

反射镜背部嵌套粘接支撑结构的设计与分析

刘波^{1,2} 丁亚林¹ 贾继强¹ 李大伟¹ 金灿强¹

(¹ 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 粘接结构由于其结构简单、紧凑,应力分布均匀,温度适应性好等优点在光学仪器中应用广泛。对反射镜背部嵌套粘接金属衬套的支撑结构做了详细研究,选择弹性模量较低的粘接剂作为粘接结构用胶;从力学性能角度分析胶层厚度和粘接面积,从热学角度分析胶层的消热粘接厚度。对粘接结构对反射镜位置精度的影响进行分析,包括反射镜的偏心量和光轴方向的移动量。

关键词 仪器;反射镜支撑;嵌套粘接;消热粘接厚度;位置精度

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.091201

Design and Analysis of Back Embedded Adhesive Structure for Mirror Support

Liu Bo^{1,2} Ding Yalin¹ Jia Jiqiang¹ Li Dawei¹ Jin Canqiang¹

(¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Adhesive structure is widely used in optical instruments because of its simplicity, uniform stress distribution and good temperature adaptability. The back embedded adhesive structure for mirror support is analyzed theoretically. The principle for choosing adhesive is determined as choosing adhesive with low elastic modulus. The adhesive structure parameters including adhesive thickness and adhesive area are analyzed from mechanical and thermal properties. The adhesive structure's effect on mirror position accuracy is analyzed, which includes mirror decenter and movement along optical axis.

Key words instrumentation; mirror support; embedded adhesive; athermal adhesive thickness; position accuracy

OCIS codes 120.4880; 120.5700; 120.6810

1 引言

在光学仪器的设计过程中,反射镜的支撑结构一直是结构设计的重点和难点,因为它直接影响到反射镜的面型和位置精度,进而影响到整机成像质量^[1-2]。从反射镜与支撑结构的固定方式看,主要有机械式和胶结式。机械式固定通常有螺钉连接、压板固定等。机械式固定容易产生局部应力,对固定面的加工和装配精度要求非常高。另外如果支撑结构与反射镜的线膨胀系数不匹配,机械式固定还很容易产生热应力。胶结式结构简单、紧凑,应力分布均匀,温度适应性好,能够把不同材料的零件组合在一起,在光学仪器中应用广泛^[3]。

胶结式固定反射镜的典型结构是在反射镜背部加工有一定数量和深度的盲孔,在盲孔处粘接与反射镜线膨胀系数相匹配的衬套,借助柔性支撑结构把衬套与镜座固连。这种背部嵌套粘接支撑结构稳定性好,配合使

收稿日期: 2013-04-02; 收到修改稿日期: 2013-04-26; 网络出版日期: 2013-08-02

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目(O70Y32R070)

作者简介: 刘波(1985—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事航空相机结构设计方面的研究。

E-mail: liubo1985@gmail.com

导师简介: 丁亚林(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空相机总体设计方面的研究。

E-mail: dingyl1964@sohu.com

用柔性支撑环节可以很好地解决热应力问题,适应性强,可用于多种尺度的反射镜^[4-5]。国内外对透镜粘接结构的分析较多^[6-9],但对于反射镜粘接结构的分析却较少。本文将对反射镜背部嵌套粘接支撑结构进行详细分析和设计,具体从粘接剂的选择、胶层参数设计、粘结结构对反射镜位置精度的影响三个方面展开研究。

2 粘接剂的选择

作为粘接技术中的关键,粘接剂的性能对粘接后组合体的力学、热学性能有着极为重要的影响。对于光学仪器用粘接剂,在光学、力学、热学等性能方面都有特殊要求。光学仪器制造业中应用的粘接剂主要有两种:一种是胶合光学元件的透明胶,不影响胶合件的光学特性,称为光学胶;另一种是把光学零件胶接在非光学零件上,一般不要求光学特性,称为光学结构胶。反射镜与其支撑结构粘接用的就是光学结构胶。光学结构胶不同于光学胶和工程用结构胶,一般都要求对基材有足够的粘接力,且应力小、抗蠕变、能经受高低温交变的考验、抗冲击性能好、耐一般有机溶剂、耐老化性能好,有时还要易拆胶返修等^[10]。目前光学仪器结构用胶中,较常用的有酚醛树脂、环氧树脂、聚氨脂、氯丁橡胶和有机硅树脂类胶粘剂等类型^[11],但趋向于选用室温或中温固化、柔性的、弹性模量低的经过改性的弹性胶粘剂。

对于粘接结构,在粘接剂固化过程中的收缩以及后续使用过程中的温度变化都会产生内应力,其值与胶层材料的弹性模量成正比,因而降低粘接结构的内应力最有效的办法是降低胶层材料的弹性模量,即赋予胶层以柔韧性。以光学仪器中常用的两种粘接剂为例,GHJ-01 光学环氧胶的弹性模量通常为室温硫化(RTV)硅橡胶的几百倍,在相同结构形式、相同温度变化下,光学环氧胶产生的热应力也是 RTV 硅橡胶的几百倍,因而相比光学环氧胶,选用 RTV 硅橡胶作为反射镜粘接剂能大大减小粘接结构的温度应力、提高反射镜组件的温度适应性。

3 反射镜粘接胶层参数设计

在选定粘接剂种类后,需要确定胶层参数,包括粘接面积和胶层厚度。反射镜背部嵌套粘接支撑结构如图 1 所示,反射镜背部开有盲孔,在盲孔处粘接金属衬套,衬套材料一般为线膨胀系数可以定制的钢。在粘接结构中,胶层参数直接影响粘接结构的力学和热学性能,设计时需从这两个方面考虑。

3.1 从力学性能考虑胶层参数

胶层厚度是影响粘接强度的重要因素之一。不同结构形式粘接强度的表现形式不同。以图 1 所示粘接结构为例,其粘接强度主要体现为剪切强度。一般情况下,在保证胶层不缺胶的前提下,胶粘剂的剪切强度会随着胶层厚度的减小而提高,如图 2 所示为某种粘接剂剪切强度随胶层厚度的变化曲线^[12]。每种胶粘剂都有特定的胶层厚度范围,在该范围内胶层具有较好的力学性能,超出该范围力学性能就明显下降。

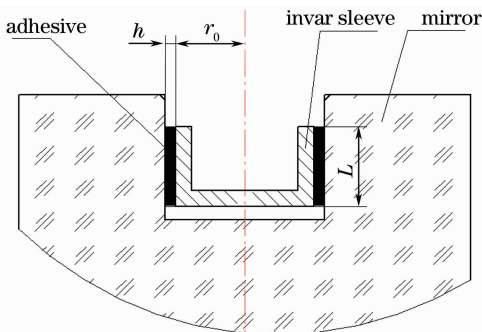


图 1 反射镜背部嵌套粘接结构示意图

Fig. 1 Sketch map of back embedded adhesive structure for mirror support

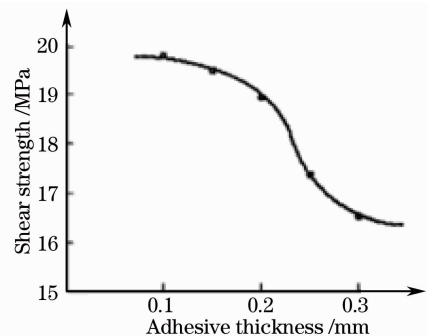


图 2 剪切强度随胶层厚度的变化

Fig. 2 Relationship between shear strength and adhesive thickness

对于承受剪切荷载的接头来说,希望将胶层厚度控制在 0.03~0.15 mm 范围内。通常的解释是当胶层厚度较小时,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,因而在此基础上增加胶层厚度有助于提高强度;但随着胶层厚度的增加,会引起胶层中的缺陷密度上升、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现象,反而使得接头强度下降^[13-14]。

影响粘接强度的另一因素是粘接面积。粘接面积越大,粘接结构所能承载的振动和冲击也越大。一般来说最小粘结面积由下式确定:

$$Q_{\min} = \frac{w \times a_G \times f_s}{J}, \quad (1)$$

式中 w 为光学零件的重量,以某一反射镜为例,其质量为 0.9 kg,因而重量 $w=9$ N; a_G 为最恶劣条件下的加速度因子,仪器在做冲击实验时的光学零件所经受的加速度最大,以冲击实验最大加速度为 $20g$ 为例,其加速度因子为 20; f_s 为安全系数,安全系数至少是 2,考虑到没有计划到的某些非最佳条件,例如粘接处理期间清洁不足等因素,所以安全系数还要取得大一些,本文取安全系数为 10; J 为粘结部位的抗剪强度,即结构粘合剂的剪切强度,对于 RTV 硅橡胶,剪切强度一般在 $2\sim 4$ MPa 之间^[15-16],取 $J=2.0$ MPa。

由(1)式计算出 $Q_{\min}=900$ mm²。反射镜衬套的直径为 30 mm,由此计算出最小的粘接宽度 $L=9.5$ mm。根据结构设计,最终粘接宽度取 12 mm。

3.2 从热学性能考虑胶层厚度

影响粘接结构的热学性能的参数主要是胶层厚度。光学元件、胶层和支撑结构之间热膨胀系数的不匹配会导致粘接结构内部产生应力。由于大多数粘接剂的弹性模量较低,几乎不可压缩,应力会在胶层内显著增大,进而影响到光学元件的面型。热膨胀系数的不匹配以及粘接剂的几乎不可压缩共同导致在粘接结构内产生高应力,为了消除热应力,需要设计胶层厚度^[17]。

关于胶层厚度的无热化设计,其模型最初来源于使用粘接剂把透镜安装于金属镜筒内的消热化设计。如图 3 所示为典型透镜粘接装配的示意图,其中定义了几何结构参数以及径向、轴向和切向三个方向。

无热粘接厚度的求解是以消除径向的应力为目的,因此求解过程中只需关注径向应力的表达式。由表征固体三维应力的胡克定律可知,径向应力可以表示为

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_r + \nu(\epsilon_z + \epsilon_\theta)], \quad (2)$$

式中 $\epsilon_r, \epsilon_z, \epsilon_\theta$ 分别为径向、轴向和切向的应变, E 为胶层材料的弹性模量, ν 为胶层材料的泊松比。求解无热粘接厚度方程需令径向应力为 0,得到

$$(1-\nu)\epsilon_r + \nu(\epsilon_z + \epsilon_\theta) = 0. \quad (3)$$

(3)式即为用胡克定律求解无热粘接厚度的一般方程。从方程中可以看出,要求解这一方程就需要知道粘接层在径向、轴向、切向上的应变,即粘接层的约束条件。

无热粘接厚度求解的关键是获得粘接层在径向、轴向和切向上的应变。粘接层在径向被约束于透镜和镜框之间,其径向应变是与粘接厚度直接有关的量,容易确定;其他两个方向上的应变需要通过一定的假设条件获得。

径向应变 ϵ_r 是径向偏差 δ_h 的函数。径向偏差定义为温度变化时不受约束的胶层厚度变化与实际厚度变化之差,即

$$\delta_h = h\alpha_b\Delta T - [(r_0 + h)\alpha_c\Delta T - r_0\alpha_0\Delta T] = \Delta T[h(\alpha_b - \alpha_c) - r_0(\alpha_c - \alpha_0)], \quad (4)$$

式中 h 为胶层厚度; r_0 为光学元件半径; $\alpha_b, \alpha_c, \alpha_0$ 分别为胶粘剂、镜框材料和光学元件材料的线膨胀系数。

由此,径向应变可以表示为

$$\epsilon_r = \frac{\delta_h}{h} = \Delta T \left[\alpha_b - \alpha_c - \frac{r_0}{h}(\alpha_c - \alpha_0) \right]. \quad (5)$$

结合(3)式和(5)式以及粘接层在轴向和切向的约束假设条件,就可以求出实现无热装配时的粘接厚度。根据不同的假设条件,无热粘接厚度方程有 Bayar 方程、改进的 Bayar 方程、Van Bezooijen 方程、改进的 Van Bezooijen 方程和高宽比近似方程等^[6-9],其中高宽比近似方程的假设最接近实际情况,因而其计算出的消热厚度也最准确,即

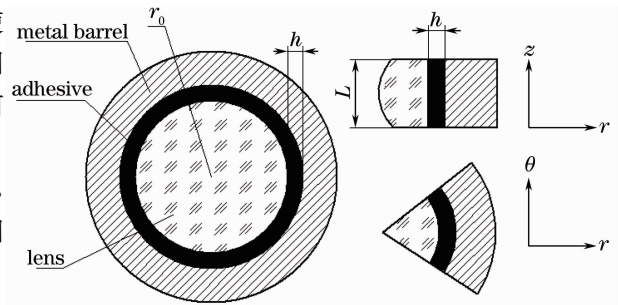


图 3 透镜粘接装配示意图

Fig. 3 Lens assembled in metal barrel with adhesive

$$h = r_0 \frac{\alpha_c - \alpha_o}{\alpha_b - \alpha_c + (\nu/1 - \nu)[2 - (h/L)][\alpha_b - (\alpha_o + \alpha_c)/2]} \quad (6)$$

上述各方程研究的都是透镜通过胶粘安装在镜筒中的情况,它们同样适用于图1所示的反射镜与钢套通过胶粘连接时胶层厚度的计算。对反射镜粘接结构应用高宽比近似方程计算消热厚度:

$$h = r_0 \frac{\alpha_{\text{mirror}} - \alpha_{\text{invar}}}{\alpha_b - \alpha_{\text{mirror}} + (\nu/1 - \nu)[2 - (h/L)][\alpha_b - (\alpha_{\text{invar}} + \alpha_{\text{mirror}}/2)]}, \quad (7)$$

式中 α_{mirror} 为反射镜材料的线膨胀系数, α_{invar} 为钢套材料线膨胀系数, α_b 为胶层材料的线膨胀系数。 α_b 一般远远大于 α_{mirror} 和 α_{invar} , 只有当 $\alpha_{\text{mirror}} > \alpha_{\text{invar}}$ 时, 由(7)式计算的胶层厚度才为正值。

以反射镜材料为碳化硅为例, $\alpha_{\text{mirror}} = 2.34 \times 10^{-6}$, 选用低线膨胀系数的钢套材料 $\alpha_{\text{invar}} = 0.05 \times 10^{-6}$ 。对于 RTV 硅橡胶, $\alpha_b = 2.36 \times 10^{-4}$, $\nu = 0.43$, 采用前述的反射镜结构参数 $r_0 = 15$ mm, $L = 12$ mm, 计算出的反射镜粘接的消热厚度为 $h = 0.059$ mm。

3.3 胶层厚度的控制

在计算出反射镜粘接胶层的消热化厚度后,如何在粘接过程中控制胶层厚度成为关键,目前常用的方法有工装定位法和空心玻璃珠法。

工装定位法如图4所示。定位工装与钢套精密配合,同时通过直口安装在反射镜的粘接孔处。此方法对反射镜、钢套和定位工装的形位公差要求较高,精密调整后对胶层厚度的控制可达微米级。

空心玻璃珠法^[18]是在粘接剂中加入与胶层厚度等厚的空心玻璃珠,通过空心玻璃珠控制胶层厚度。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: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;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,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;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。

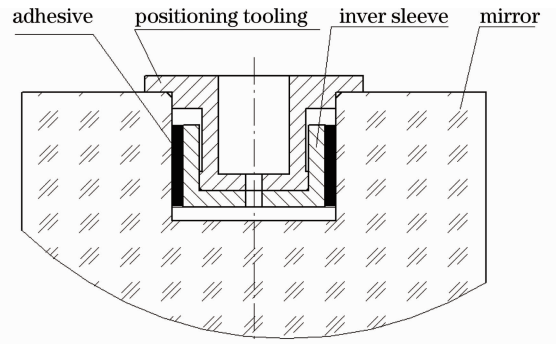


图4 用定位工装控制胶层厚度

Fig. 4 Adhesive thickness control with positioning tooling

4 粘接结构对反射镜位置精度的影响

粘接结构通过粘接剂把反射镜与衬套相连,两者并不是不完全的刚性连接。因此有必要计算在成像条件下的反射镜位置变化量,包括反射镜偏心量和反射镜在光轴方向上的移动量,看其对光学系统的像质是否有影响。Valente等^[19]提出了透镜通过胶层安装在镜筒,受径向重力载荷时,透镜偏心量的计算公式:

$$\Delta = \frac{\omega}{\pi R(d/t_e)[(E/1 - \nu^2) + G]}, \quad (8)$$

式中 ω 为透镜重量, R 为透镜半径, d 为透镜边缘厚度,即胶层轴向厚度, t_e 为胶层厚度, E 为胶层材料的弹性模量, G 为胶层材料的剪切模量, $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ 。

对于宽高比较大的情况,需用 $\frac{E}{(1 + \nu)} \left(1 + \frac{\nu}{1 - 2\nu}\right)$ 代替式中的 $\frac{E}{1 - \nu^2}$, 即

$$\Delta = \frac{\omega}{\pi R(d/t_e) \{ [E/(1 + \nu)] \{ 1 + [\nu/(1 - 2\nu)] \} + G \}}, \quad (9)$$

将(9)式应用于反射镜粘接的情况,同时引入加速度因子 a_G , 则有

$$\Delta = \frac{a_G \omega}{\pi r_0 (L/h) \{ [E/(1 + \nu)] \{ 1 + [\nu/(1 - 2\nu)] \} + G \}}, \quad (10)$$

对于反射镜沿光轴方向上的移动量,即光学间隔的变化,可根据应力应变公式推出

$$\Delta' = \frac{a_G \tau h}{2\pi r_0 L G}. \quad (11)$$

从(10)式、(11)式可以看出, Δ 和 Δ' 正比于胶层的宽高比 h/L 。在实际应用中,胶层的宽高比 h/L 通常很小,因而 Δ 和 Δ' 也很小。

以前述反射镜为例,设成像时反射镜的最大加速度为 $3g$,故 $a_G=3$,RTV胶的弹性模量取 1.134 MPa ,计算出 $\Delta=7.87\times 10^{-4}\text{ mm}$, $\Delta'=3.55\times 10^{-3}\text{ mm}$,偏心量和间隔变化极小,远小于光学设计公差,对光学系统影响甚微。

5 结 论

粘接结构简单、紧凑,应力分布均匀,温度适应性好,在光学仪器中应用广泛。本文对反射镜背部嵌套粘接支撑结构做了系统的研究,并以某一反射镜为例开展分析。对于粘接剂的选择,应选用室温或中温固化、柔性的、弹性模量低的经过改性的弹性胶粘剂;对于胶层参数,包括胶层厚度和粘接面积,分别从粘接结构的力学和热学性能进行了分析;粘接结构对反射镜位置精度的影响包括反射镜的偏心量和光轴方向的移动量,计算结果表明,偏心量和移动量变化极小,远小于光学设计公差,对光学系统影响甚微。

参 考 文 献

- Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan, *et al.*. Support schemes and thermal deformation analysis of large-aperture interferometer mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 809–815.
徐荣伟, 刘立人, 刘宏展, 等. 大型干涉仪镜子的支撑设计与温度变形分析[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 809–815.
- Tan Fanjiao, Qiao Yanfeng, Li Yaobin, *et al.*. Finite element analysis for surface shape deformation of photo-electronic theodolite primary mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 756–763.
谭凡娇, 乔彦峰, 李耀彬, 等. 光电经纬仪主镜面型变化的有限元分析[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 756–763.
- Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Effect of temperature change on the surface accuracy of bonded lens[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0808002.
王汝冬, 田伟, 王平, 等. 温度变化对胶粘结透镜面形精度的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0808002.
- Wang Zhongshan, He Xin, Fu Liangliang. Design and analysis for a minitype mirror supporting structure[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(6): 686–690.
王忠善, 何欣, 付亮亮. 一种小型空间反射镜支撑结构的设计与分析[J]. *光学技术*, 2011, 37(6): 686–690.
- Xin Hongwei, Guan Yingjun, Li Jinglin, *et al.*. Design of support for large aperture rectangular mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1560–1568.
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): 1560–1568.
- Fan Zhigang, Chang Hong, Chen Shouqian. Design of bonding layer in lens athermal mount[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2573–2581.
范志刚, 常虹, 陈守谦. 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.
- Herbert J J. Techniques for deriving optimal bondlines for athermal bonded mounts[C]. *SPIE*, 2006, 6288: 62880J.
- Vukobratovich D, Fetterhoff K A, Myers J R, *et al.*. Bonded mounts for small cryogenic optics[C]. *SPIE*, 2000, 4131: 228–239.
- Monti C L. Athermal bonded mounts: incorporating aspect ratio into a closed-form solution[C]. *SPIE*, 2007, 6665: 666503.
- Tian Xinghe, Ye Lianhua. Study on the optical epoxy structure adhesive[J]. *Adhesion*, 1998, 19(5): 11–13.
田兴和, 叶莲华. 环氧型光学结构胶粘剂的研究[J]. *粘接*, 1998, 19(5): 11–13.
- Wang Qixia, Cheng Gang, Jiang Shilei, *et al.*. Application of epoxy resin structural adhesive in optical instruments[J]. *Adhesion*, 2003, 24(3): 33–35.
王奇侠, 程刚, 蒋世磊, 等. 环氧树脂胶在光学部件粘接中的应用[J]. *粘接*, 2003, 24(3): 33–35.
- Cui Yongpeng, He Xin, Zhang Kai, *et al.*. Technique of cementation between the titanium alloys and carbon fibers[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 125–128.
崔永鹏, 何欣, 张凯. 钛合金和碳纤维的粘接技术[J]. *光学技术*, 2012, 38(1): 125–128.
- Zheng Ruiqi. Effect of adhesive thickness on adhesive performance[J]. *Adhesion*, 1990, 11(4): 30–35.
郑瑞琪. 胶层厚度对粘接性能的影响[J]. *粘接*, 1990, 11(4): 33–35.
- Zheng Xiaoling, Kong Fanrong, You Min, *et al.*. Numerical analysis for effect of adhesive thickness on the stress distribution in butt joint[J]. *Adhesion*, 2004, 25(5): 30–32.
郑小玲, 孔凡荣, 游敏, 等. 胶层厚度对拉伸试样应力分布影响的数值分析[J]. *粘接*, 2004, 25(5): 30–32.

- 15 Yang Min, Wang Cuihua, Li Tianshu, *et al.*. Study on bonding properties of one-component RTV silicone rubber[J]. *Adhesion*, 2007, 28(5): 26–27.
杨敏, 王翠花, 李天书. 单组分 RTV 硅橡胶粘接性的研究[J]. *粘接*, 2007, 28(5): 26–27.
- 16 Wu Lianfeng. Study on Heat-Resistant RTV-1 Silicone Rubber Adhesive[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010, 22–35.
吴连峰. 耐高温 RTV-1 硅橡胶粘合剂的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010, 22–35.
- 17 Fan Zhigang, Chang Hong, Chen Shouqian. Thermal stress and deformation analysis of bonded optics[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 366–369.
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.
- 18 Liu Qiang, He Xin, Zhang Feng, *et al.*. Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2229–2236.
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): 2229–2236.
- 19 Valente T, Richard R. Interference fit equations for lens cell design using elastomeric lens mountings[J]. *Opt Eng*, 1994, 33(4): 1223–1228.