空间相机反射镜组件的胶结技术

郭骏立[1,2],安 源[1],李宗轩[1],李 凯[1,2]

(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:为了保证口径为 ϕ320 mm 的反射镜粘胶前后面形精度变化较小,同时组件的动静态刚度满足使用要求,对空间相机反射镜的胶结技术进行了研究。首先,得出了六条均布粘胶和沿芯轴外环全粘胶两种粘胶方案的具体参数,并采用有限元的方法对两种方案进行了静刚度分析与光学性能分析;其次,在反射镜裸镜面形为 0.030λ(λ=632.8)时,分别检测了采用这两种粘胶方案装配后反射镜的面形精度;最后,对反射镜组件进行了振动试验。分析与试验表明:采用六条均布粘胶方案装配后,进行振动试验组件完好无损,测得一阶频率为 144.194 Hz,与有限元分析相对误差为 1.23%,动静态刚度满足需求,同时对比外环全粘胶反射镜面形精度提高了 13.5%。结果显示六条粘胶方案更适用于 ϕ320 mm 反射镜组件的粘结。

关键词:胶结技术; 反射镜组件; 胶层分布; 胶层厚度; 有限元
中图分类号:TH122 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0313002

Bonding technique of mirror components in space camera

Guo Junli[1,2], An Yuan[1], Li Zongxuan[1], Li Kai[1,2]

(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: In order to ensure the surface form precision of a mirror whose caliber is ϕ320 mm changes as small as possible before and after bonding, while static and dynamic stiffness of the mirror components meet the requirements, bonding technique of primary mirror in space camera was studied. Firstly, specific bonding parameters of six bonds and round bonds were achieved. Then, the finite element analysis for two bonding options was carried out to analyze static stiffness and optical properties. Finally, when the mirror′s surface form precision was 0.030λ (λ=632.8), the surface form precision of the mirror was tested. Besides, vibration test of mirror components was conducted. Analysis and experiment results indicate that after using six bonds option to assemble the mirror components, its first order frequency is 144.194 Hz and static and dynamic stiffness meet the requirements. Compared to round bonds option, the surface form precision of the mirror improves 13.5%. This results mean that the six bonds option is better for

收稿日期:2015-07-06; **修订日期**:2015-08-10
基金项目:国家 863 计划(2012AA121502)
作者简介:郭骏立(1991-),男,硕士生,主要从事空间相机结构设计与分析方面的研究。Email:junli_guo@yeah.net
导师简介:安源(1980-),男,研究员,硕士生导师,博士,主要从事空间遥感器结构与机构设计方面的研究。Email:any@ciomp.ac.cn

bonding the mirror whose caliber is near ϕ320 mm.

Key words: bonding technique; mirror components; distribution of glue layer; thickness of glue layer; finite element analysis

0 引 言

当前,在高精度空间相机反射镜的设计中,开始广泛采用胶结的方式来替代传统的机械紧固连接。粘胶剂在固化时会产生收缩应力，在温度变化时会产生不同程度的热应力，这些应力将会直接影响反射镜面形的优劣，从而影响整个相机系统的成像质量,因此,反射镜的胶结技术已成为空间相机领域的关键技术之一[1]。

杨亮[2]等人通过粘结剂的选择、粘胶厚度和最小粘结面积的确定以及反射镜柔性支撑的设计来减小装配应力对反射镜的影响，最终确定了一种支撑结构底部三处扇形区域均布粘胶的粘胶方案。董得义[3]等人的研究成果表明,对镶嵌件进行局部开豁口(六处均布),将镶嵌件与反射镜进行六处均布粘胶,并在高温下固化,相比于不开豁口的方案,能够减小胶层固化过程中的收缩力对反射镜面形的影响。

文中对口径为 ϕ320 mm 的反射镜进行了胶结技术的研究。首先总结了粘胶剂的选用原则并依此原则选择了合适的粘胶剂；其次推导了两种工程实践中常用的胶层分布的热应力公式，计算了对应的无热应力的胶层厚度；最后通过有限元仿真和试验对两种粘胶方案进行了对比分析，得出了一种适合文中空间相机反射镜的粘胶技术。

1 反射镜组件的特点

空间相机反射镜的支撑方式可分为背面支撑、周边支撑和中心支撑三类。背面支撑主要为多点支撑,多运用于大口径反射镜的支撑。周边支撑多用于中小口径的反射镜支撑。中心支撑多用于单拱形反射镜的支撑,它由中心部位的芯轴进行支撑,其主要运用于中小口径反射镜的支撑。

该空间相机的反射镜为单拱形反射镜，面形精度为 0.020λ,口径为 ϕ320 mm,属于小口径反射镜,同时反射镜为中心开孔通光的设计，所以采用中心支撑方式较为合理,反射镜组件结构如图 1 所示。反射镜的材料为微晶玻璃,支撑结构的材料为铟钢。

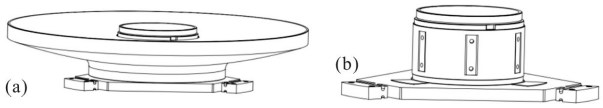


图 1 反射镜组件和支撑结构

Fig.1 Mirror components and support structure

2 胶结方案

反射镜组件由反射镜与其支撑结构胶结而成,胶结方案一般包括粘胶剂的选择、胶层分布、胶层厚度、固化工艺等。

2.1 粘胶剂选择

粘胶剂在固化时会产生收缩应力，在温度变化时会产生不同程度的热应力，为了使粘胶剂的使用对反射镜面形的影响降到最低,同时不影响系统的正常工作,在选用粘胶剂时应遵循以下原则[2-3]:(1) 所选用的粘胶剂必须具有较高的剪切和拉伸强度,以满足光机系统的力学性能要求;(2) 粘胶剂有适当的流动性，方便反射镜与支撑结构的粘结;(3) 粘胶剂固化完毕后应该具有较好的弹性，以便降低收缩应力和热应力对反射镜面形的影响;

当前,空间用胶一般采用环氧胶,采用环氧胶粘结反射镜组件时,将具有较大的粘结力与剪切强度,粘结可靠,但由于粘结应力大,会导致粘结后反射镜面形超差,工程上通过将反射镜组件粘结后,带着支撑结构精加工反射镜面形来解决这一问题。由于该空间相机有批量化生产的需求，所以制定的反射镜组件装配的技术路线是先加工反射镜,使其面形精度达到 0.020λ,然后进行组件粘结,并保证反射镜组件粘结前后,面形值的变化在 5%以内,所以不宜选用环氧胶。

该项目采用的粘胶剂为上海橡胶研究所研制的 RTV D04 硅橡胶,该粘胶剂具有较好的力学性能和适当的流动性，能够满足使用和装配要求。除此之外,D04 硅橡胶具有较低的弹性模量,将能有效的减小收缩应力和热应力，从而能更好地保证反射镜的面形并提高反射镜组件的温度适应性。

2.2 胶层分布与厚度参数设计

图 2 为一般透镜组件装配结构示意图，根据 Bayar 等人[4]对于透镜无热化装配的研究表明，光学元件在粘结过程中，胶层的厚度将对光学元件的面形精度的优劣有着直接影响，通过合理设计胶层的厚度，将可以减小甚至消除温度变化所产生的热应力，从而提高光学元件的温度适应性，减小温度对光学元件面形的影响。

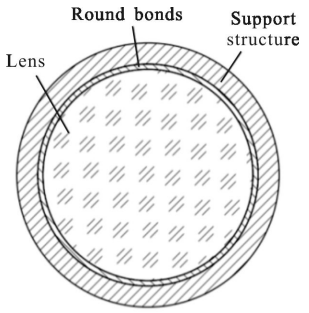


图 2 一般透镜组件装配结构示意图

Fig.2 Sketch map of ordinary lens components′ assembly drawing

他们的研究对象仅是四周环带全粘胶的透镜组件，对于以其他形式分布的胶层没有进行研究。但在工程实践中，其它形式分布的胶层又是经常使用的方案，例如沿芯轴外环均匀分布的三条胶层或六条胶层，所以有必要对胶层的分布形式进行研究。文中将研究沿芯轴外环全粘胶和六条胶层均匀分布两种胶层的分布方案，比较两种粘胶方案(为了方便叙述，将沿芯轴外环均匀分布六条胶层的方案称为方案一，将沿芯轴外环全粘胶的方案称为方案二)的优劣。两种胶层分布方案的结构示意图如图 3 所示。

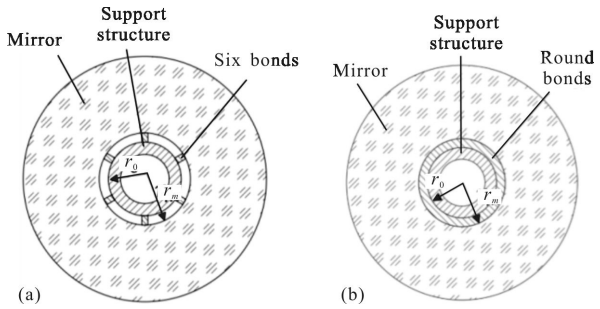


图 3 方案一和方案二

Fig.3 Option one and option two

2.2.1 方案一的胶层厚度计算

粘胶剂固化完成后，可以近似地将其当各向同性线弹性材料来处理，对于各向同性线弹性材料，用应变表示的本构方程为：

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

式中：E 为弹性模量；μ 为泊松比；ε_r、ε_z、ε_θ 分别为径向应变、切向应变和轴向应变。

对于方案一来说，当温度变化 ΔT 时，由于胶条之间存在较大的间隙，并且胶条的宽度较小，可以认为胶层在切向做自由膨胀，即：

$$\varepsilon_\theta=0 \tag{2}$$

而对于温度变化时，胶层在轴向的膨胀，根据范志刚[5]等人对透镜周边支撑方案下胶层轴向应变的推导，可以类比得到本中心支撑方式下，胶层轴向的应变：

$$\varepsilon_z=\Delta T\left(\frac{\alpha_R}{2}-\frac{\alpha_0+\alpha_m}{4}\right) \tag{3}$$

式中：ΔT 为温度的变化量；α_0、α_R、α_m 分别为柔性支撑结构、粘胶剂、反射镜的热膨胀系数。

径向应变 ε_r 定义为胶层厚度的变化量 Δh 与 h 的比值，而 Δh 为温度变化时不受约束的厚度变化与实际厚度变化之差，由简单的几何关系易知：

$$\Delta h=\Delta T\alpha_R h-(\Delta T r_0\alpha_0-\Delta T r_m\alpha_m) \tag{4}$$

$$\Delta h=\Delta T[(\alpha_R+\alpha_m)h-(\alpha_0-\alpha_m)r_0] \tag{5}$$

式中：r_0、r_m 分别为柔性支撑结构芯轴外径和反射镜的内径。由此可得径向应变：

$$\varepsilon_r=\frac{\Delta h}{h}=\Delta T\left[\alpha_R+\alpha_m-\frac{(\alpha_0-\alpha_m)r_0}{h}\right] \tag{6}$$

将公式(3)、(6)代入公式(1)可以得到在六条粘胶方案中，胶层厚度为 h，温度变化 ΔT 的情况下，反射镜受到的热应力为：

$$\sigma_r=\frac{E\Delta T(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}\left[\alpha_R+\alpha_m-\frac{(\alpha_0-\alpha_m)r_0}{h}+\frac{\mu}{1-\mu}\left(\frac{\alpha_R}{2}-\frac{\alpha_0+\alpha_m}{4}\right)\right] \tag{7}$$

该方案中 r_0=80 mm，反射镜的材料为 Zerodur，柔性支撑结构材料为 4J32，胶层参数为 RTV D04，它们的材料参数如表 1 所示。

表 1 反射镜组件材料参数表

Tab.1 Parameters of mirror components material

Material	Thermal expansion coefficient (10^{-6} ℃)	Poisson′s ratio	Modulus/MPa
Zerodur	0.1	0.24	90 600
4J32	0.65	0.25	141 000
D04	236	0.4	8

令温度变化量 ΔT=1 ℃、2 ℃、3 ℃，作出方案一的应力-胶层厚度曲线图如图 4 所示，从图中可以看

出热应力随着胶层厚度从 0.01 mm 变化到 0.5 mm，是先减小后增大，随后趋于稳定。当胶层厚度等于 0.14 mm 时，在一定范围内，不管温度大小如何变化，反射镜所受到的热应力均为零。

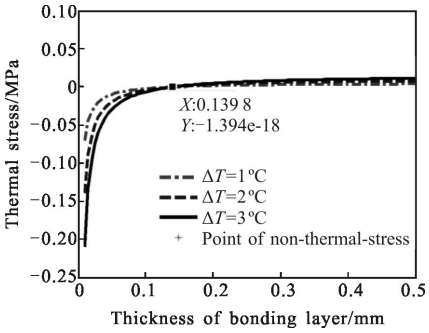


图 4 ΔT 为 1 ℃、2 ℃、3 ℃时，热应力随胶层厚度变化曲线

Fig.4 When ΔT is 1 ℃, 2 ℃, 3 ℃, thermal stress vs thickness of bonding layer

由于方案一为六条均布胶层，在确定胶层厚度后，还需确定每条胶层的宽度，才能完全确定该粘胶方案。根据 Yoder[6]等人对反射镜粘胶面积的计算方法，可得最小粘结面积 $Q_{\min}$ 为：

$$Q_{\min}=\frac{Wa_g f_s}{J} \tag{8}$$

式中：W 为光学元件的重量；a_g 为最恶劣条件下的加速度系数；f_s 为安全系数；J 为粘结区的剪切强度。该方案中，W 为 5.1 kg；a_g 为 400 g；f_s 为 2；J 为 3 MPa，胶条的长度为 32 mm，带入数据容易得到该粘胶方案的胶层宽度为 7.08 mm，为方便结构设计，取 8 mm。

2.2.2 方案二的胶层厚度计算

对于芯轴外环全粘胶的方案，此时轴向和径向将不再是自由膨胀，根据 Van Bezooijen[7]，范志刚等人的研究成果，可以假设轴向和切向的应变为：

$$\varepsilon_z=\Delta T\left(\frac{\alpha_R}{2}-\frac{\alpha_0+\alpha_m}{4}\right) \tag{9}$$

$$\varepsilon_\theta=\Delta T\left(\alpha_R-\frac{\alpha_0+\alpha_m}{2}\right) \tag{10}$$

则在胶层厚度为 h，温度变化 ΔT 的情况下，反射镜受到的热应力为：

$$\sigma_r=\frac{\Delta TE(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}\left[\alpha_R+\alpha_m-\frac{(\alpha_0-\alpha_m)r_0}{h}+\frac{\mu}{1-\mu}\left(\frac{3\alpha_R}{2}-\frac{3(\alpha_0+\alpha_m)}{4}\right)\right] \tag{11}$$

采用与方案一相同的分析方法，不难得出当胶层厚度 h=0.09 mm 时，在一定范围内，不管温度大小如何变化，反射镜所受到的热应力均为零。综上可得两种粘胶方案如表 2 所示。

表 2 反射镜组件粘结的两种方案

Tab.2 Two options of bonding mirror components

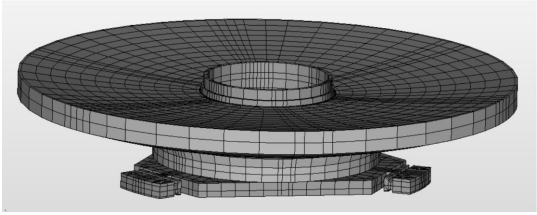
Features	Option one	Option two
Adhesive's material	D04	D04
Distribution of bonded layer	Six bonds	Round bonds
Thickness of bonded layer/mm	0.14	0.09
Width of bonded layer/mm	8	–

3 仿真分析

为了对比分析两种粘胶方案对反射镜面形的影响，以及粘结后反射镜组件结构的性能，利用 MSC NASTRAN 软件建立了有限元模型，并进行了模态分析和面形分析。

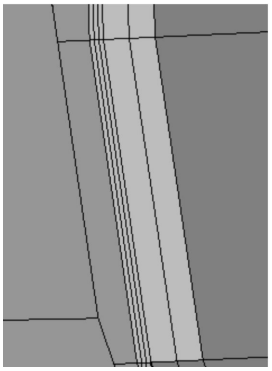
3.1 有限元模型建立

在有限元建模中，反射镜和主镜芯轴都采用了各项同性材料模拟。根据 Gregory J.Michels、韩旭等人[8-9]的研究表明，将胶层当做各向同性材料，同时把胶层在厚度方向划分三层网格单元，可以近似地模拟出胶层的性能，文中有限元建模将采用这一方法。方案一与方案二的有限元模型基本一致，文中只给出方案一的有限元模型如图 5 所示。



(a) 组件的有限元模型

(a) Finite element model of mirror components



(b) 胶层局部放大图

(b) Enlarged figure of adhesive layer

图 5 反射镜组件有限元模型

Fig.5 Finite element model of mirror components

3.2 模态分析

分别分析两种方案下的模态，其主振方向一阶固有频率如表3 所示。

表 3 主振方向一阶固有频率

Tab.3 First-order natural frequency of main vibration direction

Direction	Six bonds/Hz	Round bonds/Hz	Design requirement/Hz
X	146.09	168.89	≥120
Y	146.16	168.89	≥120
Z	250.09	260.36	≥200

根据表 3，方案一与方案二的基频均满足设计要求。

3.3 面形分析

文中对胶结技术展开研究的主要目的是为了得到一种使反射镜在粘结前后面形精度变化较小的粘胶方案，所以对两种不同的粘胶方案，分别进行了重力载荷、温度载荷以及两者共同作用下反射镜面形精度分析。由于采取热控措施后对反射镜组件的温控范围为 18±4 ℃，即反射镜组件的工作温度范围为 18±4 ℃，所以对反射镜组件进行分析时，参考温度选为 18 ℃，温度载荷选为稍显严苛的温升 5 ℃，分析结果如表 4 所示。

表 4 重力载荷和温度载荷作用下两种粘胶方案的反射镜 RMS 值

Tab.4 Mirror′s RMS of two bonding options under temperature and gravitational distortion

Load	Six bonds RMS/nm	Round bonds RMS/nm	Relative value
G_x	5.60	6.90	18.84%
G_y	5.34	6.68	20.06%
G_z	3.65	4.64	21.33%
ΔT=5 ℃	1.08	2.36	54.23%
G_x+5 ℃	5.96	7.52	20.74%
G_y+5 ℃	5.59	7.33	23.74%
G_z+5 ℃	4.61	5.96	22.65%

分析结果表明，在重力载荷作用、重力载荷与温升 5 ℃共同作用下，方案一和方案二的反射镜面形精度均小于设计要求的 0.020λ，但方案一的反射镜面形精度优于方案二。在温度升高 5 ℃时，方案一的面形精度比方案二的高 54.23%，这是因为方案一六条均布的胶层在保证粘结强度的同时，将具有更多的空间膨胀释放热应力，从而具有更好的温度适应性。

4 试验验证

4.1 反射镜面形精度检测

用于试验的反射镜裸镜面形精度为 0.030λ，分别将反射镜组件按照方案一和方案二进行粘结，待其固化完毕后，进行面形检测，检测的场所为光学检测与装调的超净间，其室温恒定在 19 ℃。

图 6 为使用 Zygo 干涉仪进行反射镜面形精度检测试验装置。

图 6 反射镜面形检测

Fig.6 Detection mirror′s RMS

图 7 为方案一固化完毕后，用 Zygo检测反射镜面形的结果，图 8 为方案二固化完毕后，用 Zygo 检测反射镜面形的结果。方案一的反射镜面形精度为 0.032λ，方案二的为 0.037λ，方案一的反射镜面形值

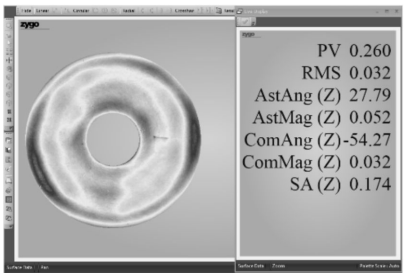


图 7 方案一的反射镜面形检测结果

Fig.7 Mirror′s RMS of option one

优于方案二的面形值 13.5%，很明显，这一数值低于有限元仿真所得到的 18.84%、20.06%、21.33%，这并不能说明有限元分析不合理，因为实际加工的镜子的面形不可能达到理论上的曲面，计算相对误差时，实测的面形值要大于仿真计算，分母变大，所以面形值的相对百分比要低一些。从有限元分析和试验检

测中,可以得到一个共同的结论:方案一的反射镜面形值优于方案二的面形值。因此,在两种方案均满足反射镜组件的力学性能要求的情况下,该项目采用方案一的粘胶方案。

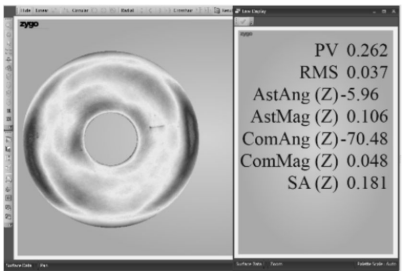


图 8 方案二的反射镜面形检测结果

Fig.8 Mirror′s RMS of option two

该项目对反射镜的设计要求为面形精度达到 0.020λ,为了验证方案一在此面形精度下的性能,将反射镜裸镜的面形精度加工到 0.020λ,采用方案一粘结固化完毕后,检测反射镜面形值,其 RMS 为 0.021λ,变化 5%,满足使用要求。

4.2 动力学试验

为了考量反射镜组件的力学性能,并验证有限元分析的正确性,按照整星给出的力学试验条件进行了振动试验,图 9 为反射镜组件振动试验现场,表5 为随机振动试验的力学条件。

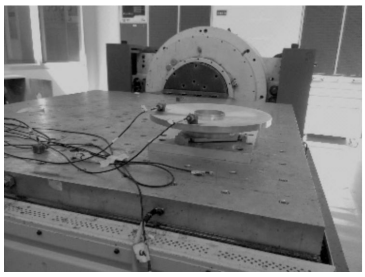


图 9 反射镜组件振动试验现场

Fig.9 Scenes of mirror components′ vibration test

表 5 随机振动试验的力学条件

Tab.5 Mechanical condition of random vibration test

Frequency range/Hz	Power spectral density/$g^2\cdot Hz^{-1}$	RMS acceleration/g
20-150	+3 dB/oct	
150-280	0.04	
280-320	0.15	
320-380	0.10	7.19
380-850	0.05	
850-1 000	0.02	
1 000-2 000	0.005	

该次试验沿光轴以及与光轴垂直正交的三个方向分别做了随机振动试验,并在试验前后进行了 0.1 g 的扫频,检测反射镜组件是否损坏。图 10 为 X 向随机试验前的 0.1 g 扫频曲线,图 11 为 X 向随机试验后的 0.1 g 扫频曲线。对比两图可知,两者的曲线走向和高低点基本一致,这表明反射镜组件经过振动试验后结构依然完好,采用方案一粘结的反射镜组件的动静态刚度满足使用需求,其一阶频率为 144.194 Hz,与仿真结果的相对误差为 1.23%,这也佐证了有限元分析的正确性。

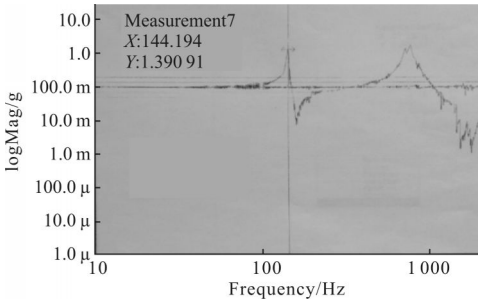


图 10 X 向随机试验前的 0.1 g 扫频曲线

Fig.10 0.1 g sweep curve of X direction before random vibration test

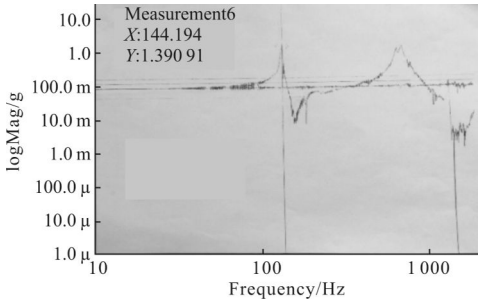


图 11 X 向随机试验后的 0.1 g 扫频曲线

Fig.11 0.1 g sweep curve of X direction after random vibration test

5 结 论

为了保证口径 ϕ320 mm 的反射镜粘胶前后面形精度变化尽量小,同时组件的动静态刚度满足使用要求,文中确定了六条均布粘胶和沿芯轴外环全粘胶两种粘胶方案的具体参数,并通过有限元仿真和试验的手段对两种方案进行了对比分析。分析与试验表明:反射镜组件采用六条均布胶层方案粘结后,进行振动试验组件完好无损,测得一阶频率为 144.194 Hz,与有限元分析相对误差为 1.23%,组件的动静态刚度满足性能要求;另外对比采用外环全

粘胶方案粘结对反射镜面形精度提高 13.5%(此时反射镜面形精度为 0.030λ),当反射镜裸镜面形加工到 0.020λ 后，检测反射镜组件的面形精度为 0.021λ。变化为 5%,满足使用要求。因此,该项目将采用六条均布粘胶方案,该方案对口径 ϕ320 mm 左右的反射镜组件的粘胶方案提供了一定的参考,并为粘胶方案的设计提供了一种有效的分析方法。

参考文献:

[1] Tan Jinguo, He Xin, Fu Liangliang. Support technique in centre of minitype mirror [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(6): 1070-1074. (in Chinese)
谭进国, 何欣, 付亮亮. 小型反射镜中心支撑技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1070-1074.

[2] Yang Liang, Li Zhaohui, Qiao Ke. Support structure and saaembling technique of a space mirror [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(12): 3277-3282. (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, 2013, 42(12): 3277-3282.

[3] Dong Deyi, Li Zhilai, Li Ruigang, et al. Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface[J]. ***Opt Precision Eng***, 2014, 22(10): 2698-2707. (in Chinese)
董得义, 李志来, 李锐刚, 等. 胶层固化对反射镜面形影响的仿真与试验[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(10): 2698-2707.

[4] Bayar M. Lens barrel optomechanical design principles[J]. ***Optical Engineering***, 1981, 20(2): 181-186.

[5] Fan Zhigang, Chang Hong, Chen Shouqian. 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. 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.

[6] Paul R Y. Opto-mechanical Systems Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 397-398. (in Chinese)
Paul R Y. 光机系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 397-398.

[7] Vukobratovich D. Bonded mounts for mall mryogenic optics [C]//SPIE, 2000, 4131: 228-239.

[8] Gregory J Michels, Victor L Genberg, Keith B Doyle. Finite element modeling of nearly incompressible bonds[C]//SPIE, 2002, 4771: 287-295.

[9] Han Xu, Wu Qingwen, Dong Deyi, et al. Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror[J]. ***Opt Precision Eng***, 2010, 18(1): 118-125. (in Chinese)
韩旭, 吴清文, 董得义, 等. 室温硫化胶层建模在透镜结构分析中的应用[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1): 118-125.