

文章编号 1004-924X(2012)10-2229-08

反射镜无热装配中胶层厚度的计算及控制

刘 强^{1,2*}, 何 欣¹, 张 峰¹, 陈思唯³

(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 100039;
3. 吉林大学 化学学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 为了实现空间传感器反射镜无热装配, 对反射镜粘接镶嵌件时胶层厚度的计算及控制胶层厚度的方法进行了研究。首先介绍了工程中常用的计算反射镜无热装配胶层厚度的方法及胶层厚度控制工艺, 主要描述了工装保证法、精密测量法和工装测量结合法, 给出了各种方法的优缺点及局限性。针对目前胶粘工艺控制胶层厚度存在的问题, 提出采用具有不同直径规格的空心玻璃微珠来控制胶层厚度的方法。拉伸试验验证了添加了空心玻璃微珠的光学环氧胶比纯光学环氧胶的力学性能提升了 20%; 利用平面反射镜粘接镶嵌件的试验表明, 依靠填充空心玻璃微珠保证胶层厚度的胶粘工艺方法能够保持反射镜面形值, 同时证明了胶层计算方法可以应用于空心玻璃珠的直径选择。提出的胶层厚度计算方法及玻璃微珠胶粘工艺可以实现反射镜无热装配, 目前已应用于某在研项目。

关键词: 反射镜; 无热装配; 胶层计算; 胶粘工艺; 空心玻璃微珠

中图分类号: TH703; TH140.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2229

Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount

LIU Qiang^{1,2*}, HE Xin¹, ZHANG Feng¹, CHEN Si-wei³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130012, China*)

* *Corresponding author, E-mail: liudequ@126.com*

Abstract: To achieve the athermal mount of remote sensor reflectors, the calculation and controlling methods of the adhesive layer thickness for a reflector in athermal mount was researched. Firstly, the methods to calculate the adhesive layer thickness for athermal mount in engineering applications were introduced, the several kinds of controlling processes of layer thickness for the reflector was described and the advantages, disadvantages and limitations of each method were analyzed in detail. Based on the analysis of the problem of the layer thickness control process, the hollow glass beads with different diameter sizes were used to control the layer thickness. A tensile test was performed to prove that the optical epoxy glue added hollow glass beads has improved the mechanical properties by 20% than

收稿日期: 2012-06-15; 修订日期: 2012-07-18.

基金项目: 中国科学院第三期创新工程资助项目 (No. 074Z3JN70)

the pure optical epoxy glue. The experiment shows that the adhesive process method by using the hollow glass beads to ensure the layer thickness can provide a good surface figure for the reflector, which meets the requirements of lens stress-free mount. The method has been used in engineering projects.

Key words: reflector; athermal mount; adhesive layer calculation; adhesive process; hollow glass bead

1 引言

胶接紧固就是使用结构粘合剂固定光学元件和金属支撑件。相对于机械连接来说,胶粘结固定具有很大优势:(1)可以实现其它连接方式无法解决的不同材料之间的连接;(2)可以降低安装界面的复杂性,使安装结构紧凑,减轻组件重量;(3)通过选择适当的粘接剂可满足耐温和抗震等方面的要求^[1]。因此越来越多的工程师选择胶接的连接方式来固定光学元件。

空间光学遥感器中的反射镜无热装配是一个比较复杂的过程,涉及到胶层厚度的设计及胶粘工艺的制定。目前在航空航天有效载荷中,反射镜与镶嵌件的粘接绝大部分采用的是光学环氧胶^[1],因使用胶粘固定时,存在光学材料、机械材料和粘接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,而热应力的存在会影响反射镜反射面的面形,从而影响光学系统的像质。通过计算选择合适的粘结厚度并制定可行的胶层厚度精确控制工艺可以最小化甚至消除热应力。李福^[2]等人对胶固平面镜进行了详细分析,建立了详细的胶层有限元模型,讨论了胶层的形状对光机结构面形的影响;赵伶丰^[3]等人对胶接头进行了分析研究,得到了胶层应力大小及分布情况;哈尔滨工业大学的范志刚^[4]等人针对胶粘固定的透镜胶层无热粘结厚度进行了研究,得到了无热粘结厚度的解析方程。不过上述实例均只是在理论上得到了粘接时胶层的厚度,并没有考虑到工程实践中的实际情况,即胶层厚度中没有提到相互粘接的零件的形位误差;另一方面,目前对胶层的研究中,具体对胶层厚度的控制还没有完整的工艺实施理论。

本文推导了反射镜采用光学环氧胶粘接紧固时胶层厚度的计算公式并研究了控制胶层厚度的方法。以无热装配时胶层厚度的计算方法为基础,考虑了相互粘接零件的形位公差的影响,最终得出了可以应用于实际粘接的胶层厚度计算方

法。通过研究空间遥感器反射镜镶嵌件中常用的几种胶层厚度控制技术,如工装保证法、精密测量法和工装测量结合法在控制胶层厚度上的优缺点,提出了采用空心玻璃控制胶层厚度的方法,并通过试验验证了此种方法的可行性,目前该方法已应用在某科研项目。

2 胶层厚度方程及控制胶层厚度方法

2.1 胶层厚度的理论计算方程

考虑到无热粘结厚度的求解是为了消除径向应力,因此求解过程中关注径向应力的表达式。计算过程基于表征固体三维应力的胡克定律,以径向应力取零构造方程。范志刚等综合考虑粘接零件的几何结构参数,得出了针对不同高宽比胶层的理论计算公式^[4-7],粘结层高宽比在 $1/3 \sim 1/10$ 之间时,应用 M 方程;粘结层高宽比大于 $1/3$ 时,应用 H 方程;粘结层高宽比小于 $1/10$ 时,应用 L 方程。

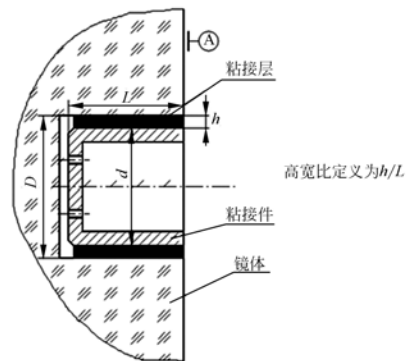


图 1 粘接零件高宽比定义

Fig. 1 Definition of aspect ratio for adhesive parts

L 方程:

$$h = \frac{r_o(\alpha_c - \alpha_o)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{v}{1-v} \left[\left(2 - \frac{h}{2L}\right) \alpha_b - \frac{3}{4}(\alpha_o + \alpha_c) \right]}$$

M 方程:

$$h = \frac{r_o(\alpha_c - \alpha_o)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{v}{1-v} \left(2 - \frac{h}{L}\right) \left(\alpha_b - \frac{\alpha_o + \alpha_c}{2}\right)}$$

H 方程:

$$h = \frac{r_o(1-\nu)(\alpha_c - \alpha_o)}{\alpha_o - \alpha_c + \frac{\nu}{4}(2\alpha_o + \alpha_c - 3\alpha_o)}$$

式中, r_o 为反射镜在镜框内部时的半径, α_o 为反射镜的热膨胀系数, α_c 为镜框的热膨胀系数, α_o 是弹性胶的热膨胀系数, ν 为胶的泊松比; 此方程同样适用于反射镜内部镶套的情况, 此时 r_o 、 α_o 分别为镶嵌件的半径及热膨胀系数, α_c 为反射镜的热膨胀系数。

2.2 工程中修正的胶层厚度计算方程

当采用光学环氧胶粘接零件时, 一般将胶层厚度 h 控制在 $0.03 \sim 0.25 \text{ mm}$ ^[3], 这是因为当胶层厚度较小时, 胶层尚不能形成连续的胶膜, 不连续之处相当于张开型裂纹; 但胶层较厚时, 会引起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拘束强化作用下降、内应力情况较为复杂等问题, 使得粘接强度下降。鉴于以上胶层厚度要求, 可知适合实际粘接应用中的胶层厚度计算方程为高宽比小于 $1/10$ 的 L 方程。

L 方程适用于胶层厚度的理论计算, 在反射镜与镜框粘接时, 还需要考虑一些实际情况: 即相粘接 2 个零件的形位公差, 与胶层厚度有关系的形位公差为相对粘接基准面的垂直度及自身的圆柱度。

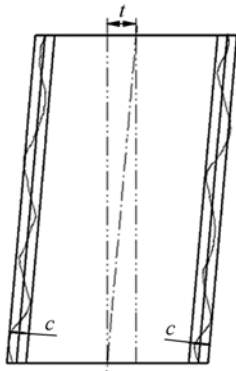


图 2 零件的形位误差示意图

Fig. 2 Sketch of the form and position errors

根据实际实施工艺对 L 方程进行修正, 称为修正的 L 方程:

$$h = \frac{r_o(\alpha_c - \alpha_o)}{\alpha_o - \alpha_c + \frac{\nu}{1-\nu} \left[\left(2 - \frac{h}{2L} \right) \alpha_o - \frac{3}{4} (\alpha_o + \alpha_c) \right]} + \Delta h \quad (1)$$

其中: $\Delta h = \frac{t_o + t_c}{2} + \frac{c_o + c_c}{2}$.

式(1)中 t_o 为反射镜的垂直度, t_c 为镜框的垂直度, c_o 为反射镜的圆柱度, c_c 为镜框的圆柱度。如果是反射镜内部镶套的情况, 则 t_o 为镶嵌件的垂直度, t_c 为反射镜孔的垂直度, c_o 为镶嵌件的圆柱度, c_c 为反射镜孔的圆柱度。

修正的 L 方程即为适合反射镜无热装配的胶层厚度计算公式, 方程等号右侧含有需要求解的厚度 h , 因此求解时需进行几次迭代, 或将其展开, 变为关于 h 的二次方程, 再进行求解。

2.3 常用的胶层厚度控制方法

通过方程计算可以得到无径向应力的最佳胶层厚度值, 另外需要关注的是如何在反射镜的粘接装配中保证胶层厚度及厚度的均匀性, 目前在反射镜粘接镶嵌件过程中, 工艺人员控制胶层厚度常用的方式有以下几种:

2.3.1 工装保证法

在反射镜背部粘接的镶嵌件位置较深时, 或者镶嵌件的粘接面宽度较窄无法精确定位时, 可以根据反射镜粘接孔的位置及反射镜的形状设计外置工装来保证胶层厚度。图 3 所示为镶嵌件与定位工装通过定位销联接在一起, 依靠定位工装与工艺孔之间的配合来保证胶层厚度。

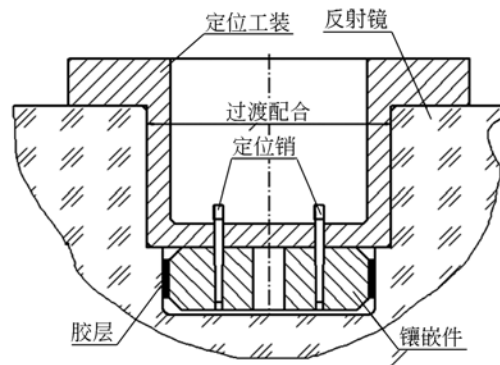


图 3 工装保证法

Fig. 3 Tooling to ensure method

此方法定位精度较高, 精密调整后对胶层厚度的控制可达微米级。缺点是: 对反射镜和定位工装的形位公差要求较高, 装配工艺比较复杂, 且对胶层厚度控制容易受定位工装与反射镜孔位配合精度影响。

2.3.2 精密测量法

当镶嵌件能够高出反射镜即测量仪器能够对镶嵌件进行直接测量时,可以采用精密测量法对胶层进行控制。如图 4 所示零件,露出镜体部分可以作为精密测量部分,采用此方法时,首先应精确测量出反射镜孔的直径尺寸公差及形位公差,在孔位的中心建立参考坐标系;其次精确测量粘接件的外径尺寸公差及形位公差,在粘接件的露出镜体部位进行测量,不断调整粘接件的位置使胶层最终达到理想厚度值。

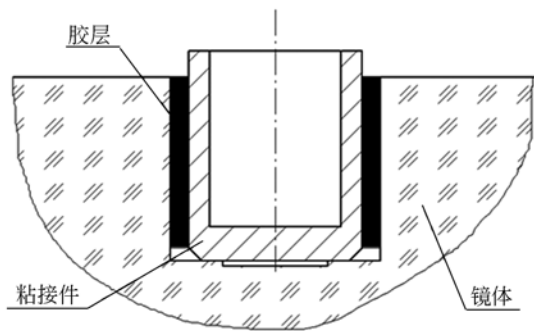


图 4 精密测量法

Fig. 4 Precision measurement method

采用此方法可直接对镶嵌件进行测量,避免了间接测量误差,选用高精度测量仪器时,对胶层厚度的控制可达亚微米级。缺点是:测量方法复杂,需要建立测量坐标系;测量时需要精密调整工装,边测量边调整,这使得重复定位精度较低。

2.3.3 工装测量结合法

当粘接镶嵌件位置较深不能直接测量同时也不能加工出工艺基准面时,可以采用工装测量结合法。如图 5 所示零件,将镶嵌件与定位测试工装联接在一起,定位测试工装露出镜体部分可以作为精密测量部分,即将镶嵌件的测量基准引入到工装上。同精密测量法一样,首先应精确测量出反射镜孔的直径尺寸公差及形位公差,在孔位的中心建立参考坐标系;然后精确测量定位测试工装的外径尺寸公差及形位公差,对工装件露出镜体部位进行测量,精密调整工装件位置使胶层达到理想厚度值。

此种方法不受反射镜粘接孔结构形式的限制,选用高精度测量仪器及调整工装时,对胶层厚度的控制可达亚微米级。缺点是:对定位测试工装的形位公差要求很高,提高了加工成本;由于引

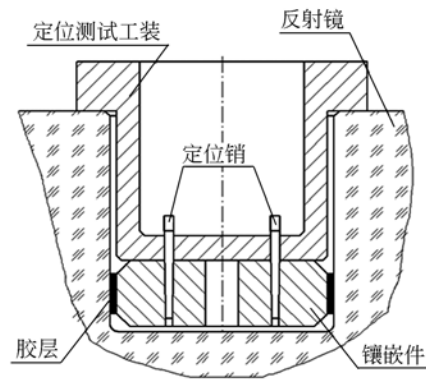


图 5 工装测量结合法

Fig. 5 Tooling and measurement method

入了定位测试工装,将定位工装的形位公差引入测量中来,定位精度相对直接测量法有所降低。

以上 3 种方法为目前反射镜粘胶过程中控制胶层厚度的常用实施工艺,尽管常用,但效果并不理想,由于胶是黏稠状液体,无法直接对胶层进行控制,只能通过间接的测量或依靠工装来保证胶层厚度,从而不可避免地引入了测量误差或工装件的形位误差,且方法复杂繁琐。如果能够在胶中添加某种既不降低胶的粘接能力又能够保证胶层厚度的物质,则精确控制胶层厚度的工艺问题就能迎刃而解。通过对种类、数量繁多的环氧胶添加剂进行考查,结合粘胶工作中的一系列试验,空心玻璃微珠成为最佳选择。

3 空心玻璃珠法在控制胶层厚度中的应用

3.1 空心玻璃微珠的特点

空心玻璃微珠是由钠硼硅酸盐材料经特殊工艺制成的薄壁、封闭的微小球体,其粒径为十到几百微米,壁厚几个微米,内部充斥 CO_2 等气体的封闭微型球体,其主要特点为:

- 完美的球形效应和各向同性;
- 有超高的强度和极低的密度;
- 有优异的比表面积和超细微粒子效应;
- 有特殊的尺寸稳定性和独特的多功能性质。

3.2 空心玻璃微珠在胶层厚度控制上的优势

空心玻璃微珠在胶层厚度控制上具有明显优

势,主要表现在:

a. 操作工艺简单:空心玻璃微珠无需做表面处理,可直接与主原料混合制成母料;粘接时,不需额外定位工装或测量仪器;

b. 胶层厚度控制精度高:由于胶层厚度是依靠空心玻璃微珠的直径来保证,直径的公差范围在 5% 以内,只要选择好玻璃微珠的直径即可实现对胶层厚度的直接控制,因此胶层厚度控制精度高;

c. 结构尺寸稳定性好:玻璃微珠流动性好,因此胶层的分布均匀性好;由于圆球状的物体是各向同性的,所以填充微珠不会产生因取向造成不同部位收缩率不一致的弊病,保证了产品的尺寸稳定。

表 1 列出了空心玻璃微珠的各项性能参数,可以了解到玻璃微珠因直径的不同可以分为不同规格。不同规格的玻璃微珠具有不同的密度,在使用时可以按照实际要求计算并选择适合规格的玻璃微珠。

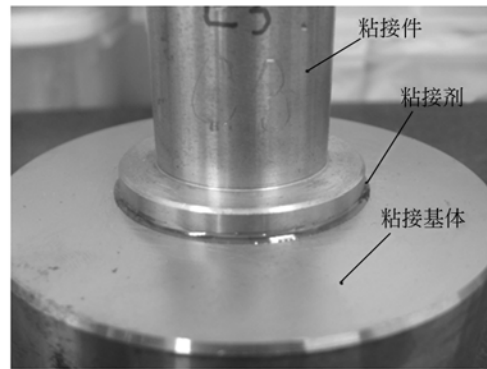
表 1 玻璃微珠材料性能参数表^[8]

Tab. 1 Properties of glass bead materials^[8]

性能参数	数值					
直径范围 / μm	10~125	10~100	10~80	10~75	10~45	10~30
堆积密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.10~	0.12~	0.15~	0.18~	0.25~	0.25~
静压强度 / MPa	0.11	0.13	0.16	0.19	0.26	0.26
漂浮率/%	3~6					
含水率/%	95					
吸油率 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.5~1					
pH 值	0.4~0.5					
外观	9.5~10.5					
	自由流动白色粉末					

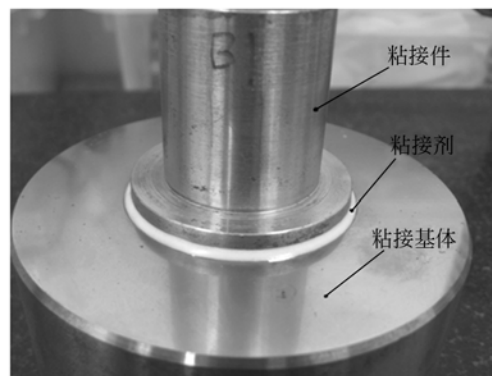
3.3 粘接强度试验

为了考查光学环氧胶中添加了玻璃微珠对粘接拉伸强度的影响,做了金属试验件,试验件由 2 部分组成,分别为粘接件和粘接基体,两者通过光学环氧胶粘接在一起,添加玻璃微珠的环氧胶为无色透明液体,而添加了空心玻璃微珠的光学环氧胶呈现乳白色,如图 6 所示。



(a) 无添加剂的光学环氧胶

(a) Optical epoxy glue without additives



(b) 含玻璃微珠的光学环氧胶

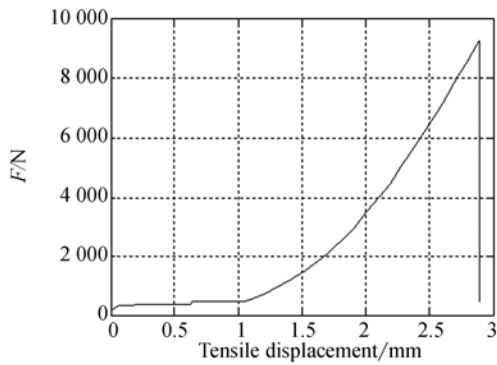
(b) Optical epoxy glue with hollow glass beads

图 6 拉伸试验件

Fig. 6 Tensile test parts

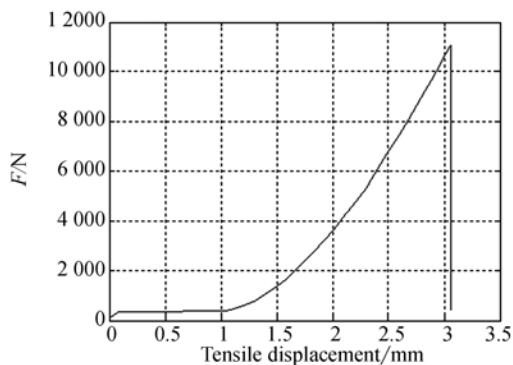
将无添加剂的试验件称为 A 件,添加了玻璃微珠的称为 B 件。A 件的胶层厚度采用了工装加精密测量法,B 件胶层厚度直接由玻璃微珠的直径保证。对于 2 个试验件的固化过程采取了完全相同的工艺实施路线,均为常温固化,固化完成,达到最高粘接强度后进行拉伸试验。

试验结束后对断面进行仔细观察,发现 2 个试验件的破坏形式相同均发生在粘接界面上。由拉伸图谱可知,拉伸曲线形状相同,表明粘接剂的物理性质相同。区别是添加了玻璃微珠的光学环氧胶拉伸强度比纯光学环氧胶提高了约 20%,这是由于微珠的存在,使得界面上不是以二维平面扩展裂纹,而且由于玻璃微珠呈球形,增加了界面的面积分数,因此界面破坏所需的能量大大提高,从而使环氧胶的粘接强度得到增强^[8]。



(a) A 试验件拉伸曲线

(a) Tensile curve of part A



(b) B 试验件拉伸曲线

(b) Tensile curve of part B

图 7 拉伸曲线

Fig. 7 Tensile curve

3.4 空心玻璃珠法在控制胶层厚度中的应用

为了综合考查胶层厚度计算方法的正确性及作为光学反射镜粘接剂的光学环氧胶中添加空心玻璃微珠后对反射镜面形的影响,设计了反射镜粘接试验。试验是在一个圆形平面反射镜上用添加了玻璃微珠的 GHJ-01 光学环氧胶镶嵌粘接了柔性金属结构件。金属结构件的材料为低膨胀系数合金 4J32,热膨胀系数 $\alpha_c = 0.05 \times 10^{-6}$,外形尺寸为 $\Phi 130$ mm(即 $r_o = 65$ mm),粘接宽度 $L = 10$ mm,垂直度 $t_c = 0.004$ mm,圆柱度 $c_c = 0.007$ mm;平面镜材料为 K9 玻璃,热膨胀系数 $\alpha_o = 0.21 \times 10^{-6}$,外形尺寸为 $\Phi 300$ mm,粘接孔的垂直度 $t_o = 0.005$ mm,圆柱度 $c_o = 0.008$ mm;平面镜裸镜反射面面形精度 rms 接近 $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8$ nm);胶粘剂为光学环氧胶 GHJ-01,热膨胀系数 $\alpha_b = 236 \times 10^{-6}$ 。根据修正的 L 方程即公式(1)计算胶层厚度。

将上述参数带入公式中,计算得出 $h_o = 0.015$ mm, $\Delta h = 0.012$ mm, $h = 0.027$ mm。

经过上述胶层厚度计算,可知金属镶嵌件和反射镜粘接孔之间的间隙值为 0.027 mm,因此选择直径为 10~30 μm 的空心玻璃微珠。综合考虑填充微珠后环氧胶的力学性能和粘弹性,玻璃微珠按 3% 的质量分数添加到光学环氧胶中^[9-10]进行镶嵌件与反射镜的粘接。

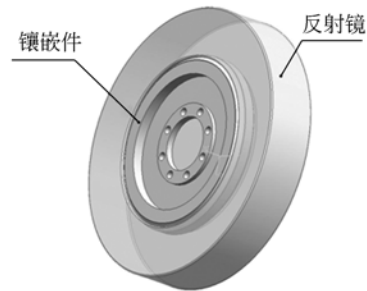


图 8 粘接试验件

Fig. 8 Adhesive test parts

试验过程:首先对反射镜裸镜的镜面面形值进行检测,记录好图像及面形 rms 值;反射镜和金属件粘接完成后在室温下固化,待固化完成,用干涉仪检测反射镜反射面的面形 rms 值,对反射镜粘接镶嵌件前后面形值作对比。

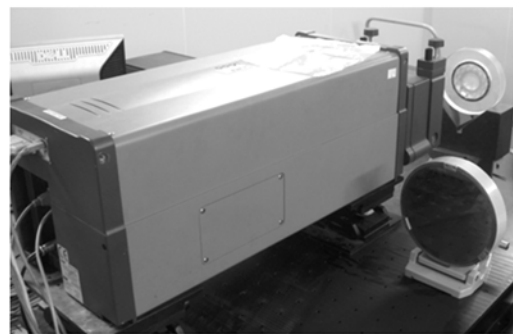
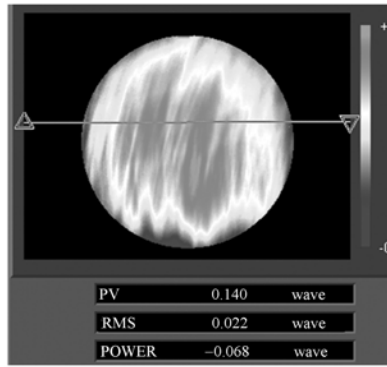


图 9 Zygo 干涉仪测平面反射镜面型

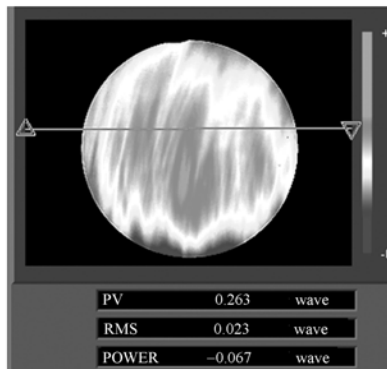
Fig. 9 Zygo interferometer used to measure the surface figure of a plane reflector

根据以往经验,在反射镜背部孔内粘接了金属零件,如果胶层厚度选择不当,胶粘应力产生的收缩变化会导致反射镜的反射面出现环状波峰或波谷形状,从而使反射镜的面形 rms 值下降;本次试验中对比粘接金属件前后反射镜面形值,两者在数值上仅相差 1/1 000 rms,可认为粘接镶嵌件前后反射镜的面形无明显变化,进而可知通过



(a) 反射镜裸镜面形值

(a)Surface figure of naked reflector



(b) 粘接了镶嵌件后的面形值

(b)Surface figure of reflector bonded an incrustation

图 10 粘接前后结果对比图

Fig. 10 Comparison of test results

参考文献:

- [1] 韩旭,吴清文,董德义,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.
HAN X, WU Q W, DONG D Y, *et al.*. Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(1):118-125. (in Chinese)
- [2] 李福,阮萍,赵葆厂,等. 胶固紧平面反射镜的有限元分析[J]. 光学技术, 2006,32(6):896-899.
LI F, RUAN P, ZHAO B CH, *et al.*. Finite element analysis of the plane mirror fastened by adhesive [J]. *Optical Technique*, 2006,32(6):896-899. (in Chinese)
- [3] 赵伶丰,白光明. 复合材料胶接头分析研究[J]. 航天

无热装配胶层计算得出的胶层厚度正确,可以应用于玻璃微珠的直径选择中,同时表明填充了空心玻璃微珠保证胶层厚度的胶粘工艺方法对反射镜面形值无影响,满足无应力即无热装配条件。

4 结 论

本文介绍了适用于工程中反射镜无热装配胶层厚度的计算方法,给出了目前反射镜装配中胶层厚度的控制工艺。针对目前胶粘工艺控制胶层厚度方法上存在的问题,提出通过在光学环氧树脂中添加具有不同直径规格的空心玻璃微珠来控制胶层厚度的方法,即通过胶层厚度计算公式,结合装配体的公差,计算出添加的空心玻璃珠直径,依靠选择玻璃微珠的直径实现对胶层厚度的控制。试验表明,通过胶层厚度计算公式选择出适当规格的玻璃微珠并填充到环氧树脂中进行粘接,试验前后反射镜面形值仅相差 1/1 000 rms,完全可以满足反射镜无热装配。由于采用玻璃微珠控制胶层厚度的胶粘工艺方法比较明确、直观,且可以避免引入额外误差,对空间光学遥感器的结构设计及热设计具有一定的指导意义,但其空间辐照性能、耐受原子氧能力及在真空中的寿命问题还需要进一步验证。总体来说此种方法在航空航天胶粘工艺的研究领域具有比较广泛的应用前景。

器环境工程,2007,24(6):393-396.

- ZH L F, BAI G M. Analysis of adhesive bonded composite joints[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007,24(6):393-396. (in Chinese)
- [4] 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.
FAN ZH G, CHANG H, CHEN SH Q, *et al.*. Design of bonding layer in lens athermal mount [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(11):2573-2581. (in Chinese)
- [5] RYABOY V M. Analysis of thermal stress and deformation in elastically bonded optics [J]. *SPIE*, 2007,6665:66650 K.
- [6] VUKOBRATOVICH D, FETTERHOFF K A, *et al.*. Bonded mounts for small cryogenic optics [J].

- SPIE, 2000, 4131: 228-239.
- [7] 范志刚, 常虹, 陈守谦. 胶粘光学元件的热应力和变形分析[J]. 光学技术, 2011, 37(3): 366-369.
FAN ZH G, CHANG H, CHEN SH Q. Thermal stress and deformation analysis of bonded optics [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 366-369. (in Chinese)
- [8] 严毓殉, 闻荻江. 玻璃微珠/玻璃纤维增强聚氨酯泡沫塑料的研究[J]. 纤维复合材料, 2004, 12(4): 25-28.
YAN Y X, WEN D J. The research on the cenosphere/glass fiber reinforced Polyurethane foam's property [J]. *Fiber Composites*, 2004, 12(4): 25-28. (in Chinese)
- [9] 吕方, 朱光明, 胡巧青, 等. 玻璃微珠填充改性聚合物研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009, 3(11): 53-56.
LV F, ZHU G M, HU Q Q, *et al.*. Advances of glass bead filled polymer composite [J]. *Fiberglass-Reinforced Plastics/Composite Material*, 2009, 3(11): 53-56. (in Chinese)
- [10] GUI F SH, WEI Y, BANG H X, *et al.*. Double yielding behaviors of polyamide 6 and glass bead filled polyamide 6 composites [J]. *Polymer Testing*, 2005, 24(6): 704-711.

作者简介:



刘 强(1981—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,2005年于哈尔滨工业大学获得学士学位,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。
E-mail: liudequ @126.com.



何 欣(1970—),男,吉林长春人,研究员,主要从事空间光学遥感器光机结构设计方面的研究。E-mail: Hexinxp@ yahoo.com.cn



陈思唯(1991—),女,吉林长春人,2010年考入吉林大学化学学院,现在读。

导师简介:



张 峰(1969—),男,吉林人,研究员,博士生导师,主要从事光学加工与检测方面的研究。E-mail: zhangfjy@ yahoo.com