

文章编号 1004-924X(2014)10-2698-10

胶层固化对反射镜面形影响的仿真与试验

董得义*,李志来,李锐钢,樊延超,张学军

(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:研究了用厚胶层进行光学零件之间的黏结操作时,胶层固化后其收缩力对反射镜面形的影响。首先,分析了胶层固化过程中胶层对光学元件产生拉应力的原理,找到了胶层固化过程中产生收缩力的主要因素。其次,建立了反射镜胶结组件的有限元模型,采用等效热变形法仿真分析了胶层收缩对反射镜面形的影响,分析发现胶层的等效线胀系数不能直接采用收缩率代替,而将材料的收缩率转换为胶层的等效线胀系数后,分析结果与试验结果吻合较好。最后,提出了减小胶层收缩对反射镜面形影响的改进方案。试验结果表明:黏胶方案改进后,胶层固化过程中的收缩力引起反射镜中心区域鼓包的 PV 值从 0.574λ 减小为 0.064λ ,镜面面形均方根值从 0.127λ 减小为 0.038λ ,这些结果显示胶层固化过程中产生的收缩力对反射镜面形的影响得到了显著改善。

关键词:光学元件;反射镜面形;胶层固化;胶层收缩;有限元分析

中图分类号:TQ171.68;TP391.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2698

Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface

DONG De-yi*, LI Zhi-lai, LI Rui-gang, FAN Yan-chao, ZHANG Xue-jun

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

* Corresponding author, E-mail: s200201029@163.com

Abstract: The effect of shrinkage stress induced by adhesive curing on a reflective mirror surface was analyzed when the thick adhesive layer was used to joint optical elements. Firstly, the principle of tensile stress induced by adhesive layer to optical elements during adhesive curing was analyzed and the main factors of generating shrinkage stress were obtained. Then, a finite element model of the reflective mirror set was constructed. The finite element analysis was carried out by using the thermal-to-shrinkage analogy and the thermal modeling tools were used to compute the adhesive curing shrinkage. The curing shrinkage was substituted by low temperature concentration, but the Coefficient of Thermal Expansion (CTE) value of the adhesive could not be taken place by the coefficient of adhesive shrinkage directly. After converting the coefficient of adhesive shrinkage to the equivalent CTE value, the analysis results are accord with the test results. Finally, the improved glue scheme was put forward on the basis of the analysis results. The experiment results indicate that the reflective mirror

收稿日期:2013-10-24;修订日期:2013-11-18.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA7020107)

surface deformation(PV value) has decreased from 0.547λ to 0.064λ , and the RMS value decreased from 0.127λ to 0.038λ . This results mean that the effect of shrinkage stress in adhesive curing processing on the reflective mirror surface has improved greatly.

Key words: optical element; reflective mirror surface; adhesive curing; adhesive shrinkage; finite element analysis

1 引 言

当前,在空间光学遥感器反射镜的设计中,光机工程师越来越青睐于采用胶接的方式替代螺钉、铆钉、压板及其他形式的紧固件来实现金属件与反射镜的连接^[1]。根据胶层厚度不同,可将胶接分为薄胶层连接与厚胶层连接两种方式,胶层厚度小于 0.01 mm 为薄胶层连接,主要用于被连接的金属件材料的线胀系数与反射镜材料的线胀系数非常接近的情况;胶层厚度大于 0.1 mm 的胶接为厚胶层连接,主要用于被连接金属件材料的线胀系数与反射镜材料的线胀系数有一定差别的情况。本文主要对厚胶层连接的胶接方式进行研究。

与传统的紧固方式相比,厚胶层连接方式具有以下明显的优点:

(a)可以根据胶层厚度消热设计公式^[2-3],将线胀系数与光学元件有一定差别的金属件进行胶接,而金属件的热变形不会对反射镜有较大的影响,从而达到消热设计的目的;

(b)对反射镜及金属件连接面的面形精度没有过高的要求,大大降低了对连接件的连接面的加工难度;

(c)可以使连接面的连接应力分布更均匀,并且可以降低连接界面的复杂性,使包装更加紧凑;

(d)连接环节具备一些柔性,在需要承受很高的机械力和要求阻尼的情况下,该特性具有较大的优势。

鉴于厚胶层连接具有以上明显的优势,在某空间光学遥感器反射镜组件的研制过程中,对厚胶层的连接方式进行了尝试。

本文针对反射镜与镶嵌件采用厚胶层进行胶接的过程中出现的问题进行了深入研究,首先对胶层固化过程中由于胶层收缩产生的拉应力的原理进行了分析,其次采用等效热变形法对胶层收缩对反射镜面形的影响进行仿真分析,并通过实

验结果验证了可取的胶层固化方式,最后根据原理分析与仿真分析结果提出了减小胶层收缩对反射镜面形影响的改进方案。

2 问题描述

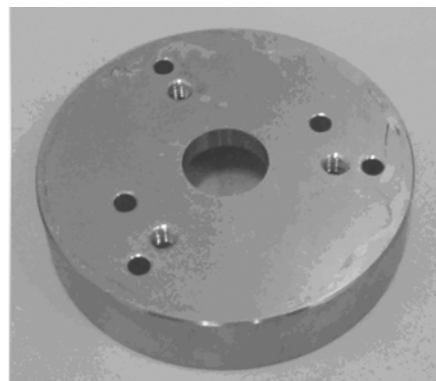
2.1 研究对象

反射镜的设计尺寸为 $300\text{ mm}\times 240\text{ mm}\times 40\text{ mm}$,材料为碳化硅,镶嵌件的材料为殷钢。反射镜与镶嵌件的结构如图 1 所示。



(a)反射镜

(a) Reflective mirror



(b)殷钢镶嵌件

(b) Invar mount

图 1 反射镜与镶嵌件的结构形式

Fig. 1 SiC mirror and invar mount

镶嵌件通过光学结构胶和反射镜的支撑孔黏接在一起,黏接方式如图 2 所示,采用环带黏接方式,胶层厚度为 0.38 mm,这种黏接方式的优点是黏接强度高且结构稳定。

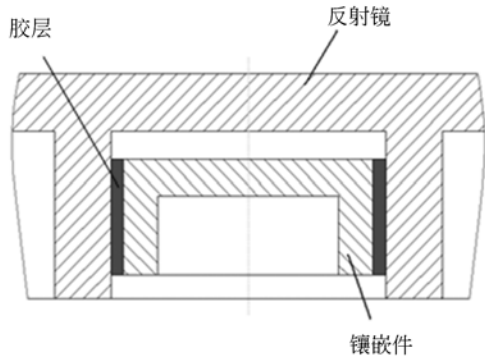


图 2 反射镜与镶嵌件胶结剖面图

Fig. 2 Profile of mirror and mount glued by adhesive

采用 Milbond 光学结构胶^[4],它是一种双组分环氧胶,包括两部分:树脂和硬化剂。该产品成本低,固化后具有较高的拉伸强度、剪切强度以及优良的热性能等优点,主要应用于金属和玻璃的黏接。Milbond 胶使用要求及其固化后典型力学特性如表 1 所示。厂家推荐的胶层厚度为 0.38 mm,Milbond 胶的收缩率主要取决于 TML(Total Mass Loss),为 0.98%。

表 1 Milbond 胶的主要特性

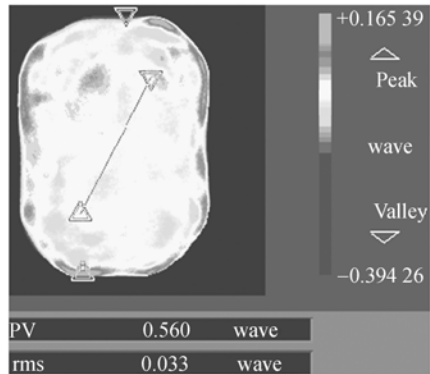
Tab. 1 Principle specifications for Milbond

参数	数值
推荐温度下的固化时间	3 h (71 ℃)
	7 d (20 ℃)
剪切强度/MPa	17.7(−50 ℃)
	14.5(25 ℃)
使用温度/℃	−54~+70
线胀系数/(10 ^{−6} · ℃ ^{−1})	62(−54~20 ℃)
	72(20~70 ℃)
黏接层厚度/mm	0.381±0.025
弹性模量/MPa	592(−50 ℃)
	158.5(20 ℃)

2.2 胶层固化后出现的问题

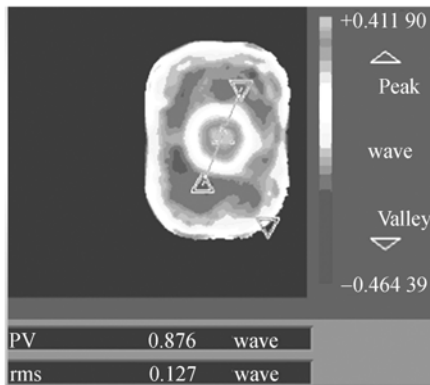
在 71 ℃ 条件下,固化 3 h 后,发现反射镜的面形出现明显变化,镜面面形均方根值从 0.033λ

变化为 0.127λ,检测结果对比如图 3 所示;镜面中心出现明显的鼓包,中心区鼓包的 PV 值由 0.05λ 变化为 0.547λ,检测结果对比如图 4 所示。



(a)黏胶前

(a)Before adhesive curing



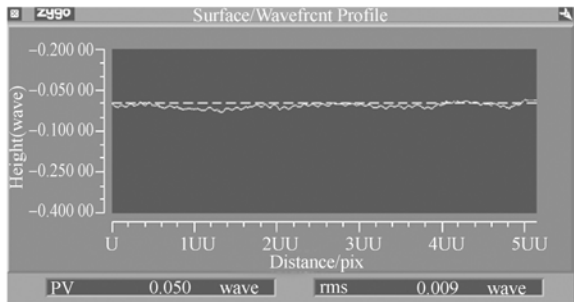
(b)黏胶后

(b)After adhesive curing

图 3 反射镜面形检测结果 RMS 值对比

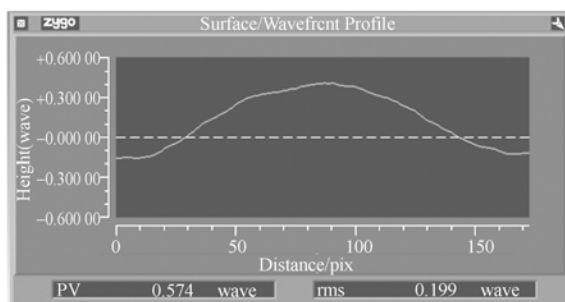
Fig. 3 Contrast of mirror surface RMS values

查阅资料表明^[5],由于气泡收缩、化学反应及物质挥发等原因导致结构胶在固化期间存在收缩现象,光学结构胶的收缩及其由液态转变为固态



(a)黏胶前

(a)Before adhesive curing



(b)黏胶后

(b)After adhesive curing

图 4 镜面 PV 值检测结果对比

Fig. 4 Contrast of mirror surface PV values

后力学特性的变化会导致其内部出现应力,从而导致反射镜镜面形发生变化。

3 原理分析

胶层自由固化模型如图 5 所示,设胶层的厚度为 h ,线收缩率为 γ ,在空气中自由固化,胶层在高度方向收缩量为 Δh 。

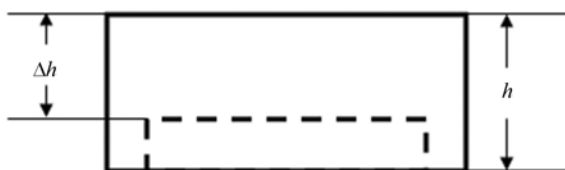


图 5 胶层自由固化的模型

Fig. 5 Model of adhesive cure shrinkage freedom

根据线收缩率的定义可知, $\gamma = \Delta h/h$ 。在胶层自由固化的情况下,由于胶层无障碍伸缩,从一个稳定状态变化到另外一个稳态,因此,在胶层内部的应力为 0。

而在实际的应用中,一般胶层(以 Milbond 光学结构胶为例)要用来连接反射镜(以 SiC 材料为例)与镶嵌件(以殷钢材料为例),其截面形式如图 6 所示。

(a) 不考虑镜头与镶嵌件的变形情况下胶层收缩引入应力的计算公式

由于 SiC 材料的弹性模量为 420 000 MPa,殷钢的弹性模量为 141 000 MPa,胶层固化后在 20 °C 下的弹性模量为 158.5 MPa,与 SiC 材料以及殷钢材料相比,胶层的弹性模量差了 3 个数量级,因此,在分析胶层收缩导致对镜头的拉力的



图 6 胶层典型应用模型

Fig. 6 Typical applied model of adhesive

原理时,可以首先假设 SiC 镜头与殷钢镶嵌件相对于 Milbond 胶层为绝对刚体。

若 Milbond 胶层在固化过程中,要产生厚度为 Δh 的收缩量,但由于镜头以及镶嵌件为绝对刚体,胶层无法收缩,即:胶层不能处于一个稳态,内部要产生拉应力,换言之:由于固化过程中收缩率的存在,胶层要从厚度为 h 的液体稳态变化为厚度为 $h - \Delta h$ 的固态稳态,但镜头与镶嵌件不让胶层收缩,就相当于把厚度为 $h - \Delta h$ 的胶层拉为厚度为 h 的胶层,由于作用力与反作用力原理,导致胶层对镜头与镶嵌件产生拉力。设在镜头与胶层连接面的应力为 S ,根据胡克定律有:

$$S = E_{\text{adhesive}} \times \xi_{\text{adhesive}}, \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量, ξ 为应变,根据应变的定义有:

$$\xi_{\text{adhesive}} = \Delta h/h = \gamma. \quad (2)$$

所以,胶层由收缩导致的对镜头的拉应力就等于胶层的弹性模量与胶在固化中的线收缩率的乘积,公式如下:

$$S = E_{\text{adhesive}} \times \gamma. \quad (3)$$

(b) 考虑镜头与镶嵌件的变形情况下由胶层收缩引入的内应力的计算公式

假设胶层收缩导致的对镜头的拉力为 F ,则镜头上黏胶部分的受力变形如图 7 所示:

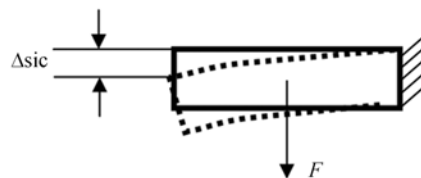


图 7 SiC 镜头黏胶区的的受力变形示意图

Fig. 7 Deformation of SiC mirror

假设镜壁受力部分的局部刚度为 K_{SiC} ,根据胡克定律:

$$\Delta_{\text{SiC}} = F/K_{\text{SiC}}. \quad (4)$$

镶嵌件黏胶部分的受力变形如图 8 所示,

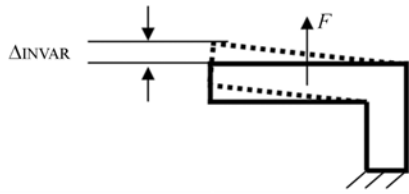


图 8 殷钢镶嵌件镜黏胶区的受力变形示意图

Fig. 8 Deformation of invar mount

假设镶嵌件壁受力部分的局部刚度为 K_{invar} , 根据胡克定律:

$$\Delta_{\text{invar}} = F / K_{\text{invar}}. \quad (5)$$

胶层的变形量为 $\Delta h - \Delta_{\text{SiC}} - \Delta_{\text{invar}}$, 所以胶层内部的应力为:

$$S = E_{\text{adhesive}} \times (\gamma - \Delta_{\text{SiC}} / h - \Delta_{\text{invar}} / h). \quad (6)$$

(c) 分析小结

在不考虑反射镜与镶嵌件变形的情况下, 胶层在固化过程中, 对镜头产生的拉应力与胶层固化后的弹性模量及其固化期间的收缩率成正比, 与胶层厚度无关; 在考虑反射镜与镶嵌件局部变形的情况下, 胶层在固化过程中, 对镜头产生的拉应力不仅与胶层固化后的弹性模量及其固化期间的收缩率有关, 还与镜头的变形量及镶嵌件的局部变形量有一定的关系。

4 仿真分析

4.1 等效热变形法

胶层收缩在物理过程中与物体在低温下的收缩过程相类似, 因此在分析中, 可采用等效热变形法对胶层的收缩对反射镜影响的过程进行仿真分析, 具体过程如下: 将镜头与镶嵌件材料的线胀系数设为 0, 选取合理的胶层的等效线胀系数, 进行 -1°C 均匀温度变形分析, 从而模拟胶层收缩对反射镜及镶嵌件的影响。

4.2 有限元模型

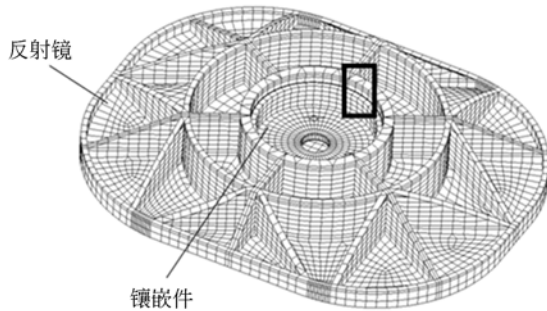
4.2.1 网格划分

在反射镜组件的建模过程中主要考虑以下几点^[6-10]:

(a) 有限元模型按照三维模型构造, 以保证有限元模型与设计结构一致;

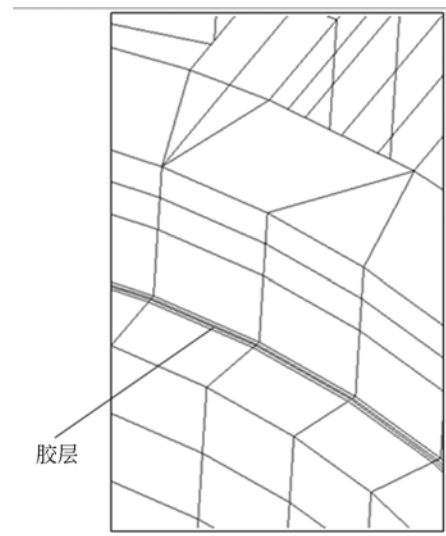
(b) 在关键的力的传递路径上(例如胶层)网格划分较密; 非关键部位网格划分可适当稀疏一些。

分析中采用 MSC/Patran 建模, MSC/Nastran 求解。根据零件结构的特点, 主要采用 8 节点六面体单元对各零件进行有限元网格划分, 个别拐角处采用五面体楔形单元过渡, 胶层在厚度方向划分 4 层单元, 整个组件的有限元模型如图 9 所示。在反射镜组件的有限元模型中共划分了 8 862 个单元, 14 630 个节点。



(a) 组件的有限元模型

(a) Finite element model of mirror set



(b) 胶层局部放大图

(b) Enlarged drawing of adhesive layer

图 9 反射镜组件有限元模型

Fig. 9 Finite element model of reflective mirror set

4.2.2 边界条件

反射镜组件在胶层的固化过程中, 不受任何边界条件的约束, 处于自由状态, 在有限元分析中, 采用增加虚拟辅助的柔性支撑的方式进行模拟。设计一个虚拟的辅助支撑, 与镶嵌件相连, 辅助支撑的弹性模量足够小(比镶嵌件材料的弹性模量小 4 个数量级), 在分析中约束辅助支撑的自

由端面,如图 10 所示,由于辅助支撑的弹性模量足够小,辅助支撑的变形对反射镜组件的影响可以忽略不计,从而达到了模拟反射镜组件处于自由状态的边界条件。

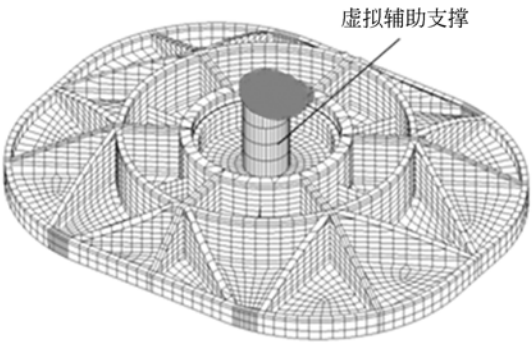


图 10 虚拟辅助支撑及边界条件

Fig. 10 Fictitious mount and boundary conditions

4.2.3 材料属性

根据等效热变形法的要求,在有限元模型中各零件选用材料的主要属性如表 2 所示。

表 2 材料属性表

Tab. 2 Material parameters for reflective mirror structure

名称	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	线胀系数 $\alpha/^{\circ}\text{C}^{-1}$	构件
Milbond	158.5	0.49	0.003	胶层
碳化硅	420 000	0.17	0	镜头
铜钢	141 000	0.25	0	镶嵌件
虚拟支撑	10	0.3	0	虚拟 辅助支撑

4.3 分析结果

在最初的分析中,直接将胶的收缩率(TML)作为胶层的等效线胀系数进行了分析,镜面中心区域 PV 值的分析结果为 1.93λ ,与实测结果 0.574λ 明显不符,说明胶层的等效线胀系数不能直接采用胶的收缩率代替,需要进行转化。

根据胶层收缩率的测试方法可知,厂家提供的胶层收缩率(TML)为体积收缩率,因此在等效热变形分析中,要先将胶层的体积收缩率转化为胶层的等效线胀系数。

图 11 所示为胶层一个体积微元,体积微元 3 个方向的边长分别为 x 、 y 、 z ;设胶层的体积收缩率为 η ,等效线胀系数为 α ;微元在环境温变 Δt 的作用下,3 个方向的变形量分别为 Δx 、 Δy 、 Δz 。

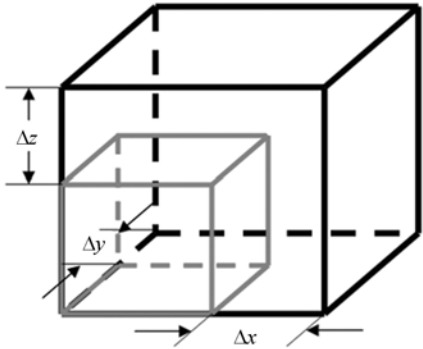


图 11 胶层微元在热变形中的变形示意图

Fig. 11 Sketch of adhesive layer element

根据线胀系数的定义,得:

$$\alpha=\Delta x/x=\Delta y/y=\Delta z/z, \tag{7}$$

根据体积收缩率的定义,可得:

$$\eta=1-\frac{(x-\Delta x) \cdot (y-\Delta y) \cdot (z-\Delta z)}{x \cdot y \cdot z}, \tag{8}$$

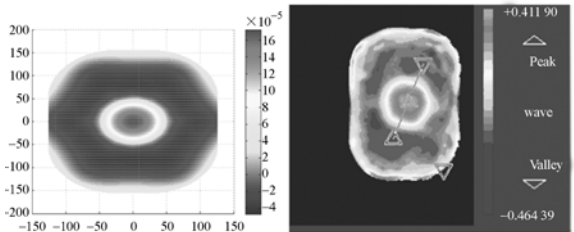
则:

$$\eta=1-(1-\alpha)^3. \tag{9}$$

所以,胶层的等效线胀系数与胶层的体收缩率之间的关系为:

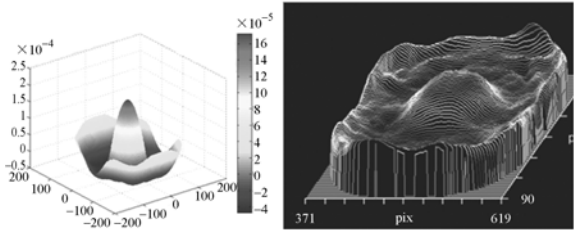
$$\alpha=1-\sqrt[3]{1-\eta}. \tag{10}$$

将胶层的体积收缩率 0.98% 带入式(10),可



(a)俯视图对比

(a)Planform contrast



(b)轴测图对比

(b)Isometric view contrast

图 12 镜面变形分析结果与检测结果对比

Fig. 12 Surface deformation comparison between analysis and test results

以得到胶层的等效线胀系数约为 0.003。将胶层的等效线胀系数修改为 0.003 后,重新分析,镜面去除刚体位移变形分析结果与检测结果对比如图 12 所示。镜面中心鼓包的 PV 值的分析结果与测试结果对比如表 3 所示。

表 3 镜面中心鼓包 PV 值分析结果与测试结果对比

Tab. 3 PV value contrast of analysis and measure results

	测试结果	分析结果
镜面 PV 值/ λ	0.574	0.591

分析结果与试验结果对比表明:

(1) 通过去除刚体位移变形云图与检测结果对比可以看出:分析结果中,镜面的变形形式与测试结果完全相同,说明等效热变形法在原理上没有问题;

(2) 通过镜面中心鼓包 PV 值的分析结果与测试结果对比表明:胶层收缩导致反射镜中心鼓包的 PV 值分析结果为 0.591 λ ,与测试结果 (0.574 λ) 吻合较好。

上述分析结果表明:采用等效热变形法将胶层收缩率转化为胶层的等效线胀系数后,采用有限元法可较为准确地模拟出胶层收缩对反射镜面形的影响。

5 黏胶方案的改进与试验验证

5.1 方案改进分析

根据式 (6) 可知,在胶层固化过程中,影响胶层对反射镜拉应力的主要因素有胶层的收缩量、镜头、镶嵌件黏胶局部的变形量和其他因素。

下面将逐一考虑减小胶层收缩对反射镜面形影响的改进措施。

5.1.1 胶层收缩量

胶的收缩量主要取决于胶在固化过程中的质量损失,胶层的质量损失主要由胶的挥发性所导致,而胶的挥发与固化温度及固化时间相关。

为了验证在胶层固化过程中的环境温度及固化时间对胶层收缩力的影响,对反射镜黏胶后分别进行了在不同温度下的固化试验,其中 a) 与 c) 是 Milbond 胶厂家提供的固化方式:

(a) 环境温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,固化 7 d;

(b) 环境温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,固化 7 d;

(c) 环境温度为 71 $^{\circ}\text{C}$,固化 3 h;

(d) 环境温度为 80 $^{\circ}\text{C}$,固化 3 h。

试验结果表明:

(a) 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下固化 7 d,镜面不会起鼓包,与裸镜相比,镜面的均方根值基本没有变化;

(b) 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下固化 7 d,镜面中心区域会出现鼓包,鼓包的 PV 值为 0.206 λ ,镜面的均方根值在 0.064 λ ,检测结果如图 13 所示;

(c) 在 71 $^{\circ}\text{C}$ 下固化 3 h,镜面中心区域会出现鼓包,鼓包的 PV 值在 0.574 λ ,镜面的均方根值在 0.127 λ ,检测结果如图 14 所示;

(d) 在 80 $^{\circ}\text{C}$ 下固化 3 h,镜面中心区域会出现鼓包,镜面变化量与在 71 $^{\circ}\text{C}$ 下固化 3 h 后的变形量基本相同。

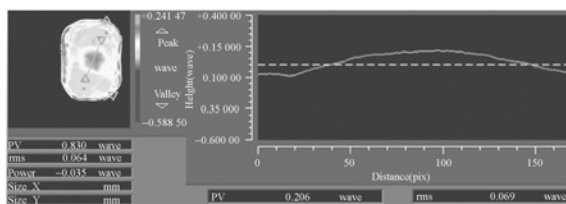


图 13 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下固化 7 d 后的面形检测结果

Fig. 13 Test result after adhesive curing for 7 d at 25 $^{\circ}\text{C}$

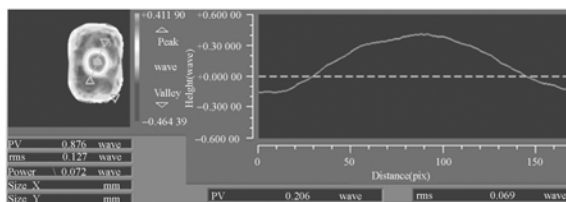


图 14 在 71 $^{\circ}\text{C}$ 下固化 3 h 后的面形检测结果

Fig. 14 Test result after adhesive curing for 3 h at 71 $^{\circ}\text{C}$

根据 4 个温度条件下固化后,镜面鼓包的 PV 值的测量结果,可以得到镜面鼓包 PV 值与固化温度的变化曲线如图 15 所示。

试验结果表明,虽然 (a) 与 (c) 都是 Milbond 胶厂家提供的固化方式,但二者的试验结果却截然不同,Milbond 胶需要在 71 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,固化 3 h 才能够完全固化,胶层的性质才能处于稳态,而在室温条件下,即使固化 7 d 也不能完全固化,而且随着时间的推移还会有变化。

因此,在实际的应用中,不能选择在室温条件

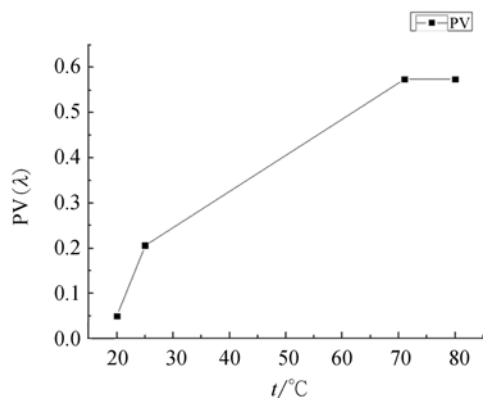


图 15 镜面鼓包的 PV 值与固化温度的变化曲线

Fig. 15 Graph of surface PV value with temperature

下长时间的固化方式,这种方式胶层不能彻底固化,处于非稳定状态,将给反射镜后续使用带来很大的风险。

5.1.2 镜头与镶嵌件的局部变形量

式(6)中, Δ_{SiC} 是镜头黏胶区域的局部变形量,设计的目标是要使镜头上受到的拉应力及由拉应力引起的变形量最小,才能保证镜面上由胶层收缩引起的镜面面形的变化最小;要使 Δ_{SiC} 最小,就要增大 Δ_{invar} (镶嵌件的局部变形),若镶嵌件黏胶局部区域足够柔,胶层的收缩量都被镶嵌件的变形量吸收,那么就起到了保护镜头的作用,因此,只要减小 K_{INVAR} 即可。减小 K_{INVAR} 的措施:在镶嵌件上开豁口,减小镶嵌件的局部刚度;其次,如图 16 所示,将胶层尽可能的黏在镶嵌件的底部,在线量变化一定的情况下,胶层越靠近镶嵌件的底部,角变量就越小,产生的拉应力也就越小。

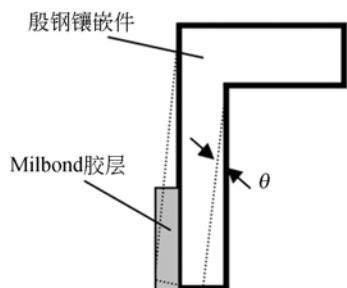


图 16 镶嵌件的角应变与线应变的关系示意图

Fig. 16 Relationship of angle strain and line strain

5.1.3 其他因素

黏胶操作中,对胶层的控制也是影响面形变化的一个重要因素。

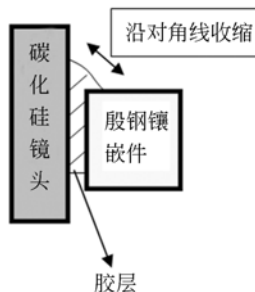
a) 对胶层的黏接面积的控制。由于固化收

缩及温度变化期间,黏接剂的尺寸变化与粘接区的尺寸成比例,所以被黏接的面积不宜太大,可根据最小黏接面积 Q_{min} 的计算公式^[12] 制定黏接面积的大小。

$$Q_{\text{min}} = W a_G f_s / J, \quad (11)$$

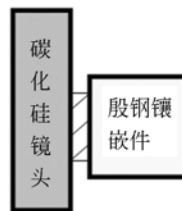
式中: J 为黏结部位的抗剪强度或抗拉强度; W 为光学元件的重量; a_G 为最恶劣条件下的加速度因子; f_s 为安全系数,至少取 2,考虑到黏胶操作中一些不可控的因素,安全系数最大可取到 4。

(b) 对黏接过程中溢出胶的处理^[13]。在使用环氧树脂胶粘接玻璃和刚性材料时,在操作时需要特别小心,确保金属与玻璃结合部周围不会溢出过量的黏结剂,固化期间,溢出的黏结剂在对角线方向的不均匀收缩很容易使镜头形成应力,如图 17(a) 所示,固化期间沿黏接剂对角面形成的体缩很容易牵拉反射镜,从而在光学面上形成鼓包变形。因此,在黏胶操作中,首先要在镶嵌件上涂胶不能涂满,以保证根部不形成溢出量;其次在端面溢出的胶一定要用丙酮擦干净。合理的胶层分布模型如图 17(b) 所示。



(a) 不可接受的胶层分布

(a) Unacceptable adhesive layer distribution



(b) 希望得到的胶层分布

(b) Acceptable adhesive layer distribution

图 17 不能接受与能接受的胶层分布形式

Fig. 17 Unacceptable and acceptable adhesive layer distributions

5.2 黏胶方案的改进设计

分析表明,采用以下两条措施可以减小胶层收缩力对反射镜的影响:

(a) 通过在镶嵌件上开豁口的方式降低镶嵌件的局部刚度;

(b) 根据公式(11),安全系数取 4,计算出需要的最小的黏接面积。

重新设计的镶嵌件的结构形式如图 18 所示,其次在黏胶操作中要严格控制胶层的分布,避免出现胶层溢出的情况。

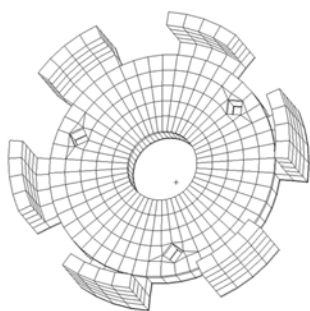


图 18 改进设计后的镶嵌件的结构形式

Fig. 18 New structure of improved invar mount

5.3 试验验证

改进设计后的镶嵌件加工完毕后,与反射镜重新进行了黏接操作,如图 19 所示。

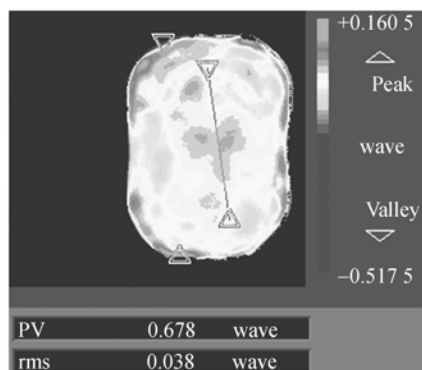


图 19 改进设计后的镶嵌件与反射镜黏胶

Fig. 19 Invar mount rebonded to reflective mirror after improving design

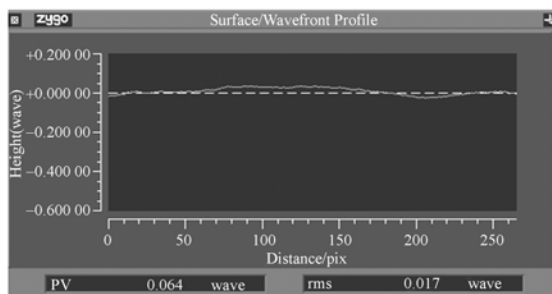
在环境温度为 $71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,固化 3 h 后,镜面面形及镜面中心区域鼓包 PV 值检测结果如图 20 所示。检测结果表明,与改进设计前相比,镜面面形均方根值与中心 PV 值有显著下降。

镜面未黏胶与黏胶方案改进前后,镜面面形检测结果对比如表 4 所示。



(a) 镜面均方根值检测结果

(a) Surface rms value of improved scheme



(b) 镜面中心 PV 值检测结果

(b) Surface PV value of improved scheme

图 20 黏胶方案改进后胶层固化对面形影响的检测结果
Fig. 20 Test results of mirror surface deformation induced by improved curing adhesive

表 4 镜面检测结果对比

Tab. 4 Contrast of surface deformation test results

检测状态	鼓包 PV/ λ	面形 rms/ λ
未黏胶	0.050	0.033
原始黏胶方案	0.574	0.127
新黏胶方案	0.064	0.038

6 结 论

研究了采用厚胶层连接技术进行反射镜与镶嵌件黏接时,胶层固化后产生的收缩力对反射镜面形的影响。首先,从原理上分析了胶层固化过程中,胶层对镜头产生的拉应力的机理,找到了影响胶层收缩力的主要因素;其次,建立了反射镜胶结组件的有限元模型,采用等效热变形法对胶层收缩引入的影响进行了仿真分析,提出了胶层的

收缩率与等效线胀系数的换算关系,使得仿真分析结果与试验结果能够很好的吻合;对环境温度在胶层固化中的影响进行了试验验证,通过对比在不同温度条件下,胶层固化后镜面面形的变化,指出了反射镜在黏胶结束后,应选择在高温条件下进行固化,为该胶在后续的使用提供了参考;最

后,从影响胶层拉应力的主要因素入手,提出了改进黏胶方案。试验结果表明:黏胶方案改进后,胶层固化产生的收缩力对反射镜面形的影响得到显著改善,从而成功地解决了反射镜与镶嵌件在厚胶层连接中,胶层固化过程中的收缩力对反射镜面形有较大影响的技术难题。

参考文献:

- [1] PAUL R Y. 光机系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008:125-127.
PAUL R Y. *Opto-mechanical Systems Design*[M]. Beijing:China Machine Press,2008:125-127.
- [2] HERBERT J J. Techniques for deriving optimal bondlines for athermal bonded mounts[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006,62280J-1:11.
- [3] DOYLE K B. Athermal design of nearly incompressible bonds [J]. *SPIE*, 2002,4771:296-303.
- [4] TIM W. Milbond Structural Adhesive, A Technical Memo for OPTI521[M]. 2006.
- [5] VREUGD J, JANSEN K M B, ERNST L J, et al.. Modeling of viscoelastic properties of a curing adhesive [J]. *Computational Methods and Experiments in Materials Characterisation III*, 2007: 241-251.
- [6] MICHELS G J, GEN G V L. Finite element modeling of nearly incompressible bonds [J]. *SPIE*, 2002,4771:287-295.
- [7] 卢铎. CAD/CAE/CAM 技术在空间光学仪器研制与开发中的应用[J]. *光学 精密工程*, 1996,4(6):1-6.
LU E. CAD/CAE/CAM Technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996,4(6):1-6. (in Chinese)
- [8] 卢铎,任庆华,李天祥. CAD/CAE 技术在长春光机所的应用[J]. *光学 精密工程*, 1995,3(6):1-4.
LU E, REN Q H, LI T X. Application of CAD/CAE technology in CIOMP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995,3(6):1-4. (in Chinese)
- [9] 韩旭,吴清文,董得义,等. 室温硫化胶层建模在透视镜结构分析中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2010,18(1):118-125.
HAN X, WU Q W, DONG D Y. Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(1):118-125. (in Chinese)
- [10] 董得义,张学军. 反射镜组件模态分析的误差评价[J]. *光学 精密工程*, 2011,19(8):1883-1894.
DONG D Y, ZHANG X J. Error valuation for mode analysis of reflective mirror set [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(8):1883-1894. (in Chinese)
- [11] Alson E. Hatheway. Analysis of adhesive bonds in optics[J]. *Proceedings of SPIE (S0277-786X)*, 1993,1998:2-7
- [12] PAUL R Y. 光机系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008:361.
PAUL R Y. *Opto-mechanical Systems Design* [M]. Beijing:China Machine Press,2008:361.
- [13] PAUL R Y. 光机系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008:366-367.
PAUL R Y. *Opto-mechanical Systems Design* [M]. Beijing:China Machine Press,2008:366-367.

作者简介:



董得义(1979—),男,天津人,博士,副研究员,2002年、2005年于北京工业大学获学士、硕士学位,2012年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感器有限元分析、力学试验等方面的研究工作。E-mail: s200201029@163.com



李志来(1965—),男,吉林镇赉人,研究员,1986年于吉林工学院获得学士学位,主要从事空间光学遥感器结构技术及精密机械方面的研究。E-mail: li-zl2004@sohu.com