

文章编号 1004-924X(2015)07-2005-08

## 胶层厚度对三点支撑反射镜面形的影响

贾树强\*, 黄 玮, 庞武斌

(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:**以 45 nm 浸没式光刻物镜中采用的三点支撑反射镜为研究对象,建立了胶层连接的三点边缘支撑结构模型,用以确定胶层厚度对三点支撑反射镜面形变化的影响。分析了重力作用下三点支撑反射镜的面形变化情况,通过解析表达式描述了胶层厚度对反射镜受力变形的影响。建立了“支撑块-胶层-反射镜”的有限元计算模型,针对不同胶层厚度对反射镜的面形变化进行了仿真分析。仿真结果表明:随着胶层厚度的增大,反射镜的面形变化(均方根值 RMS)呈现先减小后增大的趋势;当胶层厚度为 280  $\mu\text{m}$  时,反射镜面形变化的 RMS 值最小,约为 1.25 nm。最后,通过实验测量了柔性双脚架三点边缘支撑导致的反射镜面形变化。结果显示:当胶层厚度为 200, 280, 400  $\mu\text{m}$  时,反射镜面形的变化结果均与仿真结果一致,验证了本文仿真结果的正确性。

**关键词:**光机系统;反射镜;三点支撑;表面面形;胶层;有限元模型

**中图分类号:**TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.2005

## Influence of adhesive thickness on surface deformation of mirror supported by three-point mount

JIA Shu-qiang\*, HUANG Wei, PANG Wu-bin

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

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

**Abstract:** By taking the mirror supported by a three-point mount used in a 45 nm immersed lithographic objective lens for a research object, a support structure model with the three-point mount by adhesive connection was established to determine the influence of adhesive thickness on surface deformation of the mirror supported by the three-point mount. The mirror surface deformation distribution due to gravity was analyzed, and the effect of different adhesive thicknesses on surface deformation was discussed through analytical expressions. Then, a finite element model of “block-layer-mirror” was established. The deformation of mirror surface was simulated for different adhesive thicknesses. The simulation results show that the Root Mean Square(RMS) values of mirror surface deformation first decrease and then increase with the increasing adhesive thickness, and it reaches a minimum of 1.25 nm when the adhesive thickness is about 280  $\mu\text{m}$ . Finally, surface deformation changes of the mirror caused by the three-point support were tested through an experiment while adhesive thicknesses were

收稿日期:2014-12-04;修订日期:2015-02-01.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2012ZX02701001-007)

200  $\mu\text{m}$ , 280  $\mu\text{m}$  and 400  $\mu\text{m}$ . Experiment results show that surface deformation of the mirror is in agreement with simulation result, which verifies the validity of simulation results.

**Key words:** opto-mechanical system; mirror; three-point mount; surface deformation; adhesive; Finite Element Model(FEM)

## 1 序 言

结构黏合剂是光机仪器中最广泛使用的黏合剂之一,主要用于固定机械零件或光学零件。在光机结构装配中,黏合剂可以替代螺栓、铆钉、压板等机械零件来实现紧固作用。与传统的机械紧固方式相比,黏结剂紧固方式具有结构简单、重量轻、装配应力分布均匀、柔性高等特点。随着现代制造工艺的发展,结构黏合剂的物理化学性能得到了大幅的提升,并越来越多地用于精密光机系统的装配。

采用黏结剂紧固方式安装光学元件是光机系统装配时一种常见的安装方式。黏结剂紧固过程中不同的胶层厚度,黏结工艺,黏结剂性能等都会影响光学元件的面形。通过控制胶层厚度、形状等参数可以减小装配过程中产生的热应力、胶层收缩应力等装配应力,改善支撑后光学元件的面形变化,提高光机结构的性能。目前,国内外学者对黏结剂紧固方式的研究主要包括:胶结装配工艺<sup>[1-4]</sup>,如胶层固化条件选择,胶层厚度一致性控制等;胶层力学特性<sup>[5-7]</sup>,如胶层黏结强度,胶层固化过程中的内应力等;胶层特征对光学元件面形的影响<sup>[8-10]</sup>;以及在温度变化的环境下通过控制胶层厚度消除或减小热应力<sup>[11-13]</sup>。本课题组在研究 45 nm 浸没式光刻投影物镜的过程中,发现采用柔性双脚架<sup>[14-15]</sup>三点边缘支撑反射镜时,胶层厚度会显著影响反射镜面形,且呈现出一定的规律,但目前尚未见关于胶层厚度对三点支撑光学元件面形影响的研究报导。

本文以 45 nm 浸没式光刻投影物镜中的反射镜为研究对象,采用胶层连接的三点边缘支撑结构支撑反射镜,分析了理想面形在重力作用下的受力变形情况,研究了胶层厚度对面形变化的影响规律。通过建立“支撑块-胶层-反射镜”的有限元模型,仿真分析了不同胶层厚度下反射镜的面形变化,以确定不同胶层厚度值与反射镜面形变化的均方根值(Root Mean Square, RMS)之间

的关系。最后,通过实验测量柔性双脚架三点边缘支撑导致的反射镜面形变化,验证了仿真结果的正确性。该研究可为精密反射镜三点边缘支撑过程中胶层厚度的确定提供参考。

## 2 反射镜安装方案

根据 45 nm 浸没式光刻投影物镜的主要设计参数和光学系统的技术特点可知,反射镜的安装精度和表面面形对投影物镜光学系统的波像差和畸变影响最大。为实现反射镜的高精度支撑,采用三点边缘支撑的运动学支撑方案安装反射镜,如图 1 所示。

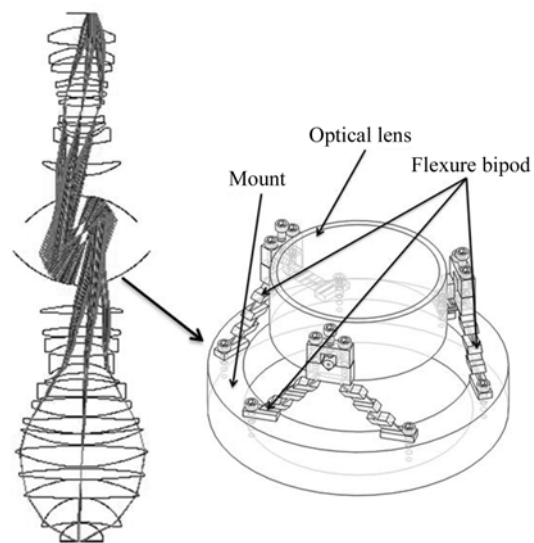


图 1 三点支撑的反射镜安装方案示意图

Fig. 1 Installation scheme for mirror supported by three-point mount

理想条件下三点边缘支撑光学元件的受力情况如图 2 所示,三点位置成  $120^\circ$  间隔,其变形最大值位于光学元件的中心。根据 Vukobratovich 推导的圆形反射镜中心变形量表达式<sup>[16]</sup>,三点边缘支撑的光学元件表面中心变形最大值为:

$$\Delta Y_C = \frac{C_S \rho_g t_g^4 (1 - \nu_g^2)}{E_g t_g^3}, \quad (1)$$

其中:  $C_s$  为支撑条件常数,与三点支撑位置到光学元件中心的距离和支撑点处的受力方向有关,理想条件下三点等间隔边缘支撑,  $C_s$  取值为 0.412;  $\rho_G$ ,  $\nu_G$  和  $E_G$  分别为反射镜材料的密度、泊松比和杨氏模量;  $r_2$  为反射镜半径;  $t_A$  为反射镜厚度。

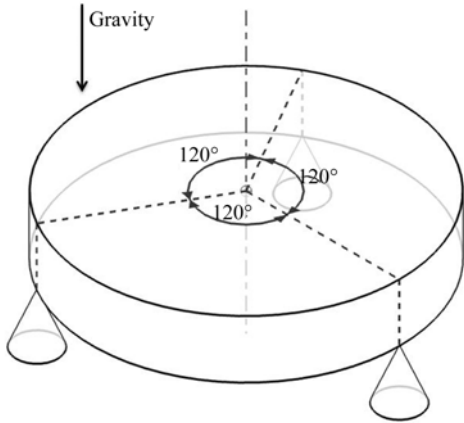
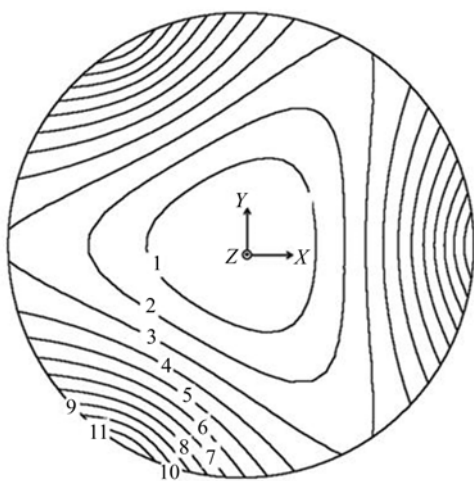


图 2 三点支撑光轴竖直的反射镜示意图

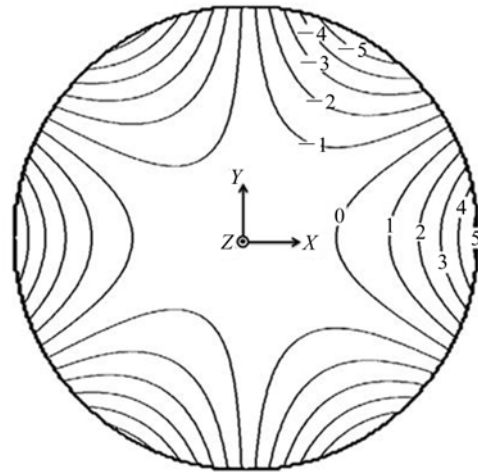
Fig. 2 Three-point support for a vertical-axis mirror

在三点支撑条件下由重力造成的反射镜表面变形如图 3(a)所示。对于光学表面而言,影响光学性能的主要因素并不是光学表面在重力作用下相对于初始位置的偏离量,而是变形后的表面相对于最佳拟合光学面的偏离量,如图 3(b)所示。从图 3(b)可以看出,三点边缘支撑导致的光学元件表面相对于最佳拟合光学面的变形为旋转对称的三叶形状。在图 3(b)所示的坐标系下,变形量



(a) 相对于原始面的变形

(a) Deformation relative to original surface



(b) 相对于最佳拟合面的变形

(b) Deformation relative to the best fitting surface

图 3 三点支撑安装方式下反射镜表面变形的等高线图

Fig. 3 Contour plots of computed surface deformation of mirror supported by three points

表示式为:

$$f(x, y) = K \cdot (3x^2y - y^3) + C_s, \quad (2)$$

其中:  $K$  为系数,  $K \approx \Delta Y_c$ ;  $C_s$  为常数,与竖直方向的支撑位置有关。

胶层厚度的变化会影响支撑点的受力情况和支撑位置到光学元件中心的距离,导致支撑条件常数  $C_s$  发生变化,从而影响反射镜表面面形的变化。

### 3 支撑块-胶层-反射镜结构建模

#### 3.1 有限元模型

以图 1 所示反射镜支撑方案为研究对象分析了在重力作用下胶层厚度对反射镜面形变化的影响。首先简化分析过程,排除安装误差、螺纹间隙、温度等因素的干扰,将图 1 所示结构简化为典型的三点边缘支撑结构,并建立胶层结构模型,如图 4 所示。模型简化处理主要包括:①忽略螺栓和螺栓孔等微小结构,用相应的约束代替;②忽略安装底座,在支撑块底端施加固定约束;③在恒温和小变形的工作情况下固化好的胶层的应力和应变呈线性关系,因此将胶层设置为刚体模型。

简化后的结构包括支撑块、黏结胶层和反射镜 3 个部分。反射镜主要参数为:厚度 30 mm、直径 100 mm、中心厚 22.5 mm、反射面半径 160 mm,胶层面积 20 mm × 10 mm,胶层位于反射镜

厚度的二分之一处。建模过程中将胶层视为均质实体,为提高仿真结果的准确性,对胶层网格进行局部细化。对支撑块-胶层-反射镜结构采用 Hex (六面体)形状进行网格划分,如图 5 所示。最终划分结果为节点数 810 15,单元数 677 85。

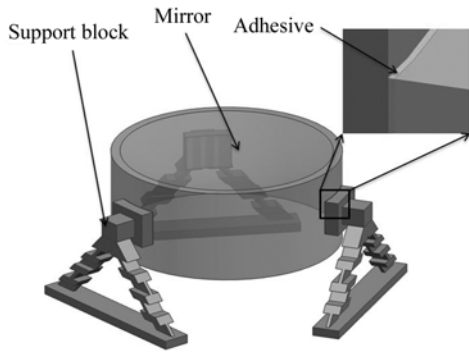


图 4 支撑块-胶层-反射镜结构示意图

Fig. 4 Structure scheme of support block-mirror-adhesive

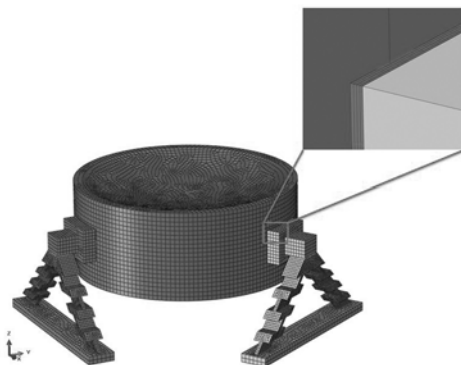


图 5 支撑块-胶层-反射镜结构的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of support block-mirror-adhesive

采用环氧树脂黏接零件时,若胶层厚度较小,难以形成连续的胶膜,胶层易产生裂纹;若胶层过厚,会引起胶层内部缺陷、固化程度不均、胶层强度下降、内应力情况较为复杂等问题。本文为研究在重力作用下胶层厚度对反射镜面形的影响,设定胶层厚度为 0~400  $\mu\text{m}$ 。

### 3.2 材料特性

支撑块-胶层-反射镜结构模型中所涉及材料的主要特性如表 1 所示。表 1 中所列均为室温条件下的参数,因此本文仿真分析结果仅作为常温条件下的设计参考。

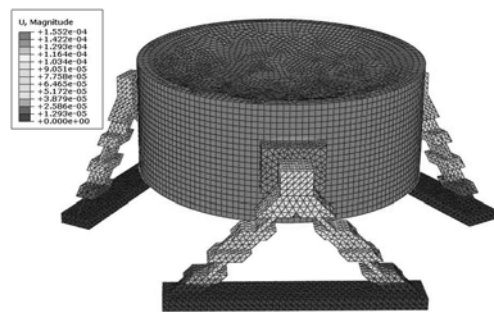
表 1 材料特性

Tab. 1 Material properties

材料	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	杨氏模量 E/MPa	泊松比
支撑块 铝 2024	2.77	73100	0.33
胶层 2216B/A 灰,3M	~1.2	689	0.43
反射镜 熔石英	2.205	73 000	0.17

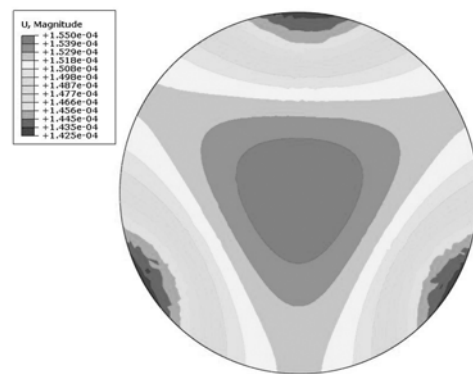
## 4 仿真计算

建立支撑装置的简化模型后,根据实际情况为各个零部件赋予不同的材料属性,设定各连接处的接触类型。为了分析在重力作用下不同胶层厚度对反射镜面形的影响,分别对胶层厚度为 0, 100, 200, 300, 400  $\mu\text{m}$  的支撑模型进行了有限元仿真计算,仿真计算结果如图 6(a)所示。图 6(b)为提取的反射面面形变化结果。



(a) 整体位移云图

(a) Deformation nephogram of whole mechanism



(b) 反射面位移云图

(b) Deformation nephogram of reflect surface

图 6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

提取仿真结果中反射面面形的变化数据后,通过数据处理得到变形后的面形相对于最佳拟合

面的偏移量,通过数据分析得到面形变化的峰谷值(Peak to Valley, PV)和 RMS 值。分别对胶层厚度为 0,100,200,400  $\mu\text{m}$  的仿真计算结果进行分析,得到不同胶层厚度下反射镜面形变化的 PV 值和 RMS 值,如图 7 所示。

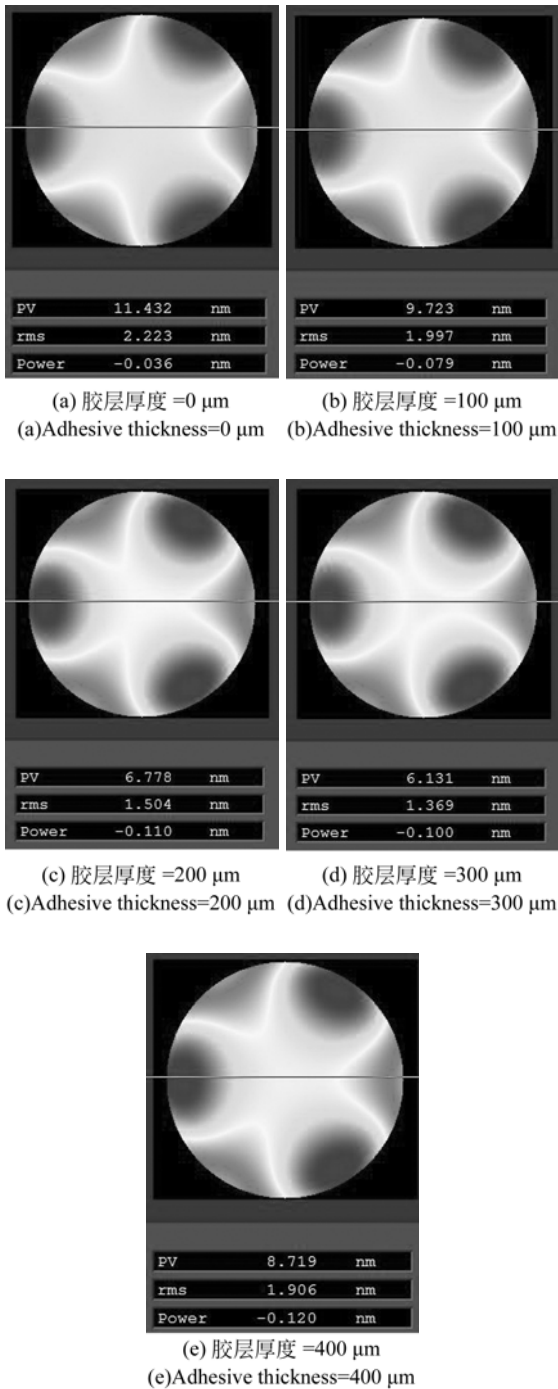


图 7 不同胶层厚度下面形变化结果

Fig. 7 Surface figure after deformation under different adhesive thicknesses

### 5 仿真结果分析

从图 7(a)~(d)可以看出,当胶层厚度变化时,反射镜表面变形后的面形相对于最佳拟合面的形状都是旋转对称的三叶形状。面形变化的 RMS 值与胶层厚度拟合曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,随着胶层厚度的增大,面形变化的 RMS 值呈现出先减小后增大的趋势。导致这种现象的主要原因是:胶层厚度影响支撑点受力和支撑位置到光学元件中心的距离,致使支撑条件常数  $C_s$  发生变化,从而影响反射镜表面面形。当胶层厚度为 280  $\mu\text{m}$  时,反射镜面形变化的 RMS 值出现极小值,约为 1.25 nm。

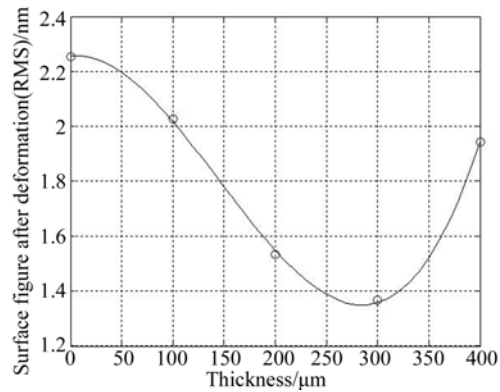


图 8 反射镜面形变化的 RMS 值与胶层厚度拟合曲线  
Fig. 8 Plots of surface figure RMS after deformation vs. adhesive thicknesses

### 6 实验验证

根据仿真结果得到最佳胶层厚度,对反射镜支撑装置进行装配,控制胶层厚度为 280  $\mu\text{m}$ ,同时对胶层厚度为 200  $\mu\text{m}$  和 400  $\mu\text{m}$  的仿真结果进行实验验证。为控制胶层厚度,在设计过程中采用 V 形块结构调整黏结块与光学元件的间隔。注胶装置如图 9 所示,注胶流程如图 10 所示。

使用 Zygo 4 英寸球面检测干涉仪实测反射镜面形,分别对反射镜装配之前和装配之后的面形进行测量,过程如图 11 所示。为了消除随机误差对测量结果的影响,对装配前和装配后的反射镜面形分别测量 30 次,计算面形变化的 PV 平均

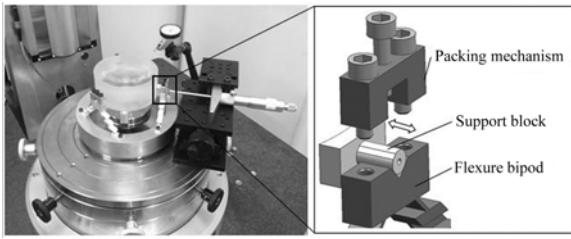


图 9 注胶装置示意图

Fig. 9 Adhesive-injection mechanism

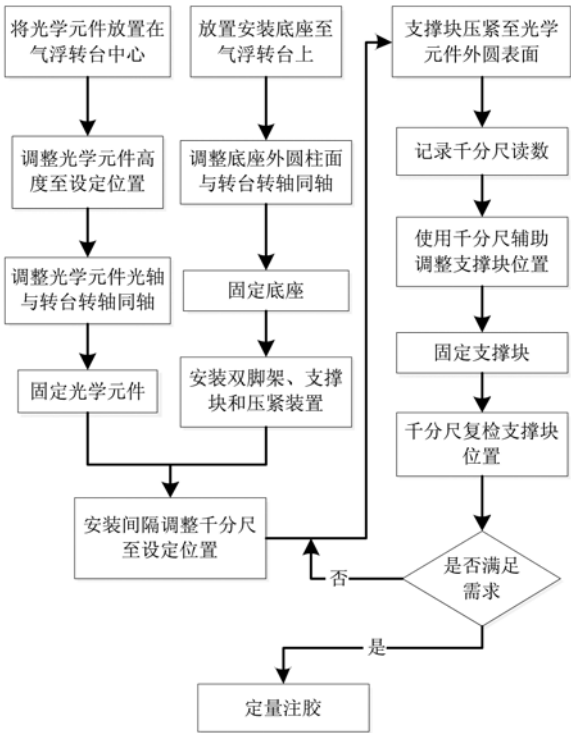
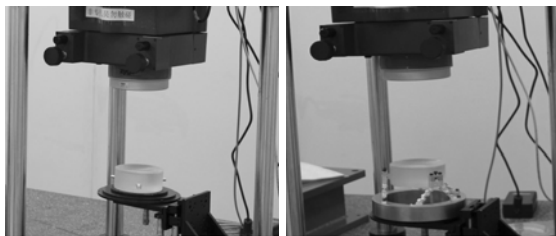


图 10 注胶流程图

Fig. 10 Flowchart of adhesive-injection process

值和 RMS 平均值, 测量结果如图 12 ~ 图 14 所示。



(a) 装配前 (a)Before assembly  
(b) 装配后 (b)After assembly

图 11 测量过程示意图

Fig. 11 Experimental process

ZYGO Process Stats			ZYGO Process Stats		
	PV nm	rms nm		PV nm	rms nm
1	48.424	4.810	1	60.223	6.697
2	45.672	4.513	2	50.818	5.484
3	43.074	4.456	3	57.770	6.504
4	44.252	4.699	4	48.810	5.323
5	44.832	4.734	5	58.572	6.605
6	43.731	4.543	6	58.157	6.605
7	42.843	4.510	7	58.292	6.703
8	43.799	4.556	8	45.903	5.197
9	44.812	4.474	9	58.485	6.692
10	43.885	4.414	10	47.632	5.068
11	43.847	4.405	11	58.601	6.672
12	42.592	4.387	12	48.568	5.146
13	42.582	4.400	13	59.045	6.514
14	46.126	4.451	14	55.009	6.496
15	42.823	4.511	15	58.678	6.619
16	45.566	4.438	16	59.344	6.600
17	42.418	4.454	17	56.457	6.406
18	43.132	4.425	18	59.151	6.607
19	44.706	4.363	19	59.016	6.624
20	46.068	4.356	20	58.070	6.672
21	44.677	4.432	21	58.784	6.623
22	40.525	4.506	22	47.226	5.153
23	41.761	4.463	23	47.033	5.137
24	41.076	4.560	24	58.437	6.553
25	42.060	4.496	25	57.384	6.649
26	41.906	4.525	26	57.655	6.681
27	41.201	4.535	27	59.866	6.693
28	39.627	4.504	28	59.344	6.661
29	40.950	4.504	29	60.262	6.561
30	45.566	4.395	30	49.466	5.801
Range	8.796	0.454	Range	14.358	1.635
Mean	43.484	4.494	Mean	55.735	6.258
StdDev	1.961	0.104	StdDev	4.803	0.610
NValid	30	30	NValid	30	30

(a) 装配前测量结果 (a)Results before assembly  
(b) 装配后测量结果 (b)Results after assembly

图 12 胶层厚度为 200 μm 时的测量结果

Fig. 12 Experiment results for 200 μm adhesive thickness

ZYGO Process Stats			ZYGO Process Stats		
	PV nm	rms nm		PV nm	rms nm
1	19.437	2.299	1	32.163	3.913
2	18.076	2.261	2	33.177	3.808
3	20.316	2.397	3	31.304	3.755
4	20.383	2.378	4	30.638	3.829
5	21.040	2.481	5	30.976	3.912
6	20.441	2.517	6	29.943	3.917
7	24.516	2.895	7	32.047	3.776
8	21.639	2.548	8	32.888	3.919
9	19.089	2.313	9	33.467	3.947
10	18.800	2.276	10	33.814	4.040
11	20.316	2.453	11	32.694	3.965
12	21.629	2.692	12	30.580	3.641
13	22.102	2.582	13	31.149	3.676
14	22.623	2.702	14	31.835	3.786
15	20.692	2.552	15	33.052	3.779
16	22.903	2.672	16	32.299	3.953
17	22.305	2.538	17	31.555	3.764
18	18.790	2.309	18	32.501	3.930
19	25.539	2.989	19	31.999	3.854
20	22.710	2.533	20	32.366	3.904
21	22.594	2.493	21	30.783	3.883
22	21.223	2.661	22	31.545	3.915
23	19.418	2.497	23	30.985	3.751
24	22.343	2.626	24	30.203	3.827
25	20.422	2.502	25	34.085	4.075
26	19.398	2.427	26	31.912	3.816
27	18.385	2.163	27	30.821	3.774
28	20.248	2.328	28	31.748	3.759
29	19.389	2.365	29	31.343	3.822
30	18.336	2.329	30	30.879	3.742
Range	7.464	0.825	Range	4.142	0.434
Mean	20.837	2.493	Mean	31.825	3.848
StdDev	1.839	0.186	StdDev	1.064	0.101
NValid	30	30	NValid	30	30

(a) 装配前测量结果 (a)Results before assembly  
(b) 装配后测量结果 (b)Results after assembly

图 13 胶层厚度为 280 μm 时的测量结果

Fig. 13 Experiment results for 280 μm adhesive thickness

Zygo Process Stats			Zygo Process Stats		
	PV nm	rms nm		PV nm	rms nm
1	45.363	4.287	1	38.951	5.674
2	42.582	4.194	2	42.215	5.881
3	42.727	4.176	3	40.834	5.897
4	40.149	4.232	4	40.496	5.826
5	43.982	4.277	5	39.994	5.826
6	38.990	4.066	6	43.799	5.982
7	40.825	4.232	7	42.302	5.858
8	38.816	4.094	8	39.087	5.709
9	41.974	4.229	9	39.521	5.826
10	41.201	4.233	10	39.367	5.778
11	42.804	4.596	11	38.189	5.716
12	39.569	4.258	12	40.226	5.785
13	42.872	4.309	13	38.826	5.701
14	41.240	4.320	14	39.753	5.636
15	43.847	4.261	15	39.521	5.790
16	41.539	4.273	16	37.136	5.650
17	39.714	4.102	17	37.107	5.591
18	42.225	4.359	18	38.015	5.733
19	38.787	4.131	19	37.184	5.695
20	44.957	4.355	20	37.522	5.688
21	37.493	4.186	21	36.673	5.709
22	44.745	4.018	22	39.038	5.741
23	44.668	4.208	23	37.783	5.654
24	38.343	4.003	24	42.514	5.746
25	45.421	4.324	25	39.087	5.768
26	42.514	4.412	26	37.880	5.725
27	44.330	4.061	27	41.694	5.900
28	41.674	4.267	28	41.056	6.050
29	37.889	4.170	29	40.023	5.806
30	38.807	4.147	30	37.851	5.693
Range	7.927	0.594	Range	7.126	0.459
Mean	41.668	4.226	Mean	39.455	5.768
StdDev	2.394	0.124	StdDev	1.819	0.104
NValid	30	30	NValid	30	30

(a) 装配前测量结果 (b) 装配后测量结果  
(a) Results before assembly (b) Results after assembly

图 14 胶层厚度为 400 μm 时的测量结果

Fig. 14 Experiment results for 400 μm adhesive thickness

从图 12~图 14 中可以看出,当装配胶层厚度分别为 200,280 和 400 μm 时,装配前测量 30 次,反射镜面形变化 RMS 平均值分别为 4.494, 2.493 和 4.226 nm;装配后测量 30 次,反射镜面形变化 RMS 平均值分别为 6.258, 3.848 和 5.768 nm。装配前和装配后多次测量的标准差数值相当,说明测量过程中环境、振动等因素导致的随机误差处于同一水平,通过多次测量消除随机

误差后反射镜面形测量结果仍然发生变化的主要原因为装配过程中产生的应力和应变。实验结果表明,当胶层厚度分别为 200 和 280 μm 时,由于三点边缘支撑导致的反射镜面形 RMS 值变化分别为 1.764 和 1.355 nm,与仿真结果中的 1.504 nm 和 1.25 nm 基本一致;当胶层厚度为 400 μm 时,由于三点边缘支撑导致的反射镜面形 RMS 值变化为 1.542 nm,虽然与仿真结果中的 1.906 nm 相差较大,但反射镜面形随胶层厚度的变化趋势与仿真结果相同。产生这种差异的主要原因可能是当胶层厚度较大时,胶层固化过程中产生了较为明显的收缩效应。

### 7 结 论

本文以 45 nm 浸没式光刻物镜中采用柔性双脚架三点支撑的反射镜为研究对象,分析了在重力作用下三点边缘支撑反射镜的受力情况和面形变化,讨论了胶层厚度对反射镜面形变化的影响。建立了支撑块-胶层-反射镜结构的有限元模型,在不同胶层厚度下对反射镜的面形变化进行了仿真分析,通过数据拟合得到了胶层厚度对三点支撑的反射镜面形变化的影响规律,并通过实验验证了仿真结果的正确性。实验结果表明:随着胶层厚度的增大,面形变化的 RMS 值呈现出先减小后增大的趋势,当胶层厚度约为 280 μm 时,反射镜面形变化的 RMS 值出现极小值。本文的方法和结论适用于三点边缘等支撑方式的中等口径反射镜。

### 参考文献:

[1] 张凯,何欣,崔永鹏. 空间相机机身桁架装配工艺[J]. 红外与激光工程,2011,40(1): 91-95.  
ZHANG K, HE X, CUI Y P. Assembly technology of frame structure of space camera's body[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 91-95. (in Chinese)

[2] LIN W CH, CHANG SH T, CHANG SH H, et al. . Primary mirror alignment and assembly for a multi-spectral space telescope [J]. *SPIE*, 2013, 8889: 888922-1.

[3] VLASENKO O, ZVEREV A, SACHKOV M. Using the DP-190 glue for adhesive attachment of a large space mirror and its rim[J]. *SPIE*, 2014, 9151:91513I-1.

[4] 刘强,何欣,张峰. 航天光学传感器指向镜用胶选择[J]. 红外与激光工程,2014,43(增刊): 183-187.  
LIU Q, HE X, ZHANG F. Choice of adhesive applying in pointing prism for aerospace optics remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(Suppl.): 183-187. (in Chinese)

[5] STUBBS D M, HOM C L, HOLMES H C, et al. . Adhesive bond cryogenic lens cell margin of safety test [J]. *SPIE*, 2011, 8125:81250N-1.

[6] RYABOY V M. Analysis of thermal stress and de-

- formation in elastically bonded optics[J]. *SPIE*, 2007,6665:66650K-1.
- [7] HU SH W, CHEN Y. A FEM coupling model for properties prediction during the curing of an epoxy adhesive for a novel assembly of radio telescope panel[J]. *SPIE*, 2014,9151:915132-1.
- [8] 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.  
DONG D Y, LI ZH L, LI R G, *et al.*. Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(10): 2698-2707. (in Chinese)
- [9] 田伟,王汝冬,王平,等. 300 mm 平面标准镜装卡结构的关键参数[J]. *中国光学*, 2011,4(3): 264-270.  
TIAN W, WANG R D, WANG P, *et al.*. Key structural parameters of 300 mm aperture reference flat mirror[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(3): 264-270. (in Chinese)
- [10] 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.  
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)
- [11] 李伟杰,李小龙. 温度交变环境下防热结构胶层厚度设计[J]. *航天器环境工程*, 2013,30(4): 421-425.  
LI W J, LI X L. Design of bond-layer thickness of thermal protection structure under alternating temperature condition [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013,30(4): 421-425. (in Chinese)
- [12] 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.  
LIU Q, HE X, ZHANG F, *et al.*. Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2229-2236. (in Chinese)
- [13] 范志刚,常虹,陈守谦. 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. Design of bonding layer in lens athermal mount[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(11): 2573-2581. (in Chinese)
- [14] WEINGROD I, CHOU C Y, HOLMES B, *et al.*. Design of bipod flexure mounts for the IRIS Spectrometer[J]. *SPIE*, 2013,8836:8836Q-1.
- [15] 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): 438-443.  
ZHANG L M, WANG F G, AN Q CH, *et al.*. Application of Bipod to supporting structure of minitype reflector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 438-443. (in Chinese)
- [16] PAUL R Y. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Third Edition. CRC Press, 2006.

#### 作者简介:



贾树强(1987—),男,河北石家庄人,硕士,研究实习员,2010年、2013年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光机结构设计与检测方面的研究。E-mail: shuqiangjia@163.com



庞武斌(1987—),男,陕西渭南人,硕士,工程师,2013年于浙江大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: pangwubin110@126.com



黄玮(1965—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: huangw@ciomp.ac.cn