

# 温度变化对胶粘结透镜面形精度的影响

王汝冬 田 伟 王 平 王立朋 隋永新\* 杨怀江

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 为了保证透镜的面形精度受温度影响较小,透镜采用低应力胶粘结要优于采用机械方式装夹。首先对比了胶粘结透镜在16℃,20℃,26℃时透镜轴向应力大小和面形的变化。实验验证了在不同温度下,胶粘结透镜面形的峰谷(PV)值(0.073λ,0.064λ,0.085λ)要优于机械方式装夹的透镜面形 PV 值(0.204λ,0.108λ,0.105λ)。最后对不同温度下胶粘结透镜面形变化的理论计算、仿真和实验结果的误差进行了分析。实验结果表明在温度变化时,采用胶粘结透镜的面形精度要优于机械装夹的透镜面形精度,并且能有效控制温度变化对透镜面形精度的影响。

**关键词** 光学测量;面形精度;胶粘结透镜;温度变化

中图分类号 TL632+.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0808002

## Effect of Temperature Change on the Surface Accuracy of Bonded Lens

Wang Rudong Tian Wei Wang Ping Wang Lipeng Sui Yongxin Yang Huaijiang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** In order to reduce the lens surface deformation when the temperature changes, the bonded lens can achieve better effect than the lens which is mounted by spacer and retainer. The radial stress of the bonded lens and surface deformation at 16℃, 20℃ and 26℃ are compared by theoretical calculation and simulation. Experiment is then made to prove that the surface deformation (PV value) of the bonded lens (0.073λ, 0.064λ, 0.085λ) is better than the mounted lens (0.204λ, 0.108λ, 0.105λ) at different temperatures. Finally, the error sources of the surface deformation about theoretical calculation, simulation and experiment at different temperatures are analyzed. Experimental results indicate that the surface accuracy of bonded lens is better than that of the mounted lens, and the bonded lens has less surface deformation when the temperature changes.

**Key words** optical measurement; surface precision; bonded lens; temperature change

**OCIS codes** 120.6650; 120.4880; 120.6810

## 1 引 言

高精度的光学系统都是在恒温下使用的,当使用环境温度和装配温度有差异值时,会对光学系统产生一定的影响。传统的隔圈压圈方式装配的光学系统,由于透镜和镜框间隙很小,热膨胀系数不匹配,热变形量不同,会产生挤压力,造成光学零件面形变差,影响光学系统的出射波前。某些对面形精度要求比较高的光学系统,如光刻物镜光学元件和标准具的标准面,温度变化产生的热应力对面形的

影响也是不可忽略的。许多学者<sup>[1~7]</sup>研究和分析了温度对光学元件面形和光学系统性能的影响。

## 2 温度对机械装夹透镜面形的影响

透镜和镜筒装配时一般为间隙配合,升温造成透镜和镜筒间隙增大,引起透镜位置松动,受到振动冲击时易导致光学零件偏心倾斜。当温度下降时,透镜和镜筒收缩量不同,容易产生接触挤压,使透镜元件面形变差。Bayar 等<sup>[8,9]</sup>通过理论分析和实验

收稿日期:2011-02-21;收到修改稿日期:2011-03-29

基金项目:国家重大专项基金(2009ZX02205)资助课题。

作者简介:王汝冬(1982—),男,硕士,研究实习员,主要从事光机设计方面的研究。E-mail:rudong1415@163.com

\* 通信联系人。E-mail:suiyx@sklao.ac.cn

研究了温度对传统机械装夹透镜面形的影响。

口径  $\phi 100$  mm 的熔石英透镜安装在铝合金镜框中,透镜和镜框之间间隙较小,无压圈压紧,如图 1 所示。分别在  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  时测量在铝合金镜框中的透镜面形和  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时裸镜透镜面形。用 Zygo 干涉仪检测透镜面形,标准具面形精度为  $\lambda/40$ ,采用 16 次相位平均,测量 10 次,得到的面形干涉图如图 2 所示,面形峰谷(PV)值如表 1 所示。

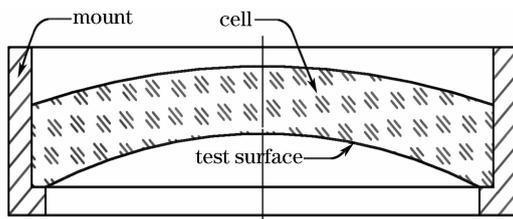


图 1 透镜装配示意图

Fig. 1 Sketch of mounted lens

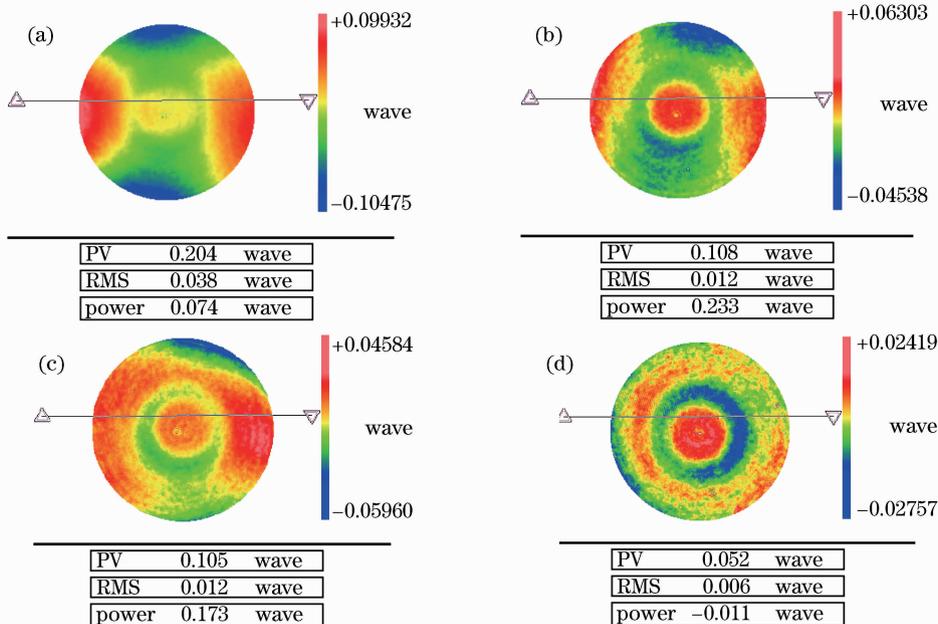


图 2 透镜面形测试图。(a)  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  带镜框透镜面形;(b)  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  带镜框透镜面形;  
(c)  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  带镜框透镜面形;(d)  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  裸镜面形

Fig. 2 Surface deformations of lens. (a) Surface deformation of mounted lens at  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (b) surface deformation of mounted lens at  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c) surface deformation of mounted lens at  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (d) surface deformation of lens cell at  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

表 1 不同温度下透镜面形

Table 1 Surface deformations of lens at different temperatures

Temperature	PV ( $\lambda = 632.8\text{ nm}$ )
$20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (lens cell)	$0.052\lambda$
$20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mounted lens)	$0.108\lambda$
$16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mounted lens)	$0.204\lambda$
$26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mounted lens)	$0.105\lambda$

对 4 种工况的干涉图和数据采集软件中泽尼克系数对比分析,在  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  时带镜框的透镜面形呈马鞍形,像散增大,面形变差。分析认为,透镜和镜框为间隙配合,实际上由于镜框内壁和透镜外圆不是理想的圆柱面,且镜框加工后存在残余应力导致变形,造成透镜和镜框的间隙变小,装配时侧壁产生摩擦和挤压等情况,导致裸镜和带镜框的透镜面形测量结果相差较大。温度降低时,镜框相比透镜收缩量更大,镜框内壁高点和透镜外沿发生挤压,产生热应

### 3 温度对胶粘结透镜面形的影响

透镜采用胶粘结技术,透镜和镜框间隙一般在  $0.05\sim 1\text{ mm}$  或者更大。由于胶层的隔离作用,温度下降时,镜筒和透镜不会因为收缩量不同产生挤压,避免了因透镜和镜筒之间的接触产生的热应力。但是胶粘结透镜时会产生收缩应力,温度变化时胶层也会产生热应力,这 2 种应力综合作用下对透镜面形的影响就是需要考虑的问题。胶粘剂的热膨胀系数一般要比镜筒和透镜大得多,在选择胶粘剂时,一般选用室温固化的胶粘剂。为了应对胶结材料热膨胀系数不匹配的问题,使之在温度改变时不产生较大应力,一般采用模量较低、延伸率高的胶粘剂,使热应力能通过胶粘剂的变形释放出来,提高胶层的厚度也有利于应力的释放。可选材料有室温硅橡

胶、室温硫化橡胶(RTV)、软聚氨酯等<sup>[10,11]</sup>。

关于透镜胶粘结结构的消热化设计和分析,有许多文献进行过研究<sup>[12~14]</sup>。采用不同热膨胀系数材料和合理设计结构尺寸参数,能达到当温度变化时光学元件不受热应力的影响。虽然理论上分析是可以的,但是实际上完全做到消热化设计是不可能的。一方面因为材料的热膨胀系数一般都是随温度变化而变化的,但分析时采用的都是20℃的实测值;另一方面因为胶粘剂一般为粘弹性体,力学分析十分复杂,参数测定也很困难。所以当温度变化时,粘结后的透镜胶接面会有应力产生,对透镜面形产生影响。

根据相关研究资料,对透镜进行粘结时,在保证粘结强度的前提下,胶层在透镜光轴方向尺寸*l*越小越好<sup>[15,16]</sup>,考虑到胶的收缩和热影响带来的应力,一般都选择点胶接的方法。胶点选择12点即可保证足够的粘结强度,也可使胶结应力对透镜面形的影响趋向均匀化。

采用多点胶结时,透镜在温度变化时,胶结面产生的应力应当包含胶粘结时产生的收缩应力和温度变化时产生的热应力<sup>[17~20]</sup>。因为透镜和镜框都是回转对称的,建立柱坐标系,如图3所示。

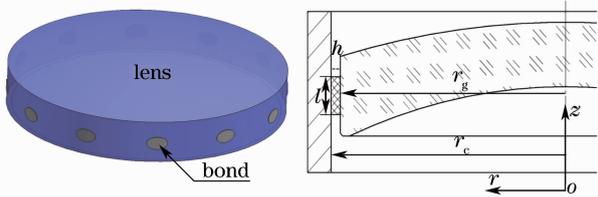


图3 胶粘结透镜结构示意图

Fig. 3 Sketch of bonded lens

应用体单元的胡克定律,胶结界面径向应力为

$$\sigma_r = \frac{E_b}{(1 + \nu_b)(1 - 2\nu_b)} \times [k_{33}(1 - \nu_b)\epsilon_r + k_{31}k_{33}\nu_b(\epsilon_z + \epsilon_\theta)], \quad (1)$$

式中  $E_b$  为胶的弹性模量;  $\nu_b$  为胶的泊松比;  $\epsilon_r$  为胶沿透镜径向方向应变;  $\epsilon_z$  为胶沿透镜轴向方向应变;  $\epsilon_\theta$  为胶沿透镜切向方向应变;  $k_{31}$  和  $k_{33}$  为修正因子,与  $\nu_b$  及胶层  $l/h$  (直径厚度比值) 有关。

图3中,胶结点看作是半径为  $l/2$  的圆面,温度变化时,在透镜轴向( $z$ 轴方向)和切向( $\theta$ 方向)产生的应变分别为

$$\epsilon_z = \epsilon_\theta = \frac{\delta l}{l} = \frac{l\alpha_b(T - T_a)}{l} = \alpha_b(T - T_a), \quad (2)$$

式中  $\alpha_b$  为胶的热膨胀系数。在透镜径向( $r$ 轴方向),

透镜的应变应为热应变和胶固化收缩产生的应变之和,可表示为

$$\epsilon_r = \frac{\delta h}{h} = (T - T_a) \left[ \alpha_b - \alpha_m - \frac{r_g}{h}(\alpha_m - \alpha_g) \right] - S_b, \quad (3)$$

式中  $r_g$  为透镜半径;  $h$  为透镜径向的胶层厚度;  $S_b$  为胶的收缩率。

把  $\epsilon_r, \epsilon_z$  和  $\epsilon_\theta$  代入(1)式可得温度变化时,透镜轴向应力为

$$\sigma_r = \frac{E_b}{(1 + \nu_b)(1 - 2\nu_b)} \times \left\{ k_{33}(1 - \nu_b) \left[ (\alpha_b - \alpha_m - \frac{r_g}{h}\alpha_m + \frac{r_g}{h}\alpha_g) \times (T - T_a) - S_b \right] + 2k_{31}k_{33}\nu_b\alpha_b(T - T_a) \right\}. \quad (4)$$

由于胶粘剂大多数为粘弹性体,具有非线性力学特性,所以上述计算胶粘结应力的方法仅为近似方法,并不能准确地描述透镜和胶粘结界面的轴向应力,但作为对透镜胶粘结时的轴向应力的评估(4)式已经足够。

透镜和镜框胶粘结后的结构尺寸如图4所示。透镜材料为熔石英,直径 $\phi 106$  mm;胶点数量为12个,沿透镜侧面周向均布;胶层为 $\phi 4$  mm,厚度0.2 mm的圆,材料为某RTV硅胶,线性收缩率约1%(3天,20℃);镜框材料为铝合金。材料性能参数如表2所示。

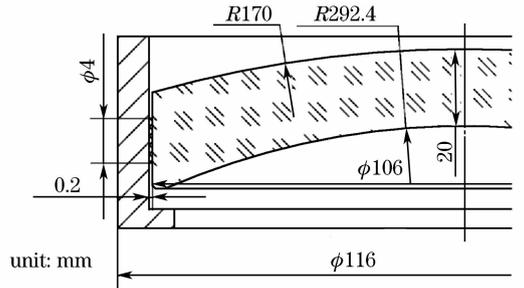


图4 胶粘结透镜结构尺寸

Fig. 4 Dimensions of bonded lens

表2 胶粘结透镜的材料参数表

Table 2 Material parameters for bonded lens mm

Material parameter	$E / \text{Pa}$	$\nu$	$\rho / (10^3 \text{ kg/m}^3)$	$\alpha / (10^{-6} / ^\circ\text{C})$
Aluminium alloy	$70.1 \times 10^9$	0.33	2.7	22.4
Fused silica	$74.6 \times 10^9$	0.16	2.2	0.55
RTV	$2.2 \times 10^6$	0.49	1.09	270

RTV胶层收缩率为1%,由此可得胶层粘结后轴向的拉伸(相比于自由收缩后厚度)为0.002 mm,

有限元分析时,把胶的收缩量当成固定位移(0.002 mm)边界条件处理。应用 Patran/Nastran 对透镜胶粘模型进行有限元建模,分别分析温度从20 ℃下降到16 ℃和从20 ℃上升到26 ℃时的透镜的轴向应力和凹面面形。透镜轴向应力分析结果如图 5,6 所示。

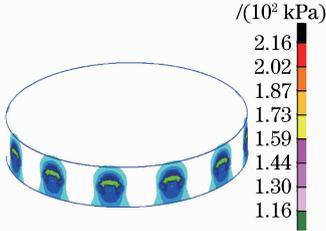


图 5 16 ℃时透镜轴向应力云图

Fig. 5 Radial stress contour of the bonded lens at 16 ℃

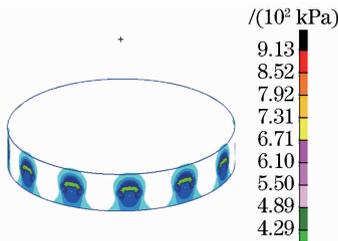


图 6 26 ℃时透镜轴向应力云图

Fig. 6 Radial stress contour of the bonded lens at 26 ℃

当  $\nu_b = 0.49, l/h = 20$  时,对应  $k_{31} = 0.9682, k_{33} = 0.6579$ ,应用(4)式计算当温度从20 ℃下降到16 ℃或上升到26 ℃时的透镜轴向应力。仿真分析结果和理论计算结果如表 3 所示。

表 3 胶粘结后,温度下降或升高时透镜轴向应力  
Table 3 Radial stress of the bonded lens when temperature changes

Temperature / ℃	16	26
Simulation /kPa	216	913
Theoretical calculation /kPa	250	872
Error /%	13.6	4.7

从表 3 可以看出,仿真结果和理论计算结果量级相同,但有误差。误差产生的原因:1) 透镜轴向应力公式为近似公式,并不能精确描述升降温时透镜轴向应力的大小;2) 仿真计算分析时对模型做了简化,也会产生误差。

应用 Matlab 程序对透镜凹面面形进行分析,除去刚性位移,可得降温或升温后的透镜凹面面形的均方根(RMS)分布图,如图 7 和 8 所示,面形数值如表 4 所示。

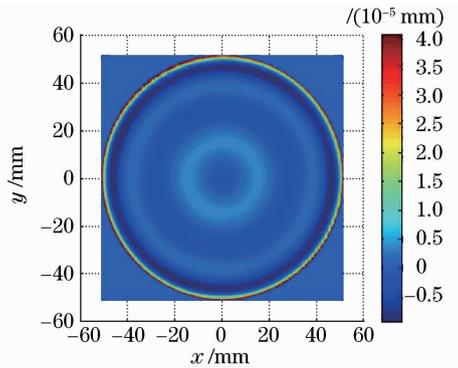


图 7 16 ℃时透镜凹面面形图

Fig. 7 Concave surface deformation of the lens at 16 ℃

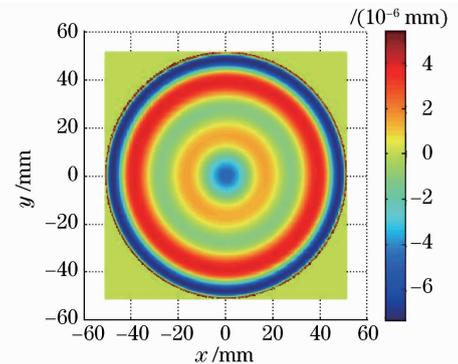


图 8 26 ℃时透镜凹面面形图

Fig. 8 Concave surface deformation of the lens at 26 ℃

表 4 透镜升温 and 降温后的面形值( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )  
Table 4 Surface deformations when temperature changes ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )

Temperature / ℃	16	26
PV /nm	28.7 ( $\lambda/22$ )	25.5 ( $\lambda/25$ )
RMS /nm	8.5	7.8

## 4 实验对比分析

采用实物进行实验,选取透镜、镜框和 RTV 胶等材料尺寸参数和仿真过程一致,如图 9 所示。采用 Zygo 干涉仪测量 16 ℃,20 ℃和 26 ℃时的胶粘结透镜面形。与预先测量好的 20 ℃时裸镜面形进行对比。采用 16 次相位平均,分别测量 10 次。测试结果曲线对比如图 10 所示。

通过分析不同温度下透镜面形对比曲线图可知,20 ℃时,胶粘结面形精度(最小值  $0.064\lambda$ )低于裸镜面形(最大值  $0.057\lambda$ ),但优于机械装夹后的透镜面形[图 2(a)中  $0.108\lambda$ ];温度下降和上升时,透镜变形变化较大。16 ℃时透镜面形(最小值  $0.073\lambda$ )要比 26 ℃时的(最小值  $0.085\lambda$ )精度高。



图9 透镜胶粘结结构

Fig. 9 Structure of the bonded lens

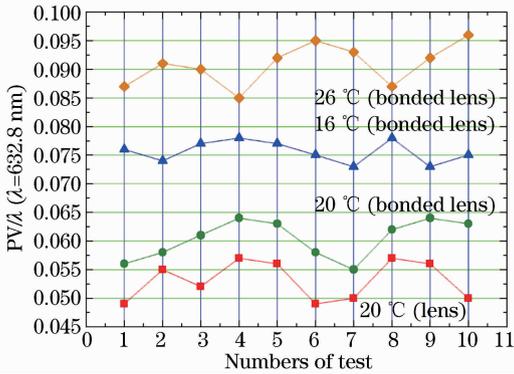


图10 不同温度下透镜面形测试曲线

Fig. 10 Surface deformations at different temperatures

同一工况下,仿真分析结果、理论计算结果和实验结果相比较,都存在误差。误差产生原因有:1) 粘结透镜的 RTV 胶是一种粘弹性体,在理论计算和仿真分析中都近似把其看作弹性材料,它们的分析结果和真实情况是有误差的;2) 理论公式中修正系数  $k_{31}$  和  $k_{33}$  来自不同种类 RTV 胶结实验,与单一型号的 RTV 胶独立的实验测量结果相比是有误差的;3) 由于机械加工误差,透镜和镜框的间隙不等于理论计算和仿真分析的理想值,胶层厚度存在变化,造成分析结果和真实测量值之间产生误差;4) 理论计算和仿真分析并未考虑胶粘结时材料表面状况(如粗糙度和化学处理等)对胶粘结应力的影响,这样也会造成理论计算、仿真分析和实际测量结果有误差。

## 5 结 论

采用胶粘结透镜时,在保证粘结强度的前提下,需要采用低应力、低收缩率和弹性模量小的胶才能保证粘结后对透镜的面形影响较小。通过实验分析,胶粘结透镜的面形精度在常温、升温和降温情况下要优于机械配合安装的透镜面形。采用胶粘结透镜,不仅能够有效改善透镜面形质量,也能有效控制

温度变化时透镜面形的变化,使温度对透镜面形影响最小。

## 参 考 文 献

- Zhang Junwei, Zhou Yi, Zhou Hai *et al.*. Effect of transient change of temperature on large-aperture optical element [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2):333~337  
张军伟,周 忆,周 海等. 瞬态温度变化对大口径光学元件的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2):333~337
- Feng Shulong, Zhang Xin, Weng Zhicheng *et al.*. Study on deformation of surface figure of large aperture mirror in temperature field [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(1):41~43  
冯树龙,张 新,翁志成等. 温度对大口径主镜面形变形的影响分析[J]. *光学技术*, 2005, **31**(1):41~43
- 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承设计与温度变形分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6):809~815
- Zhou Yi, Yang Shujuan, Zhang Junwei *et al.*. Thermal transfiguration analysis for the large aperture optical element of switchyard in ICF driver target area [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1):125~130  
周 忆,杨淑娟,张军伟等. 惯性约束聚变靶场编组站大口径光学元件的热变形分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1):125~130
- M. Olivieri, S. Pieri, A. Romoli. Analysis of defocusing thermal effects in optical systems [C]. *SPIE*, 1996, **2774**:283~292
- Alton E. Hatheway. Unified thermal/elastic optical analysis of a lithographic lens [C]. *SPIE*, 1996, **3130**:100~108
- Chen Hua, Shi Zhenguang, Sui Yongxin *et al.*. Thermal deformation analysis of optical surfaces caused by environmental temperature during interferometric testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1):0112007  
陈 华,史振广,隋永新等. 干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1):0112007
- Mete Bayar. Lens barrel optomechanical design principles [J]. *Opt. Engng.*, 1981, **20**(2):181~186
- Paul R. Yoder, Jr.. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Third Edition. Bellingham: SPIE Press, 2006. 767~783
- Gu Jiyou. *Adhesion Theory and Basis* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 180~182  
顾继友. *胶粘结理论与胶接基础*[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 180~182
- K. Rhodes. Adhesives deliver low shrink, low stress bonds and fast UV cure [C]. *SPIE*, 2001, **4253**:1605~1612
- James J. Herbert. Techniques for deriving optimal bondlines for athermal bonded mounts [C]. *SPIE*, 2006, **6288**:62880J
- Kirk A. Miller. Non-athermal potting of optics [C]. *SPIE*, 1999, **3786**:506~514
- Christopher L. Monti. Athermal bonded mounts: incorporating aspect ratio into a closed-form solution [C]. *SPIE*, 2007, **6665**:666503
- Li Shixue. *Manufacture and Application of Adhesives* [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1984. 231~235  
李士学. *胶粘剂制备及应用*[M]. 天津:天津科学技术出版社, 1984. 231~235
- Lu Hanmin. Technique for lens fixing by adhesion [J]. *Optical Technique*, 1991, **13**(4):29~34  
陆汉民. 透镜的粘接固定技术[J]. *光学技术*, 1991, **13**(4):29~34
- Michels Gregory, Keith Doyle. Finite element modeling of nearly incompressible bonds [C]. *SPIE*, 2002, **4771**:287~299

- 18 Han Xu, Wu Qingwen, Dong Deyi *et al.*. Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(1):118~125  
 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
- 19 Guan Yingjun. Finite element analysis of the focusing mirror fastened by adhesive [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(10):1~5  
 关英俊. 胶粘结固紧调焦镜有限元分析[J]. *光电工程*, 2010, **37**(10):1~5
- 20 Ryaboy Vyacheslav M.. Analysis of thermal stress and deformation in elastically bonded optics [C]. *SPIE*, 2007, **6665**:66650K