

doi:10.3788/gzxb20154412.1212001

# 用等效应力法分析温度变化对胶粘反射镜面形的影响

李文杰<sup>1,2</sup>, 王少鑫<sup>1</sup>, 穆全全<sup>1</sup>, 杨程亮<sup>1</sup>, 曹召良<sup>1</sup> 宣丽<sup>1</sup>

(1 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, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘 要:**基于等效应力法分析了温度变化对反射镜面形准确度的影响,对反射镜粘接处施加一定量的径向强迫位移约束,使其受到与热应力大小一致的应力作用,在该强迫位移约束下反射镜面形变化与热应力作用下反射镜面形变化基本一致.对直径为 70 mm、厚度为 15 mm 的反射镜进行粘接实验,用 ZYGO 干涉仪测定温变前后反射镜的面形变化.当温度由 20℃ 降到 16℃ 时,反射镜面形峰谷值和均方根值的变化量分别为  $0.005\lambda$  和  $0.002\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm),理论计算的峰谷值和均方根值变化量分别为  $0.004\lambda$  和  $0.002\lambda$ ;当温度由 20℃ 升高到 30℃ 时,反射镜面形峰谷值和均方根值变化量分别为  $0.013\lambda$  和  $0.006\lambda$ ,理论计算的峰谷值和均方根值变化量分别为  $0.012\lambda$  和  $0.004\lambda$ ,实验值和模拟分析值基本一致.

**关键词:**光学检测;光学元件;面形分析;胶粘反射镜;温度变化;强迫位移约束;ZYGO 干涉仪

中图分类号:TH122

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)12-1212001-6

## Using the Equivalent Stress to Analyze the Effect of Temperature Change on Surface Accuracy of the Bonded Mirror

LI Wen-jie<sup>1,2</sup>, WANG Shao-xin<sup>1</sup>, MU Quan-quan<sup>1</sup>, YANG Chen-liang<sup>1</sup>, CAO Zao-liang<sup>1</sup>, XUAN Li<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Applied Optics, 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)

**Abstract:** The equivalent stress method was proposed to analyze the surface change of the mirror under the temperature change. The forced displacement restrain was applied on the bonded position of the mirror to ensure the mirror suffer the equivalent stress compared with the heat stress. The surface change of the mirror under the action of the forced displacement was consistent to the one under the action of the temperature change. A bonded experiment to the mirror whose diameter is 70 mm and thickness is 15 mm and surface accuracy of the mirror is measured by the fine ZYGO interferometer in different temperatures. It is indicated that when the temperature descended from 20℃ to 16℃, the mirror surface change of the Peak to Valley(PV) and Root Mean Square(RMS) are  $0.005\lambda$  and  $0.002\lambda$ , while the simulation change of the PV and RMS are  $0.004\lambda$  and  $0.002\lambda$ . When the temperature increased from 20℃ to 30℃, the mirror surface change of the PV and RMS are  $0.013\lambda$  and  $0.006\lambda$ . The simulation change of the PV and RMS are  $0.012\lambda$  and  $0.004\lambda$ . The experimental result agrees with the simulation basically, which illustrate the equivalent stress method based on the forced displacement restrain can express the effect of the temperature change on the surface accuracy change of the mirror perfectly.

**Key words:** Optical detection; Optical element; Surface analysis; Bonded mirror; Temperature change; Forced displacement restrain; ZYGO interferometer

**OCIS Codes:** 120.6810; 120.6650; 120.1880; 120.4880

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11174274, 11174279)资助

第一作者:李文杰(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为自适应光学系统中光机结构设计. Email:li-wenjie@163.com

导师(通讯作者):宣丽(1957-),女,研究员,博士,主要研究方向为自适应光学系统总体设计、液晶器件. Email:xuanli@ciomp.ac.cn

收稿日期:2015-07-07;录用日期:2015-08-24

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

在光学系统中光学元件固定方式主要有传统的机械固定和新兴的胶粘固定<sup>[1]</sup>. 相比传统的机械固定<sup>[2-3]</sup>, 胶粘固定反射镜结构简单、重量轻、成本低廉. 近年来, 随着粘接剂以及粘接工艺的日渐成熟, 胶粘光学元件已广泛运用到光机结构中<sup>[4-7]</sup>. Alson E<sup>[8]</sup>等认为由于胶层有很高的泊松比, 且很薄, 在光学元件中其有效弹性模量是变化的, 对胶粘光学元件有限元建模具有指导意义. Gregory<sup>[9]</sup>等根据胶粘剂的不可压缩性, 修正了胶层应力应变方程, 使其更加地符合实际情况. Vyacheslav<sup>[10]</sup>等分别从理论计算和软件仿真两方面分析了温度变化对不同胶粘形式光学元件面形的影响. 闫勇<sup>[11]</sup>等研究了光学元件脱胶工艺, 提出了紧密光学胶粘件的快速脱胶方法. 董得义<sup>[12]</sup>等研究了胶层固化对反射镜面形的影响, 提出了减小胶层收缩对反射镜面形影响的改进方案. 韩旭<sup>[13]</sup>等对室温硫化 (Room Temperature Vulcanized, RTV) 胶层的建模进行了研究, 认为将胶层视为各向同性时一层单元建模即可得到较为准确的分析结果. 李福<sup>[14]</sup>等对胶点的面

积、形状以及均匀性进行了模拟分析, 发现在胶点均匀时圆形胶点对反射镜的面形影响最小.

反射镜作为常见的光学元件, 在光学系统中起到对光线的偏折作用, 其面形的好坏直接影响着光学系统的工作质量<sup>[15-17]</sup>. 然而, 在胶粘反射镜的装配体中, 胶层和装配体其它部件间的弹性模量和体积往往相差较大, 若将它们作为一个整体直接进行热应力仿真分析, 会使建模的难度大大增加, 同时在一定程度上也会影响分析结果的准确性<sup>[8]</sup>. 本文利用等效应力建模仿真分析温度变化对胶粘反射镜面形准确度的影响. 首先利用修正的热应力公式得出反射镜在温度变化时所受的热应力. 然后在胶粘位置对反射镜施加径向的强迫位移约束, 使反射镜受到与热应力大小一致的应力作用, 并分析了该强迫位移下反射镜的面形变化. 最后通过实验验证该等效应力法的可行性.

## 1 等效应力分析法

Gregory<sup>[9]</sup>根据胶粘材料有很高的宽厚比, 提出修正的三维应力应变方程为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{k_{11}k_{12}\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{k_{11}k_{13}\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{12}k_{22}\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{k_{11}(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{k_{13}k_{11}\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{13}k_{11}\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{k_{13}k_{11}\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{k_{33}(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{21} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\nu$  和  $E$  分别为胶层材料的泊松比和弹性模量.  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{13}$ ,  $k_{33}$  为不同方向上的修正系数. 当胶层材料的泊松比为 0.45 时, 不同胶层宽厚比  $b/t$  的修正系数如表 1, 其它宽厚比的修正系数可用插值法得到. 为了更加地符合工程实际需求, 在反射镜的侧面, 靠近背部对反射镜进行胶粘固定, 如图 1(a).

表 1 不同宽厚比的修正系数

Table 1 Modified coefficients in different ratio of width to thickness

$b/t$ Radio	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{13}$	$k_{33}$
1	0.4036	0.6717	0.2704	0.1433
2	0.5101	0.7866	0.5257	0.3750
5	0.7521	0.9267	0.8372	0.8518
10	0.8760	0.9685	0.9301	0.9907
20	0.9383	0.9854	0.9675	0.9994

温度变化引起胶层材料的膨胀、收缩, 使反射镜径向受到胶层材料的轴向应力作用. 建立如图 1(b) 所示

的坐标系, 反射镜在胶结界面受到的径向应力<sup>[9]</sup>为

$$\sigma_r = \frac{k_{13}k_{11}\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\epsilon_t + \epsilon_r) + \frac{k_{33}\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\epsilon_z \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_z$  分别为胶层沿反射镜轴向、切向和径向的应变. 胶层沿反射镜径向的形变  $\delta h$  定义为温度变化时不受约束的厚度变化与实际厚度变化之差, 即

$$\delta h = [h\alpha_r - (r_g + h)\alpha_m - r_g\alpha_r]\Delta T$$

则

$$\epsilon_z = \frac{\delta h}{h} = \frac{[h\alpha_r - (r_g + h)\alpha_m - r_g\alpha_r]\Delta T}{h} \quad (3)$$

式中  $\alpha_m$ ,  $\alpha_r$ ,  $\alpha_g$  分别为镜框、胶层和反射镜的热膨胀系数,  $r_g$  为反射镜的半径,  $\Delta T$  为温度变化量,  $h$  为胶层厚度. Bayar<sup>[6]</sup>粘接方程认为胶层沿反射镜轴向和切向的膨胀为不受约束的自由膨胀, 即有  $\epsilon_t = \epsilon_r = 0$ , 该假设比较适合三点粘接情况. 将式(3)代入式(2)即可得不同温度变化下反射镜所受的热应力

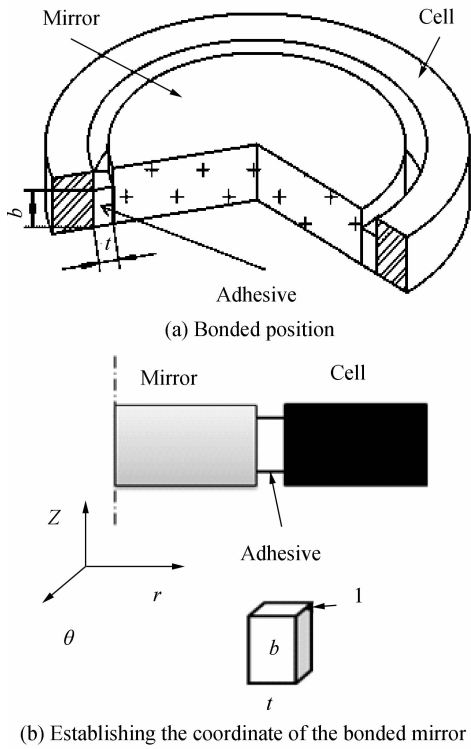


图1 反射镜粘接分析  
Fig. 1 Bonded mirror analysis

$$\sigma_r = \frac{k_{33} \nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ \alpha_r - \alpha_m - \frac{r_g}{h} (\alpha_m - \alpha_g) \right] \Delta T \quad (4)$$

由于胶粘反射镜装配体之间材料的弹性模量相差很大,且胶层所占的体积比例很小,不适合直接对装配体进行建模分析.热应力在不同的温变下对反射镜进行拉伸或挤压作用,与反射镜受到不同程度的强迫位移约束时所受的拉伸或挤压作用相类似.所以对反射镜施加强迫位移约束,等效地仿真分析热应力对反射镜面形变化的影响,可大大简化建模过程.仿真中使用的材料如表2所示,反射镜的直径为70 mm,厚度为15 mm.

施加强迫位移约束时需要考虑约束的作用面积和所给的位移大小.由于粘接剂固化和工作环境温度变化都会引起粘接剂的尺寸变化,因此在满足胶粘强度的前提下应尽量减少胶粘面积.一般来说,最小的胶粘面积  $A_{min}$  由式(5)确定<sup>[1]</sup>.

$$A_{min} = W a f_s / J \quad (5)$$

式中,  $W$  为反射镜的重量,量纲为  $N$ ,  $a$  为恶劣条件下的加速度因子,无量纲,  $J$  为抗拉强度,量纲为  $MPa$ ,  $f_s$  为安全系数,一般取 2. 考虑某些非最佳条件,如粘接面清洁不足,将安全系数取为 4. 最恶劣条件下的加速

表2 材料参量

Table 2 Material reference

Material	Density $\rho / (kg \cdot m^{-3})$	Poisson Ratio $\nu$	Young's Modulus $E / Pa$	Coefficient of heat expansion $\alpha / ^\circ C$	Shear Strength $J / Pa$	
Cell	45Steel	7850	0.3	2e11	11.6e-6	--
Bond	703 <sup>[18]</sup>	1070	0.43	1.05e6	236e-6	6e5
Mirror	Zerodur	2530	0.24	9.1e10	0.05e-6	--

度因子  $a$  主要发生在运输的时候,受行车速度、路面状况、货物重量等因素的影响.当系统用汽车运输,时速为 30 km/h 时,紧急制动,车厢将产生 0.6~0.7 g 的冲击加速度,当以 12.9~24.1 km/h 行驶在土路,车厢将产生 5~10 g 的冲击加速度<sup>[19]</sup>.为保证器件的安全,将最恶劣环境加速度因子取为 30,根据式(5)计算,直径为 70 mm 厚度为 15 mm 的微晶玻璃反射镜的最小粘接面积约为  $Q_{min} = 30 \text{ mm}^2$ .将每段胶层在反射镜轴向的高度  $b$  取为 1 mm,弧长取为 10 mm.

图2(a)、(b)分别为反射镜受拉和普通杆件受拉情况.与杆件受拉相比,反射镜受拉伸除了在受力面处受力外,还受到反射镜本身其他部位的牵拉,阻碍其向外扩张,受力相对复杂.在材料的弹性形变范围内,受拉杆件所受的应力为<sup>[20]</sup>

$$\sigma = \epsilon E = \frac{\Delta L}{L} E \quad (6)$$

式中,  $\epsilon$  为杆件的应变,  $L$  为杆件原长度,  $\Delta L$  为杆件的强迫位移量,  $E$  为杆件的弹性模量.对反射镜在胶粘位置施加不同的强迫位移约束,仿真分析得到不同

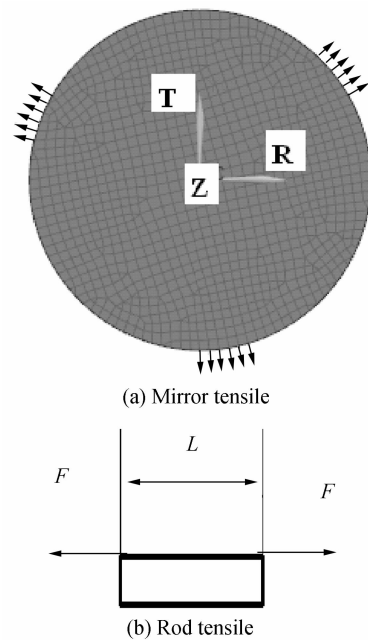


图2 强迫位移分析  
Fig. 2 Analysis of the forced displacement

的应力值,将仿真结果和长度为反射镜半径的杆件受拉计算结果相对比,如表 3.

表 3 强迫位移量与应力的关系

Compel displacement $\Delta L/\text{nm}$	1	5	10	15	20	25
Stress of Rod/kPa	2.6	13	26	39	52	65
Stress of model/kPa	10.3	51	102	152	205	258

从表 3 中可以看出,随着变形量的增加,模型受的应力和杆件理论计算的应力几乎等比增加,计算得比例系数  $K$  约为 3.95,故在反射镜弹性形变范围内,反射镜模型所受的强迫位移量和应力的关系为

$$\Delta R = \frac{\sigma}{k} = \frac{R\sigma_{\text{modeling}}}{kE} \quad (7)$$

式中,  $\Delta R$  为施加的强迫位移量,方向为反射镜径向;  $K=3.95$  为比例系数;  $\sigma_{\text{modeling}}$  为反射镜热应力,  $R$  为反射镜的半径,  $E$  为反射镜的弹性模量. 在反射镜粘接部位加强迫位移约束得到反射镜面形数据,经处理后反射镜表面面形 RMS 值和 PV 值如表 4. 从表 4 中可知,随着强迫位移的增加,反射镜面形 RMS 值和 PV 值基本是线性增加的. 因此,可以根据热应力的大小求得强迫位移量,进而预判反射镜的面形变化.

表 4 强迫位移与反射镜面形变化关系

Compel displacement/nm	1	5	10	15	20	25	30
RMS/nm	0.16	0.82	1.65	2.47	3.29	4.11	4.93
PV/nm	0.71	3.5	6.8	10.6	14.3	17.8	21.4

图 3 为直径 70 mm、厚度 15 mm 的反射镜在温变  $1^\circ\text{C}$  时的面形变化情况. 为更好地观察反射镜面形的变化规律,图中反射镜面形变化均为模型实际面形变化的 10 倍. 模拟中胶层的宽厚比为 10,厚度为 0.1 mm. 计算得反射镜径向所受到的应力为 12.5 kPa,需要对反射镜施加的强迫位移约束为 1.23 nm,反射镜面形 PV 值和 RMS 值的变化量分别约为 0.76 nm 和 0.25 nm. 图 3 (a)、(b) 分别为反射镜受拉和受压的情况,其中上表面为工作面. 当反射镜在粘接处受到压力

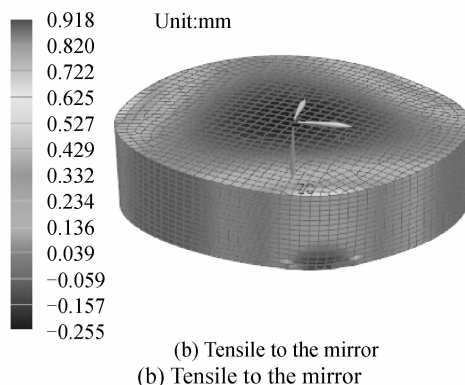
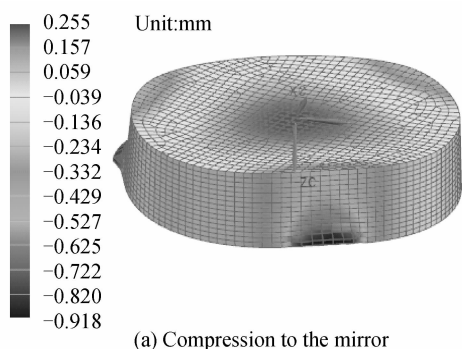


图 3 强迫位移约束对反射镜面形的影响

Fig. 3 Mirror surface accuracy affected by the forced displacement constraint

作用时,反射镜的工作面向外鼓起,形成离焦;当反射镜受拉伸作用时其工作面向内凹陷,形成反向离焦.

## 2 实验验证与结果分析

为了验证等效应力方法的可行性,对直径 70 mm、厚度 15 mm 的反射镜进行粘接实验,并用 ZYGO 干涉仪测量其不同温度下的面形. 反射镜的粘接位置为靠近反射镜背部的侧面三点粘接,如图 1(a),每处粘接位置粘接的宽度和高度分别为 10 mm 和 1 mm,胶层厚度为 0.1 mm. 所使用的材料参量如表 2. 图 4 为利用 ZYGO 干涉仪测量反射镜面形的实验光路图,ZYGO 干涉仪的测量准确度为  $\lambda/1000$  ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )<sup>[21]</sup>. 实验前对裸镜进行三次热循环处理,面形稳定后测量其初始面形. 反射镜在室温 ( $20^\circ\text{C}$ ) 下的初始面形 PV 值为  $0.047\lambda$ ,RMS 值为  $0.005\lambda$ ,离焦量为  $0.001\lambda$ ,如图 5 (a). 接着对反射镜进行粘接,并让粘接剂在恒定室温 ( $20^\circ\text{C}$ ) 下固化,固化的时间为 72 h. 固化后在室温 ( $20^\circ\text{C}$ ) 下测量反射镜面形,某一次的面形如图 5 (b). 然后分别在环境温度为  $16^\circ\text{C}$  和  $30^\circ\text{C}$  下测量粘接反射镜的面形,保温时间均超过 6 h. 反射镜在  $16^\circ\text{C}$  和  $30^\circ\text{C}$  下的某一次测量面形分别如图 5 (c) 和 (d). 三种温度下 10 次测量结果如表 5.

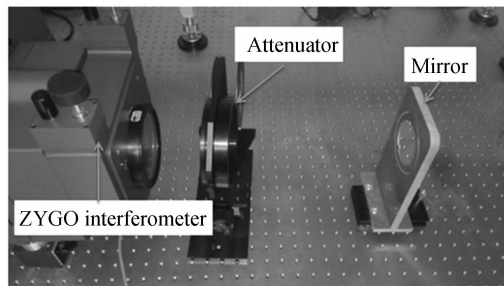


图 4 ZYGO 干涉仪测反射镜面形

Fig. 4 Surface accuracy measurement to the mirror using ZYGO interferometer

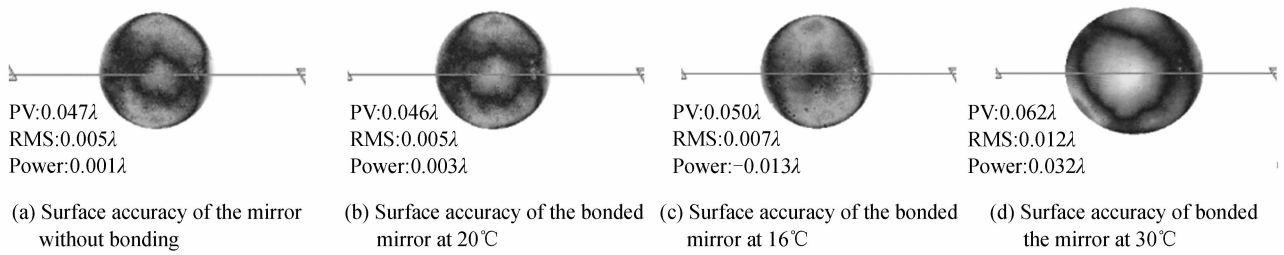


图5 不同条件下反射镜面形检测

Fig. 5 Surface accuracy measure of the mirror at different condition

表5 不同温度下的面形数据

Table 5 Deformation date of mirror at different temperature Unit:  $\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{nm}$ )

Numbers	16°C			20°C			30°C		
	PV	RMS	Power	PV	RMS	Power	PV	RMS	Power
1	0.049	0.006	-0.010	0.046	0.005	0.003	0.063	0.011	0.024
2	0.052	0.007	-0.011	0.048	0.005	0.000	0.059	0.012	0.029
3	0.052	0.007	-0.013	0.050	0.005	0.004	0.062	0.012	0.032
4	0.060	0.008	-0.012	0.051	0.006	0.002	0.069	0.013	0.030
5	0.050	0.007	-0.013	0.052	0.006	0.002	0.062	0.010	0.035
6	0.057	0.006	-0.007	0.050	0.006	0.003	0.058	0.012	0.028
7	0.048	0.006	-0.006	0.039	0.004	0.002	0.057	0.010	0.019
8	0.047	0.006	-0.007	0.047	0.005	0.005	0.058	0.010	0.024
9	0.050	0.006	-0.009	0.046	0.005	-0.001	0.062	0.011	0.028
10	0.048	0.006	-0.012	0.051	0.005	0.001	0.059	0.010	0.024
Averages	0.052	0.007	-0.010	0.048	0.005	0.002	0.061	0.011	0.027

模拟分析中,当温度变化为 $1^\circ\text{C}$ 时反射镜的面形PV和RMS值变化量分别为 $0.0012\lambda$ 和 $0.0004\lambda$ ( $\lambda=632.8\text{nm}$ ).当反射镜从室温的 $20^\circ\text{C}$ 降到 $16^\circ\text{C}$ 时,反射镜面形的PV值从 $0.048\lambda$ 升高到 $0.052\lambda$ ,RMS值由 $0.005\lambda$ 升高到 $0.007\lambda$ ,离焦项由正变为负值.PV值和RMS值变化量分别为 $0.004\lambda$ 和 $0.002\lambda$ .而理论计算的面形PV值变化量为 $0.005\lambda$ ,RMS值变化量为

$0.002\lambda$ .当环境温度升高到 $30^\circ\text{C}$ 时,反射镜面形PV值从 $0.048\lambda$ 升高到 $0.061\lambda$ ,RMS值由 $0.005\lambda$ 升高到 $0.011\lambda$ ,离焦量增大,PV值和RMS值的变化量分别为 $0.013\lambda$ 和 $0.006\lambda$ .而理论计算的面形PV值变化量为 $0.012\lambda$ ,RMS值变化量为 $0.004\lambda$ .模拟和实验结果的面形变化量对比如表6,实验获得的结果和模拟分析结果基本一致.

表6 模拟结果和实验结果的面形变化对比

Table 6 Comparison of surface change between simulation and experiment Unit:  $\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{nm}$ )

	Change of PV		Change of RMS		Change of Power
	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	
$20^\circ\text{C}\rightarrow 16^\circ\text{C}$	0.005	0.004	0.002	0.002	Positive to Negative
$20^\circ\text{C}\rightarrow 30^\circ\text{C}$	0.012	0.013	0.006	0.004	More Positive

反射镜室温下的离焦量为正值,主要是由于胶层的固化收缩,使反射镜在粘接部位受到径向拉伸,导致其工作面向里凹陷.当环境温度下降时材料发生收缩,由于胶层很薄,胶层的径向收缩量小于镜框的收缩量而受到挤压,并将挤压力传递给反射镜.由于材料的连续性,在粘接部位受到压缩的反射镜使其工作面向外突出,故离焦由正变负.同理,当环境温度升高时材料发生膨胀,因胶层很薄,其膨胀量小于镜框的膨胀量,被镜框向外拉伸,并将拉伸作用传递给反射镜,使反射镜的工作面在原有凹陷的基础上继续向里凹陷,故离

焦量负值变大.温度升高时测得的面形数据偏大主要是因为温度升高和胶层固化均使反射镜受到拉伸.理论和实验数据的对比可知,理论分析结果与实验检测结果基本一致,用强迫位移产生等效应力来模拟温度对反射镜面形的影响是可行的.

为了证明该方法具有一定的普适性,对直径为 $100\text{mm}$ 、厚度为 $20\text{mm}$ 的反射镜进行与上述 $70\text{mm}$ 口径反射镜相同的分析过程,其分析结果如表7.结果表明,理论分析数据和实验结果基本吻合,说明该方法比较适合用于中小型反射镜的分析应用.

表 7 100 mm 口径反射镜的模拟结果和实验结果对比

Table 7 Comparison between simulation and experiment for mirror of 100 mm Unit:  $\lambda(\lambda=632.8\text{nm})$ 

	Change of PV		Change of RMS		Change of Power
	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	
20°C→16°C	0.007	0.006	0.003	0.003	Positive to Negative
20°C→30°C	0.017	0.018	0.008	0.007	More Positive

### 3 结论

利用强迫位移约束产生等效应力来模拟分析温度变化对反射镜面形的影响,避免了整体模拟分析中因胶层与其他部件间的弹性模量和体积相差较大而产生的建模复杂问题,大大提高了仿真分析的效率.对直径为 70 mm、厚度为 15 mm 以及直径为 100 mm、厚度为 20 mm 的反射镜的粘接实验中,反射镜的面形变化量与利用等效应力法分析得到的反射镜面形变化量基本一致.该方法用简单的等效应力分析法来预判不同温度及粘接条件下反射镜的面形变化情况,节省了实验时间和成本,适用于中小型反射镜的分析应用.

#### 参考文献

- [1] YODER P R. Opto-mechanical systems design [M]. ZHOU Hai-xian, CHEN Yun-fang Transl. Beijing: China machine press, 2008:120.
- [2] ZHOU Zi-yun, GAO Yun-guo, SHAO Shuai, et al. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(06): 1547-1554.  
周子云, 高云国, 邵帅, 等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计 [J]. *光学·精密工程*, 2014, **22**(06): 1547-1554.
- [3] CHEN Hong-da, CHEN Yong-he, SHI Ting-ting, et al. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(02): 535-540.  
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究 [J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(02): 535-540.
- [4] WU Zhi-hui, WANG Dong-ping, ZHOU Lian-sheng, et al. Influence of adhesives on dynamics characteristic of opto-mechanical structure [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **06**(06): 75-80.  
吴志会, 王东平, 周连生, 等. 胶粘剂对光机结构动力学特性的影响 [J]. *光电工程*, 2014, **06**(06): 75-80.
- [5] WANG Ru-dong, TIAN Wei, WANG Ping, et al. Effect of temperature change on the surface accuracy of bonded lens [J]. *Chinese Journal of 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准确度的影响 [J]. *中国·激光*, 2011, **38**(8): 0808002.
- [6] FAN Zhi-gang, CHANG Hong, CHEN Shou-qian. 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.
- [7] CUI Yong-peng, HE Xing. Cementation technique for reducing stress in mirror fixation [J]. *Infrared*, 2014, **10**(10): 20-22.  
崔永鹏, 何欣. 用于降低胶接应力的反射镜胶接技术 [J]. *红外*, 2014, **10**(10): 20-22.
- [8] HATHEWAY A E. Analysis of adhesive bonds in optics [C]. SPIE, 1993, **1998**: 1-7.
- [9] MICHELS G J, GENBERG V L. Finite element modeling of nearly incompressible bonds [J]. SPIE, 2002, **4771**: 487-495.
- [10] RYABOV V. Analysis of thermal stress and deformation in elastically bonded optics [C]. SPIE, 2007, **6665**(50): 1-12.
- [11] YAN Yong, YAO Jing-song, ZHANG Lei, et al. Fast degumming of high-precision optical cemented elements [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(06): 1657-1663.  
闫勇, 姚劲松, 张雷, 等. 精密光学胶结件的快速脱胶 [J]. *光学·精密工程*, 2015, **23**(06): 1657-1663.
- [12] DONG De-yi, LI Zhi-lai, LI Rui-gang, et al. Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(10): 2698-2707.  
董得义, 李志来, 李锐钢, 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.
- [13] HAN Xu, WU Qing-wen, DONG De-yi, 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.
- [14] LI Fu, RUAN Ping, ZHAO Bao-chang, et al. Finite element analysis of the plane mirror fastened by adhesive [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(6): 896-899.  
李福, 阮萍, 赵葆常, 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.
- [15] LI Fu, RUAN Ping, ZHAO Bao-chang. Analysis of the mirror surface at the gravity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 272-275.  
李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 272-275.
- [16] LIANG Biao, LIU Wei, CHEN Chen. Support design of plane raster and calculation of the surface deformation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1514-1520.  
梁彪, 刘伟, 陈程. 平面光栅支撑结构设计及其面形分析计算 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(10): 1514-1520.
- [17] YUAN Ting, ZHANG Feng, TAO Xiao-ping, et al. Test of optical mirror surface using fringe reflection system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7): 1-7.  
袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 条纹反射法检测光学反射镜面形 [J]. *光子学报*, 2015, **44**(7): 1-7.
- [18] 关少华. RTV 胶在高准确度光学装配中对面形影响的分析 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [19] 运输过程中的冲击特性 [EB/OL] (2008) <http://wenku.baidu.com/view/07037495dd88d0d233d46aec.html>
- [20] 陈天富, 冯贤桂, 材料力学 [M]. 第 2 版, 重庆: 重庆大学出版社, 2005: 10.
- [21] ZHANG Li-min, WANG Fu-guo, AN Qi-chang, et al. Application of Bipod to supporting structure of minitype reflector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 439-443.  
张丽敏, 王富国, 安其昌, 等. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用 [J]. *光学·精密工程* 2015, **23**(2): 439-443.