

## 激光与光电子学进展

## 相位校正器的粘接热应力分析

卢飞<sup>1,2\*</sup>, 向汝建<sup>1,2</sup>, 徐宏来<sup>1,2</sup>, 张卫<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;<sup>2</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 粘接工艺会影响相位校正器的实际性能,然而在研制过程中相位校正器的镜面常出现破损情况。分析粘接工艺后校正面面形的特征和镜面破损的特点发现,镜面玻璃与连接柱头材料之间热膨胀系数差异过大会导致高温固化后校正面相应位置的残余应力过大。建立数值模型对连接处的热应力进行仿真,并选取热膨胀系数与镜面玻璃相近的柱头材料以及固化温度更低的黏接剂减小残余应力。将柱头材料更换为热膨胀系数与玻璃材料(K9)更匹配的 3Cr13,实验结果表明,高温固化后相位校正器的静态面形有了极大改善,多次实验均未出现校正面破损的情况。

**关键词** 光学器件; 相位校正器; 粘接热应力; 高温固化; 镜面破损

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220650

## Cementation Heat Stress Analysis of Phase Corrector

Lu Fei<sup>1,2\*</sup>, Xiang Rujian<sup>1,2</sup>, Xu Honglai<sup>1,2</sup>, Zhang Wei<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;<sup>2</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

**Abstract** The bonding process will affect the actual performance of the phase corrector. However, its mirror surface is often damaged during the development process. In this paper, the characteristics of the correction surface shape and the damage to the mirror after the bonding process are analyzed, and it is inferred that the excessive difference in the thermal expansion coefficient between the mirror glass and the connecting column head material causes excessive residual stress in the corresponding position of the correction surface after high-temperature curing. A numerical model is established to simulate the thermal stress of the joints, and it is used to select a stud material with a thermal expansion coefficient similar to that of mirror glass and an adhesive with a lower curing temperature to reduce the residual stress. The stigma material is replaced with 3Cr13, which has a thermal expansion coefficient that matches the glass material (K9). The experimental results show that the static surface shape of the phase corrector has been significantly improved after high-temperature curing, and the correction surface has not been damaged after multiple experiments.

**Key words** optical device; phase corrector; cementation heat stress; high temperature firming; mirror break

## 1 引言

相位校正器主要运用于自适应光学系统中<sup>[1-2]</sup>,在天文观测、高能激光系统等领域有着广泛应用<sup>[3-5]</sup>。镜面玻璃和驱动器阵列是相位校正器的核心结构,通过驱动器柱头的往返控制玻璃的镜面面形(校正面),以达到相位校正的目的。

粘接工艺具有轻质量、无附加应力、易于装配等优势,是目前镜面玻璃和柱头之间最常用的连接方

式<sup>[6-8]</sup>。校正面面形的高精度控制要求对粘接性能等提出了极高的要求(粘接强度大于 30 MPa、形变小于 0.5  $\mu\text{m}$ ),因此,粘接材料和粘接方法的选择至关重要。粘接工艺通常会为相位校正器校正面引入可观的非预期形变,直接影响其校正性能,严重时还可能导致校正面破损。这些现象通常与粘接后的残余应力有关。陈庆红等<sup>[9]</sup>基于有限元仿真深入研究了预应力对镜面机械性能的影响;刘红婕等<sup>[10]</sup>认为残余应力会严重影响熔融石英的反射面面形,带来损伤阈值下降等

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-02-22; 录用日期: 2022-03-17; 网络首发日期: 2022-03-28

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目(KJQN202100546)

通信作者: \*lufei04008@163.com

负面影响。因此,研究并分析应力的影响对于光学器件的研制是非常必要的。

关于相位校正器热应力的研究,关注点大多在镜面薄膜吸收带来的热应力上<sup>[11-13]</sup>,对于粘接过程产生应力的研究较少。李剑锋等<sup>[14]</sup>研究了望远镜主镜支撑中粘接连接的热应力的影响规律,并在几何因素、粘接层厚度等方面提出了优化建议;徐宏来等<sup>[15]</sup>针对变形镜粘接热应力问题,提出了针对镜面玻璃结构的优化设计方案。本文根据相位校正器研制过程中粘接固化后校正面剧烈变形甚至破损的现象,对粘接部位的热应力进行了有限元仿真,以寻找粘接工艺不良影响产生的原因;并从黏接剂的选择、粘接工艺参数等方面探寻减小残余应力的方法,以获得更理想的静态面形,最终提高相位校正器的性能和使用寿命。

## 2 相位校正器的粘接应力残余

相位校正器通过单个驱动器阵列的法向移动改变镜面玻璃的局部面形,多个驱动器构成的阵列作用在同一块镜面玻璃的不同位置,即可获得预期的校正面。因此,驱动器对镜面玻璃面形的精度控制有赖于驱动器柱头与镜面玻璃之间的牢固连接。考虑到单个驱动器的有限空间以及额外的装配结构可能带来的附加应力,相位校正器镜面玻璃与驱动器柱头之间通常以粘接方式进行连接。但实验中发现,粘接工艺后变形镜的校正性能非常不稳定,且经常出现镜面破损的情况,如图 1 所示。

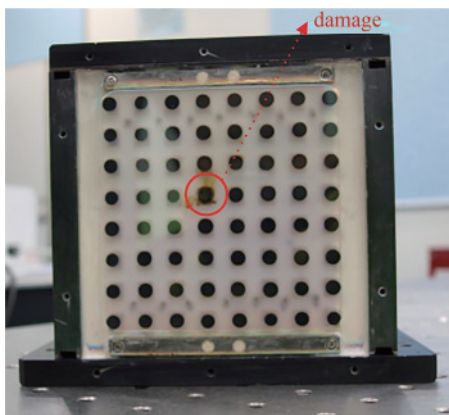


图 1 相位校正器的校正面破损

Fig. 1 Damage to the correction surface of the phase corrector

用哈特曼传感器对粘接工艺后镜面的静态面形进行了测试,结果如图 2 所示。可以发现,未加载任何电压时,虚线矩形区域内显示出明显的面形畸变,导致哈特曼传感器单元产生串扰,无法重构波前。检查发现,破损处正好是连接柱头与镜面粘接的区域,可推断出两者之间存在很大的应力。同时,镜面玻璃破损的位置大都位于驱动器柱头与镜面玻璃粘接区域的边缘地带,且破损发生在高温固化后。这表明高温固化过程产生了严重的残余应力。

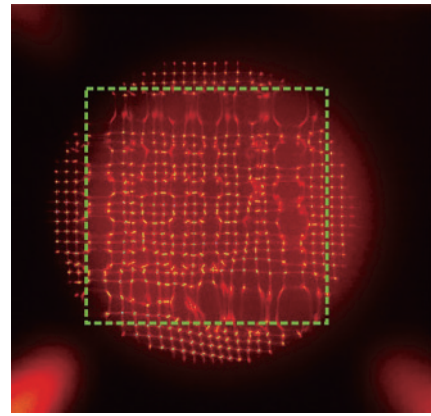


图 2 镜面面形的测试结果

Fig. 2 Test result of mirror surface shape

为了获得足够的粘接刚度、强度和耐用性能,黏接剂需在一定的温度下固化才能获得预期的粘接性能。材料具有热胀冷缩的特性,且不同材料的热膨胀系数差异通常较大,这会导致高温固化后回到工作温度的过程中,两个稳固连接的材料之间由于收缩特性不同会产生应力。这种残余的热应力很可能是校正面面形畸变甚至破裂的原因。

## 3 有限元仿真分析

相位校正器研制时使用的是一种高温固化胶,粘接后需要将粘接处在  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  下固化 5 h,然后自然冷却至室温(定为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。高温固化完成后,镜面与柱头稳固连接,冷却过程中由于材料的不同会发生非自然收缩。即柱头和玻璃的自然收缩量由于热膨胀系数不一致差异较大,但牢固的粘接迫使两者收缩量一致,从而产生应力。为验证自然冷却后残余热应力的影响,建立了仿真模型以计算粘接部位的残余应力。图 3(a)为相位校正器的仿真模型,图 3(b)为粘接位置。模型尺寸如表 1 所示,相关材料性能参数如表 2 所示。

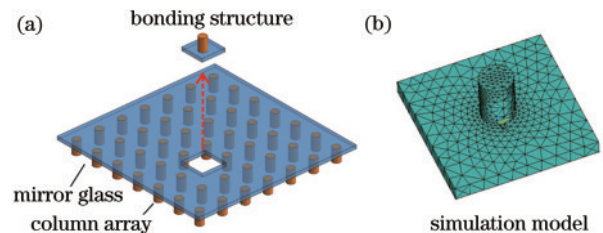


图 3 仿真模型。(a)相位校正器的结构;(b)粘接位置  
Fig. 3 Simulation model. (a) Structure of the phase corrector;  
(b) bonding position

表 1 仿真模型的尺寸

Table 1 Dimensions of the simulation model unit: mm

Mirror thickness	Diameter of connecting column head	Length of connecting column head
1.5	3.5	4

表 2 材料的性能参数  
Table 2 Performance parameters of materials

Material	Elastic modulus /GPa	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient /( $10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	Allowable stress /MPa	Density /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
Fused silica	72	0.17	5.6	70-120	2.19
K9	81.3	0.209	75	60-80	2.53
Beryllium Bronze	120	0.33	178		8.2
3Cr13	200	0.3	102		8.18

最初研制的相位校正器镜面材料为 K9, 连接柱头材料是铍青铜。通过有限元分析软件计算得到高温固化环节粘接部位从  $100\text{ }^\circ\text{C}$  冷却到室温  $25\text{ }^\circ\text{C}$  后的残余应力分布如图 4 所示。可以发现, 粘接结构中柱头处的应力最大, 为  $155\text{ MPa}$ 。

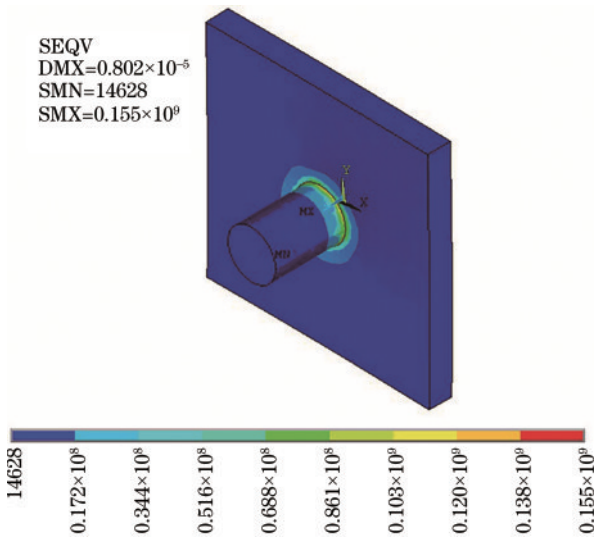


图 4 相位校正器的初始应力立体分布

Fig. 4 Initial stress stereo distribution of the phase corrector

相位校正器的镜面(粘接面所在平面)应力分布如图 5 所示。可以发现, 镜面上最大应力为  $64.5\text{ MPa}$ , 达到了 K9 材料的许用应力界限  $60\sim 80\text{ MPa}$ , 此时镜面极易损坏。这表明高温固化后自然冷却过程中所

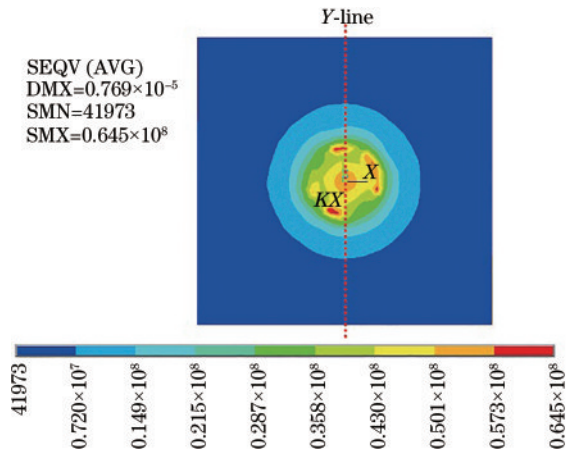


图 5 镜面的应力分布图

Fig. 5 Stress distribution diagram of mirror surface

产生的残余应力是校正面形畸变甚至破裂的主要原因。为解释镜面破损较常发生在粘接边缘处, 沿接触面中心线(Y-line)绘出应力路径分布图, 如图 6 所示。可以发现, 应力峰值恰好分布在连接柱头与镜面粘接的边缘处, 该实验结果与实验现象相吻合。

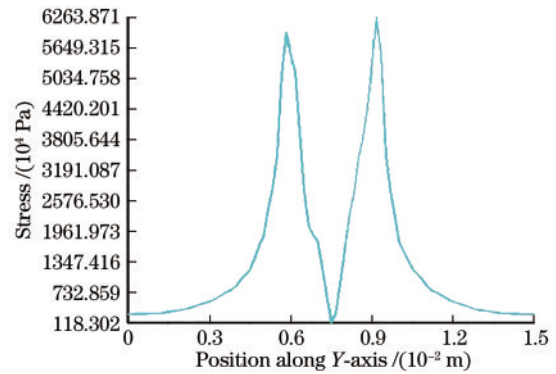


图 6 应力的路径分布图

Fig. 6 Path distribution diagram of stress

#### 4 改进方案及实验验证

为解决高温固化带来的残余应力问题, 用合金 3Cr13 作为柱头材料, 其热膨胀系数为  $1.02 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 与 K9 玻璃材料的热膨胀系数 ( $7.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) 更接近。通过有限元分析得到使用 3Cr13 合金时镜面的应力分布及沿接触面中心线应力路径分布如图 7 和图 8

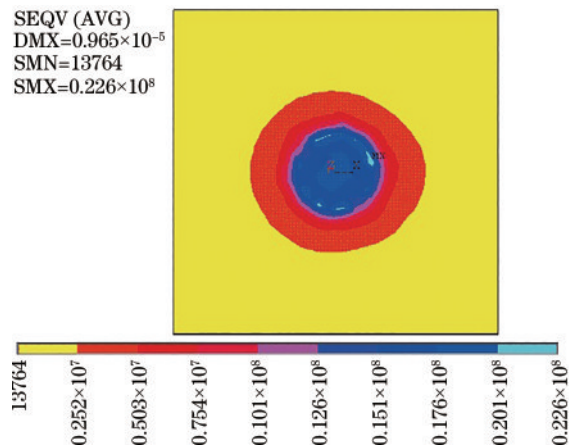


图 7 改进结构的镜面应力分布图

Fig. 7 Mirror stress distribution of the improved structure



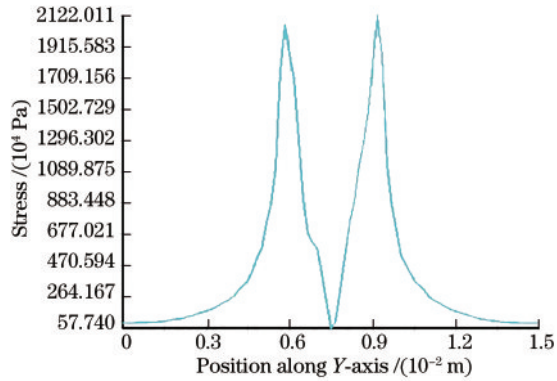


图 8 改进结构的应力路径分布图

Fig. 8 Stress path distribution diagram of the improved structure

所示。可以发现,使用 3Cr13 合金后,应力分布形态基本相同,但镜面上的最大应力下降到 2.6 MPa,相比更

换材料前减小了 96%,远小于许用应力界限 60~80 MPa。这表明用 3Cr13 作为柱头材料后,校正面形畸变甚至破裂的问题会得到明显缓解。

将柱头材料更换为 3Cr13 合金后,采用相同的工艺研制了新型相位校正器,改进后的器件没有出现校正面破损的情况,完成粘接流程后相位校正器的静态面形如图 9(a)所示。可以发现,改进工艺后光斑阵列的齐整性相比改进前有了明显提高,这表明面形畸变得以有效抑制。面形的改善使结构单元避免了串扰,重构后的波前如图 9(b)所示。二次加工后测得的光斑阵列分布均匀,表明整个面形非常平整,如图 10 所示。重构后的波前峰谷(PV)值仅  $1.76\lambda$ ,满足相位校正器的使用探测要求。因此,仿真和实验均证明了更换连接柱头材料是解决残余热应力问题的有效方法,也克服了粘接工艺易引起镜面破损的难题。

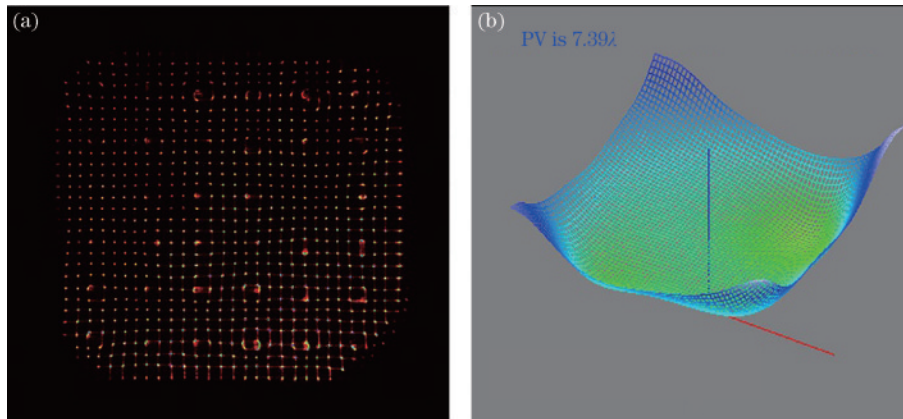


图 9 更换材料粘接后的面形测试图。(a)面形;(b)重构的波前

Fig. 9 Surface shape with new material. (a) Surface shape; (b) reconstructed wavefront

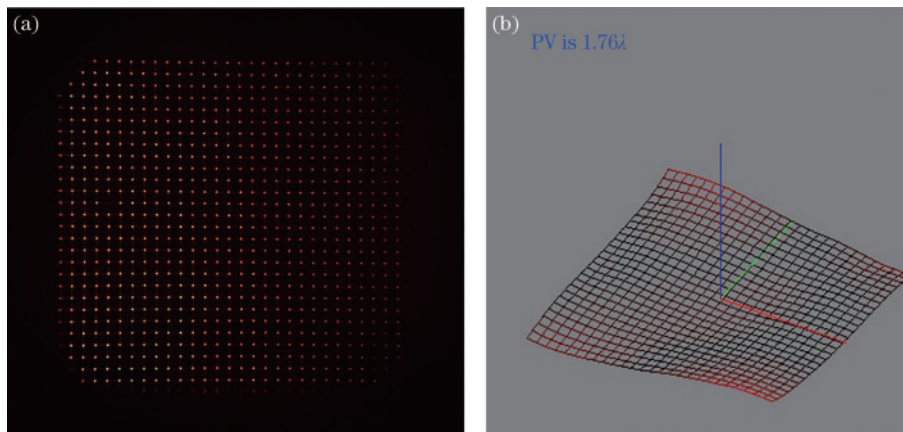


图 10 二次加工后的面形测试图。(a)面形;(b)重构的波前

Fig. 10 Surface shape after secondary treatment. (a) Surface shape; (b) reconstructed wavefront

## 5 残余应力的抑制方法

熔融石英是一种常用的玻璃材料,其透光性和机械强度均要优于 K9。相同条件下对 4 种镜面与柱头材料组合的最大残余应力进行了计算,结果如表 3 所示。可以发现,使用熔融石英材料时残余热应力更大,熔融石英

+3Cr13 组合的镜面最大热应力比 K9+3Cr13 组合增加 235%。原因是熔融石英的热膨胀系数比 K9 更小,与两种柱头材料的差异更大。将柱头材料更换为 3Cr13,得到了很好的残余应力抑制效果,原因是 3Cr13 的热膨胀系数与镜面玻璃更匹配。这表明选择热膨胀系数更匹配的镜面玻璃与柱头材料可以显著抑制热应力。

表 3 不同材料组合的最大残余热应力

Table 3 Maximum residual thermal stress of different material combinations

unit: MPa

Position	K9+3Cr13	K9+beryllium bronze	fused silica+3Cr13	fused silica+beryllium bronze
Mirror	20.5	64.5	68.7	102
Column head	56.8	155	193	248

除了更换热膨胀系数更匹配的镜面玻璃与柱头材料外,减小固化温度也可以减小残余热应力。这就需要在保证粘接强度的前提下,寻找固化温度更低的黏接剂,使其在固化后自然冷却时热膨胀系数差异导致的热应力减小。为界定某种胶的固化温度是否满足使用要求,设定安全应力警戒线为断裂应力下限的 70% (胶水指定的固化温度高于最高固化温度点,相位校正

器即有破裂的风险),计算不同组合的最高固化温度点,结果如表 4 所示。可以发现,不同组合的最高固化温度点差异很大,K9+3Cr13 组合比其他 3 种组合的最高固化温度高得多,使用固化温度高的胶水时最不容易破裂。如果使用最初的镜面材料 K9 及柱头材料铍青铜,选择的胶水的固化温度不应超过 74 °C。

表 4 不同材料组合对应的最高固化温度

Table 4 Maximum curing temperature corresponding to different material combinations

Parameter	K9+3Cr13	K9+beryllium bronze	fused silica+3Cr13	fused silica+beryllium bronze
Allowable stress of the mirror /MPa	60-80	60-80	70-120	70-120
Maximum safety stress /MPa	42	42	49	49
Maximum curing temperature /°C	178	74	78	63

综上所述,选取热膨胀系数相近的镜面玻璃材料和驱动器柱头材料、使用固化温度更低的黏接剂可以有效抑制残余热应力。镜面残余应力与固化温差之间呈现良好的线性关系。以 K9 和铍青铜材料组合为例,

工作温度设定为 25 °C,计算得到的镜面残余应力最大值与固化温差的关系如表 5 所示。可以发现,镜面残余应力与固化温差成正比例关系。

表 5 镜面残余应力与固化温差的关系

Table 5 Relationship between mirror residual stress and curing temperature difference

Parameter	Curing temperature is	Curing temperature is	Curing temperature is	Curing temperature is
	50 °C	75 °C	100 °C	125 °C
Temperature difference /°C	25	50	75	100
Maximum residual stress /MPa	21.5	43	64.5	85.9

## 6 结 论

通过有限元仿真分析,解释了相位校正器在粘接环节后校正面形严重畸变甚至破裂的原因,即高温固化后自然冷却过程中所产生的残余热应力。通过将柱头材料更换为热膨胀系数与镜面玻璃更接近的 3Cr13,大大减小了残余热应力。对常用镜面及柱头材料组合在相同工况下最大残余热应力和最高固化温度的计算结果表明,材料选择及固化温度对粘接效果有重要影响。选取热膨胀系数相近的镜面玻璃材料和驱动器柱头材料、使用固化温度更低的黏接剂可以有效克服相位校正器研制过程中的残余热应力难题。

### 参 考 文 献

- [1] Roddier F, Thompson L. Adaptive optics in astronomy [J]. Physics Today, 2000, 53(4): 69.
- [2] Vorontsov M A, Carhart G W, Cohen M, et al. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000, 17(8): 1440-1453.
- [3] Fugate R Q, Fried D L, Ameer G A, et al. Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser Guide-star[J]. Nature, 1991, 353(6340): 144-146.
- [4] Xu L, Wu Y C, Du Y L, et al. High brightness laser based on Yb:YAG MOPA chain and adaptive optics system at room temperature[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 14592-14600.
- [5] Wang K, Tu B, Jia C Y, et al. 7 kW direct-liquid-cooled side-pumped Nd:YAG multi-disk laser resonator[J]. Optics Express, 2016, 24(13): 15012-15020.
- [6] Kanno I, Kunisawa T, Suzuki T, et al. Development of deformable mirror composed of piezoelectric thin films for adaptive optics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(2): 155-161.
- [7] 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.

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.
- [8] 李国会, 卢飞, 徐宏来, 等. 主动冷却式一维变形镜技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602007.  
Li G H, Lu F, Xu H L, et al. Research on the one-dimension deformable mirror with active cooling system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0602007.
- [9] 陈庆红, 徐世珍, 黄进, 等. 预应力对熔石英损伤的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(10): 2531-2535.  
Chen Q H, Xu S Z, Huang J, et al. Effect of pre-stress on damage of fused silica[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2531-2535.
- [10] 刘红婕, 黄进, 王凤蕊, 等. 熔石英表面热致应力对激光损伤行为影响的研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(2): 1308-1313.  
Liu H J, Huang J, Wang F R, et al. Effect of thermal stresses on fused silica surface on the laser induced damage[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(2): 1308-1313.
- [11] 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.  
Hu X C, Peng J Q, Zhang B. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0102003.
- [12] 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.  
Hu X C, Wang D, Chen 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.
- [13] 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.  
Feng F, Wei B B, Liu W G, et al. Experimental study of impact of high power laser irradiation on compensation ability of deformable mirrors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 120101.
- [14] 李剑锋, 杨飞, 明名, 等. 望远镜主镜支撑中粘接连接的热应力研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(1): 13-17.  
Li J F, Yang F, Ming M, et al. Research on the thermal stress of bond connection used in telescope primary mirror support system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(1): 13-17.
- [15] 徐宏来, 向汝建, 卢飞, 等. 相位校正器粘接局部应力控制技术[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(7): 071002.  
Xu H L, Xiang R J, Lu F, et al. Control method of local cementation stress in phase-corrector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(7): 071002.