

大口径反射镜低应力夹持优化设计

马文静, 徐振源, 曹庭分, 张军伟*, 向勇, 陈良明, 郑胜亨

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 为了同时满足激光装置对大口径反射镜面形精度和结构稳定性的控制要求,提出了一种反射镜多自由度解耦的多点夹持方式,通过限位实现对反射镜多自由度的控制,以此避免由夹持带来的附加面形。采用有限元法分析了所提方式的有效性,并通过实验验证了分析方法及该夹持方式的可行性,结果表明采用该反射镜夹持方式带来的附加面形较小,满足反射镜低应力附加夹持面形的要求。在此基础上,对 45° 倾斜放置的反射镜的面形进行了模拟,探究了不同夹持点位置分布对反射镜面形精度的影响规律,模拟结果表明:为了保证反射镜的面形精度,至少要有一个夹持点位于反射镜的长边。该研究成果对大口径反射镜夹持设计具有重要的指导意义。

关键词 光学设计; 大口径反射镜; 低应力夹持; 面形精度; 有限元模拟

中图分类号 TH242

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1105004

Optimal Design of Low-Stress Mounting for Large Aperture Mirror

Ma Wenjing, Xu Zhenyuan, Cao Tingfen, Zhang Junwei*, Xiang Yong,

Chen Liangming, Zheng Shengheng

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract In order to meet the control requirements of the surface accuracy and structural stability of large aperture mirrors for laser devices, a multi-point mounting method with decoupling of multiple degrees of freedom of the mirror is proposed. The control of multiple degrees of freedom of mirror is realized by limiting position to avoid the additional surface shape caused by mounting. The effectiveness of the proposed method has been analyzed by finite element method, and the feasibility of the analysis method and the mounting method has been verified through experiments. The results show that the additional surface shape brought by the mounting method of the mirror is small, which meets the requirement of the low-stress additional mounting surface of the mirror. On the basis, the surface shape of the mirror placed at a tilt angle of 45° is simulated, and the influences of the position distributions of different mounting points on the surface accuracy of the mirror are explored. Simulation results show that in order to ensure the surface accuracy of the mirror, at least one mounting point should be located on the longer side of the mirror. These results have important guiding significance for the mounting design of large aperture mirrors.

Key words optical design; large aperture mirror; low-stress mounting; surface accuracy; finite element method

OCIS codes 220.4880; 140.3460; 230.4040

1 引 言

大口径反射镜作为高功率固体激光装置的重要组成部分,其面形精度对激光的光束质量有着不可忽视的影响^[1-3]。若反射镜镜面发生变形,那么到达镜面不同点光束的光程就会发生变化,导致光束产生波前畸变,严重影响激光的光束质量。为了保证反射镜的面形精度,必须采用合适的夹持方式对反

射镜进行固定。不合理的夹持结构会使光机结构的连接强度不够强,对其稳定性造成影响,严重降低激光装置的打靶精度。因此,大口径反射镜的夹持设计一方面应将反射镜稳定固定在镜框内,另一方面还应尽量减小反射镜的夹持应力,使反射镜的面形畸变控制在要求的范围内^[4]。

目前,大口径反射镜常见的夹持方式有背部支撑、周圈夹持及侧面夹持等。背部支撑是通过背部

收稿日期: 2020-05-22; 修回日期: 2020-06-27; 录用日期: 2020-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(U183020005)

* E-mail: zhangjunwei @caep.cn

支撑点实现对反射镜的支撑,其中支撑点的数量及位置分布根据反射镜的尺寸和形状确定。采用背部支撑带来的反射镜附加面形畸变较小,且结构较为稳定,但背部支撑需要在反射镜背部打孔,这增加了反射镜的加工难度,同时背部支撑点处会形成较大的应力梯度,从而对光束质量产生一定的影响,且背部支撑的适用范围具有一定的局限性,不能用于要求背部透光的反射镜^[5-6]。周圈夹持是利用多个胶钉对反射镜的4个侧面进行夹持,通过多点夹持的方式减小局部点位的应力。对该夹持方式而言,随着夹持胶钉数量的增加,由夹持引入的反射镜附加面形畸变逐渐减小,但反射镜装校的工作量也随之增大^[7]。同时由于螺钉的几何误差、摩擦因数、润滑条件以及拧紧速度等多种因素的耦合作用,螺钉的预紧力难以被控制,反射镜面形的严重畸变现象出现的概率很高。另外周圈夹持属于摩擦夹持,由于摩擦的非线性,周圈夹持的反射镜在运输过程中因冲击造成的位置变化不能恢复,这影响了反射镜在线安装的精度。

在高功率固体激光装置的建设过程中,常采用变形镜对光束的波前进行控制,以降低装置对光路中光学元件的低频面形的要求^[8],即由重力带来的反射镜的低频面形可以通过变形镜进行校正,因此反射镜夹持设计需要严格控制由夹持带来的高频面形。针对这一特点,本文对现有反射镜的夹持结构进行了优化设计,提出了一种反射镜多自由度解耦的多点夹持方式,并建立了该夹持方式下反射镜面形精度的有限元模拟模型,在通过实验验证模型有效性及夹持方式可行性的基础上,利用该模型对45°倾斜放置的反射镜面形进行了模拟,探究了不同夹持点位置分布对反射镜面形精度的影响规律。

2 反射镜夹持结构优化设计

周圈夹持主要是靠侧面胶钉的正压力来保证反射镜的面形精度,并利用胶钉与反射镜间的摩擦力来控制反射镜的结构稳定性。但胶钉正压力与摩擦力之间存在正比关系,也就是说,若要保证反射镜的面形精度,需尽可能减小正压力的值,但摩擦力也会随之减小,导致光机结构的连接强度不够强,反射镜的结构稳定性较差^[9-10]。因此为了实现反射镜面形精度与结构稳定性的解耦,需要将胶钉的夹持力与摩擦力解离开,将侧面胶钉的夹持力变为多自由度限位,并施加胶钉的正面夹持力。

为了能更均匀地分配反射镜的重力、减小各夹

持点之间镜面的重力变形,反射镜夹持点的数量应尽可能多。但夹持点数量的增加也会引起一些附加问题,如:当夹持点超过3个时,夹持结构的加工误差或预紧力大小的差异会使反射镜的各个夹持位置不在同一个平面内,导致反射镜过定位,这严重影响反射镜的面形精度;夹持点数量的增加还会导致反射镜装校困难,降低反射镜的装校效率。

通过上述分析,本文提出了一种正面三点夹持、侧面八点支撑的反射镜夹持结构,其中:正面胶钉对反射镜起夹持作用,用于保证反射镜的面形精度及结构稳定性;侧面胶钉均位于镜框侧面的中线上,用于固定反射镜在镜框内的位置,即起限位作用。反射镜夹持结构如图1所示,主要包括反射镜、镜框、压板、胶钉等。为了减小热应力对反射镜面形的影响,镜框和压板均选用了与反射镜热膨胀系数接近的铝合金材料。反射镜和镜框之间的装配通过安装在镜框和压板上的胶钉来实现,其中胶钉结构如图1右侧放大图所示,由直径为6 mm的普通螺钉改造而成,在该结构前端嵌入厚度为2 mm的聚四氟乙烯薄片,以避免金属与反射镜间的直接接触产生的摩擦力。装配时选用精度高的扭力工具将胶钉拧入以夹紧镜片,并保证镜片的低应力。

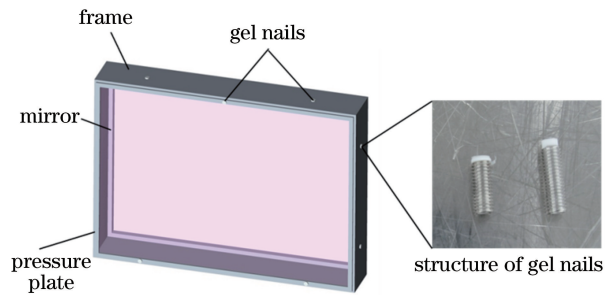


图1 反射镜正面夹持结构

Fig. 1 Front mounting structure of mirror

反射镜的受力情况如图2所示,其基本的力学模型可以简化为一个矩形弹性体,反射镜正面三点

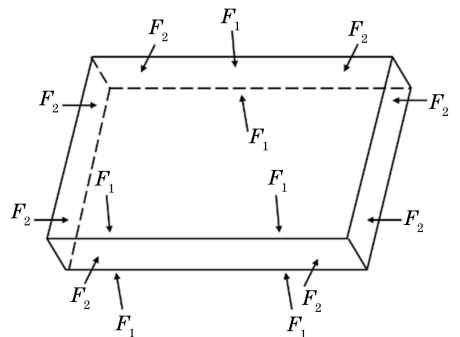


图2 反射镜单元的力学模型

Fig. 2 Mechanics model of mirror unit

受夹持力 F_1 的作用,侧面八点受支撑力 F_2 的作用。由于反射镜与胶钉之间并非直接接触,而是靠摩擦系数很小的聚四氟乙烯垫片连接,因此胶钉仅带来夹持力,而不产生摩擦力。

3 反射镜面形精度的有限元模拟及实验验证

当反射镜处于水平位置和倾斜位置时,其镜面重力变形是非常明显的,因此为了能够更真实地反映夹持力对反射镜面形精度的影响,同时也为了便于进行实验测试,本节将首先建立竖直放置条件下反射镜面形精度的有限元模型,并进行实验验证,通过对夹持前、后反射镜的附加面形畸变分析所设计夹持结构的合理性及可行性。

3.1 有限元模型的建立

本节利用 ANSYS 有限元软件建立了反射镜的面形精度分析模型^[11]。其中反射镜模型的尺寸为 610 mm×440 mm×85 mm,同时为了真实反映反射镜的变形情况,采用与实际情况相同的材料进行模拟,材料参数如表 1 所示。

表 1 模拟材料参数

Table 1 Simulated material parameters

Material	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Elastic	Poisson's ratio ν
		modulus E / MPa	
K9	2500	82×10^3	0.21
Aluminum	2770	71×10^3	0.33
Polytetrafluoroethylene	2200	1.42×10^3	0.40

按反射镜所受的约束关系添加外部约束。首先,施加的载荷为反射镜自身的重力及胶钉作用在反射镜上的正压力(图 3),其中重力作用表征为镜体内任一点承受的均匀体积力,胶钉的正压力表征为作用在反射镜与胶钉接触位置上的均匀分布的压力。另外,实际工作时反射镜镜框底面与基础钢架连接在一起,因此在镜框底面胶钉处施加固定约束。

- A: standard earth gravity: $9.8066 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
- B: fixed support
- C: force of 333 N
- D: force 2 of 333 N
- E: force 3 of 333 N
- F: force 4 of 333 N
- G: force 5 of 333 N
- H: force 6 of 333 N
- I: force 7 of 333 N
- J: force 8 of 333 N

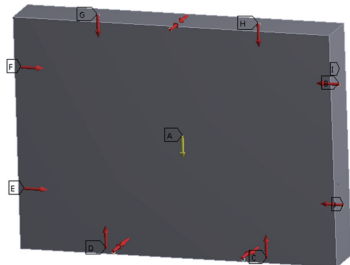


图 3 有限元模拟的边界条件

Fig. 3 Boundary condition of finite element simulation

值得注意的是,在实际装配过程中,通常选用扭力工具将胶钉拧入镜框中,因此需要将扭矩转换为预紧力:

$$F = \frac{T}{k \cdot d}, \quad (1)$$

式中: F 为螺栓预紧力; T 为螺栓扭矩; k 为扭矩系数,本文取 $k=0.3$; d 为螺栓公称直径。在有限元模拟时,所施加的正面螺栓预紧力 $F_1=222 \text{ N}$,侧面螺栓预紧力 $F_2=333 \text{ N}$ 。

3.2 反射镜镜面的波面拟合

有限元模拟得到的反射镜整体变形体现了其波前像差,包括平移量、倾斜量、离焦、像散等。然而在波前像差中,平移量和倾斜量是刚性位移,需要从面形数据中分离出来,通过校准工序对面形数据进行补偿,才能得到反射镜法线方向上的真实峰谷(PV)值^[12]。波面拟合就是一种有效的补偿方法。该方法通常选择一个线性无关的基底函数 $Z(x, y)$ 对由有限元分析得到的反射镜面形变化的离散节点数据进行拟合,用连续的函数 $w(x, y)$ 表示被测元件的面形,从而计算出反射镜表面变形的最大值与最小值之差(PV 值)。

传统的波面拟合方法包括最小二乘法、协方差法、Gram-Schmidt 法及 Zernike 多项式拟合法等^[13],其中 Zernike 多项式中各系数相互独立,可消除偶然因素的干扰,且可有选择地单独处理各像差系数、优化系统性能,是较为理想的波面拟合方法。因此本文采用 Zernike 多项式拟合法来进行大口径反射镜的波面拟合,其表达式为

$$w(x, y) = q_1 Z_1(x, y) + q_2 Z_2(x, y) + \dots + q_n Z_n(x, y), \quad (2)$$

式中: q_1, q_2, \dots, q_n 为 Zernike 多项式系数; $Z_1(x, y), Z_2(x, y), \dots, Z_n(x, y)$ 为 n 项 Zernike 多项式。

以 $Z_1(x, y), Z_2(x, y), \dots, Z_6(x, y)$ 为基底拟合波面,拟合公式为

$$w(x, y) = q_1 + q_2 \cdot 2x + q_3 \cdot 2y + q_4 \cdot \sqrt{3}(2x^2 + 2y^2 - 1) + q_5 \cdot 2\sqrt{6}xy + q_6 \cdot \sqrt{6}(x^2 - y^2). \quad (3)$$

将变形后的节点坐标代入(3)式,再利用最小二乘法求得参量 q_1, q_2, \dots, q_n ,即可得到拟合的波面及面形的 PV 值^[14]。

3.3 模拟结果分析与实验验证

利用 ANSYS 有限元软件对竖直放置状态下的反射镜进行面形精度模拟,其结果如图 4 所示。通过反射镜的变形云图可以看出,正面夹持点处的变

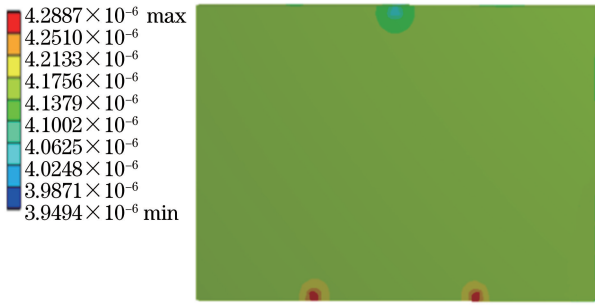


图 4 有限元仿真的反射镜变形分布云图

Fig. 4 Simulated surface deformation contour of mirror

形较大,这表明胶钉夹持力的作用会使反射镜会出现应力集中,但影响区域较小,对整体的变形分布影

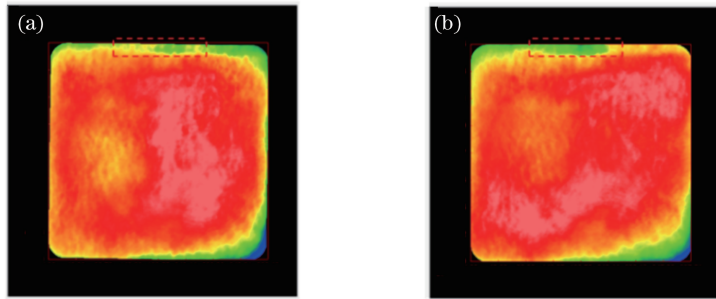


图 5 反射镜面形测试云图。(a)无夹持;(b)正面三点夹持+侧面八点支撑

Fig. 5 Surface deformation contours of mirror obtained by test. (a) No-mounting; (b) three-point mounting at the front and eight-point mounting on the side

为了避免单块反射镜测试带来的结果的偶然性,本节共进行了 4 块反射镜面形的测试,其结果如图 6 所示。可以看出,夹持后反射镜的面形 PV 值会有所增大。对测试结果取平均值,可得无夹持状态和正面三点夹持、侧面八点支撑方式下的反射镜面形 PV 值分别为 220.1 nm 和 243.4 nm,反射镜的附加面形畸变为 23.3 nm。这可能是由于干涉仪的测量误差或反射镜的状态变化等因素带来的重复性精度误差导致的。整体上,该夹持方式带来的附加面形畸变很小,满足附加面形畸变小于 $\lambda/3$ 的指标要求,且远小于现有大口径反射镜夹持方式带来的

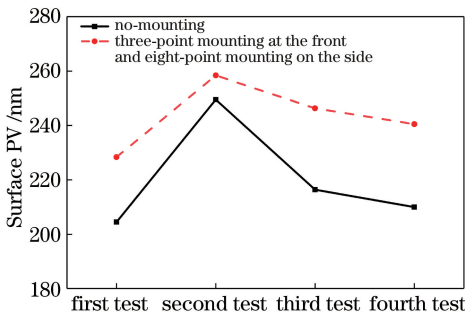


图 6 反射镜面形测试实验结果

Fig. 6 Experimental measurement results of mirror surface

响不大,反射镜中心区域的附加面形畸变基本为 0。

为了验证上述有限元模型的可靠性,本节还利用红外干涉仪检测平台对三点夹持的反射镜面形,如图 5(a)所示,然后测量了正面三点夹持和侧面八点支撑方式下的反射镜面形,如图 5(b)所示,其中正面胶钉夹持扭矩为 40 cN·m,侧面胶钉夹持扭矩为 60 cN·m。可以看出,夹持前后反射镜的整体面形分布并没有明显的变化,仅正面夹持点位置附近的变形有所增加,这说明夹持点位置处会出现应力集中,实验测试结果与模拟结果相符。

附加面形畸变,即文献[6]中提到的周圈夹持方式下的反射镜附加面形畸变为 150 nm,反射镜的面形精度得到了较大程度的优化,这证明了该夹持结构的可行性。同时考虑到实验误差的存在,认为实验结果与模拟结果基本一致,这表明所建立的有限元模型具有一定的可靠性。

4 反射镜面形精度的影响因素研究

高功率固体激光装置中存在着大量 45°倾斜放置的大口径反射镜。在此状态下,重力作用带来的反射镜附加变形是不可忽视的,因此必须对该状态下的反射镜面形进行测试。然而,受实验条件的限制,无法直接测量出 45°倾斜放置的反射镜的面形精度,故可以利用上一节构建的有限元模型进行模拟,从而对影响反射镜面形精度的因素进行探究。

为了能更均匀地分配反射镜的重力、减小各夹持点之间镜面的重力变形,需对夹持点的位置分布进行合理设计^[15]。本节共设计了 4 组反射镜夹持方案,以探究夹持点位置分布对反射镜面形精度的影响规律。不同夹持点的位置分布及面形拟合结果如表 2 所示,变形分布云图如图 7 所示。

表 2 不同夹持点位置分布的模拟结果

Table 2 Simulation results for different positons of mounting points

Scheme No.	Mounting pattern at the front	Surface PV /nm
1	Three-point mounting on longer side	246.99
2	Three-point mounting on shorter side	293.88
3	One-point mounting on longer side and two-point mounting on shorter side	284.15
4	One-point mounting on shorter side and two-point mounting on longer side	291.74

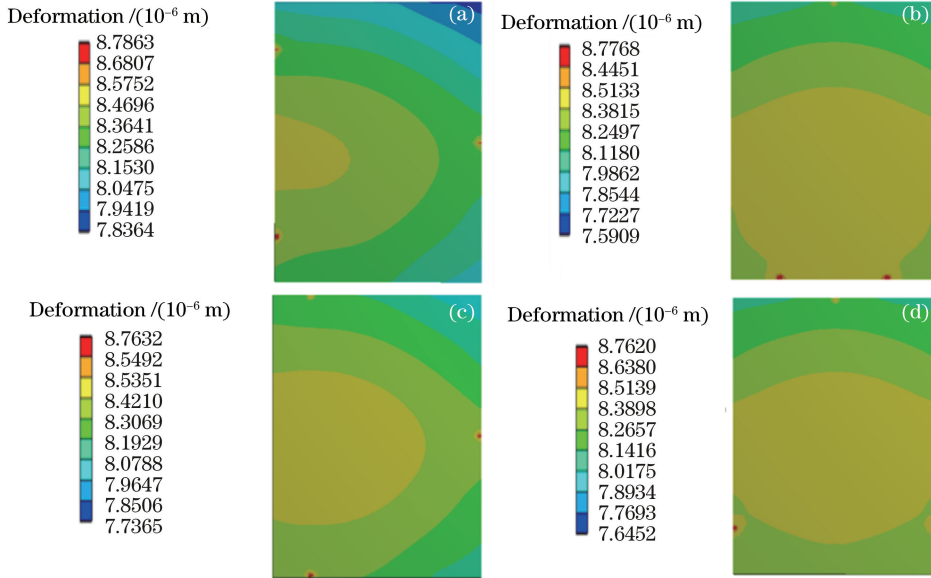


图 7 不同夹持点位置分布的反射镜变形云图。(a)面形畸变 1;(b)面形畸变 2;(c)面形畸变 3;(d)面形畸变 4

Fig. 7 Surface deformation contours of mirror for different positons of mounting points. (a) Surface deformation 1; (b) surface deformation 2; (c) surface deformation 3; (d) surface deformation 4

通过反射镜波面拟合计算可得,长边夹持的面形畸变要明显小于短边夹持,且长边正面三点夹持的面形畸变最小。这是因为长边跨度较大,在重力的作用下易发生弯曲,产生较大形变。因此为了保证反射镜的面形精度,至少要有一个夹持点位于反射镜的长边。

为了进一步探究夹持点位置分布对反射镜面形的影响,本节还模拟了方案 1 中不同夹持点间距下的面形 PV 值的变化情况。保持单点夹持的位置始终处于长边的中心,改变另一侧两夹持点的间距,得到的模拟结果如图 8 所示。可以看出,随着两夹持点间距的增加,反射镜的面形 PV 值先减小、后增大,当间距为 260 mm 时,面形 PV 值为最小值 241.30 nm,且反射镜中心区域变形较为均匀。当两夹持点间距过小时,反射镜的边缘处会出现较大的变形,而当间距过大时,反射镜整体没有出现较大畸变,但中心区域变形梯度较大。因此,夹持点应尽可能均布设在反射镜的边缘,即单点夹持的一侧夹持点应位于反射镜的边缘中心,两点夹持的一侧夹持点的间距应为反射镜边长的 1/3~2/3。

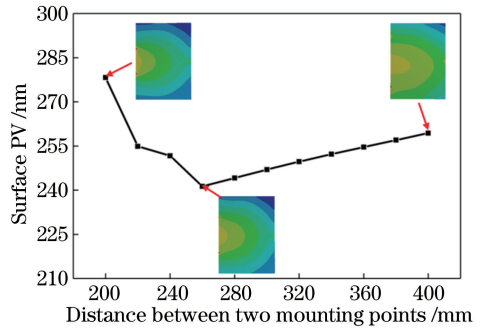


图 8 不同夹持点间距的面形 PV 值

Fig. 8 Simulation results of the mirror surface with different distance between mounting points

5 结 论

通过对现有的反射镜夹持方式进行优化设计,提出了一种反射镜多自由度解耦的多点夹持方式,通过限位实现对反射镜多自由度的控制,以避免由夹持带来的附加面形。利用 ANSYS 有限元软件建立了该夹持方式下的反射镜面形分析模型,并通过实验验证了分析方法及该夹持方式的可行性。结果表明:采用所提方式进行反射镜夹持带来的附加面

形畸变较小,除夹持点处会产生较大变形外,反射镜中心区域的附加面形畸变基本为0,满足反射镜低应力附加夹持面形的要求。对45°倾斜放置的反射镜面形进行了模拟,探究了不同夹持点位置分布对反射镜面形精度的影响规律。模拟结果表明:为了保证反射镜的面形精度,至少要有一个夹持点位于反射镜的长边,且夹持点应尽可能均布设在反射镜的边缘。

参 考 文 献

- [1] Zhang X M, Wei X F. Review of new generation of huge-scale high peak power laser facility in China[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100003.
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(1):0100003.
- [2] Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, et al. Review on development of Shenguang-II laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002.
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(1):0100002.
- [3] Bowers M, Wisoff J, Herrmann M, et al. Status of NIF laser and high power laser research at LLNL[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1008: 1008403.
- [4] Li G H, Wang H, Xiong Z, et al. Surface error analysis of large reflecting mirror under assembly fastening forces [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(9): 1173-1178.
李桂华,王辉,熊召,等.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.
- [5] 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.
- [6] Yu J C, Yuan J, Cong S S, et al. Design of adhesive structure for back-supported space reflector inserts [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0523002.
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(5):0523002.
- [7] Chen X J, Wang M C, Wu W K, et al. Wavefront distortion control for large aperture mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3325-3328.
- [8] Luo S, Wang J Q, Zhang B. Influence of fatigue characteristics of piezoelectric ceramics actuators on correction ability of deformable mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0905002.
罗帅,王家秋,张彬.压电陶瓷驱动器疲劳特性对变形镜校正能力的影响[J].中国激光,2018,45(9):0905002.
- [9] Zhang Z, Quan X S, Wang H, et al. Low-stress mounting configuration design for large aperture laser transmission mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0114002.
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(1):0114002.
- [10] Su R F, Liu H T, Liang Y C, et al. Analysis of adjusting effects of mounting force on frequency conversion of mounted nonlinear optics [J]. Applied Optics, 2014, 53(2): 283-290.
- [11] Bathe K J, Ramm E, Wilson E L. Finite element formulations for large deformation dynamic analysis [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1975, 9(2): 353-386.
- [12] Spaeth M L, Manes K R, Wismayer C C, et al. The national ignition facility wavefront requirements and optical architecture [J]. Optical Engineering, 2004, 43(12): 2854-2865.
- [13] Wu L, Chen N N, Fan Y, et al. Surface reconstruction of large aperture plane optical components based on method of relative angle difference [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0623002.
巫玲,陈念年,范勇,等.相对角差法重建大口径平面光学元件面形[J].光学学报,2019,39(6):0623002.
- [14] Feng J, Bai Y, Xing T W. Fitting accuracy of wavefront using Zernike polynomials [J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(2): 31-34.
冯婕,白瑜,邢廷文. Zernike 多项式波面拟合精度研究[J].光电技术应用,2011,26(2):31-34.
- [15] Luc A. Optimized axial support topologies for thin telescope mirrors [J]. Optical Engineering, 1995, 34(2): 567-574.