

# 热-机械耦合作用下黏结材料对变形镜应力特性的影响

王家秋, 罗帅, 张彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

**摘要** 为分析热-机械耦合作用下黏结材料对变形镜应力特性的影响,利用有限元方法建立了含黏结材料的变形镜模型。采用顺序耦合分析方法分析和比较了三种典型黏结材料对变形镜应力分布的影响,并讨论了在不同胶层厚度下变形镜最大应力的变化规律。结果表明,在实际的变形镜系统中,由于热-机械耦合作用,黏结材料的特性和参数会对变形镜的应力特性产生明显的影响。黏结材料对变形镜前表面的应力分布与面形峰谷值几乎没有影响,而对其后表面的应力分布影响较大,尤其会导致镜面与极头连接处的应力明显增大。对于不同的黏结材料,黏结材料的弹性模量和热膨胀系数越小,变形镜所受的应力越小。在三种典型的黏结材料中,胺类固化环氧 5222 材料对应的变形镜应力最大,酚醛环氧树脂 T300 材料对应的变形镜应力最小,而酚醛环氧树脂 4221 材料对应的变形镜应力居二者之间。此外,黏结材料的胶层厚度会直接影响变形镜的应力特性,其最大应力值随胶层厚度的增大而明显减小。在变形镜制作过程中,应在有效控制胶层内部气泡等缺陷产生的前提下选择较厚的黏结厚度。

**关键词** 自适应光学; 变形镜; 热-机械耦合; 黏结材料; 应力

中图分类号 TN248; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030104

## Influence of Adhesive Materials on Stress Characteristics of Deformable Mirrors Under Thermo-Mechanical Coupling

Wang Jiaqiu, Luo Shuai, Zhang Bin

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

**Abstract** In order to analyze the effect of adhesive material on the stress characteristics of the deformable mirror (DM) under thermo-mechanical coupling, we establish a DM model with adhesive material by the finite element method. We analyze and compare the effects of three typical adhesive materials on the stress distributions of the DM using the sequential coupling method, and discuss the variation law of the maximum stress of the DM for adhesive layers with different thicknesses. The results indicate that the characteristics and parameters of the adhesive material greatly affect the stress characteristics of the DM due to thermo-mechanical coupling in an actual DM system. The adhesive material has almost no effect on the stress distribution of the front surface of DM, as well as the peak-valley value of the surface shape, but has a significant influence on the stress distribution on the rear surface. In addition, the stress at the joint between the mirror and the pole is significantly increased. For different kinds of adhesive materials, the smaller the elastic modulus and the thermal expansion coefficient are, the smaller the stress on the DM is. Among the three typical adhesive materials, the stress on the DM glued with the amine-cured epoxy 5222 material is the largest, the stress on the DM glued with the phenolic epoxy resin T300 material is the smallest, and the stress on the DM glued with the phenolic epoxy resin 4221 material is between those of the two materials. In addition, the thickness of the adhesive layer directly affects the stress characteristics on the DM, whose maximum value decreases with the increase of the thickness of the adhesive layer, which means that in the process of the DM manufacturing, a thicker adhesive thickness should be chosen reasonably under the condition of effective controlling the

收稿日期: 2017-08-19; 收到修改稿日期: 2017-09-19

基金项目: 科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(2014RA4051)、天津市薄膜光学重点实验室开放基金(KJWX170620)

作者简介: 王家秋(1994—),女,硕士研究生,主要从事变形镜热效应、疲劳损伤与控制等方面的研究。

E-mail: jiaqiawang183@163.com

导师简介: 张彬(1969—),女,博士,教授,主要从事高功率激光技术、光束传输变换和控制、非线性光学等方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

produce of the bubble and other defects inside the adhesive layer.

**Key words** adaptive optics; deformable mirror; thermo-mechanical coupling; adhesive material; stress

**OCIS codes** 010.1080; 110.1080; 140.3460

## 1 引言

典型的自适应光学系统主要包含三个组成部分:波前传感器、计算控制处理器和波前校正器<sup>[1]</sup>。变形镜(DM)作为常用的波前校正器,其校正能力和使用寿命会极大地影响自适应光学系统的性能<sup>[2]</sup>。在制作以分立压电驱动连续表面变形镜<sup>[3]</sup>、双压电片变形镜<sup>[4]</sup>等典型的变形镜时,通常采用黏结材料固定镜面与极头。不同的黏结材料将直接影响极头与镜面之间的黏结性能,进而影响驱动器对镜面的驱动作用以及变形镜的校正能力和使用寿命<sup>[5]</sup>。虽然各国科研工作者已对变形镜波前校正过程中的热形变及应力特性等展开了大量研究<sup>[6-9]</sup>,但均未考虑热-机械耦合作用下黏结材料对变形镜应力特性的影响。

胶接技术被广泛应用于许多领域,因此引起了人们的广泛关注<sup>[4,10-13]</sup>。杨春梅等<sup>[11]</sup>对环氧胶黏涂层中的温度应力以及金属被黏物与胶层间的应力分布进行了仿真。Temma等<sup>[12]</sup>利用有限元分析方法研究了在金属胶接中劈裂接头的应力分布规律,分析了被黏物与黏结剂之间弹性模量的比值,以及胶层厚度对胶层及被黏物界面处应力分布的影响。在光学领域中,黏结剂在光学零件的加工以及产品结构的黏结、密封等方面均有着广泛的应用。其中,环氧胶因其黏结强度大、耐高温、耐湿热老化等特性,常被用作光学元件的黏结材料<sup>[4,10,14]</sup>。利用有限元方法建立了含黏结材料的变形镜模型,并选取了三种不同固化方式的环氧胶作为黏结材料,进而分析了变形镜在热-机械耦合作用下,有无黏结材料、使用不同黏结材料以及胶层厚度对变形镜应力特性的影响。

## 2 理论模型

### 2.1 应力分析模型

变形镜的一个驱动器引起的面形变化由影响函数决定,而影响函数通常可由高斯函数近似表示为<sup>[15]</sup>

$$I_i(x, y) = \exp\left[\ln b \cdot \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{d^2}\right],$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

式中 $(x_i, y_i)$ 为驱动器 $i$ 的中心位置坐标, $b$ 为交连值, $d$ 为驱动器的间距, $n$ 为驱动器个数。单个驱动

器产生的面形变化很小,且可近似认为是相互独立的,因此整个变形镜面形可视为每个驱动器影响函数的叠加<sup>[16]</sup>,即

$$M(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i I_i(x, y), \quad (2)$$

式中 $V_i$ 为驱动器 $i$ 的等效控制电压。

理论上,位于镜面边缘驱动器的面形并非完全与(2)式的形式一致,但其对变形镜应力分布的影响较小。为便于分析,假定变形镜对畸变波前起校正作用的区域位于其边缘内侧部分,进而可忽略边缘效应<sup>[17]</sup>。

变形镜在实际工作中通常会受到强激光连续辐照与机械驱动的共同作用,因此采用顺序耦合法对热-机械耦合作用下变形镜的应力分布进行分析。顺序耦合法的基本思路是通过变形镜进行热分析而求得变形镜的温度场,进而将其作为载荷施加到机械应力分析中,从而计算出变形镜的应力分布<sup>[7-9,18]</sup>。在应力分析过程中,采用弹性力学理论(即广义 Hooke 定律<sup>[19]</sup>)对变形镜产生的热形变进行分析,可得

$$\begin{cases} \sigma_x = \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_x - (3\zeta + 2G)\alpha T \\ \sigma_y = \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_y - (3\zeta + 2G)\alpha T \\ \sigma_z = \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_z - (3\zeta + 2G)\alpha T \\ \tau_{xy} = 2G\epsilon_{xy}, \tau_{yz} = 2G\epsilon_{yz}, \tau_{xz} = 2G\epsilon_{xz} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 $x, y, z$ 方向所受的正应力; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 为对应的正应变; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ 分别为 $xy$ 面、 $yz$ 面、 $xz$ 面所受的切应力; $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{xz}$ 为对应的切应变; $\zeta$ 为表征材料压缩性的一阶 Lamé 常数, $\zeta = E\mu / [(1 + \mu)(1 - 2\mu)]$ ,其中 $\mu$ 为泊松比, $E$ 为杨氏模量; $G$ 为剪切弹性模量, $G = E / [2(1 + \mu)]$ ;  $\alpha$ 为热膨胀系数; $T$ 为初始温度场。

变形镜是塑形较强的实体结构,根据第 3、4 强度理论,在平面应力状态下,变形镜的受力情况可采用 Von Mises 等效应力表征<sup>[20-21]</sup>,即

$$S_{eq} = \sqrt{\mathbf{S}^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{S}}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{S} = (S_x, S_y, S_{xy})^T$ ,  $S_x, S_y$ 为正应力分量,  $S_{xy}$

$$\text{为剪应力分量; } \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & 0 \\ -1/2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

## 2.2 变形镜建模

为方便讨论而不失一般性,以 73 单元分立压电驱动连续表面变形镜为例进行研究,变形镜的结构如图 1(a)所示。根据图 1(a)所示的变形镜结构,利用有限元分析软件 ANSYS 建立了变形镜模型,如图 1(b)所示。变形镜极头间距为 20 mm,直径为 8 mm,长度为 10 mm,基底直径为

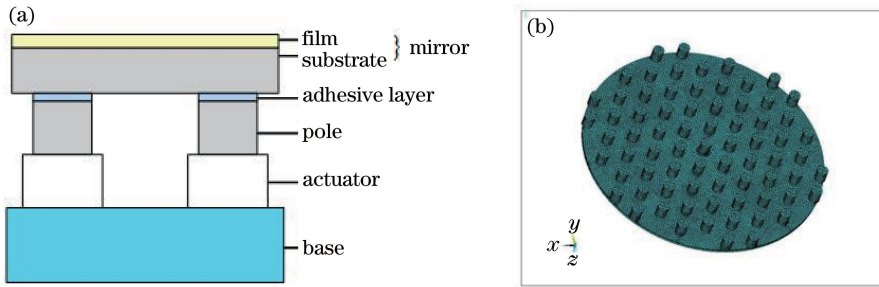


图 1 (a)变形镜结构;(b)变形镜有限元模型

Fig. 1 (a) Structure of DM; (b) finite element model of DM

极头作为镜面与驱动器间的连接单元,其材料通常与镜面相同。镜面与极头间通过黏结剂黏结,不同的黏结材料及其黏结厚度直接影响极头与镜面之间的黏结性能,进而影响驱动器对镜面的驱动作用。因此,选取了三种不同固化方式的黏结材料进行进一步的分析和比较,黏结材料分别是胺类固化环氧 5222,酚醛环氧树脂 4221 和 T300(分别用 I,

表 1 变形镜材料的热物理参数

Table 1 Thermo-physical parameters of DM

Material	Density / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Specific heat / ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Heat conductivity / ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Thermal expansion coefficient / ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )	Young's modulus / GPa	Poisson's ratio
Si	2329	703	146.000	4.20	131.00	0.28
YbF <sub>3</sub>	8150	361	0.051	18.90	75.79	0.28
ZnS	4080	1927	0.190	7.10	74.50	0.29
Material I 1570	1000	0.850	3.000	120.00	0.28	
Material II	2000	960	0.850	5.32	48.00	0.30
Material III	1570	972	0.720	30.00	126.00	0.33

## 3 黏结材料对变形镜应力特性的影响

假定入射激光为高斯光束,峰值功率密度为  $5000\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,光斑半径  $w_0=40\text{ mm}$ ,连续辐照时间为 30 s。热-机械耦合作用下应力分析流程图如图 2 所示<sup>[26]</sup>。利用有限元方法计算得到变形镜的温度场,并以变形镜的温度场作为载荷施加到变形镜。

180 mm,厚度为 2.5 mm。变形镜镀有膜系为 Sub/H(LH)<sup>11</sup>/Air 的高反膜,Sub 为硅(Si),H 为硫化锌(ZnS),L 为氟化镱(YbF<sub>3</sub>),波长  $\lambda=3.8\text{ }\mu\text{m}$ 。通过 Macleod 膜系设计软件分析可知,该膜系中单层 ZnS 薄膜的厚度为 431.82 nm,单层 YbF<sub>3</sub> 薄膜的厚度为 678.57 nm,膜系反射率  $R=99.967\%$ ,基底与极头的材料为 Si。

II, III 号材料表示)<sup>[22]</sup>。

在建立变形镜模型时,忽略了胶层中存在的气孔和黏结面等缺陷<sup>[23]</sup>。在顺序耦合分析中进行热分析和机械分析时,变形镜分别采用实体块单元 SOLID70 和 SOLID185;划分网格时胶层及附近的区域网格需进行细分。变形镜材料的热物理参数如表 1 所示<sup>[22,24-25]</sup>。

在变形镜的机械应力分析中,以随机相位屏作为畸变波前<sup>[27]</sup>,通过变形镜的影响函数和最小二乘法求得驱动器的等效控制电压矩阵<sup>[28-29]</sup>,再利用有限元方法对变形镜的应力分布进行仿真,进而计算得到变形镜在热-机械耦合作用下的应力分布。该变形镜镀有高反膜,因此需利用(3)式计算出变形镜因吸收激光的能量而产生的热形变,再通过(4)式计算得到变形镜的 Von Mises 等效应

力。采用不同黏结材料或增加黏结材料,变形镜的交连值几乎没有变化,因而对影响函数也几乎

没有影响。在后续的分析中,变形镜的影响函数均为定值。

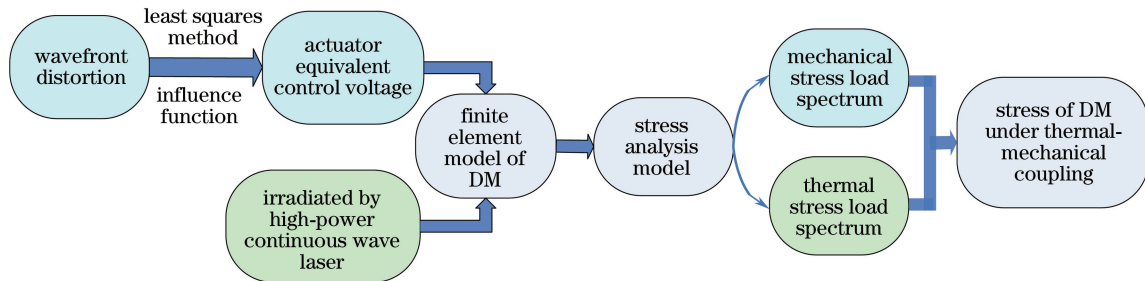


图 2 热-机械耦合作用下应力分析流程图

Fig. 2 Flow chart of stress analysis under thermal-mechanical coupling

### 3.1 热-机械耦合作用下黏结材料对变形镜应力的影响

为了分析黏结材料对变形镜应力的影响,首先对没有黏结材料的变形镜在热-机械耦合作用下的应力分布进行分析,假设极头与镜面间是理想连接。当无黏结材料时,畸变波前与变形镜拟合面形如图

3 所示。待校正畸变波前如图 3(a)所示,根据(3)式可计算出无黏结材料时变形镜的拟合面形,如图 3(b)所示。其中,变形镜的面形峰谷(PV)值为  $10.60 \mu\text{m}$ 。此时,由(4)式可计算出变形镜的  $V_{\text{on Mises}}$  等效应力值,无黏结材料时热-机械耦合作用下变形镜应力分布云图如图 4 所示。

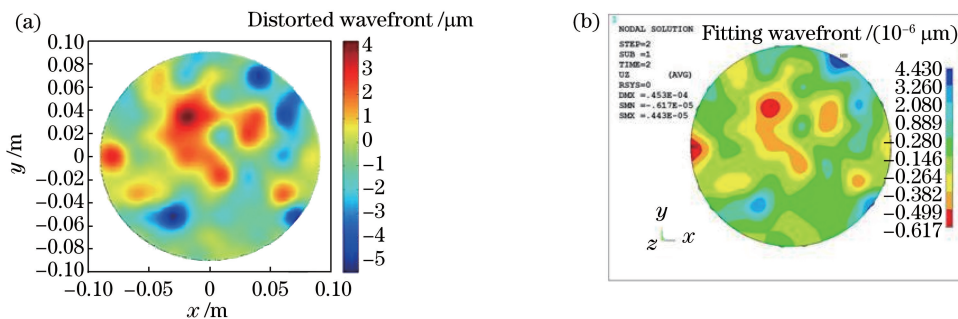


图 3 无黏结材料时的(a)畸变波前和(b)变形镜拟合面形

Fig. 3 (a) Distorted wavefront and (b) fitting surface shape of DM without adhesive material

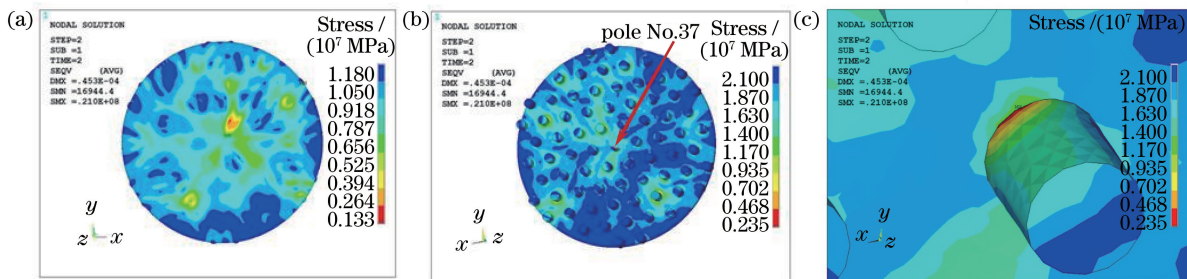


图 4 无黏结材料时热-机械耦合作用下的变形镜应力分布云图。(a)前表面;(b)后表面;(c)最大应力处

Fig. 4 Stress distribution nephograms of DM under thermal-mechanical coupling without adhesive material.

(a) Front surface; (b) rear surface; (c) position at maximum stress

由图 3(b)和图 4(a)可以看出,变形镜表面应力较大的值集中在形变量较大的区域。分析图 4 可知,变形镜前表面应力最大值为  $11.80 \text{ MPa}$ ,变形镜后表面 37 号极头与镜面连接处的应力最大,为  $21.00 \text{ MPa}$ 。这是由于极头对镜面有一定的约束作

用,变形镜后表面应力整体大于前表面,且应力较大的位置主要集中于极头与镜面相接处,该结论与文献[9]一致。

在实际工作中,分立压电驱动连续表面变形镜的镜面与极头之间并不是直接连接的,而是通过

光学胶进行黏结。因此,需要考虑黏结材料特性及其参数对变形镜应力的影响。以 I 号黏结材料为例,其黏结面积为极头的底面积,黏结厚度为 0.40 mm。为分析 I 号黏结材料在热-机械耦合作用下对变形镜应力的影响,需先通过(3)式模拟得到考虑黏结材料的变形镜拟合面形分布,有黏结材料时变形镜的拟合面形如图 5 所示,由图 5 可见,其峰谷(PV)值为  $10.59 \mu\text{m}$ 。相应地,有黏结材料时变形镜的应力分布云图如图 6 所示。

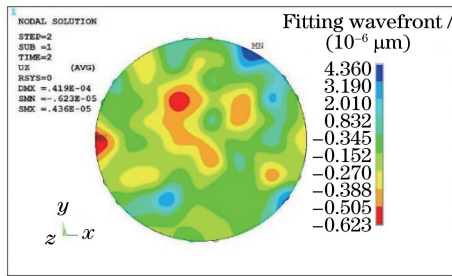


图 5 有黏结材料时变形镜的拟合面形

Fig. 5 Fitting wavefront of DM with adhesive material

由图 6 可见,变形镜前表面应力最大值为 12.00 MPa,后表面应力最大值为 33.60 MPa。当变形镜仅受机械驱动作用时,其表面面形 PV 值为  $10.57 \mu\text{m}$ ,前表面 Von Mises 等效应力最大值为 8.55 MPa,而后表面最大等效应力值为 33.30 MPa。由此可见,激光辐照仅对变形镜前表面应力有影响,而对后表面应力没有太大影响,其原因在于激光辐照引起的温度升高并未达到使黏结剂变性的温度。对比不考虑黏结材料与考虑黏结材料的变形镜对应力的影响时,黏结材料对变形镜前表面应力分布几乎没有影响,而对后表面应力分布的影响较大。这是由于变形镜在受到激光辐照和机械驱动时,黏结材料与基底材料的弹性模量和热膨胀系数等参数不同,从而导致热胀收缩剧烈程度不同,使得变形镜应力增大,这也是实际工作中造成镜面与极头连接处损坏甚至极头脱落的原因之一。此外,当增加黏结材料后,变形镜形变面形 PV 值无明显变化,可见考虑黏结材料后几乎不会影响变形镜的校正效果。

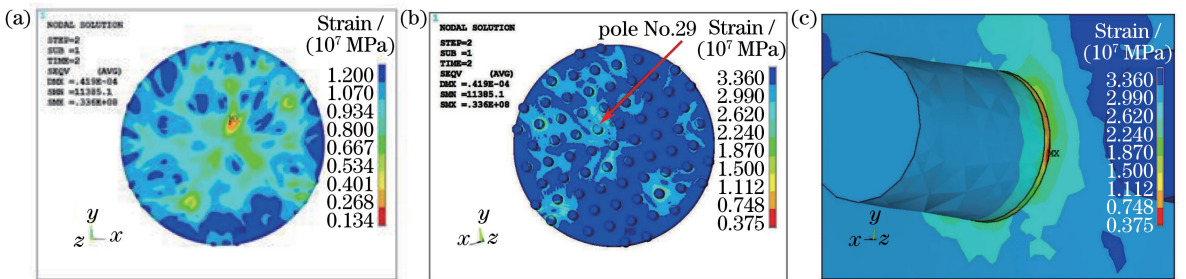


图 6 有黏结材料时变形镜的应力分布云图。(a)前表面;(b)后表面;(c)最大应力处

Fig. 6 Stress distribution nephograms of DM with adhesive material. (a) Front surface; (b) rear surface; (c) position at maximum stress

### 3.2 黏结材料类型对变形镜应力的影响

为了分析黏结材料类型对变形镜应力的影响,分别模拟了 II 号和 III 号黏结材料对变形镜在热-机械耦合作用下的应力,所得变形镜应力分布云图分

别如图 7 和图 8 所示。在计算过程中,黏结面积均为极头的底面积。

由图 7 和图 8 可见,使用 II 号黏结材料时,变形镜前表面应力最大值为 11.90 MPa,后表面应力

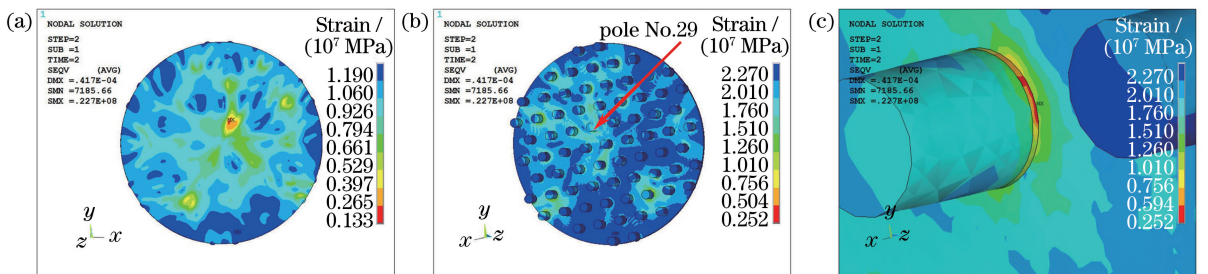


图 7 使用 II 号材料时变形镜的应力分布云图。(a)前表面;(b)后表面;(c)最大应力处

Fig. 7 Stress distribution nephograms of DM with adhesive material II. (a) Front surface; (b) rear surface; (c) position at maximum stress

最大值为 22.70 MPa, 位于 29 号极头胶层处。使用Ⅲ号黏结材料时, 变形镜前表面应力最大值为 12.10 MPa, 后表面应力最大值为 57.90 MPa, 同样

位于 29 号极头胶层处。进一步分析图 7(b)和图 8(b)可知, 使用黏结材料时, 应力主要集中在胶层中。

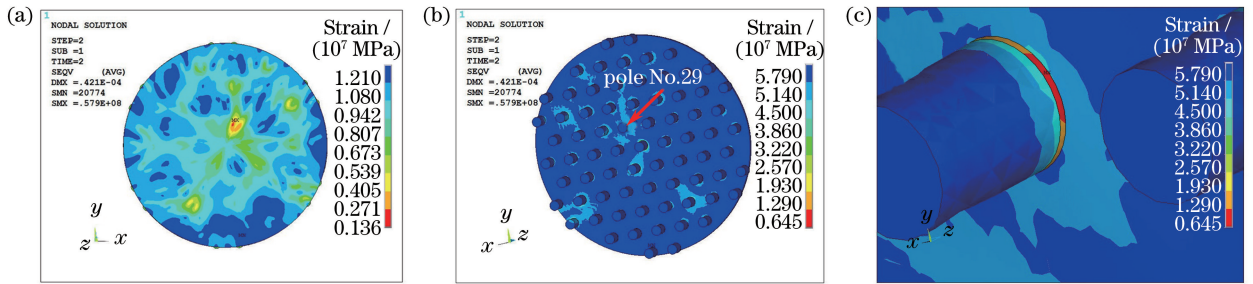


图 8 使用Ⅲ号材料时变形镜的应力分布云图。(a)前表面;(b)后表面;(c)最大应力处

Fig. 8 Stress distribution nephograms of DM with adhesive material III. (a) Front surface; (b) rear surface; (c) position at maximum stress

为了对比三种黏结材料对变形镜的校正效果和应力的影响, 使用不同黏结材料时, 变形镜的形变范围和最大应力值如表 2 所示。

由表 2 可知, 使用三种材料的变形镜形变面形 PV 值相差不大, 分别为 10.59, 10.54, 10.59  $\mu\text{m}$ 。由此可见, 当黏结面积和黏结材料厚度相同时, 黏结材料的类型对变形镜的校正效果几乎没有影响。当使用Ⅱ号黏结材料时, 变形镜所受的应力最小, 而使用Ⅲ

号黏结材料时变形镜所受的应力最大。这是由于材料的杨氏模量和热膨胀系数越大, 变形镜所受的应力就越大。由表 1 中材料的热物理参数可知, Ⅱ号材料的弹性模量最小, 致使变形镜的应力最小。Ⅰ号和Ⅱ号黏结材料的热膨胀系数均小于Ⅲ号, 所以Ⅲ号黏结材料随温度变化引起的胀缩情况更剧烈, 故使用Ⅲ号黏结材料时变形镜应力最大。由此可见, 当黏结材料的弹性模量和热膨胀系数较小时, 变形镜应力相对较小。

表 2 使用不同黏结材料时的变形镜形变范围和最大应力

Table 2 Maximum stress and deformation range of DM with different adhesive materials

Type of material	Deformation range of DM / $\mu\text{m}$	Maximum stress in front surface of DM / MPa	Maximum stress in rear surface of DM / MPa
I	-6.23-4.36	12.00	33.60
II	-6.19-4.35	11.90	22.70
III	-6.05-4.54	12.10	57.90

### 3.3 胶层厚度对变形镜应力的影响

变形镜胶层应力的具体分布不仅与黏结材料和黏结面积等因素有关, 还与胶层厚度密切相关。一般而言, 胶层的厚度为 0.04~0.40 mm<sup>[23,30]</sup>。因此, 在 0.04~0.40 mm 范围内讨论了三种黏结材料在不同胶层厚度时, 变形镜最大等效应力的变化规律。使用不同黏结材料时, 胶层厚度对变形镜的最大应力值的影响如图 9 所示。

由图 9 可知, 当这三种黏结材料的厚度减小时, 变形镜的最大应力均随之减小; 当黏结材料的厚度相同时, Ⅰ号黏结材料对应的应力最大, 而Ⅲ号黏结材料对应的应力最小。当胶层厚度为最大值 0.40 mm 时, Ⅰ号、Ⅱ号和Ⅲ号黏结材料对应的变形镜的最大应力分别为 33.0, 22.7, 57.9 MPa。值得指出的是, 当胶层厚度小于 0.10 mm 时, 变形镜的应力随胶层厚度的减小而迅速增大。这是由于胶层过薄

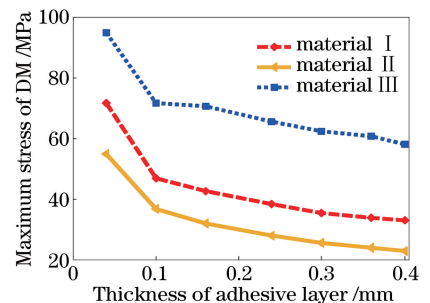


图 9 使用不同黏结材料时胶层厚度对变形镜的最大应力值的影响

Fig. 9 Effect of adhesive layer thickness on maximum stress value of DM with different adhesive materials

时, 在驱动器的驱动作用下, 镜面与极头会对黏结剂有很大的约束作用, 使得胶层中产生较大的应力。因此, 胶层越薄则约束作用越强, 胶层中的应力越大。当胶层厚度大于 0.10 mm 时, 随着胶层厚度的

增加, 镜面与极头对胶层的约束作用减弱, 且黏结也更稳定, 因此变形镜胶层中的应力将会随着胶层厚度的增加而减小。

在实际工作中, 胶层过薄时, 胶量不足会导致涂胶不均匀, 使得极头与镜面间不能形成稳定的黏结, 更易导致胶层内的应力集中。但胶层过厚时, 胶层内部容易形成气泡等缺陷, 阻碍驱动器对镜面的驱动作用, 从而影响变形镜的校正效果。因此, 为了不引入过多集中的应力及缺陷, 并满足变形镜的校正要求, 应选择相对较厚的黏结厚度。

## 4 结 论

变形镜镜面与极头通常通过黏结剂黏结, 而黏结材料的选择会影响变形镜的性能, 从而影响变形镜的校正能力和使用寿命, 因而需要分析黏结材料对变形镜的影响。通过建立含黏结材料的变形镜有限元分析模型, 对热-机械耦合作用下黏结材料对变形镜的应力特性的影响进行了研究, 并分析了不同黏结材料及其胶层厚度对变形镜应力特性的影响。结果表明: 使用黏结材料后, 变形镜形变面形 PV 值无明显变化, 说明黏结材料对变形镜的校正能力影响不大。黏结材料的弹性模量和热膨胀系数越小, 产生的应力集中现象越不明显, 变形镜的应力越小。具体来说, 当黏结材料的厚度相同时, 胺类固化环氧 5222 材料对应的变形镜应力最大, 酚醛环氧树脂 T300 材料对应的变形镜应力最小, 而酚醛环氧树脂 4221 材料对应的变形镜应力居二者之间。胶层厚度会影响变形镜的最大应力, 且变形镜的最大应力随胶层厚度的增大而减小, 具体来说, 当胶层厚度小于 0.10 mm 时, 变形镜应力随胶层厚度的增大而迅速减小; 当胶层厚度在 0.10~0.40 mm 之间时, 变形镜应力随胶层厚度的增大而缓慢减小。

## 参 考 文 献

- [1] Jiang W H. Adaptive optical technology [J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(1): 7-13.  
姜文汉. 自适应光学技术 [J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 7-13.
- [2] Zhao L N, Dai Y, Zhao J L, *et al.* Super-resolution imaging of pupil filter using deformable mirror [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041801.  
赵丽娜, 戴云, 赵军磊, 等. 基于变形反射镜的光瞳滤波超分辨成像 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041801.
- [3] Lin X D, Liu X Y, Wang J L, *et al.* Progress of the continuous surface deformable mirror based on piezoceramic actuator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090003.  
林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090003.
- [4] Zhou H. Research on bimorph deformable mirror and its application in adaptive optics [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
周虹. 双压电片变形反射镜研制与应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [5] Fan Z G, Chang H, Chen S Q. 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. 透镜无热装配中粘结层的设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2573-2581.
- [6] Feng F, Wei B B, Liu W G, *et al.* Experiment study of impact of high power laser irradiation on compensation of deformable mirrors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120101.  
封斐, 魏斌斌, 刘文广, 等. 强激光辐照对变形镜补偿能力影响的实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120101.
- [7] Hu X C, Peng J Q, Zhang B. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality [J]. Chinese Journal of Laser, 2015, 42(1): 0102003.  
胡小川, 彭家琪, 张彬. 变形镜热形变及其对光束质量的影响分析 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102003.
- [8] Hu X C, Wang D, Cen L X, *et al.* Effect analysis of self-correction method based on the prediction model of deformable mirror with thermal deformation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1202001.  
胡小川, 王度, 陈丽霞, 等. 基于变形镜热形变预估模型的自校正效果分析 [J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1202001.
- [9] Chen L X, Wu Z, Zhang B, *et al.* Study on fatigue damage characteristics of deformable mirrors under thermal-mechanical coupling effect [J]. Applied Optics, 2016, 55(31): 8779-8786.
- [10] Cheng G, Jiang S L, Chen H Q. Application of epoxy resin adhesive in optical instruments [J]. Chinese Adhesives, 2004, 13(4): 1-4.  
程刚, 蒋世磊, 陈华强. 环氧树脂胶在光学部件粘接上的应用 [J]. 中国胶粘剂, 2004, 13(4): 1-4.
- [11] Yang C M, Zheng X L, Yu H Z. Finite element analysis of inner stress in epoxy adhesive layer [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2004, 26(2): 160-162.

- 杨春梅, 郑小玲, 余海洲. 环氧胶粘涂层中温度应力的有限元分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2004, 26(2): 160-162.
- [12] Temma K, Sawa T, Iwata A. Two-dimensional stress analysis of adhesive butt joints subjected to cleavage loads[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1990, 10(4): 285-293.
- [13] Hou R X. Application and development of optics adhesive used in optical instruments[J]. Optical Technology, 1997(1): 49-55.  
侯瑞祥. 光学仪器胶粘剂应用现状及进展[J]. 光学技术, 1997(1): 49-55.
- [14] Liu Q, He X. Investigation on solidification technics of pastern in space mirror[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(2): 118-120.  
刘强, 何欣. 反射镜用光学环氧胶粘固化工艺研究[J]. 机械设计与制造, 2011(2): 118-120.
- [15] Rao X J, Ling N, Jiang W H. Experiment of measuring influence function of deformable mirror using digital interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(10): 1446-1451.  
饶学军, 凌宁, 姜文汉. 用数字干涉仪测量变形镜影响函数的实验研究[J]. 光学学报, 1995, 15(10): 1446-1451.
- [16] Harvey J E, Callahan G M. Wavefront error compensation capabilities of multi-actuator deformable mirrors[C]. SPIE, 1978, 0141: 50-58.
- [17] Ma X M. Eigenmode characteristics of DF chemical laser and its adaptive wavefront correction effect prediction[D]. Chengdu: Sichuan University, 2014.  
马雪梅. DF 化学激光器的本征模式特性及自适应校正效果预估[D]. 成都: 四川大学, 2014.
- [18] Yan B. Research on reliability analysis methods of structural-thermal coupling and structural fatigue [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.  
阎彬. 结构-热耦合问题及结构疲劳的可靠性分析方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [19] Wang H G. Introduction to thermoelastic mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989.  
王洪纲. 热弹性力学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [20] Liu H W. Mechanics of material[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992.  
刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [21] Bai C Y, Qi P Q, Mou R K, *et al.* Multiaxial equivalent stress amendment algorithm based on classical Von Mises stress[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23): 166-170.
- 白春玉, 齐丕骞, 牟让科, 等. 基于经典 Von Mises 应力的多轴等效应力修正方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 166-170.
- [22] Yi X S. Composite materials handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.  
益小苏. 复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [23] Kong F R, You M, Zheng X L, *et al.* Influence of elastic modulus and thickness of adhesive on stress distribution of adhesive bonded joints under cleavage loading[J]. China Elastomerics, 2004, 14(4): 41-45.  
孔凡荣, 游敏, 郑小玲, 等. 胶粘剂特性和厚度对劈裂载荷作用下胶接接头应力分布的影响[J]. 弹性体, 2004, 14(4): 41-45.
- [24] Zhang Y H. Study on mechanical property for mid-infrared optical thin film[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2006.  
张殷华. 中红外光学薄膜机械性能研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2006.
- [25] Wakaki M. Handbook of optical materials[M]. Zhou H X, Cheng Y F, Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.  
若木守明. 光学材料手册[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [26] Chen L X. Study on fatigue damage characteristics of the optical deformable mirrors[D]. Chengdu: Sichuan University, 2017.
- [27] Chen L X, Hu X C, Han K, *et al.* Improvement method for fitting high-frequency phase by Zernike polynomials[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0314001.  
陈丽霞, 胡小川, 韩开, 等. Zernike 多项式对空间高频相位拟合的改进方法[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0314001.
- [28] Tyson R K, Byrne D M. The effect of wavefront sensor characteristics and spatiotemporal coupling on the correcting capability of a deformable mirror[C]. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1980: 228.
- [29] Tyson R K. Using the deformable mirror as a spatial filter: Application to circular beams[J]. Applied Optics, 1982, 21(5): 787-793.
- [30] Zheng R Q. Effect of adhesive layer thickness on adhesive properties[J]. Adhesion, 1990, 11(4): 33-35.  
郑瑞琪. 胶层厚度对胶接性能的影响[J]. 粘接, 1990, 11(4): 33-35.