

大口径激光传输反射镜低应力夹持工艺设计

张 政¹, 全旭松², 王 辉¹, 姚 超¹, 融亦鸣¹

¹清华大学机械工程系, 北京 100084;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 从惯性约束核聚变(ICF)装置中具有重要作用的大口径激光传输反射镜出发,基于中国神光-III 主机装置的工程实践,分析了大口径激光传输反射镜夹持工艺的技术现状和难点,建立了大口径反射镜受夹持力变形的通用力学模型,提出了基于挠性零件的全新低应力夹持工艺,并利用有限元仿真和现场实验相结合的方法对挠性零件的力学特性进行了工艺效果验证。基于挠性零件的特点设计了新的全口径反射镜组件,对比研究了新旧工艺下夹持力对面形畸变(波前误差)的影响。最后,结合全新反射镜组件和夹持诱导畸变数值解耦方法构建了更加高效的完整装配工艺流程。该研究对解决大口径光学元件夹持诱导变形这一难题具有重要意义,有望为建设下一代 ICF 装置提供更加高效、可靠的技术方案。

关键词 激光器; 低应力夹持; 波前误差; 高功率固体激光器; 大口径反射镜

中图分类号 TH161; TN242 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0114002

Low-Stress Mounting Configuration Design for Large Aperture Laser Transmission Mirror

Zhang Zheng¹, Quan Xusong², Wang Hui¹, Yao Chao¹, Rong Yiming¹

¹Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The large aperture laser transmission mirror is a crucial optical unit of the high power solid-state laser in the inertial confinement fusion (ICF) facility. Based on the engineering practice of the SG-III facility, the technology status and key problems of the low-stress mounting configuration for the mirror are summarized firstly. Then, a general mechanical model of the deformed mirror is built with the elastic mechanics theory. Furthermore, a brand new low-stress mounting configuration with flexure support is proposed and the mechanical properties of the flexure support are verified with the finite element method and field experiments. The new integrated mirror assembly is designed and the influence of mounting force on surface deformation under the current and the new technologies is studied by comparison. Finally, with combination of the new mounting configuration and the numerical decoupling method of stress-induced deformation, a promising process flow is discussed. The study is of great significance for solving the mounting-induced deformation of the large aperture optical devices, and is expected to provide effective and reliable technical schemes for constructing ICF facility of the next generation.

Key words lasers; low-stress mounting; wavefront error; high power solid laser; large aperture mirror

OCIS codes 140.3460; 230.4040; 220.4880

1 引 言

核聚变被誉为地球能量的终极来源。从 20 世纪 60 年代开始,美、法、俄、中等国纷纷开始了惯性约束核

收稿日期: 2016-08-15; **收到修改稿日期:** 2016-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(51575310)、北京市自然科学基金(3162014)

作者简介: 张 政(1993—),男,博士研究生,主要从事精密制造与装配、光学系统误差建模分析方面的研究。

E-mail: zcnjn@163.com

导师简介: 王 辉(1977—),男,博士,副研究员,主要从事精密制造与装配、误差形成机理与优化方面的研究。

E-mail: wanghuisx@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

聚变(ICF)装置的研究和建设。以中国第三代聚变装置神光-III为例^[1],为了在实验室内创造发生聚变所需的极端高温高压环境,需要48束高能固体激光经过长达86 m的光路之后精准地射向直径仅为2 mm的氘氚靶丸上,每束激光到达靶心的时间偏差小于60 ps,打靶误差不能超过30 μm 。如此高的精度要求要靠每条光路中上千块精密光学元件同时来保证。其中,位于靶区编组传输部分的尺寸为610 mm \times 440 mm的激光传输反射镜是口径最大的光学元件,该反射镜同时具有位置调整、对准方向和光程匹配等关键功能,故其面形精度会直接影响激光的光束质量(波前误差)和靶心的能量密度。

2 光学元件面形精度对激光光束质量的影响

ICF的原理是将氘氚靶丸加热到极高的温度(通常为几千万甚至上亿摄氏度),使之成为高温等离子体,其中的粒子才能获得足够多的动能克服库仑位垒,最终实现可以自持的聚变反应。极端的聚变点火条件要求用来激发聚变的高功率固体激光器必须具备良好的光束质量和聚焦性能,这就需要利用光路中使用的每一个元件的光学性能(面形精度)来保证。

在ICF装置中使用的大口径光学元件,其制造误差、装配(夹持)误差以及工作状态下的热变形都会导致镜面产生波前相位误差,美国国家点火装置(NIF)根据波前空间调制周期 L 的大小将误差范围分为三个频段,分别是高频段($0.01\text{ mm} < L < 0.12\text{ mm}$),中频段($0.12\text{ mm} < L < 33\text{ mm}$)和低频段($L > 33\text{ mm}$)^[2]。其中,高频误差又称为粗糙度,中频误差又称为波纹度,二者都会影响远场能量分布的边缘区域,且都产生自光学元件的加工制造过程;低频误差又称为轮廓度,会直接影响激光远场能量分布的中心区域并决定焦斑大小,这部分误差主要来源于制造和装校过程。随着波前误差均方根的增大,环带能量半径将会显著增大,最终导致光束的会聚能力迅速减弱^[3]。因此,为了提高聚变装置靶心的能量密度,早日实现聚变点火,必须进一步控制大口径光学元件的面形精度。由于当前广泛采用的磁流变抛光等技术已经可以将表面粗糙度(R_a)控制在1.28 nm^[4],因此,通过优化光学元件装校工艺来减小波前低频误差的方法可以更显著地提高ICF装置中大口径光学元件的面形精度。

3 大口径激光传输反射镜夹持工艺的技术现状和难点

在精密光学元件的装校过程中都存在一个共性的难题,即需要在保证牢固夹持光学元件的同时尽量减小夹持力导致的面形畸变。具体地说,在ICF装置中,既要保证每一个光学元件被稳定、精确地安装在工作位置,又要避免因夹持力而产生的变形、双折射甚至是破裂。Su等^[5]对ICF装置中具有大径厚比的磷酸二氢钾(KDP)晶体的低应力夹持方式进行了深入的研究,利用薄板弯曲理论建立了晶体在夹持力下的基本力学模型并通过有限元方法对夹持方案进行验证;Kroes等^[6]研究并设计了天文观测中应用的红外光学低温传输装置中的低应力夹持结构;Hibbard等^[7]设计了NIF中KDP晶体的精密夹持工装并获得了最优的频率转换效率,满足了NIF的性能要求。以上研究对当前进行的有关光学元件精密装配的工作具有重要的参考价值,但由于本研究中的大口径激光传输反射镜在尺寸、材料、功能以及技术要求等方面较上述研究对象都有很大区别,相比KDP晶体的夹持在技术上具有更大的挑战性,因此必须针对其独有特征进行全新的理论建模分析和现场实验研究。

图1所示为当前应用于神光-III主机装置中的大口径激光传输反射镜组件,由镀有高反射膜的H-K9L玻璃镜体、铝合金镜框、压板、紫铜垫片、预紧螺钉、球头组件和吊装块组成。采用四周支撑夹持工艺,镜体由分布在铝合金镜框四周的96个预紧螺钉来夹持。这种夹持方式与美国NIF采用的三点联结背支撑夹持工艺^[8]完全不同。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^[9],对螺钉预紧力的精确控制一直是一个公认的难题。王辉等^[8]研究了螺钉紧固力的不确定性对反射镜面形的影响,并得出随着螺钉紧固力误差的增大,反射镜面形的波前误差近似线性增长的结论;在当前工艺条件下,熟练的操作者最低可将螺钉紧固力的误差控制在 $\pm 20\%$ 左右,这导致反射镜面形畸变超差现象出现的概率很高。为了从根本上解决当前反射镜存在的面形畸变超差问题,同时减小光束的波前误差以保证靶心更高的能量密度,必须从理论上分析大口径反射镜受力变形的机理并提出一套完整的低应力夹持工艺和夹持力诱导变形的表征方法。

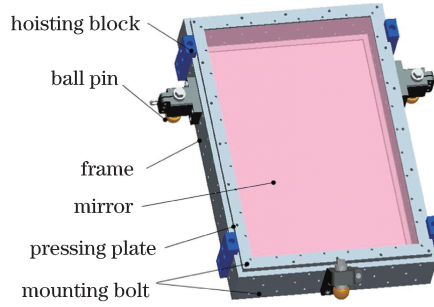


图 1 大口径激光传输反射镜组件结构

Fig. 1 Structure of the large aperture laser transmission mirror component

4 大口径反射镜受夹持力弯曲变形的力学模型

图 2 所示为简化后的大口径反射镜载荷约束示意图。根据弹性力学知识,可将其视作一个满足连续性、均匀性、各向同性、线弹性和小变形这 5 个基本假设的矩形弹性体^[9],其底部边缘受固定约束,4 个侧面受夹持力载荷,上边缘受均布预紧力。在弹性理论中一般将厚径比 h/b 为 $0.125\sim 0.2$ 的板称为厚板(中厚板),与 h/b 为 $0.125\sim 0.2$ 的薄板相比,厚板需要考虑横向剪应变的影响,此时问题被定义为厚板(中厚板)弯曲问题^[12]。因为本研究的反射镜的厚径比 $h/b = 0.19$,为了建立与实际情况更相符的力学模型,采用 Reissner-Mindlin 厚板理论^[13]。

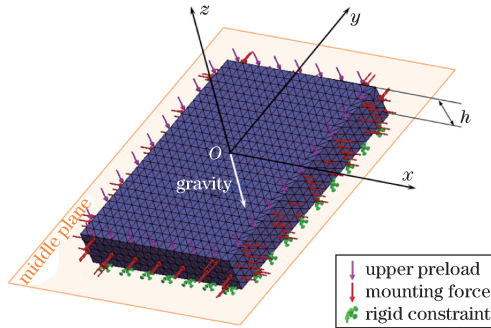


图 2 反射镜的简化载荷约束示意图

Fig. 2 Simplified schematic of load and constraint on the transmission mirror

将平分反射镜镜体厚度 h 的平面称为中平面(图 2),坐标原点 O 在中平面中, x 、 y 坐标轴也在中平面中, z 坐标轴垂直于中平面,镜体内部的任一点的位移分量可以表示为

$$\begin{cases} u(x, y, z) = -h\theta_x(x, y) \\ v(x, y, z) = -h\theta_y(x, y), \\ w(x, y, z) = w(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中 h 为镜体的厚度, θ_x 为垂直于中平面的法线在 x - z 平面内的转角($x \rightarrow z$ 为正方向), θ_y 为垂直于中平面的法线在 y - z 平面内的转角($y \rightarrow z$ 为正方向), w 为中平面挠度($-z$ 为正方向)。

镜体承受的弯矩/扭矩与镜体曲率/扭率的关系可表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{D}\boldsymbol{\kappa}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\kappa} = \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial\theta_x/\partial x \\ \partial\theta_y/\partial y \\ \partial\theta_x/\partial y + \partial\theta_y/\partial x \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 M_x (M_y) 为垂直于 x (y) 轴的截面上单位长度的弯矩, M_{xy} 为垂直于 x 轴的截面上单位长度的扭矩, κ_x (κ_y) 为中间面在 x (y) 轴方向的曲率, κ_{xy} 为中间面在 x 轴和 y 轴方向的扭率, E 为 H-K9L 玻璃的弹性模量, $E = 79 \text{ GPa}$, ν 为 H-K9L 玻璃的泊松比, $\nu = 0.211$ 。

横向剪力与剪应变的关系为

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{\gamma}, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{bmatrix}, \boldsymbol{C} = \frac{5Eh}{12(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial w / \partial x - \theta_x \\ \partial w / \partial y - \theta_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $Q_x(Q_y)$ 为垂直于 $x(y)$ 轴的截面上单位长度的横向剪力。

镜体的平衡方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = 0 \\ \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} - Q_y = 0, \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \bar{q} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 \bar{q} 为作用在中平面单位面积上的外载荷(包括重力和夹持力)。

以上是对大口径激光传输反射镜受夹持力变形进行分析的理论基础。由于在实际研究过程中很难通过求解上述偏微分方程得到镜体应力和应变的解析解,人们广泛采用更加灵活高效的有限元方法对此类问题进行求解,其原理是将反射镜实体离散为众多基本力学单元,对每个单元的变形进行求解,将单元总装形成联合方程组,最后对联合方程组进行求解即可获得全域的数值解^[14]。

5 基于挠性零件的大口径反射镜低应力夹持工艺

建立的大口径反射镜受力弯曲变形的基本力学模型以及有限元计算方法都是开展反射镜低应力夹持工艺研究的力学基础和分析工具,下文首先介绍针对挠性零件力学特性的仿真分析和实验研究,然后利用上述力学模型和计算方法对新夹持工艺下面形的畸变量进行计算和分析。

5.1 挠性零件的力学特性研究实验

当前神光-III 主机装置中的大口径激光传输反射镜采用四周支撑夹持工艺,这种工艺由分布在镜框 4 个侧面上的 96 个预紧螺钉直接向镜体提供夹持力。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,直接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。

从技术可行性和经济适用性角度出发,提出了图 3(a)所示挠性零件夹持工艺以均化夹持力并实现对夹持力的精确控制。首先挠性零件将螺钉与镜体的点接触转化为面接触,通过定性的压力分布测试可以看出[图 3(b)],挠性件底面每一块子区域上的接触应力分布几乎一致,即在提供夹持力时每个子区域对镜体产生的影响相同,这样的夹持效果相较于存在 $\pm 20\%$ 预紧偏差的螺钉夹持工艺有明显的优势。为了进一步验证挠性零件的力学特性,先利用有限元方法对挠性零件的力学特性进行仿真分析,如图 4(a)所示,在压板上施加不同大小的均布压力,分别计算挠性零件与镜体接触的每个子区域的压力均值,结果显示,除了靠近边缘的两个子区域外,挠性零件底面中间部分与镜体完整接触的个子区域的压力偏差很小(约为 $\pm 6\%$);如图 4(b)所示,模拟真实螺钉加力状态,设置每颗螺钉的名义预紧力大小为 113 N,螺钉预紧力偏差范围为 $\pm 0\% \sim \pm 30\%$,结果显示 5 个完全接触子区域的夹持力偏差为 $\pm 12\% \sim \pm 15\%$ 之间。当然,仿真分析的结果相对理想,过程中忽略了零件制造误差等客观因素的影响。为了获得更加真实可靠的数据,设计图 5 所示单镜框实验装置(挠性零件的公差设定为 ± 0.1 mm),旨在模拟挠性零件受到预紧力时的真实变形情况。利用多点薄膜压力测试系统采集挠性件上下表面的压力数据,基于该实验系统进行两组现场实验。实验一:相同预紧力重复施加 5 次,旨在研究挠性零件上下表面压力的偏差范围;实验二:在相同范围内施加大小不同、逐渐递增的预紧力,旨在研究挠性零件对预紧力的调控能力。

实验一的结果如表 1 所示,可以看出在真实情况下,挠性零件表现出良好的均载特性,最大夹持力偏差约为 $\pm 15\%$,这与图 4(b)所示仿真结果一致;实验二的结果如图 6 所示,图 6(a)显示挠性零件上下底面上的压力随着预紧力的增加呈现相同的增长趋势,图 6(b)则说明挠性零件上底面预紧力与下底面夹持力的关系

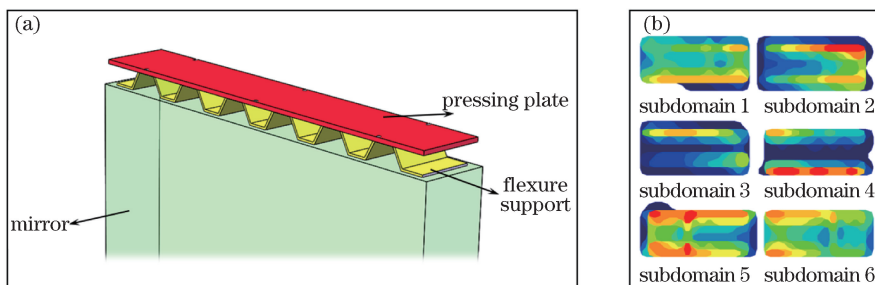


图 3 (a) 挠性零件夹持工艺简图; (b) 挠性零件底面压力分布测试结果

Fig. 3 (a) Schematic of mounting configuration with flexure support; (b) stress distribution test results of the flexure support bottom surface

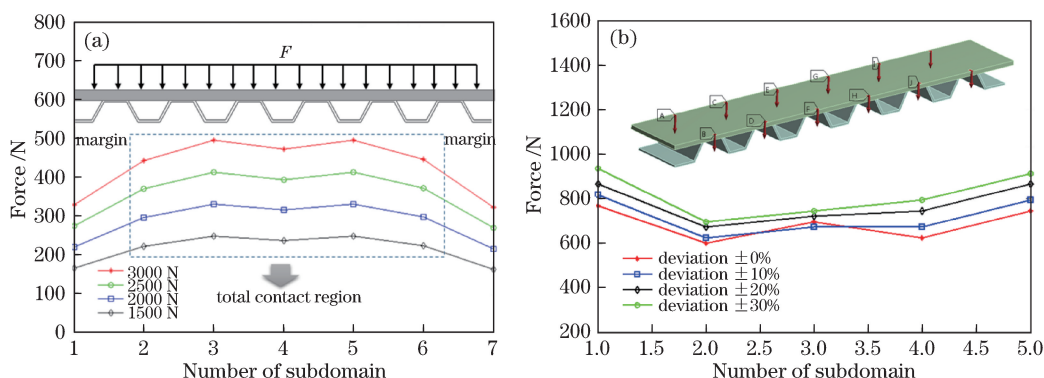


图 4 挠性零件力学特性仿真结果。在压板上 (a) 施加均匀压力; (b) 模拟真实螺钉加力状态

Fig. 4 Simulation results of mechanical properties of flexure support. (a) Applying uniform force on the pressing plate; (b) simulating the real condition with the bolts applying preloads

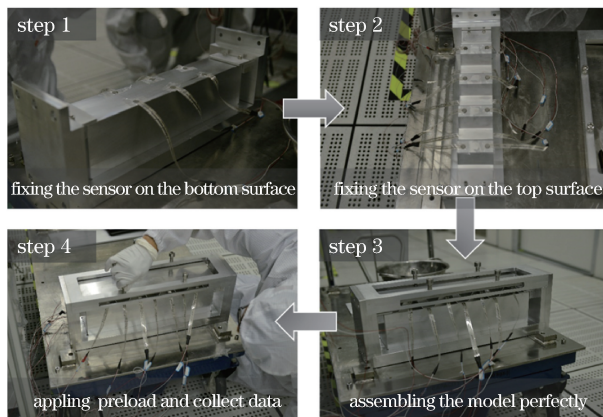


图 5 挠性零件力学特性现场实验步骤

Fig. 5 Experimental procedure for studying mechanical properties of flexure support

表 1 挠性零件力学特性现场实验结果

Table 1 Experimental results of mechanical properties of flexure support

Number of force	1	2	3	4	5
Deviation of top subdomains /%	7.15	7.16	7.67	9.71	8.71
Deviation of bottom subdomains /%	11.07	9.12	14.64	12.67	15.25

近似呈线性关系,表明可以通过调控压板上的预紧力大小来计算并控制镜体所受到的夹持力大小,这是当前夹持工艺难以做到的。

此外,采用挠性零件的夹持工艺还有一个明显的优点,挠性零件与镜体的接触面积比当前工艺下螺钉与镜体的接触面积大得多,即将当前离散型夹持方式改进为集中型夹持方式,在承受相同机械振动、冲击载荷

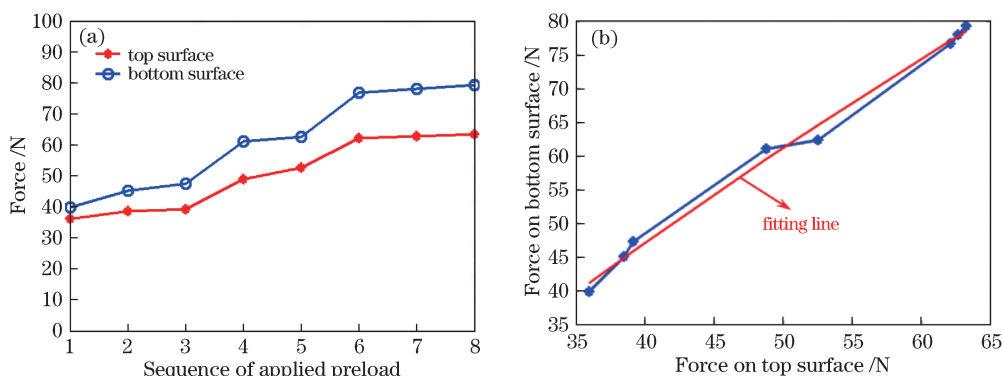


图 6 (a) 挠性零件承受不同预紧力时上下底面压力变化曲线; (b) 挠性零件上下底面压力变化关系
Fig. 6 (a) Force change when flexure support bears different preloads; (b) relationship between preloads on the top surface and on the bottom surface

或风载的情况下,新型夹持工艺的稳定性会更好,同时所需要的夹持力相应减小。在后续工作中,通过仿真和实验的方法寻找最优的夹持力,该力值能在保证大口径反射镜组件稳定性的同时对反射镜面形影响最小。在此过程中,通过改变挠性零件与镜体间的摩擦系数以及改进机械结构的方法已经取得了一些阶段性的成果。

5.2 完整低应力夹持工艺验证

验证挠性零件的力学特性之后,对当前大口径反射镜完整组件的机械结构设计进行改进,如图 7 所示,新的组件由镜框、反射镜、紫铜垫片、镜体压板、预紧螺钉、限位螺钉、挠性件压板和挠性件组成,其中反射镜根据激光传输的需要选取 H-K9L 玻璃,镜框、挠性件等与镜体直接接触的支撑部件的材料则选取 6061 型铝合金,这种材料密度低,具有良好的光学特性、热性能以及真空特性^[6]。

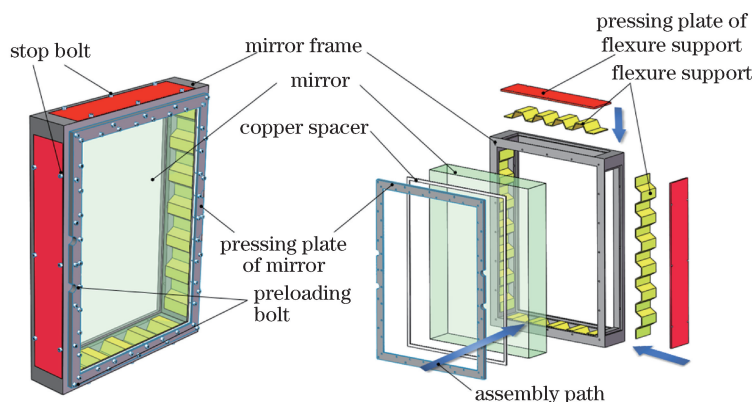


图 7 基于挠性零件的全新大口径反射镜组件结构爆炸图

Fig. 7 Explosive view of structure of the brand new large aperture mirror module based on flexure support

李桂华等^[10]曾在 ANSYS 平台中对当前神光-III 主机装置中采用的基于螺钉的大口径反射镜周向支撑夹持工艺进行了仿真分析,每颗夹持螺钉提供的名义夹持力设定为 130 N,实际夹持力偏差范围设定为 $\pm 25\%$,结果表明此时反射镜中心透光区域的最大波前误差约为 180 nm。提出新的夹持工艺之后,利用 ANSYS 16.0 中对新工艺下的波前误差与名义夹持力的关系进行研究,用镜面 z 轴方向的峰谷(PV)值表征波前误差,周向每个侧面上受到预紧力的总和与螺钉直接夹持工艺一致,结果如图 8 和图 9 所示。从图 9 可以看出,在相同的预紧力作用下,新工艺夹持力导致的面形偏差在 90 nm 左右,而当前工艺夹持力导致的面形偏差最大达到 180 nm。此外,随着预紧力的增长,波前 PV 值近似呈线性增长,当达到许用最大变形量(211 nm)时,对应每个螺钉提供的预紧力约为 1600 N,这个量级的预紧力经挠性零件转化为夹持力以后可满足反射镜组件的稳定性要求。因此,在低应力夹持与反射镜组件稳定性之间可以找到一个平衡点,即最优预紧力(夹持力)值。后续工作中将进一步完善夹持工装的设计,如考虑与线性可替换单元

(LRU)的集成等问题,并开展大口径反射镜空间多姿态下的面形测量实验,以期对新的夹持工艺方案进行完整的工程验证。

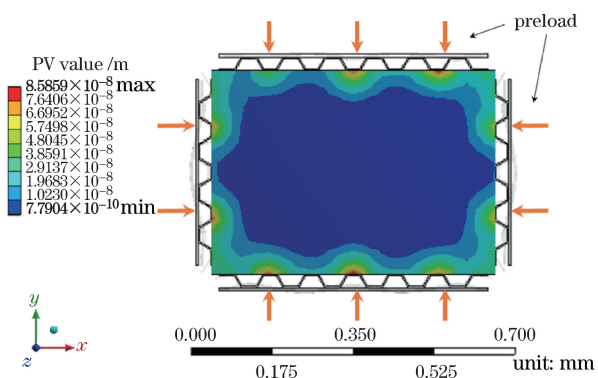


图 8 新夹持工艺下夹持力诱导波前误差仿真结果

Fig. 8 Simulation results of mounting-induced wavefront error for new mounting configuration

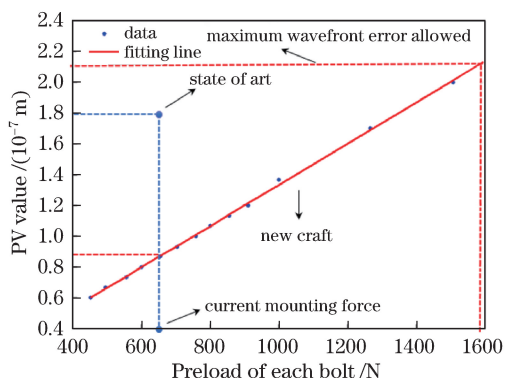


图 9 新夹持工艺下预紧力大小与波前误差的关系

Fig. 9 Relationship between preload and wavefront error for new mounting configuration

5.3 夹持诱导面形数值解耦分析与完整工艺流程优化

大口径反射镜组件在装配完成以后,还需要在大口径激光干涉仪前通过检测才能从光学装配大厅(OAB)转运至主机现场,装入主机光路之中。一般在这个过程中干涉仪测量得到的面形数据主要包含三项内容:原始面形(精密机械加工后的面形)、重力诱导面形以及夹持诱导面形。经过长时间的实践过程发现,这样的检测过程存在两点不足,一是从干涉仪直接测量得到的面形数据中难以有针对性地研究最为关注的夹持力对面形的影响;二是当前这种装配和检测同时进行的工艺流程十分耗费工时,很难满足下一代更高功率 ICF 装置建设的进度要求。

针对第一点不足,将干涉仪精密检测与计算机数值计算相结合,成功解耦分离得到夹持诱导面形,如图 10 所示。首先将没有受到夹持力的裸镜安装到干涉仪检测平台上,测量得到此时的面形数据 $z_{nk}^{(n)}$,然后按照图 7 所示装配路径完整装配反射镜组件,再次测量受到夹持力的反射镜,获得新的面形数据 $z_w^{(n)}$,随后在计算机中编写算法将两次测量得到的数据点对应求差,便可得到夹持力作用导致的面形畸变为

$$z_m^{(n)}(x, y) = z_w^{(n)}(x, y) - z_{nk}^{(n)}(x, y), \quad (7)$$

式中测量位置坐标 (x, y) 在干涉仪 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 有效测量区域内, $n \in [1, 1048576]$, 为各离散数据点编号。

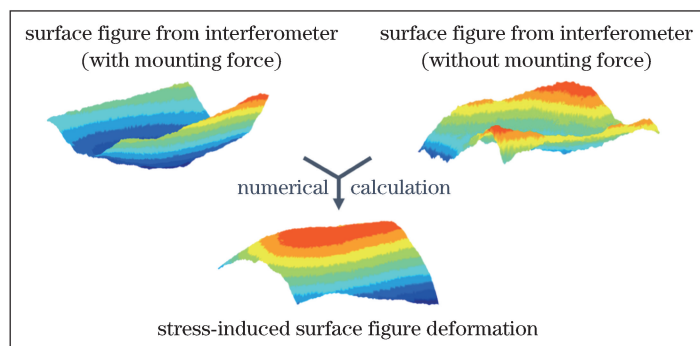


图 10 夹持诱导畸变数值解耦计算过程

Fig. 10 Numerical decoupling of mount-induced deformation

针对第二点不足,在解决第一点不足的思路的基础上提出了新的反射镜装配流程,如图 11 所示,该工艺流程基于大口径反射镜挠性零件夹持工艺以及精密测量结合数值分析的大口径反射镜精密检测方法,是一种闭环工艺流程。第一步采用定值压力装置(液压机)向镜体压板施加预紧力,随后用限位螺钉将镜体压板的位置固定;第二步使用大口径干涉仪测量得到面形数据;第三步将干涉仪测得的数据传输到计算机中进行数值计算(依靠自主开发的软件来实现),可以通过算法实现对夹持诱导面形畸变的分析并提出改进方案;最

后根据软件分析结果调整夹持力以达到装配要求(PV 值小于 211 nm)。依靠新的装配流程可以更有针对性地对反射镜的夹持力进行调节,并且在装配辅助软件的协助下,可以对同一批次的其他反射镜面形进行预测以避免逐个检测而耗费大量工时。

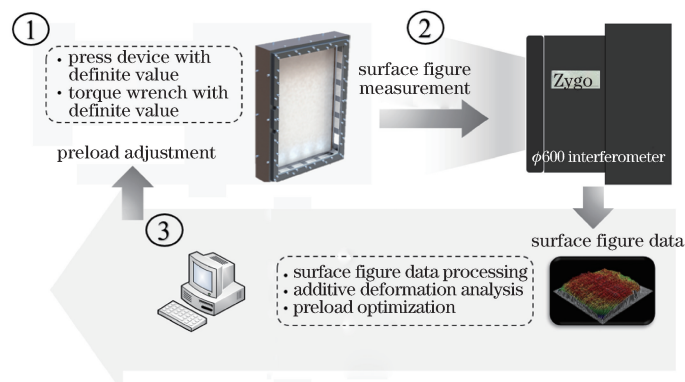


图 11 低应力夹持闭环工艺流程

Fig. 11 Closed-loop process of low-stress mounting

6 结 论

特殊的应用背景和极其严苛的技术要求导致大口径反射镜(口径大于 400 mm)的低应力夹持成为了一个世界性的难题。从中国神光-III 主机装置的工程实践入手,针对大口径激光传输反射镜的低应力夹持工艺展开了深入的研究。首先,以当前基于螺钉的周向支撑夹持工艺的缺陷为切入点,在 Reissner-Mindlin 理论的基础上建立了大口径反射镜受夹持力变形的完整力学模型;随后,提出基于挠性零件的全新夹持工艺,并结合有限元分析和现场实验对其力学特性进行了验证,发现其具有良好的均载特性(夹持力偏差小于 $\pm 15\%$)以及对夹持力的可控性。根据挠性零件的力学特点,设计了完整的大口径反射镜组件,并通过有限元方法研究了新工艺下夹持力与波前误差的关系并与当前工艺下夹持力对面形畸变的影响进行对比,发现在相同的夹持力作用下新工艺导致的面形 PV 值最大约为 90 nm(不大于 211 nm),证明新工艺具有良好的夹持效果。最后,提出精密测量结合数值计算的解耦方法,分离得到夹持力产生的面形畸变并基于此理论构建了更加高效、可靠的反射镜装配工艺流程。

需要承认的是,由于我国对 ICF 装置的研究起步较晚,理论和实践基础薄弱,相较美国的 NIF 和法国的兆焦耳激光器^[15]装置还有较大的差距。为了进一步缩小差距,提高神光系列 ICF 装置的技术水平,必须将基础理论研究和现场实验研究相结合,开展针对高功率固体激光器中大型光机组件精密装校问题的深入研究,在控制波前误差提高光束质量和打靶精度的同时,还要优化现有的光机组件装配工艺以提高装机效率,最终达到我国下一代 ICF 装置的建设进度要求。

参 考 文 献

- [1] Zheng Wanguo, Deng Ying, Zhou Wei, *et al.* Development of laser technology in research center of laser fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3082-3090.
郑万国, 邓颖, 周维, 等. 激光聚变研究中心激光技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3082-3090.
- [2] English R E Jr, Laumann C W, Miller J L, *et al.* Optical system design of the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1998, 3482: 726-736.
- [3] Chen Yuanhua, Zheng Wanguo, Chen Wenjing, *et al.* Phase RMS gradient of the distorted wavefront for high power optical components[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(3): 403-408.
陈源画, 郑万国, 陈文静, 等. 高功率光学元件畸变波前相均方根梯度计算[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(3): 403-408.
- [4] Shi Feng, Dai Yifan, Peng Xiaoqiang, *et al.* Magnetorheological finishing for high-precision optical surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1859-1864.
石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 高精度光学表面磁流变修形[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1859-1864.

- [5] 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.
- [6] Kroes G, Kragt J, Navarro R, *et al.* Opto-mechanical design for transmission optics in cryogenic IR instrumentation [C]. SPIE, 2008, 7018: 70182D.
- [7] Hibbard R L, Norton M A, Wegner P J, *et al.* Design of precision mounts for optimizing the conversion efficiency of KDP crystals for the National Ignition Facility[C]. OSA 1998 Summer Topical Meeting, 1998.
- [8] 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(9): 0922004.
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(9): 0922004.
- [9] Bu Yan. Design and calculation for threaded connection[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995.
卜 炎. 螺纹联接设计与计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [10] Li Guihua, Wang Hui, Xiong Zhao, *et al.* Assembly accuracy of large optical units in high power laser system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(11): 116-122.
李桂华, 王 辉, 熊 召, 等. 高功率激光系统中大型光机组件的装配精度研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(11): 116-122.
- [11] Zeng Pan. Finite element analysis and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
曾 攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [12] Wang Longfu. Theory of elasticity[M]. Beijing: Science Press, 1984.
王龙甫. 弹性理论[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [13] Reissner E. On the theory of transverse bending of elastic plates[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 1976, 12(8): 545-554.
- [14] Su R, Liu H, Liang Y, *et al.* Mechanical and optical analysis of large-aperture optics mounted on a frame with a curved surface[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56(1): 189-195.
- [15] André M L. The French Megajoule Laser Project (LMJ)[J]. *Fusion Engineering & Design*, 1999, 44(1): 43-49.