075 mm,与上节理论推导的结果几乎一致,这也从反射镜面形精度的角度验证了该理论的正确性。由于胶层厚度非常薄,在工程中0.07 mm厚的胶层要比0.075 mm厚的胶层更容

易获得,同时胶层厚0.07 mm的反射镜 RMS 值的计算结果为0.0178λ,也满足光学系统成像要求,所以取0.07 mm作为胶层最优厚度。

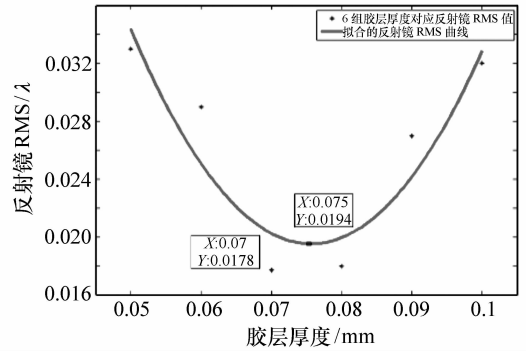


图7 不同胶层厚度反射镜 RMS 的拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of primary mirror's RMS with different adhesive thicknesses

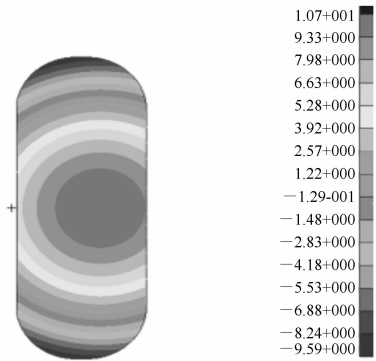


图8 胶厚0.07 mm的反射镜在热载荷下的面形图

Fig.8 Cloud chart of primary mirror's surface figure with 0.07 mm adhesive

### 4.3 重力面形分析

空间相机所处的运载和运行环境条件非常复杂,为了在复杂的环境条件下保证相机的成像质量,要求相机具备良好微重力环境适应性<sup>[16]</sup>。表2为最优胶层厚度的反射镜分别在3个方向重力场下的面形值。从表2可以看出,在X、Y向的反射镜面形要优于λ/50,达到设计指标;然而Z向重力场下的RMS值为0.0355λ,超过了设计指标,但鉴于本反射镜组件采用光轴水平方向(受Y向重力)进行检测和装调,可以不将Z向自重作用下的面形RMS值作为硬性的考核指标<sup>[17]</sup>,说明该模型具有较好的静态结构刚度。

表2 反射镜在重力场下的分析结果

Tab.2 Analysis results of mirror under gravity

	X向	Y向	Z向
RMS	0.006 2 $\lambda$	0.017 3 $\lambda$	0.035 5 $\lambda$
PV	0.026 8 $\lambda$	0.084 3 $\lambda$	0.164 3 $\lambda$

#### 4.4 动力学分析

##### 4.4.1 模态分析

通过 MSC Patran/Nastran 对优化后的模型进行模态分析。表3为优化后反射镜组件的模态分析结果。图9为前三阶阵型图。从表3可以看出,反射镜组件基频为220.17 Hz,满足结构设计要求,说明该优化模型具有较好的动态刚度。

表3 反射镜组件的模态

Tab.3 Mode of primary mirror assembly

阶数	频率/Hz	振型
1	220.17	反射镜绕Z轴摆动
2	246.56	反射镜绕Y轴摆动
3	253.05	反射镜沿Y向振动

##### 4.4.2 动力学分析

在卫星的试验、运输和发射过程中,相机会受到比较恶劣的振动冲击,这就要求反射镜组件具有良好的动态特性,特别是胶层的应力不能超过粘结剂的粘接强度,不出现疲劳破坏。通过有限元分析软件来仿真振动试验条件,因此需要分析优化后反射镜中胶层在正弦和随机载荷下的应力。表4为反射镜组件中胶层在3个方向的峰值应力和最大应力。从正弦和随机振动工况下的应力分析结果可以看出,胶层正弦峰值应力和最大随机应力都发生在Z向,分别为12.3 MPa和8.6 MPa。

表4 反射镜组件中胶层的峰值应力和最大应力

Tab.4 Peak and maximum stress of epoxy in the primary mirror assembly

	X向	Y向	Z向
正弦峰值应力/MPa	9.2	10.9	12.3
最大随机应力/MPa	5.1	6.9	8.6

## 5 试验验证

### 5.1 反射镜组件振动试验

由于碳化硅反射镜毛坯制作和加工周期较长,制造加工成本高昂,为了在反射镜的结构设计早期验证反射镜组件是否满足刚度和强度要求,并验证有限元分析的准确性,设计并加工了与碳化硅反射镜相同质量和相同质心位置,且具有一致结构拓扑形式的铝质反射镜,其余零件结构和材料不变。对反射镜组件进行了动力学振动试验,表4为随机振动试验的力学条件。

表5 随机振动试验的力学条件

Tab.5 Mechanical condition of random vibration test

频率范围/Hz	功率谱密度/ ( $g^2 \cdot Hz^{-1}$ )	总均方根 值/(gRMS)
10 ~ 60	+3.0 dB/oct	8.2
60 ~ 200	0.12	
200 ~ 300	↘	
300 ~ 800	0.04	
800 ~ 2 000	-6.0 dB/oct	

图10为反射镜组件振动试验现场。图11为Y向随机试验前的0.2 g扫频曲线,一阶频率为216.4 Hz;与有限元分析结果的相对误差为1.71%,这也验证了有限元分析的准确性;图12为反射镜Y向随机振动的加速度响应曲线,加速度放大倍率为2.01,满足设计要求;随后进行了0.2 g扫频,一阶频率为216.4 Hz,表明反射镜组件满足动态强度要求。

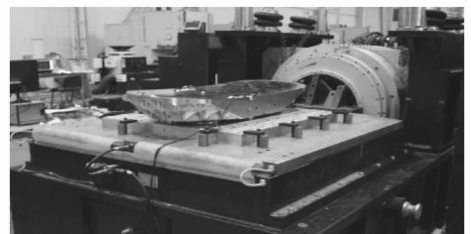


图10 反射镜组件振动试验现场

Fig.10 Scenes of mirror components' vibration test

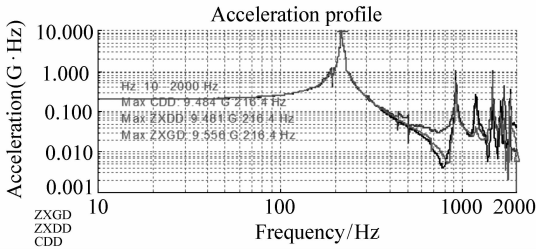


图 11 Y向随机试验前的0.2 g扫频曲线

Fig. 11 0.2 g sweep curve of Y direction before random vibration test

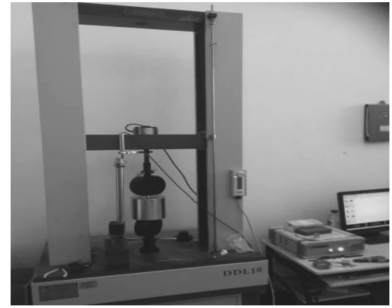


图 13 粘结剂(GHJ-01(Z))粘接镶嵌件的拉伸试验

Fig. 13 Tensile test of the glue(GHJ-01(Z)) bonding the inlay of mirror component

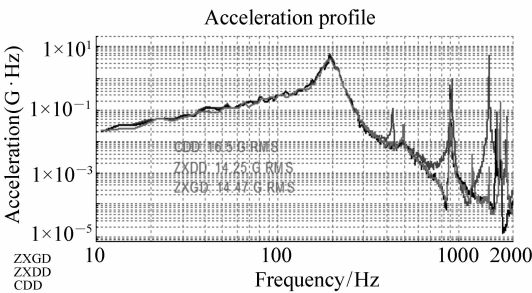


图 12 反射镜Y向随机振动的加速度响应曲线

Fig. 12 Acceleration response curves of mirror in Y direction

## 5.2 粘结剂(GHJ-01(Z))抗剪强度试验

为了保证反射镜组部件在恶劣的条件下具有较高的安全性,粘结剂(GHJ-01(Z))必须要有足够的安全裕度。图13为粘结剂的剪切试验现场,试验中的粘结件与反射镜中镶嵌件具有相同的粘接形状和尺寸。通过万能试验机对固化后的粘结剂进行拉伸试验,通过实验测得该厚度的环形胶层固化后的抗剪强度为30.2 MPa。分析与试验表明:该反射镜组件中环形粘结剂的抗剪强度大于正弦和随机条件下胶层的峰值应力,安全裕度为2.46,粘接强度满足设计要求。

## 参考文献:

- [1] 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,2011,2:118-120.  
LIU Q, HE X. Investigation on solidification technics of pastern in space mirror[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2011, 2:118-120. (in Chinese)
- [2] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册[M]. 第8卷,第二版. 北京:中国标准出版社,443-445.  
Editorial Committee of Aeronautical Materials of China. *Aeronautical Materials Handbook of China*[M]. Volume 8, second edition. Beijing: Chinese Standard Press, 443-445. (in Chinese)

## 6 结论

本文介绍了现有的几种胶层无热粘结厚度的方程及其假设条件,并对带有锥度盲孔的长条形反射镜的无热胶层厚度进行了推导,得出最优胶层厚度为0.07 mm;分析了+5℃温升工况下各模型的应力分布及镜面面形精度,得出胶层厚0.07 mm时反射镜面形精度最优,这与理论推导的结论一致;对胶层厚度优化后的反射镜组件进行了有限元分析,分析结果表明,在+5℃温升和Y向重力作用下,反射镜面形RMS分别为0.0173λ和0.0178λ,满足光学性能指标。对胶层无热化设计后的反射镜组件进行振动试验,测得一阶频率为216.4 Hz与有限元分析的一阶频率相对误差为1.71%,满足系统对反射镜组件提出的动态刚度的指标要求,并且,随机振动前后反射镜组件一阶频率无变化,表明其具有良好的结构强度。正弦和随机条件下胶层最大应力为12.3和8.6 MPa,均小于试验测得环形胶层固化后30.2 MPa的抗剪强度,具有较高的粘接安全裕度。本文所提出的背部带锥度的盲孔最优胶层厚度设计方案对同类型反射镜的胶层设计具有借鉴。

- [3] 肖艳. 环氧树脂分类、应用领域及市场前景[J]. 化学工业, 2014, 32(9): 19-24.  
XIAO Y. Classification, Application field and Market prospect of Epoxy[J]. *Chemical Industry*, 2014, 32(9): 19-24. (in Chinese)
- [4] RYABOV V M. Analysis of thermal stress and deformation in elastically bonded optics[J]. *SPIE*, 2007, 6665: 66650K.
- [5] BARYAR M. Lens barrel opto-mechanical design principles[J]. *Optical Engineering*, 1984, 20(2): 181-186.
- [6] 辛宏伟, 关英俊, 李景林, 等. 大孔径长条反射镜支撑结构的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1560-1567.  
XIN H W, GUAN Y J, LI J L, *et al.*. Design of support for large aperture rectangular mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1560-1567. (in Chinese)
- [7] HERBERT J J. Techniques for deriving optimal bond lines for athermal bonded mounts[J]. *SPIE*, 2006, 6288: 62880J.
- [8] PENG X, VIEGAS J. Silicon photonics athermal Mach-Zehnder interferometer with wide thermal and spectral operating range[J]. *SPIE*, 2015, 9367: 936715-7.
- [9] VLASENKO O, ZVEREV A, SACHKOV M. Using the DP-190 glue for adhesive attachment of a large space mirror and its rim[J]. *SPIE*, 2015, 915131: 1-6.
- [10] VUKOBRATOVICH D, FETTERHOFF K A, MYERS J R, *et al.*. Bonded mounts for small cryogenic optics[J]. *SPIE*, 2000, 4131: 228-239.
- [11] 范志刚, 常虹, 陈守谦, 等. 透镜无热装配中粘接层的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2573-2581.  
FAN ZH G, CHANG H, CHEN SH Q. Design of bonding adhesive in lens athermal mount[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2573-2581. (in Chinese)
- [12] 赵伶丰, 白光明. 复合材料胶接头分析研究[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(6): 393-396.  
ZHAO L F, BAI G M. Analysis and research of the composite adhesive joints[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, 24(6): 393-396. (in Chinese)
- [13] 邵亮, 杨飞, 王富国, 等. 1.2 m 轻量化 SiC 主镜支撑系统优化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 229-234.  
SHAO L, YANG F, WANG F G, *et al.*. Design and optimization of supporting system for 1.2 m lightweight SiC primary mirror[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 229-234. (in Chinese)
- [14] 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): 2229-2235.  
LIU Q, HE X, ZHANG F, *et al.*. Calculation and control of adhesive adhesive in reflector athermal mount[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2229-2235. (in Chinese)
- [15] 赵鹏, 吴清文, 卢镔, 等. 航天相机主镜热特性研究[J]. 光学精密工程, 1997, 5(6): 64-68.  
ZHAO P, WU Q W, LU E, *et al.*. Study on the thermal characteristics of the space camera reflector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(6): 64-68. (in Chinese)
- [16] 刘磊, 马军, 郑玉权. 空间微重力下离轴三反相机离焦范围[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 320-325.  
LIU L, MA J, ZHENG Y Q. Defocus range of off-axis three-mirror anastigmat (TMA) camera under space microgravity [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 320-325. (in Chinese)
- [17] 关英俊, 辛宏伟, 李志来, 等. 大口径空间反射镜组件结构设计与分析[J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 777-782.  
GUAN Y J, XIN H W, LI ZH L, *et al.*. Structural design and analysis of large aperture mirror subassembly[J]. *Laser and Infrared*, 1997, 5(6): 64-68. (in Chinese)

#### 作者简介:



李梦庆(1985—),男,内蒙古通辽人,硕士研究生,2011年于武汉大学获得学士学位,主要从事长条形空间反射镜轻量化及消热化设计方面的研究。E-mail: limengqing10000@163.com



张雷(1982—),男,山东菏泽人,副研究员,2003年于东北大学获得学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间遥感器的结构设计与分析方面的研究。E-mail: 18686344285@163.com