

光机异质胶接固化中的镜面形状稳定性

关英俊¹, 程晓辉¹, 张铭起¹, 李锦峰^{2,3}, 胡海飞^{2*}¹长春工业大学机电工程学院, 吉林 长春 130012;²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光学环氧胶粘接作为光学镜头到其支撑结构的主流异质连接方式,对维持镜面面形精度具有重要作用。研究了胶层固化过程中收缩应力对镜面面形的动态影响。分析了胶层固化收缩应力产生的原理;基于胶黏剂材料本构理论建立了胶层黏弹性力学模型,并分析了胶层收缩应力随固化时间的变化关系;利用等效温度载荷法模拟胶层固化收缩应力对镜面面形的影响,并基于拓扑优化方法进行了固化应力卸载结构优化设计,优化后胶层粘接面积减小了39%;最后,完成了室温粘接固化条件下的反射镜粘接实验,并在固化全程进行了镜面面形的原位监测,得到了镜面面形的峰谷(PV)值、均方根(RMS)值的时变特性曲线,结构优化后的镜面面形稳定于0.018λ(波长λ=632.8 nm),结果验证了仿真模型的有效性。

关键词 异质胶接; 固化收缩应力; 有限元分析; 动态监测; 面形精度

中图分类号 TH703

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS241282

1 引言

随着空间遥感相机不断朝着口径大型化、结构轻量化的方向发展,实际应用对轻薄型反射镜的研制提出了更高的要求,例如:地球同步轨道卫星的空间分辨率还存在不足,亟待提升1~2个数量级,且需要进一步大幅降低面密度^[1]。胶接技术作为光机系统中最常用的装配方式,装配过程中的胶接固化收缩应力以及胶接工艺会对轻薄镜面面形精度产生较大的影响。从20世纪70年代起,在光机胶接领域,国内外研究人员对反射镜胶接进行了大量的研究工作,主要分为以下几个方面。

1) 针对无热化胶黏剂参数进行研究。由于胶接装配过程受环境温度的影响,胶层固化过程中产生热应力,通过确定合理的胶黏剂参数减小或者消除热应力带来的影响。无热化粘接的问题最早是由Bayar^[2]提出的。Bayar对如何定位镜筒中的透镜元件进行研究,根据胶接连接的方式,假设胶层只在径向发生应变,推导出无热化胶层厚度的理论计算公式;在此基础上,Vukobratovich等^[3]针对低温小型光学反射镜的黏合安装,提出了一种基于胶黏剂热弹性的设计方法,将透镜和镜框的线膨胀系数平均值加入胶层轴向和切向上,得到光学表面面形精度为0.031λ(波长λ=

632.8 nm)。

2) 针对反射镜胶接装配方式进行研究。为预估胶接光学元件的稳定性和应力,Klotz^[4]提出了一种胶接形式装配设计方法。该方法利用胡克定律进行应力-应变分析,使用非热化方程完成反射镜的粘接;为研究预胶接连接对反射镜面形的影响,关少华^[5]通过有限元仿真分析了硅橡胶固化应力对镜面的影响,确定了六点胶接的装配方式。为研究光学胶黏剂Milbond固化对面形的影响,董得义等^[6]分析了镜片与镶嵌件之间应力的产生原因,利用有限元软件对反射镜组件进行建模与优化分析,确定了六点胶接装配方式。

3) 针对胶黏剂固化应力进行数值仿真研究。周定沛^[7]针对如何避免胶接过程中产生的内应力,对胶层内应力的形成条件和胶层的内应力松弛进行理论分析,得出胶黏剂中催化剂的比例和胶黏剂固化理论时间,避免胶黏剂在深度固化时残留应力。为研究复杂情况下胶黏剂对高精度镜面面形的影响,冯瑞^[8]以黏弹性理论为基础,通过对反射镜粘接件进行有限元建模分析,以单胶点为例推导出多胶点胶接方式。Maggiore等^[9]针对现有结构胶黏剂的连接工艺进行综述,介绍了其应用领域的最新研究进展和胶黏剂在混合连接过程中的应用。此外,Sun等^[10]为解决粘接

收稿日期: 2024-07-11; 修回日期: 2024-09-05; 录用日期: 2024-09-13; 网络首发日期: 2024-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(62175234)、国家重点研发计划(2023YFC2206002)、吉林省优青人才(20230508111RC)

通信作者: *huhf@ciomp.ac.cn

会降低反射镜表面面形精度的问题,研究了反射镜变形、热应力和固化收缩应力之间的关系,给出了释放胶黏层固化应力结构优化措施,并提出了粘接微应力设计路线。基于等效热变形法进行了粘接应力分析,完成了反射镜组件粘接,测量表面精度稳定在 0.0225λ 。

目前面形检测手段无法实时反映粘接过程中胶层对面形的影响,从而无法对粘接工艺进行有效的调控。例如,在某工程应用中,在镜面修形末期,需要择机集成支撑结构,但这一过程普遍存在较大的固化应力,外化为粘接后面形变差,典型案例表明:粘接后镜面面形均方根(RMS)值可由 $\lambda/30$ 退化到 $\lambda/8$ ^[6]。此类事故在高轻量化率、超薄型镜体上更严重。对空间轻薄反射镜而言,研究胶接对反射镜面形精度的影响尤为重要。

为降低镜面粘接前后相对面形的变化率,拟优化胶接工艺,解决胶层固化面形动态监测问题,并进行消应力结构的优化设计,推动轻薄镜面的稳定集成和工程应用^[11-12]。本文针对 $\Phi 100$ mm 轻薄反射镜研究胶接对其面形的影响规律。该反射镜组件的总体设计要求为:基频不小于 120 Hz,固化应力作用下面形 RMS 不大于 $\lambda/50$,粘接前后面形变化率不大于 15%。

2 反射镜组件

2.1 研究对象

为了降低边界条件的复杂性,同时为了降低实验成本、缩短加工周期,兼顾材料的自重变形、装卡变形特点,选取了平面实体反射镜作为试样,选取尺寸为 $\Phi 100$ mm $\times$ 10 mm 的平面反射镜用于原理验证,材料为微晶玻璃,面密度约为 25 kg/m²,整体厚度为 10 mm,径厚比为 10,这些指标与工程中的轻薄镜体具有较好的相似性;模拟粘接件为 $\Phi 25$ mm $\times$ 20 mm 的钢钢,反射镜与粘接件的结构如图 1 所示。

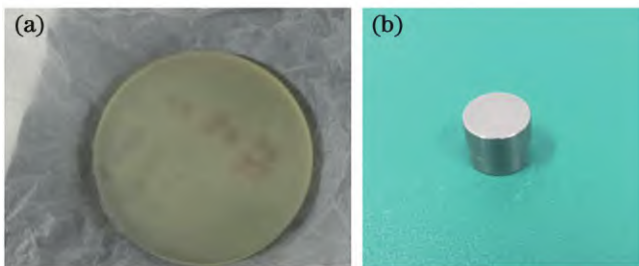


图 1 反射镜与粘接件的结构。(a) 100 mm 口径反射镜;(b) 钢钢粘接件

Fig. 1 Structures of mirror and bonded joint. (a) 100 mm-diameter mirror; (b) invar bonded joint

2.2 材料属性

实验所需各部分材料的性能参数如表 1 所示。
本文选用 3M 公司的 EC-2216 B/A 环氧胶,其具

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Part	Material	Elastic modulus E /GPa	Poisson's ratio μ	Density ρ /(g/cm ³)
Mirror	Zerodur	91.00	0.24	2.53
Adhesive layer	EC-2216	0.18	0.43	1.50
Prop up	4J32	141.00	0.25	8.10

有较高的机械强度,可耐剧烈冲击、振动和弯曲载荷,适用于低温粘接应用,可实现室温固化,其较高的黏度还有利于精确控制粘接厚度以及传递镜面、支撑结构的定位基准。EC-2216 B/A 环氧胶的具体性能参数如表 2 所示。

表 2 EC-2216 B/A 环氧黏接剂的参数^[13]

Table 2 Parameters of EC-2216 B/A epoxy adhesive^[13]

Parameter	Value or content
Color	Gray/white
Curing time	7 d@24 °C
Shear strength	13 MPa @24 °C
Adaptive temperature zone	-55-150 °C

3 固化原理与本构模型

3.1 胶层等效弹性模型

在室温环境且无外力作用下,胶层会自由固化收缩。图 2 所示为胶层自由收缩模型,胶层边长为 S ,在固化之后,胶层边长变化了 ΔS 。

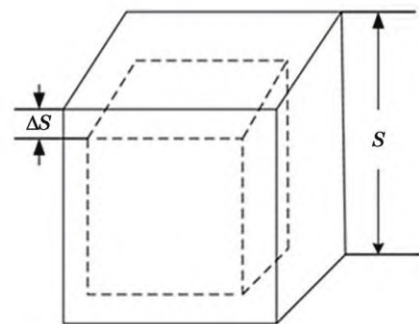


图 2 胶层自由收缩模型

Fig. 2 Free shrinkage model of adhesive layer

假定线收缩率为 β ,根据其定义可得

$$\beta = \Delta S / S \quad (1)$$

胶层从一个稳态固化收缩到另一个稳态,胶层内部不会产生应力。而在外界力的作用下,即非自由固化收缩下的胶层会产生收缩应力。

在实际应用中,粘接过程会引起光学反射镜的面形变化,如图 3 所示^[6]。

假设反射镜与粘接件的刚度分别为 K_r 、 K_l ,根据胡

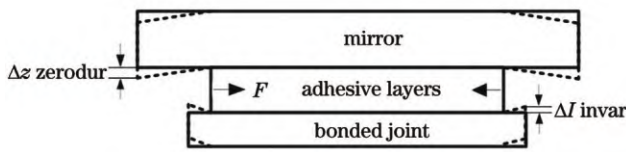


图 3 粘接件受力变形图

Fig. 3 Deformation diagram of bonded joint

克定律,胶层固化收缩后,反射镜粘接面的局部变形量为

$$\Delta z = F/K_z \quad (2)$$

式中: F 为胶层收缩对镜体的拉力。

同理可得粘接件表面的局部变形量为

$$\Delta I = F/K_I \quad (3)$$

胶层的固化收缩变形量为 $\Delta S - \Delta z - \Delta I$,假设胶层的固化收缩应力为 σ ,根据胡克定律,可得

$$\sigma = E_a \times (\Delta S - \Delta z - \Delta I)/S \quad (4)$$

式中: E_a 为胶层弹性模量。

3.2 胶层黏弹性模型

胶黏剂属于合成高分子化合物,具有黏性和弹性两种不同机理的形变,综合体现了黏性流体和弹性固体两者的特性。本文将采用线性黏弹性模型对胶层进行力学建模^[14]。

在线性黏弹性模型中,Maxwell模型及Kelvin模型是两个基本模型:前者体现松弛现象,但不表示蠕变;后者体现蠕变,却不能体现应力松弛。为了更好地描述实际材料的黏性,本文将采用广义Maxwell模型^[15],其由 N 个Maxwell模型并联而成,如图4所示。

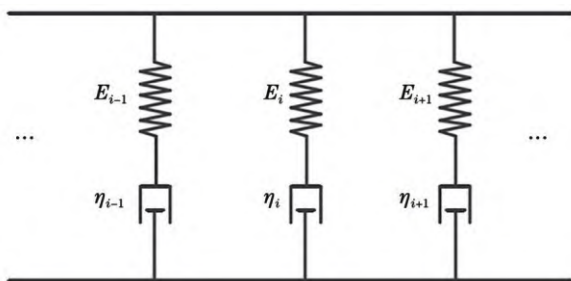


图 4 广义 Maxwell 模型

Fig. 4 Generalized Maxwell model

广义Maxwell模型的本构方程可采用松弛模量表示为

$$E_r(t) = \sum_{i=1}^n E_i \exp(-t/\lambda_i) + E_\infty \quad (5)$$

式中: E_i 为第 i 个单元的松弛模量; E_∞ 为无限长时间后的模量; n 为单元总数; λ_i 为第 i 个单元的松弛时间,可表示为

$$\lambda_i = \eta_i/E_i \quad (6)$$

式中: η_i 为第 i 个单元的黏性系数。当单元 i 的 η_i 与 E_i 的比值较大时,单元表现出很强的黏性,此时单元模量

用 η_i 来表示;当单元 i 的 η_i 与 E_i 的比值较小且趋近于0时,单元表现出很强的弹性,此时单元模量用 E_i 来表示。

为了更好地反映胶层固化应力随时间的变化,引入 Boltzmann 线性叠加理论^[16],得到应力松弛函数关系式为

$$\sigma(t) = \int_0^t \frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} E_r(t-\tau) d\tau \quad (7)$$

式中: t 为胶层固化时间; ϵ 为胶层固化应变; τ 为时间增量。

将式(5)代入式(7)中,得到广义Maxwell模型的应力随时间的变化关系:

$$\sigma(t) = E_\infty \epsilon + \frac{\epsilon}{t} \left\{ \sum_{i=1}^n E_i \lambda_i [1 - \exp(-t/\lambda_i)] \right\} \quad (8)$$

由式(8)可得到胶层收缩应力随时间的变化关系。现将 $E_\infty=0.043$ MPa、 $\epsilon=0.06$ 、 $E_1=1.93$ MPa、 $\lambda_1=301.307$ s、 $E_2=0.098$ MPa、 $\lambda_2=3013.07$ s、 $E_3=0.168$ MPa和 $\lambda_3=30130.7$ s(数据参考文献[17])代入式(8),可得到胶层收缩应力随时间的变化关系。

在恒定收缩率下,绘制出粘接结构优化前应力随时间的变化关系,如图5所示。

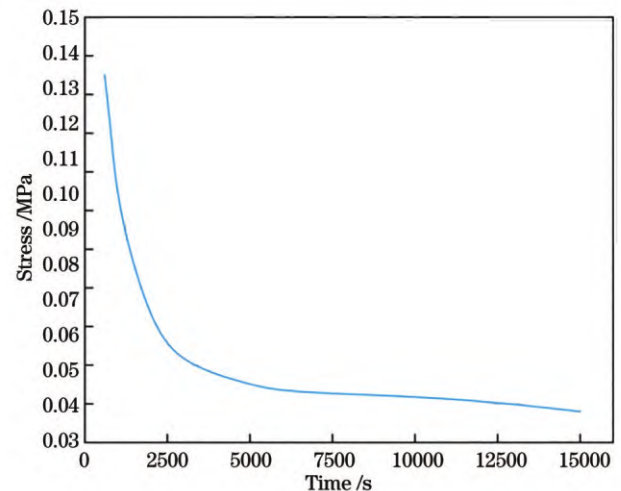


图 5 应力随时间的变化

Fig. 5 Stress varying with time

由图5可知,当固化时间大于5000 s时,胶层收缩应力的下降幅度变小,15000 s后胶层收缩应力基本趋于平稳。因此可选取15000 s为参考固化时间,为后续有限元计算、原位监测提供基础输入。

4 固化应力与变形分析

在反射镜粘接固化过程中,由于胶接接头的不同,胶层固化收缩会影响镜面面形,为验证两者的相互关系,通过有限元分析软件对反射镜组件的粘接固化过程中的应力和变形分布进行仿真分析。

4.1 反射镜组件有限元建模

建立光学平面反射镜组件的有限元模型,利用 MSC/Patran-Nastran 进行分析计算及后处理。光学平面镜组件主要有镜体、环氧黏接剂、钢钢支撑件组成^[18],共含 7024 个单元、9466 个节点,如图 6 所示。

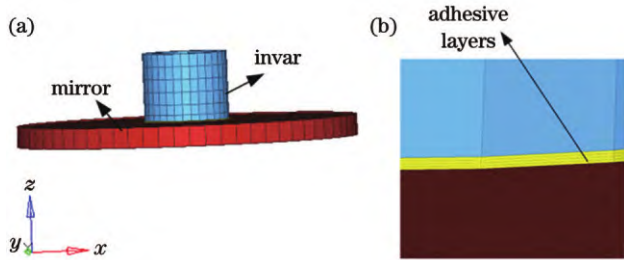


图 6 反射镜粘接组件有限元模型。(a)镜组件有限元模型;
(b)胶层网格细节

Fig. 6 Finite element model of bonded mirror assembly.
(a) Finite element model of mirror assembly; (b) mesh details of adhesive layers

建模过程需要注意以下事项:1)有限元模型与三维模型保持高度一致;2)关键区域(如粘接区)网格需要细化,以提高计算精度,非关键区域网格可稀疏划分^[19]。

反射镜组件主要采用六面体进行网格划分,过渡部分可用楔形体(五面体)单元替代六面体单元,在厚度方向采用 4 层体单元来实现环氧黏接剂胶层的精细化建模。

4.2 粘接层结构设计

胶接作为反射镜与粘接件之间的连接方式,对反射镜的面形及模态影响较大,使用更小的粘接面积将有利于减小固化收缩应力,从而降低对镜面面形的影响。

根据最小粘接面积公式^[20]确定合理的粘接面积如下:

$$Q_{\min} = W a_G f_s / J \quad (9)$$

式中: W 为光学零件的质量; a_G 为最恶劣条件下的加速系数; f_s 为安全系数; J 为粘接部位的抗拉强度。安全系数至少是 2,考虑到粘接过程中存在的影响因素,如胶层中含有气泡或杂质,安全系数可取到 4、10 甚至更高。所用 $\Phi 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 规格 Zerodur 反射镜的质量 W 为 90 g,根据工程应用需求,加速因子 a_G 取 400, f_s 取 10,前述 EC-2216 胶的平均拉伸强度 J 为 14 MPa,由式(9)计算得到最小粘接面积约为 253 mm^2 。

初始粘接面积参考文献[21](500 mm^2),在钢钢结构的粘接面设计一个 $\Phi 25 \text{ mm}$ (490 mm^2)的圆形粘接区域,推荐胶层厚度为 0.2 mm ,以此为基础对粘接面积进行优化设计^[22]。优化目标函数为反射镜在 1 g 自重和 20°C 变化范围下的面形 RMS 值,约束条件为粘接面积约束。粘接区域的拓扑优化问题可

表示为

$$\begin{cases} \text{find: } X = (A_1, A_2, \dots, A_N)^T \\ \text{min: } f(X) = f_{\text{RMS}} \\ S' \geq 120 \\ \text{s.t.: } 253 \leq A_i \leq 490 \end{cases} \quad (10)$$

式中: X 为粘接层面积; $f(X)$ 为受粘接面积影响的面形 RMS 精度; A_i 为第 i 个单元的粘接层面积; f_{RMS} 为镜面面形精度; S' 为反射镜组件的基频。

通过 OptiStruct 求解器进行优化求解,目标函数经过 15 步迭代后收敛,迭代曲线如图 7 所示,优化结果如图 8(a)所示。拓扑优化后的胶层面积为 300 mm^2 ,有限元模型如图 8(b)所示。

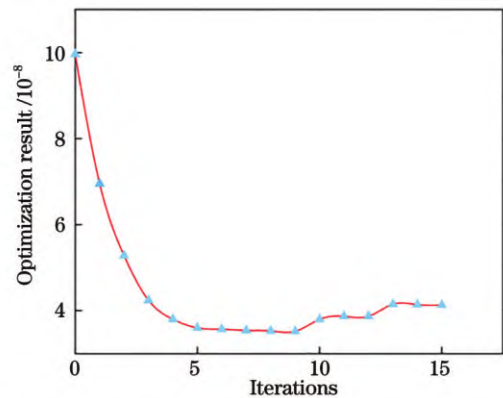


图 7 胶层拓扑优化迭代曲线

Fig. 7 Iterative curve of adhesive layer topology optimization

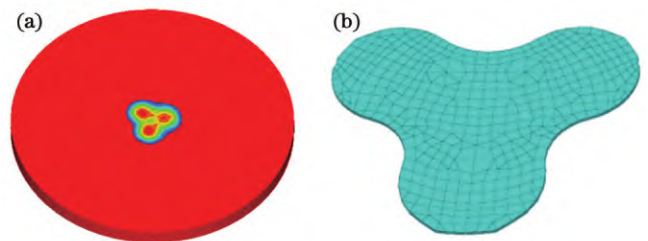


图 8 胶层拓扑优化结果。(a)拓扑优化结果;(b)胶层有限元模型

Fig. 8 Topology optimization results of adhesive layer.
(a) Topology optimization result; (b) finite element model of adhesive layer

经过仿真分析,发现反射镜的面形值及基频的变化趋势如图 9 所示。由图 9 可知:粘接面积为 300 mm^2 时,镜面面形 RMS 为 0.018λ ,满足固化应力变形 RMS 不大于 $\lambda/50$ 的要求;镜组件基频为 217 Hz ,满足反射镜组件不低于 120 Hz 的设计指标要求,优化粘接面积约为 300 mm^2 。

4.3 等效温度载荷法

胶层固化收缩导致镜面面形发生变化的现象同物体在一定温度环境下产生的收缩现象类似。因此,本

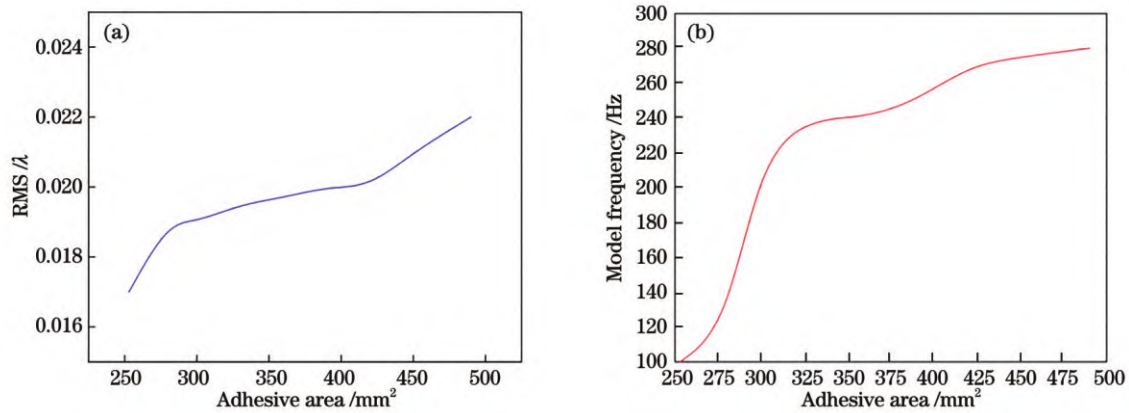


图9 镜面面形RMS及组件基频变化趋势。(a)胶接面积对面形RMS值的影响;(b)胶接面积对组件基频的影响

Fig. 9 Trends in mirror surface RMS and fundamental frequency. (a) Effect of adhesive area on surface RMS; (b) effect of adhesive area on assembly fundamental frequency

文采取等效温度载荷法模拟胶层固化收缩对镜面面形的影响^[23]。具体过程如下:通过等效温度载荷法选择胶层的线膨胀系数,将反射镜与粘接件材料的线膨胀系数设置为0,施加 -1°C 均匀温度变形后进行分析,从而模拟胶层收缩对反射镜面形的影响。胶层收缩体积比的计算公式为

$$\omega = v'/v = \pi(1 + \alpha T)^2 R^2(1 + \alpha T)t' / (\pi R^2 t') \quad (11)$$

式中: v' 为胶层收缩后的体积; v 为胶层收缩前的体积; ω 为胶层收缩体积比,本文取0.99; α 为考虑胶层收缩

时的等效热膨胀系数; T 为温度变化,文中设置温度降低1 K; R 为胶层半径; t' 为胶层厚度。

根据式(11),计算得到

$$\alpha = 1 - \sqrt[3]{1 - \omega} \quad (12)$$

本文所用EC-2216胶的体积收缩率为0.5%,计算得出胶层的线膨胀系数 α 为 $1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$,通过有限元黏弹性模型可以跟踪胶层固化收缩时的镜面面形和界面收缩应力变化。图10为胶层收缩应力云图。

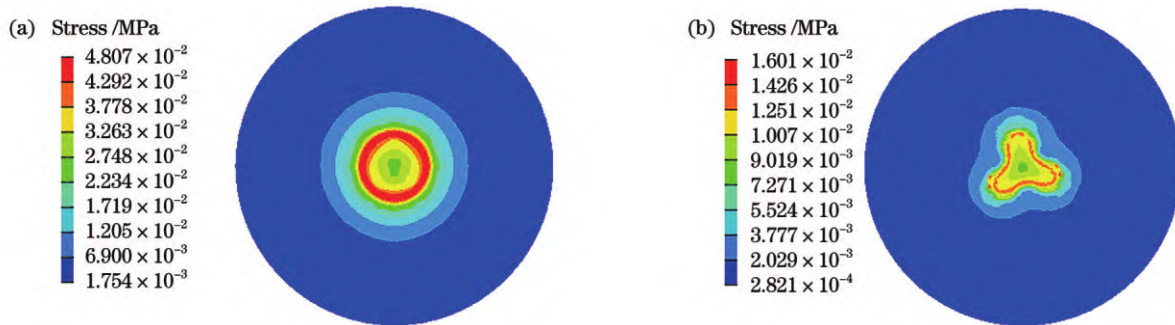


图10 胶层收缩应力云图分布。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 10 Adhesive layer shrinkage stress contours. (a) Before optimization; (b) after optimization

跟踪优化前组件粘接界面的最大收缩应力变化历程如图11所示。由图11可知,通过有限元仿真得出的优化前胶层收缩应力与固化时间的关系与通过理论计算出的结果相符。当固化时间大于5000 s时,胶层收缩应力的下降幅度变小,15000 s后胶层收缩应力基本趋于平稳,故可推荐15000 s为参考固化时间。

根据图9的胶层粘接面积,并基于图10(b)所示的有限元仿真模型,得到胶层固化收缩应力,应力变化结果如图12所示。由图12分析可知,在15000 s最佳固化时间后,优化后胶层收缩应力为0.016 MPa,低于优化前的结果(0.048 MPa)。模拟固化后的面形如图13所示,面形峰谷(PV)值和RMS值如表3所示。

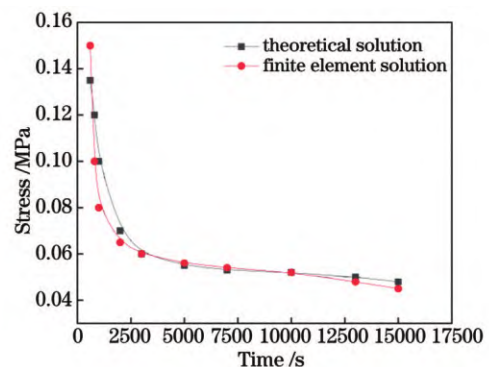


图11 优化前胶层应力变化历程

Fig. 11 History of adhesive layer stress development before optimization

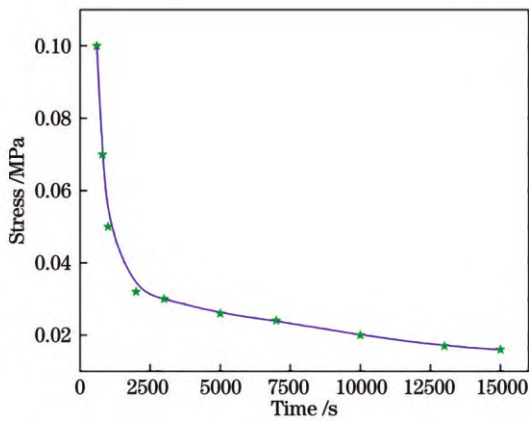


图 12 优化后收缩应力变化历程

Fig. 12 History of adhesive layer stress development after optimization

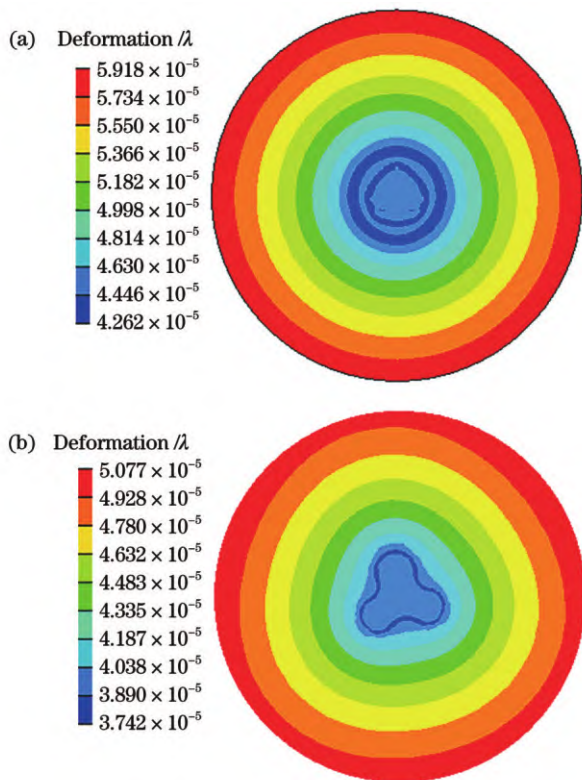


图 13 胶层固化后的镜面变形仿真云图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 13 Simulated contours of mirror deformation after adhesive curing. (a) Before optimization; (b) after optimization

表 3 面形 PV 值和 RMS 值

Table 3 PV and RMS values of surface shape

Surface parameter	PV /λ	RMS /λ
Before optimization	0.175	0.021
After optimization	0.172	0.018

通过仿真分析得到胶层固化收缩对反射镜面形的影响,通过反射镜面形 RMS 值可知,优化后粘接结构

的反射镜面形 RMS 为 0.018λ , 优于优化前粘接结构的反射镜面形 RMS (0.021λ), 且满足粘接固化后面形 RMS 不大于 $1/50\lambda$ 的设计要求。

5 粘接实验验证

本实验针对两个粘接实验件的粘接工艺均采用室温固化方式。在胶层固化过程中,全程监测反射镜面形变化,完成面形数据采集,并给出面形 PV 和 RMS 的全程变化曲线。

5.1 粘接流程

为验证仿真结果的准确性,设计了反射镜粘接实验,其粘接操作要点为:1)镜体保护和初步粘接面清理;2)去除粘接块表面氧化层;3)表面清理及确认;4)镜体与粘接件精密定位;5)粘接质量控制(体积、厚度、气泡、胶形);6)镜面面形实时监测。详细操作流程如图 14 所示,具体操作和工艺细节可参考文献[21,24]。

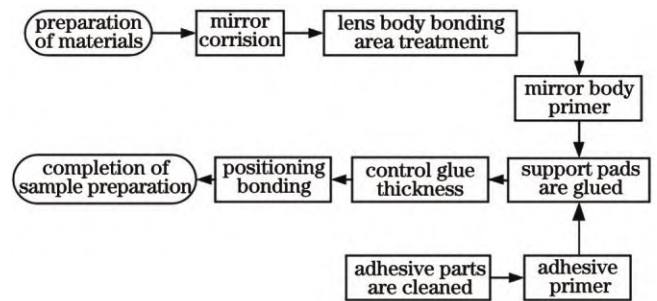


图 14 反射镜粘接实验流程

Fig. 14 Mirror bonding test process

5.2 原位面形监测

用 ZYGO 数字干涉仪进行面形监测的实验方案如图 15 所示。实验过程为:根据 ZYGO 数字干涉仪操作规程,在室温条件下,首先对反射镜初始面形进行检测,并进行记录;然后,用干涉仪分别对优化前和优化后的粘接接头进行动态面形监测,记录固化过程中的面形变化。

将平面反射镜放置于粘接工装的定位夹具上,定位夹具的边槽有软橡胶垫,防止镜面被刮伤。通过干涉仪监测镜面面形,粘接前的面形 PV 值为 0.175λ , RMS 值为 0.016λ ,如图 16 所示。

在胶层固化过程中,实验与仿真镜面的面形变化如图 17 所示;固化完成后,镜面面形值如图 18 所示。

5.3 结果分析

实验发现胶层固化对镜面面形的影响与仿真趋势相同,这验证了胶层在 15000 s 最佳固化时间后,镜面面形值趋于稳定,结果如表 4 所示。

通过表 4 可以看出,仿真计算与实验结果相吻合。镜面初始面形 RMS 值为 0.016λ ,受胶层自重和对接液压的综合影响,镜面在胶层涂抹后、与粘接件对接初期

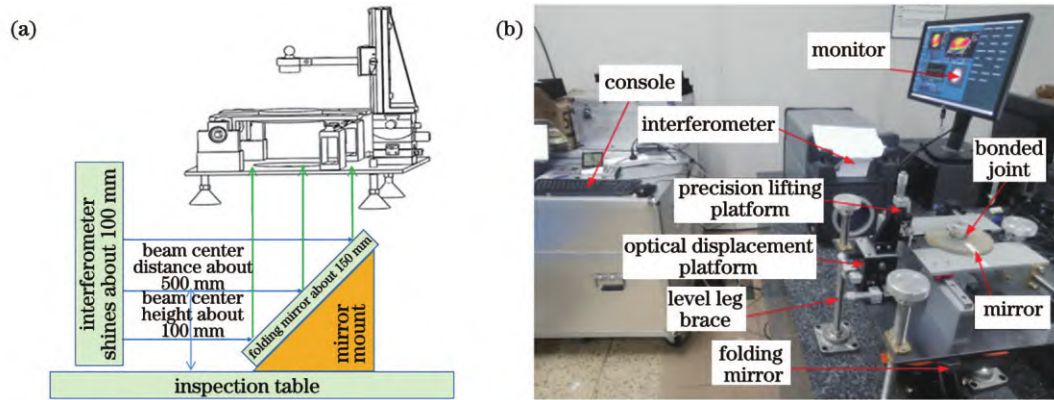


图 15 镜面胶接固化过程中的动态面形原位监测实验方案。(a)光学检测光路;(b)实验平台实物图

Fig. 15 Test scheme for *in-situ* dynamic surface shape monitoring during mirror bonding and curing. (a) Optical test path; (b) physical photo of test platform

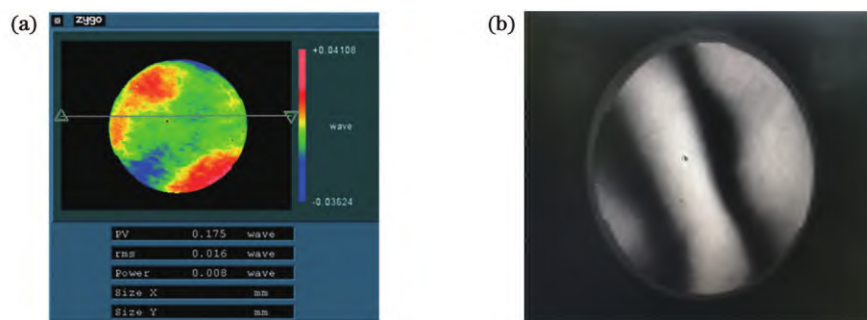


图 16 镜面初始面形精度。(a)面形检测值;(b)镜面干涉条纹

Fig. 16 Initial mirror surface accuracy. (a) Surface shape test values; (b) mirror surface interference fringes

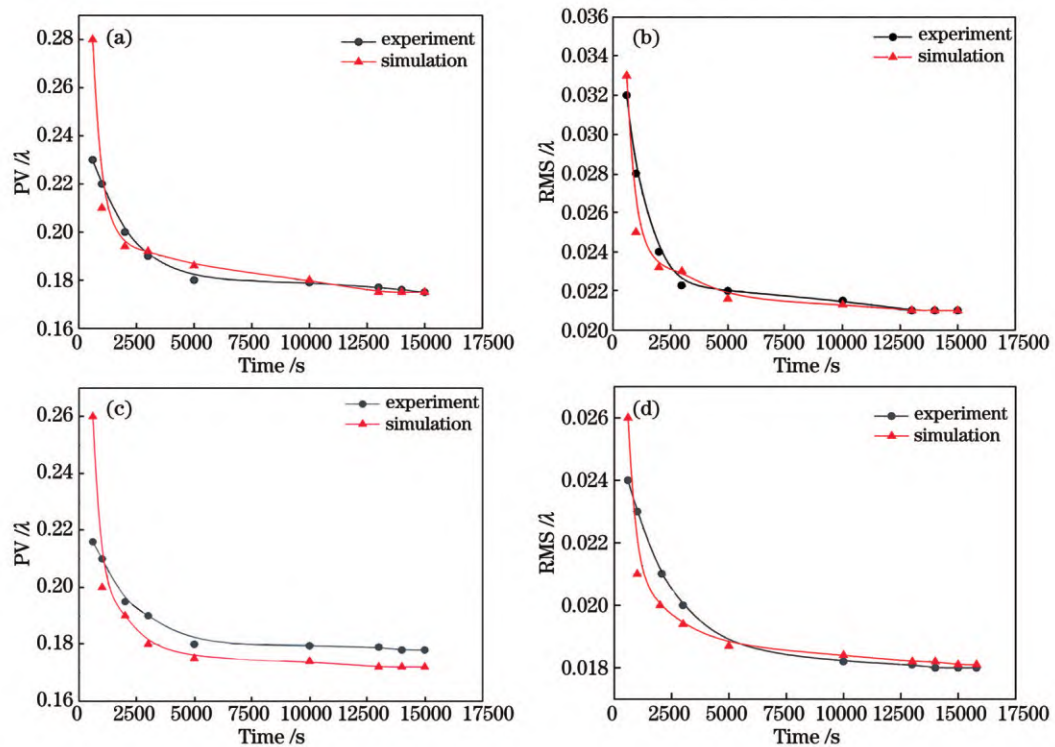


图 17 实验与仿真面形精度变化对比。(a)结构优化前 PV 值;(b)结构优化前 RMS 值;(c)结构优化后 PV 值;(d)结构优化后 RMS 值

Fig. 17 Comparison of tested and simulated surface accuracy changes. (a) PV before structural optimization; (b) RMS before structural optimization; (c) PV after structural optimization; (d) RMS after structural optimization

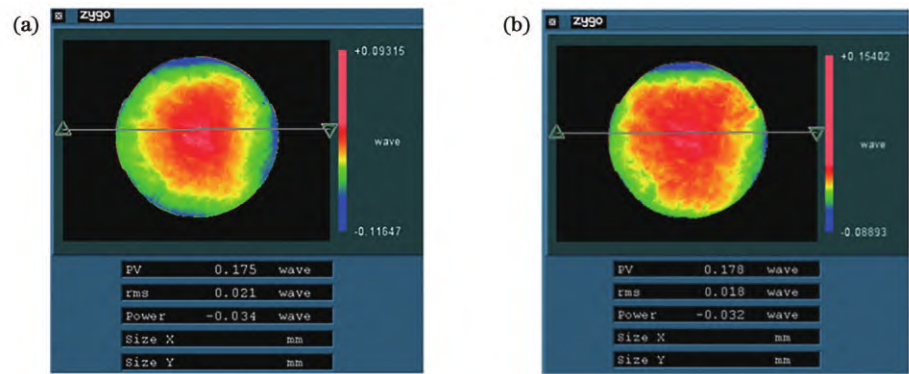


图 18 胶层固化后镜面面形干涉检测结果。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 18 Interferometry surface shape test results for cured mirror surface. (a) Before optimization; (b) after optimization

表 4 镜面面形检测结果

Table 4 Test results of mirror surface shape

Monitor status	PV of FEA calculation / λ	RMS of FEA calculation / λ	PV of test / λ	RMS of test / λ
Before bonding	0.175	0.021	0.175	0.021
After bonding	0.172	0.018	0.178	0.018

会产生较小的附加变形,对接液压的影响会随着胶层流动而不断减小, $\Phi 100$ mm 轻薄反射镜设计要求为:在固化应力下,镜面变形 RMS 不大于 $\lambda/50$,粘接前后面形变化率不大于 15%。

优化前镜面面形 RMS 值为 0.021λ ,且粘接后面形 RMS 值的变化率为 31.3%,不符合设计要求;优化后镜面面形 RMS 值为 0.018λ ,粘接前后面形 RMS 值的变化率为 12.5%,达到了设计要求。

在粘接完成的第 7 天(室温完全固化时间)、第 14 天分别进行了 1 h 一次的面形复检,发现最佳面形 RMS 值的变化量在 0.002λ 以内,胶层对面形影响已经比较稳定,稳定性可以满足工程应用要求。

6 结 论

本文研究了平面反射镜组件异质胶接时胶层固化收缩对反射镜面形的动态影响。基于胶层固化收缩应力产生的原理,结合黏弹性理论建立了胶层力学模型,预测胶层固化稳定时间为 15000 s;通过黏弹性有限元建模,并采用温度载荷法等效模拟胶层固化收缩应力对面形的影响。结果显示胶层应力随时间的变化趋势与理论一致;通过结构拓扑优化设计,将胶层粘接面积从 490 mm^2 优化到 300 mm^2 ,胶层粘接面积减小了 39%,优化后镜面 RMS 稳定在 0.018λ ;通过粘接实验对固化时间、固化变形进行了测试,结果验证了结构优化和粘接工艺的有效性。

参 考 文 献

[1] 胡海飞,郭鹏,乔冠博.空间光学大型镜面若干关键力学问题综述[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(1):42-47.
Hu H F, Guo P, Qiao G B. Review on some key mechanical problems for large mirrors in space optics[J]. Journal of

Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(1): 42-47.
[2] Bayar M. Lens barrel optomechanical design principles[J]. Optical Engineering, 1981, 20(2): 181-186.
[3] Vukobratovich D, Fetterhoff K A, Myers J R, et al. Bonded mounts for small cryogenic optics[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4131: 228-239.
[4] Klotz G L. Tool for bonded optical element thermal stability analysis[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8125: 81250I.
[5] 关少华. RTV 胶在高精度光学装配中对面形影响的分析[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所,2013.
Guan S H. Analysis of impact of RTV bond on the surface shape in the assembly of high-precision optical lens[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
[6] 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 Z L, Li R G, et al. Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2698-2707.
[7] 周定沛.胶层的粘弹性与内应力松弛[J].粘接,1997(2):1-4,19-54.
Zhou D P. Viscoelasticity and internal stress relaxation of the adhesive line[J]. Adhesion, 1997(2): 1-4, 19-54.
[8] 冯瑞.胶接差异对光机镜片面形的影响研究[D].长春:吉林大学,2022.
Feng R. Research on the influence of adhesion difference on the surface shape of opto-mechanical lenses[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
[9] Maggiore S, Banea M D, Stagnaro P, et al. A review of structural adhesive joints in hybrid joining processes[J]. Polymers, 2021, 13(22): 3961.
[10] Sun L J, Wu W C, Chen W C, et al. Microstress bonding design of low-distortion mirror assembly[J]. Optical Engineering, 2022, 61(10): 105109.
[11] 刘国庆,马超,张宗存,等.星载热红外长波光谱仪透镜柔性支撑结构研究[J].中国激光,2024,51(17):1710003.
Liu G Q, Ma C, Zhang Z C, et al. Flexible support structure of lens for spaceborne thermal infrared long wave spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(17): 1710003.
[12] 翟方超,曾庆化,毛飞龙,等.基于虚像运动分析的光电稳定

- 平台反射镜补偿技术[J]. 光学学报, 2024, 44(20): 2012004.
- Zhai F C, Zeng Q H, Mao F L, et al. Mirror compensation technology for photoelectric stabilized platform based on virtual image motion analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(20): 2012004.
- [13] 3M Company. Safety data sheet[EB/OL]. (2022-11-01)[2024-09-11]. https://www.3m.com/3M/en/_US/p/d/b40066427/.
- [14] de Vreugd J, Jansen K M B, Ernst L J, et al. Modelling of viscoelastic properties of a curing adhesive[C]//WIT Transactions on Engineering Sciences, Computational Methods and Experiments in Materials Characterisation III, June 13–15, 2007, Bologna, Italy. Southampton: WIT Press, 2007: 241-251.
- [15] 张小兵, 尹韶辉, 朱科军, 等. 基于广义 Maxwell 模型的非球面光学镜片成型模拟[J]. 材料导报, 2013, 27(20): 148-152.
- Zhang X B, Yin S H, Zhu K J, et al. Simulation of compression molding aspherical glass lenses based on generalized Maxwell model[J]. Materials Review, 2013, 27(20): 148-152.
- [16] 陈艳, 张科慧. Boltzmann 叠加原理在聚合物粘弹性理论中的应用[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(5): 90-92.
- Chen Y, Zhang K H. The application of Boltzmann overlapping principle in viscoelastic theory of polymer[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science Edition), 2005, 41(5): 90-92.
- [17] 刘玖. 光机系统胶接结构的力学行为分析[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- Liu J. Mechanical behavior analysis of adhesive structure of optomechanical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [18] 关英俊. 空间反射镜胶粘结固紧结构优化设计[J]. 机械设计, 2011, 28(3): 72-76.
- Guan Y J. Optimum design of adhesive bonds in the space mirror[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(3): 72-76.
- [19] 武永见, 刘涌, 孙欣. 柔性支撑式空间反射镜胶接应力分析与消除[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 20210496.
- Wu Y J, Liu Y, Sun X. Analysis and elimination of adhesive bonding force of flexible supported space mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 20210496.
- [20] Yoder P, Vukobratovich D. Opto-mechanical systems design, two volume set[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [21] Hu H F, Zhou D, Zhao C C, et al. Hetero-bonding strength investigation into opto-mechanical interface[J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2024, 11: 1406090.
- [22] 张家齐, 郭艺博, 张友建, 等. 机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(3): 578-586.
- Zhang J Q, Guo Y B, Zhang Y J, et al. Design of reflector assembly and adhesive layer under airborne wide temperature conditions[J]. Chinese Optics, 2023, 16(3): 578-586.
- [23] 陆玉婷, 王伟之. 大口径胶粘主镜装调的有限元分析[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(1): 38-44.
- Lu Y T, Wang W Z. Alignment of large aperture gluing primary mirror with finite element method[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(1): 38-44.
- [24] 胡海飞. 大型镜面原位光学加工-检测多点复合支撑系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- Hu H F. Research on design and test of the multi-point hybrid support structures for *in-situ* optical fabrication and test of large optics[D]. Changchun: Jilin University, 2020.

Mirror Surface Stability During Adhesive Curing of Opto-Mechanical Hetero-Bonding

Guan Yingjun¹, Cheng Xiaohui¹, Zhang Mingqi¹, Li Jinfeng^{2,3}, Hu Haifei^{2*}

¹*School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, Jilin, China;*

²*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;*

³*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Objective Adhesive bonding has become one of the most popular methods and a unique method sometimes for connecting optical components to their support structure in optical systems. For high-precision optical systems, the shrinkage stress caused by adhesive curing has a non-negligible influence on the mirror figure accuracy. At present, there is a lack of methods for monitoring the figure precision during the bonding, which makes the bonding process hard to control in time. The bonding process is planned to be optimized, and the dynamic monitoring problem of the bonded mirror figure should be solved to reduce the relative figure change rate before and after mirror bonding. We investigate thin glass mirror specimens with a diameter of $\Phi 100$ mm and a thickness of 10 mm to optimize the stress-relieving structure. Finally, a foundation can be laid for promoting stable opto-mechanical integration quality and widening the engineering application of light-thin mirrors.

Methods Firstly, the principle of curing shrinkage stress of adhesive layers is analyzed. Secondly, based on the constitutive theory of adhesive materials, the viscoelastic mechanical model of the adhesive layer is introduced, and the relationship between the shrinkage stress of the adhesive layer and the curing time is analyzed. Then, the equivalent

temperature loading method is adopted to simulate the influence of the adhesive shrinkage stress on the mirror figure, based on which the optimal design of the curing stress unloading structure is carried out by topology optimization. Finally, by employing the proposed adhesive bonding technique, a dynamic monitoring test platform for the curing figure of the adhesive layer is built, with the bonding process and optical tests carried out.

Results and Discussions Based on the viscoelastic theory, the mechanical model of the adhesive layer is built, and the performance parameters of the adhesive layer are determined according to the theoretical calculation and finite element simulation, with the 0.2 mm thickness of the adhesive layer and minimum adhesive area of 300 mm². The equivalent temperature loading method is adopted to simulate the effect of the adhesive curing shrinkage on the mirror figure, and it is verified that the results of the curing shrinkage stress of the adhesive layer before optimization are consistent with those of theoretical analysis. The results show that the shrinkage stress of the adhesive layer is 0.016 MPa and the mirror figure accuracy RMS is 0.018λ after the optimized bonding structure, which indicates that the designed adhesive structure meets the application requirements. According to the whole history curves of the PV and RMS values of the mirror figure during the curing process, it is found that the curing time is recommended as 15000 s, and the final figure accuracy RMS is 0.021λ/0.018λ for the non-optimized/optimized structure respectively. The test results show that the structure of the optimized adhesive joint is better than that before optimization, and the simulation results are verified by experiments.

Conclusions In studying the influence of optomechanical hetero-bonding processes on the mirror figure, the mechanical model of the adhesive layer is built by analyzing the principle of curing shrinkage stress of the adhesive layer combined with the viscoelastic theory, with the curing stability time of the adhesive layer recommended as 15000 s. By adopting the combination of viscoelastic finite element modeling method and the equivalent temperature loading method, the influence of adhesive curing shrinkage stress on the figure is simulated, and then a reasonable stress-relieving bonding structure is optimized. By conducting the optimal design of structural topology, the adhesive layer bonding area is optimized from 490 to 300 mm², a reduction of 39%, and the corresponding RMS of the optimized mirror surface is stabilized around 0.018λ. The mirror bonding equipment for monitoring the mirror figure dynamically is designed to ensure the bonding quality. The dynamic monitoring bonding process of the adhesive layer curing figure is established at room temperature. The curing time and surface deformation are tested during the curing process focusing on the mirror figure stability. As a result, we verify the effectiveness of the structural optimization, the bonding process, and the finite element model.

Key words hetero-bonding; curing shrinkage stress; finite element analysis; dynamic monitoring; surface accuracy