

大口径平面光学元件的全金属装夹方案设计

邵平¹ 夏兰² 乔战峰¹ 居玲洁¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

²中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 真空环境下大口径光学元件的装夹采用传统有机物无应力装夹方式会带来有机污染等各种问题。设计了一种大口径平面光学元件的夹具和装夹方案, 利用金属结构直接装夹大口径平面光学元件, 可在降低金属装夹框表面加工精度和光学元件处于任意倾斜角度等情况下, 不产生光学元件装夹应力, 同时避免了传统有机物无应力装夹而带来的有机污染。可广泛应用于大口径平面光学元件在光学工程、光学实验装置中的装夹。

关键词 光学器件; 无应力装夹; 全金属装夹; 弹性支点; 大口径光学元件; 有机污染

中图分类号 TN248.1; O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.112302

All-Metal Fixture Scheme Design for Large Aperture Optical Element

Shao Ping¹ Xia Lan² Qiao Zhanfeng¹ Ju Lingjie¹

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract Large aperture optical element clamping generally use the traditional organic stress-free clamping. In vacuum environment, the clamping will bring about various problems such as the organic pollution. A fixture scheme and the corresponding fixture have been designed for large plane optical element. The scheme uses the metal structure for clamping optical element directly, reduces surface machining accuracy of metal frame, achieves stress-free clamping and avoids organic pollution caused by traditional way with the optical element working at any angles. This scheme can be widely used in the large aperture optical elements clamping in optical engineering and optical experimental device.

Key words optical devices; stress-free clamping; all-metal fixture; elastic support; large aperture optical element; organic pollution

OCIS codes 230.4040; 350.4600; 140.3580

1 引言

目前, 高功率激光装置向大口径、高通量、列阵化方向发展^[1], 激光装置主要光学元件的口径不断增大, 光学元件宽厚比增大, 大口径光学元件面形容易受到外界因素的影响, 其中光学元件自重和装夹应力引起的元件形变最为突出。大口径光学元件装夹一般采用处处刚性夹持的柔性连接^[2-3], 同时通过有限元分析等手段优化夹持力、节点分布等参数达到减小夹持变形的目的^[4-6], 为使元件受力均匀, 基本都采用了有机材料固定镜片^[4-6]。实现激光高通量传输必须具备一个洁净、干燥、无污染的环境, 在高功率短脉冲激光装置的压缩室、靶室等真空环境下, 有机材料在高功率激光直接或间接辐照下会产生污染物——气溶胶, 充斥于整个实验环境, 从而对光学元件产生污染, 使光学元件在激光辐照下损伤或损伤增长。针对高功率激光装置需求, 本文设计了一种大口径平面光学元件装夹方案, 利用金属结构直接装夹大口径平面光学元件而不产生装夹应力, 并设计了相应的夹具。

2 大口径平面光学元件装夹结构设计

高功率激光装置要求部分大口径光学元件背部透光, 光学元件装夹采用了周边支撑方式, 设计结构如

收稿日期: 2014-05-04; 收到修改稿日期: 2014-06-12; 网络出版日期: 2014-10-15

作者简介: 邵平(1961—), 男, 高级实验师, 主要从事激光装置器件方面的研究。E-mail: shaoping_sp@163.com

图1所示,包括镜框,旋转轴,支架,弹性支点若干,变形薄板,内六角圆柱头螺钉及凸台等。镜片装入镜框与压板间,变形薄板框替代有机垫片介于镜面与压板之间,多个凸台和内六角圆柱头螺钉将图中的镜框和大口径平面光学元件压板固定在一起,将镜框装入支架之后,调整至工作姿态。此时调节多个弹性支点的调节丝杆,使大口径平面光学元件的下表面与变形薄板框贴合。该装夹方案将装夹件与元件接触由点接触变成了面接触,多个弹性支点使变形薄板框的面随光学元件的平面度而改变并紧密贴合,能保证大口径光学元件在装夹后的装夹变形量小于检测波长的 $1/10$,而变形薄板框自身不需要任何平面度要求,大大降低加工难度。

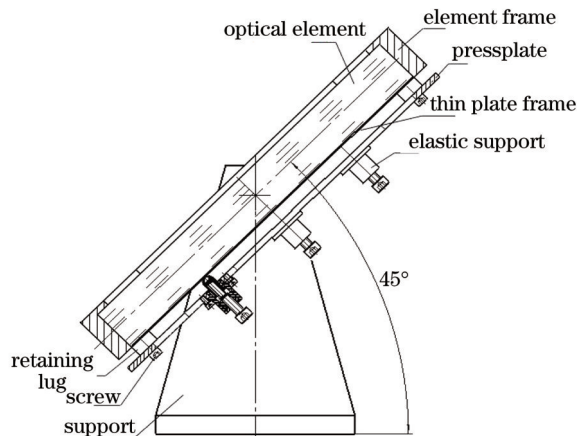


图1 装夹元件及夹具设计图

Fig.1 Clamping component and fixture design

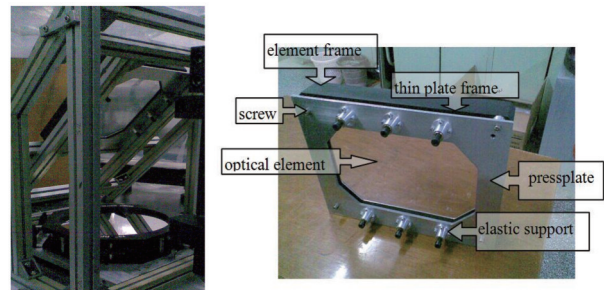


图2 实例元件装夹

Fig.2 Example of optical element

3 有限元分析及实验结果

大口径平面光学元件本身重力是主要的装夹变形来源。实例光学元件尺寸为540 mm(长)×420 mm(宽)×70 mm(厚),重量约为34.93 kg,材料为K9玻璃,工作角度为 45° (图2)。图3给出了实例光学元件与弹性薄板框的有限元模型,在弹性薄板框除弹性支点外的部分施加了固定约束,对整个结构施加了 45° 角重力场。

利用有限元分析法分析以下三种情况:1)工作状态下光学元件的形变;2)工作状态下弹性薄板框存在不平整或者轻微变形时光学元件的形变;3)在第二种状态下对弹性支点施加合适的力时光学元件的形变。将有限元分析得到的镜面节点信息进行面形拟合计算,得到如图4~6所示的拟合结果。

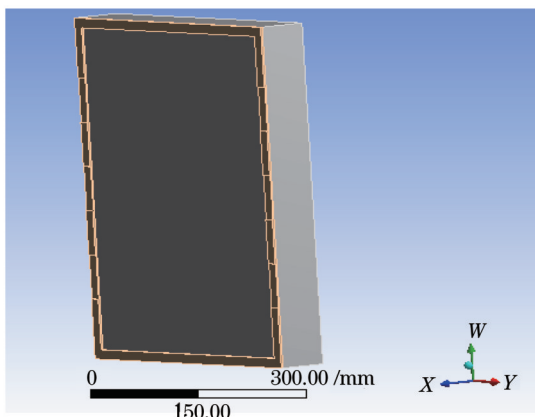


图3 平面光学元件及薄板框有限元模型

Fig.3 Finite element model of the flat optical element and the thin plate frame

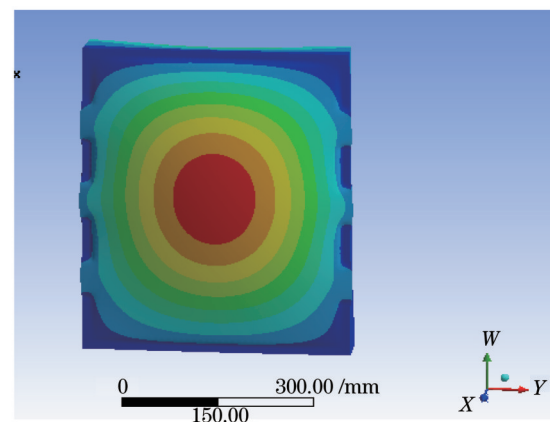


图4 平面光学元件工作状态下的面形

Fig.4 Surface of optical element under the working attitude

图4是理想平面光学元件在 45° 工作姿态下因重力产生形变的示意图。图5是薄板框或者镜框存在轻微变形的示意图,光学元件的形变增加,其中增加的峰谷(pv)值约是图4状态下的 $1/10$,说明大口径平面光

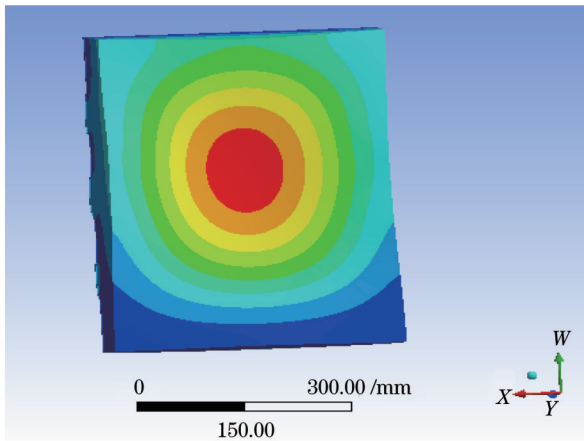


图5 薄板框或镜框存在轻微变形情况下平面光学元件的面形
Fig.5 Surface of optical element with slight deformation of the thin plate frame or the mirror frame

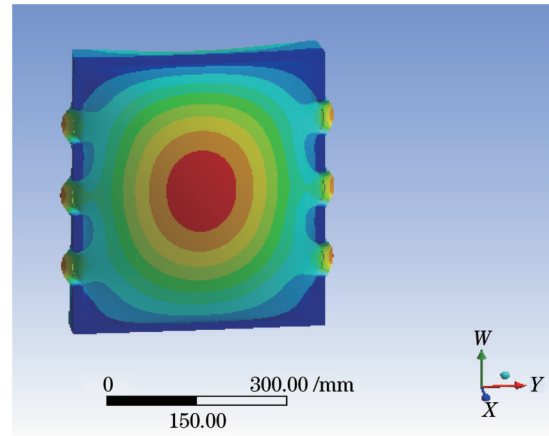


图6 弹性支点力补偿之后平面光学元件的面形
Fig.6 Surface of optical element with force compensation of the elastic supports

学元件pv值的主要来源是光学元件自重。图6中,对弹性支点施加合适的力,以补偿光学元件装夹形变。光学元件pv值比图4中光学元件pv值小了1/10。由此得出结论:弹性支点施加的力不仅能够补偿薄板框或镜框变形引入的光学元件形变,而且还能够部分补偿光学元件自重引起的形变。

关键元件弹性薄板框材料选择铝板或不锈钢板,其性能参数见表1。厚度参数需要根据大口径光学元件使用姿态以及大口径光学元件形状进行选择。

表1 材料参数

Table 1 Martial parameters

Material	Density /(kg/m ³)	Modulus /GPa	Poisson ratio
K9	2.5×10 ³	88	0.215
Aluminum	2.7×10 ³	70.6	0.33

以铝框为例,对各种不同厚度情况下应力及变形量进行了有限元分析。本文实例光学元件在45°倾角(工作角)时,变形薄框受到大口径元件重量分力为246.9 N,假设变形薄框四周分布的弹性支点有6个,均匀分布于长方形口径的长边上,六个弹性支点可分为三对,分别为上方支点,中间支点,下方支点,则有限元分析结果如表2所示。

表2 薄板框受力表

Table 2 Stress of the thin plate frame

Thickness of the thin plate frame /mm	Force of the upper supports /N	Force of the middle supports /N	Force of the lower supports /N	Deformation /mm
1	47	0.11	47	2.247×10 ⁻²
1.5	14	0.28	14	0.783×10 ⁻³
2	9.2	0.3	9.2	0.364×10 ⁻³
3	4.1	0	4.1	0.115×10 ⁻³
3.5	2.8	0.015	2.8	0.740×10 ⁻⁴

在以上分析结果基础上,实验测量实例光学元件与压板间再加入真空橡皮或加入不同厚度薄板框装夹后的面形,结果如表3所示。

表3 元件变形情况表

Table 3 Deformation of the optical element

Material of the thin plate frame	Thickness /mm	Element surface (pv) /λ
Vacuum rubber	2	1.8
Nil	Nil	1.5
Aluminum	1.5	1.2
Aluminum	2	1
Aluminum	3	0.759

实例光学元件面形 p_v 值为 0.310λ , λ 为测试光波长 (632.8 nm), 面形图如图 7 所示。装夹之后, 当选择薄框材料为铝, 薄框厚度为 3 mm 时, 元件 p_v 值为 0.759λ , 均方根(rms)值为 0.146λ , 面形如图 8 所示。

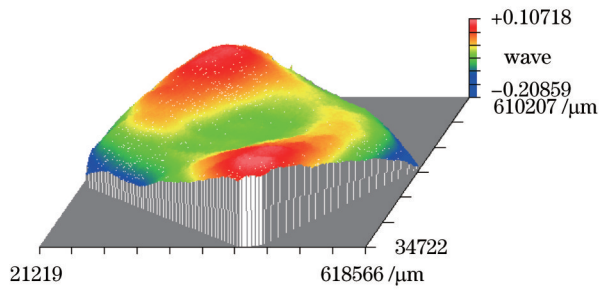


图 7 装夹前元件面形

Fig.7 Surface shape of the element before clamping

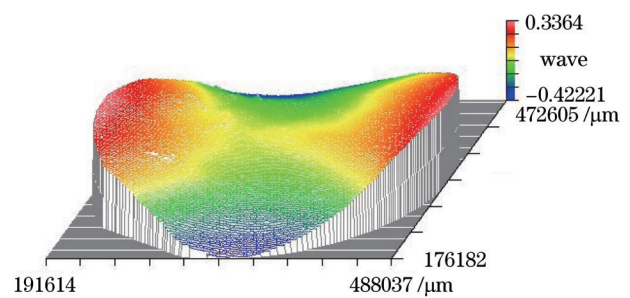


图 8 装夹后元件面形

Fig.8 Surface shape of the element after clamping

装夹后的大口径平面光学元件处于工作姿态, 此时因本身重力及装夹应力等原因仍有部分变形(图 8), 需调节各弹性支点的丝杆来补偿形变。可调弹性支点的结构由弹性支点外壳、调节丝杆、锁紧压圈、螺母、弹簧和弹簧套构成, 提供多个可调的力点。其特征在于调节调节丝杆使弹簧在有限的空间内变形, 通过弹簧套将力作用在变形薄板框上, 作用力的大小由调节丝杆控制。锁紧压圈起到防止螺母在调节时松动的作用, 弹性支点外壳起到固定弹性支点的作用。当光学元件存在倾斜角度时, 根据倾角大小分析大口径平面光学元件重力的分力来选择弹簧弹性, 要选择弹簧弹性略大于大口径平面光学元件重力分力, 才能使得弹性支点有足够的力支撑大口径平面光学元件, 起到稳定的作用。设计此弹性支点的在实际应用中最大的作用是能够实现对大口径平面光学元件的固定, 尤其是能解决当大口径平面光学元件存在倾斜角度时的固定问题。还可通过有限元分析优化对弹性支点的分布和数量^[2-5], 得到最好的装夹效果。

当选择薄框材料为铝, 薄框厚度为 3 mm 时, 调节三组弹性支点之后, 测量得到元件 p_v 值为 0.310λ , rms 值为 0.053λ (图 9)。

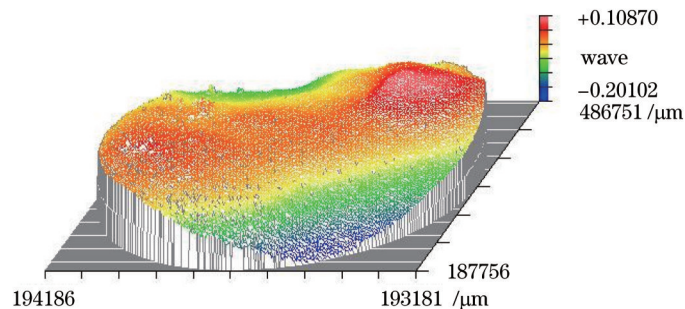


图 9 装夹调整后元件面形

Fig.9 Surface shape of the element after adjusting

比较光学元件裸镜状况下、装夹状况下及装夹调整后三种情况下的面形情况, 得出结论, 大口径平面光学元件全金属装夹方案能够减小镜框等加工精度, 部分补偿大口径平面光学元件因自重引起的形变, 实现无应力装夹。

4 结 论

根据高功率激光装置实际需求提出了一种大口径平面光学元件全金属装夹方案, 并设计制作了相应夹具, 分析了该方案下装夹对大口径光学元件面形的影响。实验结果表明, 该方案避免了使用有机材料, 不会因为激光杂散光辐照而产生污染, 同时降低了对机械件加工的精度要求, 并且能保证大口径光学元件在装夹后装夹变形小于 $1/10\lambda$ (国际上定义光学元件的装夹变形量小于 $1/6\lambda$ 为达到无应力要求)。

参考文献

- 1 Xu Qiao, Gu Yuanyuan, Chai Lin, et al.. Measurement of wavefront power spectral density of large optical

- components [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(3): 344–347.
许 乔, 顾元元, 柴 林, 等. 大口径光学元件波前功率谱密度检测[J]. *光学学报*, 2001, 21(3): 344–347.
- 2 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang, *et al.*. Measurement error analysis of high precision fizeau interferometer for lithography projection objective [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 2029–2034.
苗二龙, 张 健, 谷勇强, 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2029–2034.
- 3 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.
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.
- 4 Gregroy L T, Stamley C S. Stability design consideration for mirror system in ICF lasers lawrence livermore national laboratory [R]. UCRL–JC–125396, 1996.
- 5 Honvath J. NIF/LMJ prototype amplifier mechanical design [R]. UCRL–JC–124520, 1996.
- 6 Cao Tingfen, Xiong Zhao, Xu Xu, *et al.*. Mounting ways and surface figure of large–aperture KDP crystal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 081404.
曹庭分, 熊 召, 徐 旭, 等. 大口径KDP晶体夹持方式对面形的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 081404.
- 7 Tian Wei, Wang Rudong, Wang Ping, *et al.*. Key structural parameters of 300 mm aperture reference flat mirror [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 264–270.
田 伟, 王汝冬, 王 平, 等. 300 mm 平面标准镜装卡结构的关键参数[J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 264–270.
- 8 Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan, *et al.*. Support schemes and thermal deformation analysis of large aperture interferometer mirrors [J]. *Acta Opica Sinica*, 2005, 25(6): 809–815.
徐荣伟, 刘立人, 刘宏展, 等. 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 809–815.