



## 大口径反射镜低应力夹持技术\*

郑胜亨<sup>1</sup>, 马文静<sup>1</sup>, 杨 英<sup>1</sup>, 曹庭分<sup>1</sup>, 陈晓娟<sup>2</sup>, 郭雨源<sup>1</sup>,  
廖予祯<sup>1</sup>, 张 鑫<sup>1</sup>, 韩 伟<sup>1</sup>, 邓学伟<sup>1</sup>, 胡东霞<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 高功率固体激光装置对大口径反射镜附加波前畸变和姿态稳定提出了苛刻的要求, 在确保姿态稳定性的同时, 要求低应力夹持使附加波前畸变峰谷值(PV 值)  $< \lambda/3$ , 波长  $\lambda=633$  nm。提出了一种正面三点支撑结合侧面八点限位的大口径反射镜夹持技术, 对该夹持结构下引起的附加波前畸变进行了仿真和实验研究, 并对反射镜姿态稳定性进行了不同工况下的实验模拟。结果表明, 该夹持方式引入的附加波前畸变 PV 值约为 23.6 nm, 振动、晃动、翻转不同工况下反射镜指向变化 PV 值小于 50  $\mu$ rad, 附加波前畸变和姿态稳定性均满足高功率激光装置的要求。

**关键词:** 高功率固体激光装置; 大口径反射镜; 低应力夹持; 波前畸变; 姿态稳定性

**中图分类号:** TH242

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11884/HPLPB202133.210176

## Low-stress mounting technology of large aperture mirror

Zheng Shengheng<sup>1</sup>, Ma Wenjing<sup>1</sup>, Yang Ying<sup>1</sup>, Cao Tingfen<sup>1</sup>, Chen Xiaojuan<sup>2</sup>, Guo Yuyuan<sup>1</sup>,  
Liao Yuzhen<sup>1</sup>, Zhang Xin<sup>1</sup>, Han Wei<sup>1</sup>, Deng Xuewei<sup>1</sup>, Hu Dongxia<sup>1</sup>

(1. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China;*

2. *Institute of Systems Engineering, CAEP, P. O. Box 919-408, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** The high-power solid-state laser facility puts forward stringent requirements for the additional wavefront distortion and attitude stability of the large-aperture mirror. While ensuring attitude stability, the peak-to-valley (PV) value of additional wavefront distortion caused by low-stress mounting is required to be less than  $\lambda/3$  (wavelength  $\lambda=633$  nm). In this paper, a mounting technology of large aperture mirror with three-point front support and eight point side fixing is proposed. The additional wavefront distortion caused by the mounting structure is simulated and experimentally studied. And the attitude stability of mirror under different working conditions is experimentally researched. The results show that the PV value of additional wavefront distortion introduced by this mounting method is about 23.6 nm, and the PV value of the mirror pointing under different conditions of vibration, shaking, and flipping is less than 50  $\mu$ rad. The additional wavefront distortion and attitude stability meet the requirements of high-power lasers.

**Key words:** high-power solid-state laser device; large-aperture mirror; low-stress mounting; wavefront distortion; attitude stability

在高功率固体激光装置中, 大口径反射镜是关键的光学器件, 其面型精度和姿态稳定性影响着光束的指向和定位精度, 对激光装置最终的性能有着直接影响<sup>[1-3]</sup>。国内外相关学者对大口径反射镜的支撑和夹持结构展开了深入研究, 目前大口径反射镜采用的支撑结构方式主要有: 背部支撑、周边支撑和侧面支撑<sup>[4-6]</sup>。

针对自身装置的特点和反射镜的使用方式, 美国国家点火装置(NIF)采用背部支撑的装配设计方式, 三个支撑点处安装有压电陶瓷驱动器<sup>[7-8]</sup>。这种支撑方式调节精度高, 通过压电陶瓷调节后镜面可以达到很高的面形精度(PV  $< \lambda/3$ , 波长  $\lambda=633$  nm), 其缺点是压电陶瓷价格昂贵, 成本较高, 且背部支撑的方式不能用于背部透光的反射镜<sup>[9-10]</sup>。法国兆焦耳(LMJ)激光装置采用了密封嵌入式支撑和弹簧夹持式支撑两种周边支撑方式, 使得反射镜的面型精度

\* 收稿日期: 2020-05-10; 修订日期: 2020-07-13

联系方式: 郑胜亨, zhenshenhen@126.com。

通信作者: 杨 英, whbms4353@163.com。

(PV 值)在  $0.5 \mu\text{m}$  之内<sup>[11]</sup>。这两种周边支撑方式分别通过薄硅胶垫和静态弹簧对反射镜镜面变形进行控制,可以极大程度上减小反射镜的面型变化,其弊端是反射镜的姿态难以保证,需要通过镜框上的机械结构对反射镜的姿态进行校正。

陈晓娟等人采用侧面支撑夹持结构对反射镜进行夹持<sup>[12]</sup>,这样的结构主要是依靠分布在镜框四周的 94 个胶钉向镜体施加预紧力进行夹持。多胶钉的布局可以均匀分散夹持应力,减小应力集中导致的附加面形畸变。但由于反射镜的面形精度要求很高,镜体的紧固力不能太大,同时为保障镜片的结构稳定,还需要可靠的预紧力,所以其预紧工艺需要非常精细的考虑以达到严苛的技术要求。同时由于该工艺下夹持力的分散性和单个螺钉夹持力的不确定性,会导致镜体夹持力诱导面形畸变和波前误差超差严重且难以调控<sup>[13]</sup>。本文提出了一种正面三点夹持结合侧面八点限位的大口径反射镜夹持结构并进行仿真分析,搭建了实验平台,对夹持面形和姿态稳定性开展了实验研究,结果表明,该夹持结构不仅可以实现低应力夹持,而且可以保证反射镜的姿态稳定性。

## 1 低应力夹持结构及仿真

由于激光装置要求镜片背部通光,因此侧面支撑是较合适的支撑方式。传统的侧面支撑在反射镜四周施加多个均匀的力同时实现反射镜的限位和夹持,通过将夹持力分散到各个夹持点,从而减小由于夹持力过于集中而导致的反射镜附加面形畸变。由于该夹持方式利用胶钉和反射镜之间的摩擦力进行夹持,当反射镜在运输过程中受到振动和冲击时,会产生微位移导致反射镜相对镜框的姿态发生变化,并且由于胶钉数量过多,很难确保各胶钉的装校状态一致,在反射镜的装校过程需要耗费大量的时间<sup>[14-15]</sup>。针对上述问题,本文设计了一种正面三点夹持结合侧边八点限位的夹持结构,如图 1 所示,红色实线箭头表示图中可见夹持点/限位点,虚线箭头表示图中不可见夹持点/限位点。采用正面少点夹持能够最大限度的减小因夹持导致的镜面变形,同时利用侧边限位点对反射镜进行限位,能够分担正面夹持点的受力,减小正面夹持点所受的摩擦力。

夹持结构中主要包含反射镜、镜框、压框、胶钉。反射镜和镜框的装配通过安装在镜框和压框上的胶钉来实现,在正面 3 个红点处用胶钉对反射镜进行夹持,用于保证反射镜的面形及结构稳定性;侧面 8 个胶钉(每面 2 个)用于固定反射镜在镜框内的位置,起限位作用。由于玻璃材料微观组织结构复杂,对应力和应变较为敏感,且表面受力易产生划痕或破裂。因此在装夹过程中必须尽量减少硬接触以降低接触应力,并要使其受力均匀,以避免应力集中。为此在螺钉与玻璃之间放置垫片,以避免金属和玻璃直接接触。传统的周边夹持中,垫片材料一般选用 2~3 mm 厚的聚四氟乙烯或硅橡胶材料。与之不同的是本方案采用少点夹持,由于镜子重力影响,每个垫片所受压力较大,这会导致垫片在姿态转换过程中会发生塑性形变甚至是损坏,从而使反射镜与镜框的相对位置发生改变。为了减小胶钉的形变量,改用厚度约为 0.2 mm 的胶片来替代厚度约为 2 mm 的胶头,同时用平面螺钉代替中空空的螺钉,如图 1 中放大图所示。

夹持结构的基本力学模型可简化为一个矩形弹性体,其正面受 3 个夹持力,侧面受 8 个支撑力。为了获得夹持结构的形变,利用 Ansys 软件搭建相应的模型对  $90^\circ$  和  $45^\circ$  安装角度下反射镜的面形进行了仿真,模型的载荷与边界条件见图 2,镜片面变形结果见图 3。其中反射镜尺寸为  $610 \text{ mm} \times 440 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$ ,材料为 K9,材料的弹性模量为 88 GPa,泊松比为 0.215,密度为  $2520 \text{ kg/m}^3$ ,胶钉预紧力为 333 N。

图 3(a) 和 (b) 分别是反射镜夹持结构在  $90^\circ$  和  $45^\circ$  放置状态下镜面法向的静态变形云图,可以看出,形变区域主要集中在正面夹持点附近,对反射镜整体面形影响较小。夹持结构设计关心的是镜片沿镜面法向的面变形,从结构静态变形计算中分离出在镜面法向面变形量,得

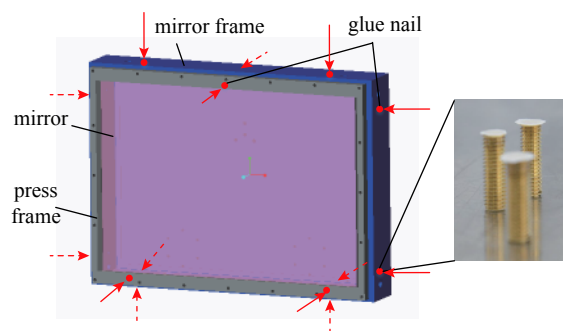


Fig. 1 Mounting structure of large-aperture mirror

图 1 大口径反射镜夹持结构

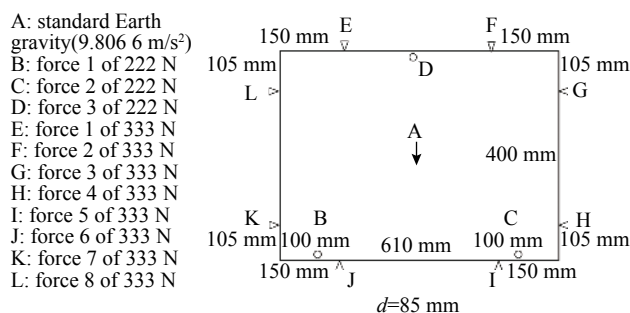


Fig. 2 Boundary condition of finite element simulation

图 2 有限元模拟的边界条件

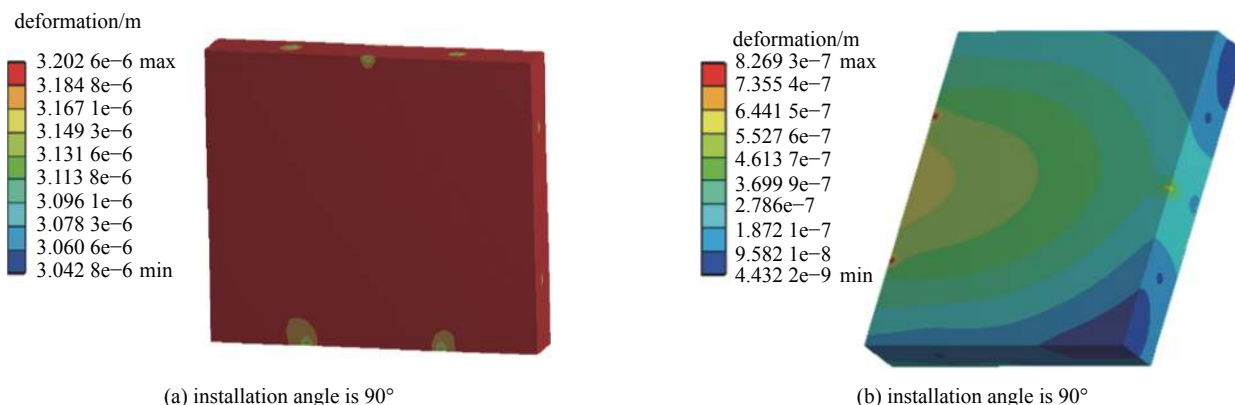


Fig. 3 Simulation results of mirror surface

图3 反射镜面形仿真结果

到镜片的由重力和夹持应力引起的最大面变形约分别为 159.8 nm(90 °)和 383.2 nm(45 °)。

## 2 反射镜夹持面形和姿态稳定性试验

### 2.1 试验对象

如图4所示,采用上述设计的夹持结构对反射镜进行装配并作为试验对象,图中红色圆点表示正面3个夹持点,红色箭头表示侧面8个支撑点。其中反射镜为610 mm×440 mm×85 mm的K9玻璃,镜框选用与镜片热膨胀系数接近的铝合金材料,正面夹持点预紧力为222 N,侧面限位点预紧力为333 N,预紧力通过精度为2%的数显扭力扳手施加。

### 2.2 试验方案

利用图5所示的大口径红外干涉仪检测平台对试验对象的附加面形进行试验。试验中分别测量了无任何夹持下的反射镜的面形(作为初始面形)以及反射镜夹持过程中不同状态下的面形,通过对比夹持后的反射镜面形和初始面形,可以得到夹持结构带来的附加面形畸变。

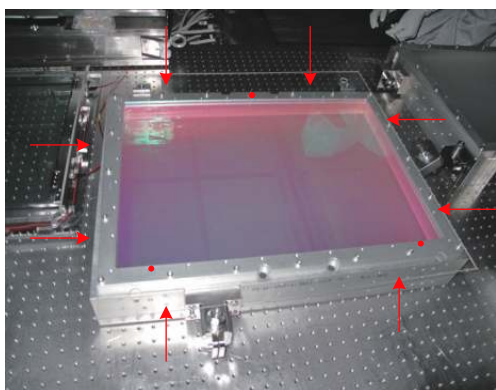


Fig. 4 Test object after assembly

图4 装配后的试验对象

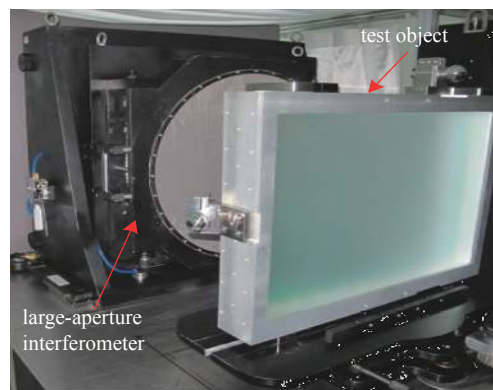


Fig. 5 Infrared interferometer testing platform

图5 红外干涉仪检测平台

同时,为了验证夹持结构的姿态稳定性,进行了反射镜夹持姿态稳定性试验。试验光路示意图如图6所示,基准镜通过连接件采用胶粘的方式与反射镜外框粘连,以确保试验过程中基准镜与反射镜外框的相对位置不会发生相对变化。试验时对反射镜整体进行晃动和振动,并进行长时间的姿态改变,在晃动和振动过程中,认为基准镜和反射镜外框的相对位置不发生变化,利用自准直仪测量传输反射镜与基准镜之间的夹角变化,以此反映传输反射镜对于夹持外框的姿态变化。

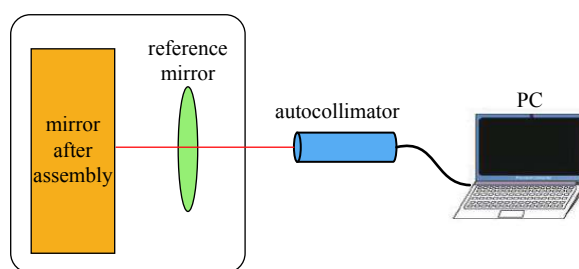


Fig. 6 Optical path of mounting attitude stability

图6 夹持姿态稳定性试验光路

试验分为四个步骤进行: 第一步, 在反射镜竖直静止状态下进行连续测试, 取测试平均值作为反射镜初始姿态; 第二步, 以 1 s 晃动 1 次的速度以及  $\pm 5^\circ$  的小角度快速晃动反射镜 3 次后进行测试, 模拟反射镜运输过程中经历的振动; 第三步, 以 10  $^\circ$ /s 的速度对反射镜进行  $\pm 90^\circ$  的大角度俯仰, 然后进行测试, 模拟反射镜转运过程中经历的搬运过程; 第四步, 以反射面朝上的姿态使反射镜平躺 48 h 后再重复进行上述步骤测试, 以验证夹持胶钉是否发生塑性形变。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 反射镜夹持面形试验结果

反射镜夹持面形试验结果如图 7 所示, 图 7(a)、图 7(b)、图 7(c) 分别为无夹持状态、正面三点夹持状态、正面三点夹持+侧边八点限位状态下的面形测试结果。可以看出, 夹持前后反射镜整体的面形分布没有发生明显变化, 仅在正面夹持点处发生了局部变形, 与仿真结果一致。

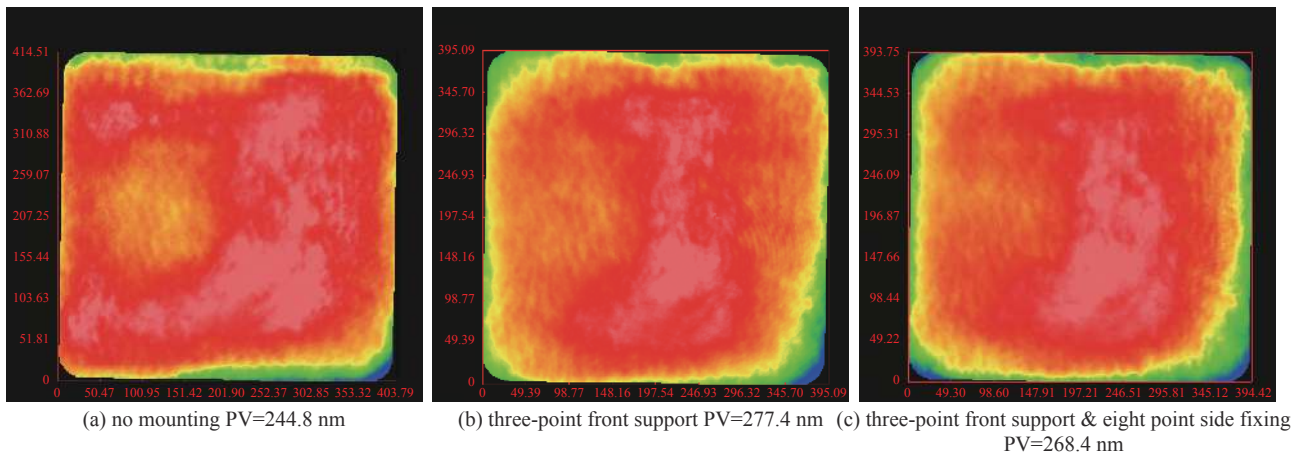


Fig. 7 Test result of mirror surface

图 7 反射镜面形测试结果

在无夹持情况下, 反射镜面型的 PV 值为 244.8 nm; 正面三点夹持状态下, 反射镜面型的 PV 值为 277.4 nm; 正面三点夹持+侧边八点限位状态下, 反射镜面型的 PV 值为 268.4 nm。对比初始状态和夹持后状态可以得到反射镜的附加面形畸变仅为 23.6 nm, 满足附加面形畸变小于  $\lambda/3$  的指标要求。

#### 3.2 反射镜姿态稳定性试验结果

反射镜姿态稳定性试验结果如图 8 所示, 图中(a)和(b)分别是反射镜指向角在 X 轴和 Y 轴方向的变化, (c) 是反射镜合成指向角的变化。图 8 中反射镜姿态稳定试验可分为四个阶段, 分别是静态(代表初始状态)、小角度快速晃动阶段、大角度俯仰阶段和长时间平躺后复测阶段。可以看出, 在四个阶段的反射镜姿态稳定性试验中, 反射镜指向角变化 PV 值小于  $6.5''$  ( $37.7 \mu\text{rad}$ ), 满足指向变化小于  $50 \mu\text{rad}$  的设计要求, 说明正面三点支撑和侧面八点限位的夹持结构能够保证反射镜的姿态稳定性。

振动和前后俯仰时(图 8 中②号虚线框和③号虚线框)反射镜指向变化 PV 值小于  $20 \mu\text{rad}$ , 说明夹持结构对反射镜实现了良好的限位, 能够确保反射镜在运输和搬运过程中保持姿态稳定性。在长时间平躺后(图 8 中④号虚线框), 反射镜指向发生了约  $37.7 \mu\text{rad}$  的变化, 但随后反射镜姿态向初始姿态变化, 可能是因为反射镜平躺时镜子重力使得胶钉表面的胶片发生了弹性变形, 当反射镜回正时, 随着胶片应力的释放使得镜子姿态逐步恢复到初始状态。

### 4 结 论

本文针对高功率固体激光装置对大口径反射镜面型精度和姿态稳定性的要求, 优化设计了一种大口径反射镜低应力夹持方式, 这种正面少点夹持结合侧边限位的夹持结构不仅提高了装校效率, 而且可以简化胶钉与反射镜的受力状态分析, 减少夹持过程中出现的不可控因素。同时正面少点夹持可以最大限度减小夹持对反射镜面形的影响, 再结合侧边限位的方式可以使得各个胶钉大部分是轴向受力, 避免因摩擦不够导致镜子姿态发生改变。并对该夹持方式开展了试验研究, 研究结果表明, 该夹持方式能够在确保反射镜面形精度(附加面形畸变仅为 23.6 nm)的同时保持姿态的稳定(指向变化小于  $50 \mu\text{rad}$ )。

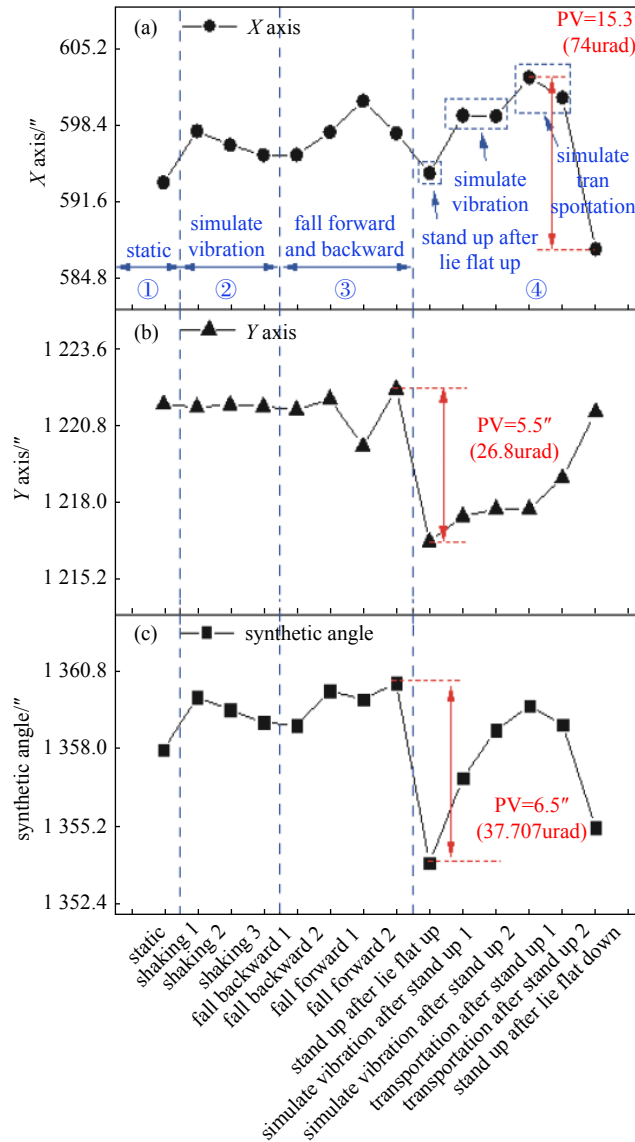


Fig. 8 Test result of mirror attitude stability

图 8 反射镜姿态稳定性试验结果

参考文献：

[1] Bowers M, Wisoff J, Herrmann M, et al. Status of NIF laser and high power laser research at LLNL[C]//Proceedings of SPIE. 2017: 1008403.

[2] 张小民, 魏晓峰. 中国新一代巨型高峰值功率激光装置发展回顾[J]. 中国激光, 2019, 46: 0100003. (Zhang Xiaomin, Wei Xiaofeng. Review of new generation of huge-scale high peak power laser facility in China[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46: 0100003)

[3] 朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制[J]. 中国激光, 2019, 46: 0100002. (Zhu Jianqiang, Chen Shaohe, Zheng Yuxia, et al. Review on development of Shenguang- II laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46: 0100002)

[4] 张军伟, 吴文龙, 傅学军, 等. 大口径反射镜低附加波前控制技术[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3193-3196. (Zhang Junwei, Wu Wenlong, Fu Xuejun, et al. Low addition wavefront control technology of large aperture mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3193-3196)

[5] 陈晓娟, 王美聪, 吴文凯, 等. 大口径反射镜波前畸变控制技术[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3325-3328. (Chen Xiaojuan, Wang Meicong, Wu Wenkai, et al. Wavefront distortion control for large aperture mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3325-3328)

[6] 沈展鹏, 陈晓娟, 陈学前, 等. 大口径反射镜结构的两种参数优化方法[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 062001. (Shen Zhanpeng, Chen Xiaojuan, Chen Xueqian, et al. Two parameter optimization methods for large aperture mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 062001)

[7] Atherton L J. Optics for the National Ignition Facility[J]. Australian & New Zealand Journal of Public Health, 1999, 21(6): 614-620.

[8] Hawleyfedder R A, Stolz C J, Menapace J A. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 102-105.

[9] 于霖晨, 袁健, 丛杉珊, 等. 背部支撑型空间反射镜镶嵌件粘接结构设计[J]. 光学学报, 2019, 39: 0523002. (Yu Jichen, Yuan Jian, Cong Shanshan, et al. Design of adhesive structure for back-supported space reflector inserts[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39: 0523002)

[10] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, et al. Large optics for the National Ignition Facility[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 295-351.

- [11] Noailles S, Hatheway A E, Bart T, et al. Mechanical support system of laser megajoule large-dimension optical components[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007: 66650Z.
- [12] 李桂华, 王辉, 熊召. 大口径传输反射镜在装配紧固力下的面形误差分析[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(9): 1173-1178. (Li Guihua, Wang Hui, Xiong Zhao, et al. Surface error analysis of large reflecting mirror under assembly fastening forces[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(9): 1173-1178)
- [13] 王辉, 黎沁, 熊召, 等. 高功率固体激光器的大口径反射镜装配误差分析[J]. *光学学报*, 2015, 35: 0922004. (Wang Hui, Li Qin, Xiong Zhao, et al. Assembly error analysis for large aperture transport mirror in high power solid-state laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35: 0922004)
- [14] 张政, 全旭松, 王辉, 等. 大口径激光传输反射镜低应力夹持工艺设计[J]. *光学学报*, 2017, 37: 0114002. (Zhang Zhen, Quan Xusong, Wang Hui, et al. Low-stress mounting configuration design for large aperture laser transmission mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37: 0114002)
- [15] Su R, Liu H, Liang Y, et al. Analysis of adjusting effects of mounting force on frequency conversion of mounted nonlinear optics[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(2): 283-90.