

大口径超薄晶体的面形畸变分析和低应力新型夹持方法探索

向 勇¹, 李恪宇^{1,2*}, 王 伟¹, 冯 斌¹, 韩 伟¹, 王 芳¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²中国科学技术大学中国科学院量子信息重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 针对惯性约束聚激光装置终端光学系统中使用的大口径超薄晶体的面形畸变,探索了一种低应力新型夹持方法——四周回形全紧固夹持法。从谐波转换模型和晶体准直两方面进行了分析,表明晶体面形畸变将降低三倍频效率和导致准直光斑弥散,并提出了晶体面形总畸变小于 $5\ \mu\text{m}$ 和晶体装夹畸变小于加工畸变的两项控制目标。再根据力学模型,设计了四周回形全紧固夹持法的精密装配结构,并对该结构进行了精密加工控制和有限元分析,以及实验验证。验证结果表明,利用低应力新型夹持方法,晶体装配后的总面形畸变小于 $5\ \mu\text{m}$,说明该方法能够满足晶体的面形畸变控制目标。

关键词 非线性光学; 非线性波混频; 惯性约束聚变; 大口径超薄晶体; 面形畸变; 光机装配

中图分类号 TB133 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201744.0208001

Surface Aberration Analysis for Large-Aperture and Ultra-Thin Crystal and New Type of Clamping Method with Low-Stress

Xiang Yong¹, Li Keyu^{1,2}, Wang Wei¹, Feng Bin¹, Han Wei¹, Wang Fang¹

¹Research Institute of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Aiming at the surface aberration for large-aperture and ultra-thin crystal used on the final optical system of inertial confinement fusion facility, a new design of precision mounts with low-stress, named clip-like clamped support all four edges, is proposed. Based on the harmonic conversion model and crystal alignment, the third harmonic generation efficiency will fall and the alignment focal spot will widen because of the crystal surface aberration. So the two control aims must be achieved that the surface aberration should be less than $5\ \mu\text{m}$ and the crystal clamping aberration should be less than machining aberration. Based on the mechanics model, the clip-like clamped support all four edges of precise assembly structure is designed. The precision machining control, finite element analysis, and experimental verification are carried out. Experimental results show that the total surface aberration is less than $5\ \mu\text{m}$ by using the method of precision mounts with low-stress, this method meets the demand of crystal surface aberration control.

Key words nonlinear optics; nonlinear wave mixing; inertial confinement fusion; large-aperture and ultra-thin crystal; surface aberration; opto-mechanical mounts

OCIS codes 190.4223; 190.4400; 220.4830

收稿日期: 2016-09-19; 收到修改稿日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(11304293)

作者简介: 向 勇(1973—),男,硕士,副研究员,主要从事高功率固体激光靶场工程光学方面的研究。

E-mail: xiangyong_caep@163.com

* 通信联系人。E-mail: likeyu6969@163.com

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)激光装置^[1-3]的终端光学组件中使用了许多大径厚比(口径和厚度比)光学元件,磷酸二氢钾(KDP)晶体是其中的典型代表,其口径超过 300 mm×300 mm,甚至达到了 430 mm×430 mm,而厚度仅为约 9~12 mm,其径厚比达到 30:1以上。KDP 晶体是一种非线性频率转换光学元件,其功能是实现高能激光的谐波转换,以满足 ICF 物理实验的短波长打靶需求。由于 KDP 晶体输出性能的高低决定了 ICF 装置的性能,因此,KDP 晶体一直是 ICF 装置中光学、物理学和制造领域中的重点研究对象。

KDP 晶体的面形畸变直接影响着激光系统的能量传输效率和光束质量,而面形畸变则受到加工水平、装配工艺和受力状态等因素的影响。光机装配过程中,晶体的夹持结构和受力将直接改变晶体的面形,为了保证晶体在终端光学系统中的位置精度和稳定性,需对晶体的新型夹持方法进行探索研究,而目前尚欠缺很多这方面的研究。

低应力夹持^[4]是大口径光学元件光机装配中提出的一个概念,其基本含义是使光学元件保持在其加工成形的状态下工作,以尽量不引入外部应力改变其状态为目标。KDP 晶体作为透射元件,只有元件周边很小区域可以用于夹持,面形畸变控制难度极大。传统的光学元件夹持方式是四周胶粘方式,其基本思路是基于柔性接触来减少附加应力,但是由于胶的收缩和固化过程极难量化控制,因此存在应力控制难度大、固化时间长、装配效率低等缺点。而基于机械夹持的光机装配具有装配效率高、拆装方便等优点,并且机械力可以量化控制,是高精度光机装配的发展方向。比如,美国国家点火装置中的 KDP 晶体即采用了机械夹持的方式^[4-6],实现了夹持附加面形畸变小于 2λ ($\lambda=633$ nm,下同)的技术指标。

针对口径为 330 mm×330 mm、厚度为 10 mm 的 KDP 晶体,本文分析了晶体面形畸变的影响,设计了四周回形全紧固夹持法的光机单元结构,并通过实验验证了该结构的有效性。

2 光学模型及面形畸变影响分析

2.1 谐波转换模型和三倍频效率分析

考虑到激光的退偏效应,国内外 ICF 激光装置的高功率三倍频(THG)系统,通常采用如图 1 所示的 I/II 类角度失谐三倍频方案,由一块 I 类二倍频(SHG)晶体和一块 II 类三倍频晶体组成。该方案的优势是对基频光(波长为 1053 nm,用 1ω 光表示)的偏振态不敏感,可以很好地克服在高功率密度下 1ω 光的退偏问题;劣势是对位相失配问题非常敏感,需要高精度控制谐波转换过程中位相匹配角的宏观失配和微观失配问题。

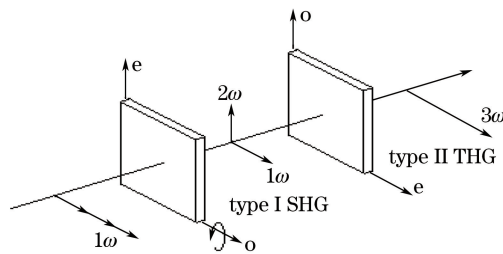


图 1 ICF 装置的三倍频方案

Fig. 1 THG scheme for ICF device

从波动方程出发,可以推导出三倍频耦合方程组为^[7]

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + 2in_e(\omega) \left[\frac{\partial F}{\partial z} + \rho_e(\theta) \frac{\partial F}{\partial y} \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \chi H^* G \exp(i\Delta kz) - i \frac{n_e(\omega)\omega}{c} \alpha_1 F, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + 2in_o(2\omega) \frac{2\omega}{c} \frac{\partial H}{\partial z} = - \frac{(2\omega)^2}{c^2} \chi F^* G \exp(i\Delta kz) - i \frac{2n_o(2\omega)\omega}{c} \alpha_2 H, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + 2in_e(3\omega) \frac{3\omega}{c} \left[\frac{\partial G}{\partial z} + \rho_{3\omega}(\theta) \frac{\partial G}{\partial y} \right] = - \frac{(3\omega)^2}{c^2} \chi FH \exp(-i\Delta kz) - i \frac{3n_e(3\omega)\omega}{c} \alpha_3 G, \quad (3)$$

式中 F 、 H 和 G 分别是 1ω 光、二倍频光(波长为 526.5 nm,用 2ω 光表示)和三倍频光(波长为 351 nm,用 3ω

光表示) 的复振幅, $\bar{\chi} = -\chi \sin 2\theta \cos 2\phi$ 是非线性系数, $\rho_\omega(\theta) = \frac{1}{n_e(\omega, \theta)} \frac{\partial n_e(\omega, \theta)}{\partial \theta}$ 和 $\rho_{3\omega}(\theta) = \frac{1}{n_e(3\omega, \theta)} \frac{\partial n_e(3\omega, \theta)}{\partial \theta}$ 是离散因子。在(1)~(3)式的非线性波混频过程中, 最影响三倍频系统输出效率的是两次和频的位相失配量 Δk 。

二倍频中的 I 类匹配为

$$\Delta k = \frac{\omega}{c} [2n_e^{2\omega}(\theta) - n_e^\omega - n_e^\omega] \quad (4)$$

三倍频中的 II 类匹配为

$$\Delta k = \frac{\omega}{c} [3n_e^{3\omega}(\theta) - 2n_e^{2\omega} - n_e^\omega(\theta)] \quad (5)$$

式中夹角 θ 是光传播方向与晶体光轴的夹角, 三种光的 e 光折射率 $n_e^\omega(\theta)$ 与 θ 有关。理想的位相失配量 Δk 应该为 0, 或者为一固定值, 这样才能实现较高的三倍频输出。但是, 由于各种因素的影响, Δk 存在宏观误差 $\Delta k_1(\theta)$ 和近场不同区域的微观非均匀性 $\Delta k_2(x, y, \theta)$, 将降低三倍频输出效率和增大三倍频近场的非均匀性, 从而大大降低三倍频系统的输出能力。 Δk 的宏观误差是在不考虑位相失配量的微观差异的基础上, 主要考虑晶体在线调试的调试误差、 1ω 光指向性的漂移和温度扰动误差, 它是晶体的整体调试误差, 即 Δk 是与位置坐标 (x, y) 无关、仅与夹角 θ 相关的物理量; Δk 的微观非均匀性为晶体内外的局部误差, 不同区域的 Δk 是空间位置 (x, y) 和夹角 θ 的函数, 即 $\Delta k(x, y, \theta)$, 这主要表现在晶体内部光轴非均匀性、 1ω 光波面曲率半径、晶体加工后的表面面形畸变、晶体装夹后的表面面形畸变, 后两者合称为晶体的面形畸变。如图 2 所示, 根据图 1、谐波转换模型(1)~(3)式和 Δk 的两种表达式(4)、(5)式, 编写了相应的计算程序, 计算了受 Δk 宏观误差影响的两种晶体调谐曲线。

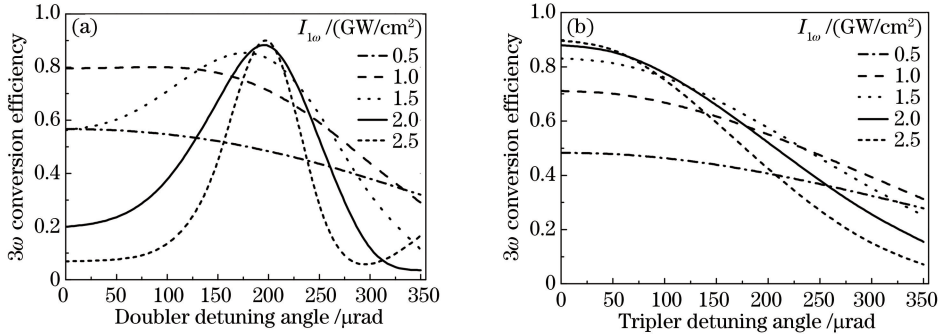


图 2 (a)SHG 晶体(厚度 12 mm)和(b)THG 晶体(厚度 10 mm)调谐曲线

Fig. 2 Detuning curves of (a) SHG crystal (thickness is 12 mm) and (b) THG crystal (thickness is 10 mm)

由图 2 可知, SHG 晶体的 Δk 宏观误差对三倍频输出效率的影响要远大于 THG 晶体。当 1ω 光功率密度为 2.5 GW/cm^2 时, 若只容许三倍频效率的绝对值下降 5%, 则 SHG 的晶体宏观调试误差必须小于 $\pm 30 \mu\text{rad}$ 。若将晶体表面看成一个简单的球面, 则球面中心和边缘的法线差 d 必须小于 $30 \mu\text{rad}$, 这样才能保证光束口径 r 内三倍频效率的非均匀性, 3ω 光近场不同区域的三倍频效率波动峰谷(PV)值将小于 5%, 三倍频的整体效率降低值将控制在 0.5% 以内。此时, 由于晶体成品的面形畸变主要表现为低频球差, 晶体表面对应的面形畸变 PV 值可以用近似值表示为

$$X_{\text{PV}} = d \times r/2 = 30 \mu\text{rad} \times (0.29/2) \text{ m} \approx 5 \mu\text{m} \quad (6)$$

2.2 晶体准直对面形畸变的要求

如图 3 所示, 晶体准直远场 CCD 位于主放空间滤波器焦点处的中箱体内, 利用晶体表面的反射光原路返回完成晶体的在线准直[图 3(a)]。CCD 口径为 $8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 主放输出透镜焦距 $f = 17.4 \text{ m}$, 则 CCD 视场为

$$F = r_{\text{CCD}}/f = 8/17.4 \approx 460 \mu\text{rad} \quad (7)$$

主放晶体准直远场一倍衍射极限对应的角度为

$$\theta = 2.44 \times \lambda / r = 2.44 \times 1.053 / (0.29 \times \sqrt{2}) \approx 6.3 \mu\text{rad} \quad (8)$$

由于其他元件的面形畸变远小于晶体面形畸变,则可近似认为晶体准直的远场光斑弥散主要来源于晶体面形畸变。如图 3 所示,如果晶体准直光斑占满整个 CCD 视场,有时甚至大于 CCD 视场[图 3(b)],则晶体准直的重复性和精度将无法保证,装置的运行效率将大大下降;为了保证准直的重复性和精度,必须控制远场光斑弥散,远场光斑容许的最大值为视场的一半[图 3(c)],即远场光斑大小的视场为 $230 \mu\text{rad}$,则晶体准直远场光斑大小对应的衍射倍数为 $230/6.3 \approx 38$ 倍衍射极限。再根据实测和拟合的远场光斑焦斑尺寸与波前 PV 的对应关系可知(图 4),38 倍衍射极限大小对应的波前畸变为 18λ 左右。由于晶体准直光为晶体表面的反射光,准直光波前畸变可以近似理解为晶体表面畸变的 2 倍,即晶体表面畸变容许的最大值为 9λ ,大小为 $5.5 \mu\text{m}$ 左右。

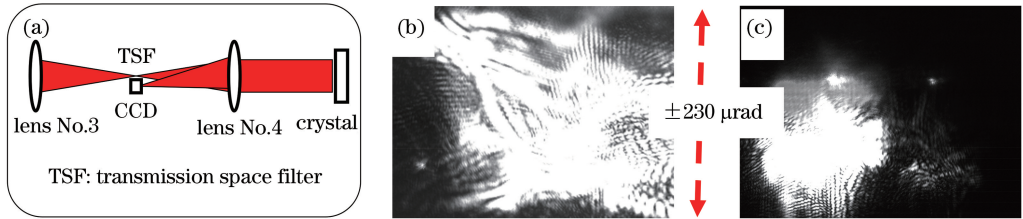


图 3 (a)晶体准直光路图;晶体面形畸变(b)较大(20λ)和(c)较小(3λ)时,实测晶体准直远场 CCD 上的光斑图像
Fig. 3 (a) Crystal alignment beam path; measured crystal alignment focal spots on far-field CCD for the (b) big (20λ) and (c) small (3λ) crystal surface aberrations

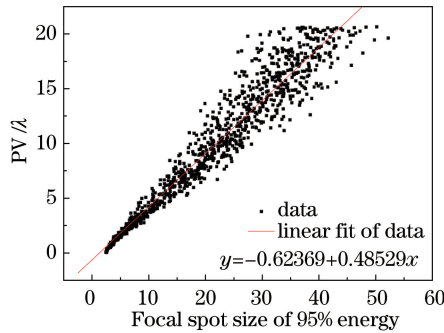


图 4 实测和拟合的激光装置远场光斑 95% 能量集中度的焦斑尺寸与波前 PV 的关系

Fig. 4 Measured and fitted focal spot size of laser device far field spot 95% energy intensity versus wavefront PV

2.3 晶体面形畸变控制要求

从上述分析可知,无论是三倍频效率,还是晶体准直,其对晶体面形畸变的要求基本一致,均为 $5 \mu\text{m}$ 左右。晶体面形畸变包含静态的晶体表面加工面形畸变和动态的晶体装夹应力畸变,动态畸变值应该小于或者等于静态畸变值,这样晶体加工的精度控制才有意义,并且晶体面形畸变才能实现精确控制。因此,必须实现晶体面形总畸变小于 $5 \mu\text{m}$ 和晶体装夹畸变小于加工畸变的两项控制目标。目前,国内外 ICF 装置对晶体表面加工面形畸变控制要求是 5λ ($3.2 \mu\text{m}$),对晶体装夹畸变的要求也如此,这样才能实现晶体面形畸变 $5 \mu\text{m}$ 以内的总控制目标。

3 力学模型及面形畸变控制方法探索

3.1 力学模型

对于 KDP 晶体来说,为了能够在使用过程中获得稳定的定位精度,并便于拆装和运输,需要一个结构框对其提供稳定的定位和支撑。因此,KDP 晶体在使用状态下,其附加面形畸变主要来源于重力和装配夹持力所导致的弹性变形。结构上常用的三点定位适用于被支撑体为刚度较大的情况,而对于大径厚比、刚度很弱的 KDP 晶体来说,三点定位不能有效地抵制重力变形。为了消除重力所导致的光学元件面形变化,应该使光学元件和机械框有尽可能多的接触点,并且装夹应力分布应尽量均匀、对称,才能改善重力所导致的

面形变化,进而减小面形畸变对倍频效率和晶体准直的双重影响。

针对口径为 330 mm×330 mm、厚度为 10 mm 的 KDP 晶体,基于机械夹持的思想,设计了一种低应力新型夹持方法——四周回形全紧固夹持法,其光机装配单元结构如图 5 所示,晶体放置到夹持框内,晶体 B 面与夹持框内的高精度定位平面接触,并通过八个金属压片压紧晶体 A 面(即图中向外的一面),使晶体 B 面与承重面紧密接触。夹持框承重面与晶体表面接触范围为回字形区域,接触宽度为 5 mm;金属压片与晶体之间垫聚四氟乙烯垫,以增加实际接触面积,减少局部应力集中。同时,通过晶体框上四周的胶头螺钉调整晶体的横向位置,将晶体固定在晶体框的中心位置。光机装置单元中各元件的材料及其属性如表 1 所示。

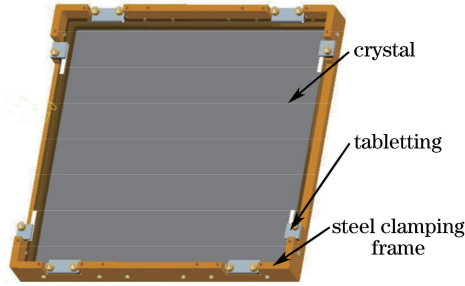


图 5 四周回形全紧固夹持法的晶体光机装配单元结构

Fig. 5 Crystal machine assembly unit of clip-like clamped support all four edges

表 1 材料性能表

Table 1 Material properties

Material type	Modulus of elasticity /MPa	Poisson ratio
2Cr13	2.23×10^5	0.30
Polycarbonate resin	2.35×10^3	0.35
Polytetrafluoroethylene	400	0.50
KDP (KH_2PO_4)	1.96×10^4	0.06

对于各向异性的 KDP 晶体,使用的矩阵计算应力应变关系为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{XX} \\ \sigma_{YY} \\ \sigma_{ZZ} \\ \sigma_{YZ} \\ \sigma_{XZ} \\ \sigma_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{11} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{13} & D_{13} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{XX} \\ \epsilon_{YY} \\ \epsilon_{ZZ} \\ 2\epsilon_{YZ} \\ 2\epsilon_{XZ} \\ 2\epsilon_{XY} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中弹性强度 $D_{11}=71.2, D_{12}=-5.0, D_{13}=14.1, D_{33}=56.8, D_{44}=12.6, D_{66}=6.22$,6 个量的单位为 GPa。XYZ 坐标系代表晶体的材料坐标系,Z 为晶体的光轴方向。

3.2 理想约束条件下面形畸变的挠度分析

由于 KDP 晶体的径厚比超过了 30,因此可以采用近似实用的薄板小挠度理论来求解,其基本方程为

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{R}, \quad (10)$$

$$R = \frac{Et^2}{12(1-\mu^2)}, \quad (11)$$

式中 R 为薄板的弯曲刚度, t 为板厚, E 为弹性模量, μ 为泊松比, q 为载荷集度(包括自身重量和受力)。

对于晶体在晶体框中的装配方式,矩形薄板的四边边界条件假定为固定约束。将固定边界条件代入公式,由矩形薄板的三角解法可得,对于四边固定、自重变形的正方形元件,最大挠度发生在元件中心处。中心处挠度计算公式为

$$\omega_{\max} = (\omega_0 + 2\omega_1)_{x=0,y=0} = (0.00406 - 0.00280) \frac{q_0 a^4}{R} = 0.00126 \frac{q_0 a^4}{R}. \quad (12)$$

3.3 装配有限元模型和加工精度控制

(12)式中,将晶体承重面假设为理想平面,且将边界条件假定为固定约束,与实际的状态存在较大的差距。为了获得更加精确的晶体面形,根据力学模型和挠度分析,建立的晶体光机装配单元的有限元模型如图6所示,模型中各零件的材料及相关属性参数见表1。

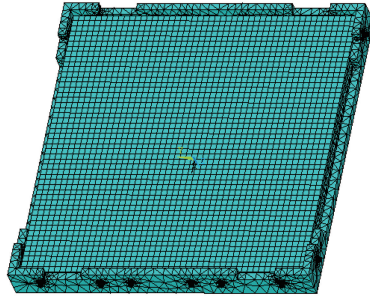


图6 晶体光机装配单元的有限元模型

Fig. 6 Finite element model of crystal machine assembly unit

力学的有限元模型关键点在于:

- 1) 在夹持框的承重面上,采用曲线拟合的方式建立了具有平面度误差的起伏表面;
- 2) 在晶体与夹持框之间、晶体与胶钉之间分别建立接触模型,摩擦系数为0.15;
- 3) 将晶体假设为理想平板。

夹持框的晶体承重面平面度误差是影响晶体装配面形的主要因素之一。由于夹持框承重面由数控加工获得,其表面无法实现镜面反射,不能使用干涉仪检测表面轮廓。为了获得夹持框承重面的轮廓,在研究中采用激光跟踪仪对夹持框四边承重面进行多点密集检测,测出采样点的高度差,拟合得到承重面轮廓。检测使用的FARO激光跟踪仪分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ 。夹持框进行常规粗加工完成后测量得到的承重面轮廓如图7所示。

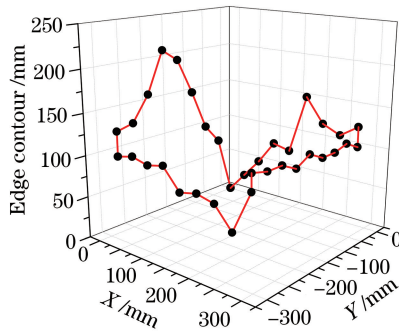


图7 33 cm长的晶体承重面粗加工完成后测量得到的三维图

Fig. 7 3D display of the measured 33 cm crystal bearing surface after rough machining

从图7可见,常规粗加工的平面度非常大,远不能满足晶体精密装校面形畸变的控制要求。因此,在上述检测数据的基础上,对夹持框进行了二次精细加工。然后,通过多次加工→检测→再加工→再检测的重复迭代,最后保证了夹持框平面度小于 $5\ \mu\text{m}$ 。

3.4 有限元分析结果

限制压条沿晶体平面的二维平移自由度,只留法向自由度,并在法向上施加 $0.04\ \text{MPa}$ 的压强,忽略重力,计算得到晶体的变形云图如图8所示。

根据图8的计算结果,以及有限元模型和加工精度控制结果,在夹持框承重面面形畸变的作用下,晶体最大变形为 $2.98\ \mu\text{m}$,最大变形位于晶体的四角。这是因为建立模型时,四个支撑边均为中心高、两端低的形状,在下压的夹持力作用下,晶体的变形与支撑边面形吻合。在重力存在的情况下,若晶体水平放置,则晶体的最大变形为 $4.735\ \mu\text{m}$,但是晶体中心点的变形仅为 $3.5\ \mu\text{m}$ 。考查晶体 $300\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ 通光口径内的变形情况,只考虑夹持框承重面面形畸变时,晶体最大变形约为 $2.5\ \mu\text{m}$,最大变形位于晶体的四角。同时考虑重力作用,当晶体处于水平放置姿态时,晶体的最大变形约为 $4.0\ \mu\text{m}$,而中心点的变形仅为 $3.5\ \mu\text{m}$ 。

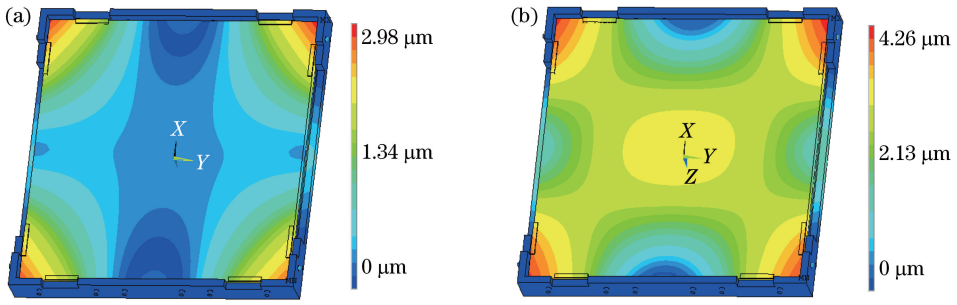


图 8 晶体框夹持总体静力位移轮廓图。(a)误差平面无重力;(b)误差平面有重力

Fig. 8 Contour plot of the crystal clamping total static displacements. (a) Error plane without gravity; (b) error plane with gravity

4 实验验证及分析

4.1 光机装配面形检测实验

使用 Zygo 干涉仪检测晶体光机装配前后的面形,干涉仪型号为 GPI-XP/D,精度为 $1/10\lambda$,测量面形最小分辨周期为 0.65 mm 。使用干涉仪测量自由状态下晶体的面形,即晶体垂直放置在夹持框内,B面与夹持框承重面接触,不施加夹持力。检测结果如图 9 所示,A面反射波前为 15.493λ ,B面反射波前为 13.013λ 。由于波前畸变是面形畸变的两倍,计算得到自由状态下晶体 A 面 PV 值为 $4.902\ \mu\text{m}$,B 面 PV 值为 $4.117\ \mu\text{m}$ 。

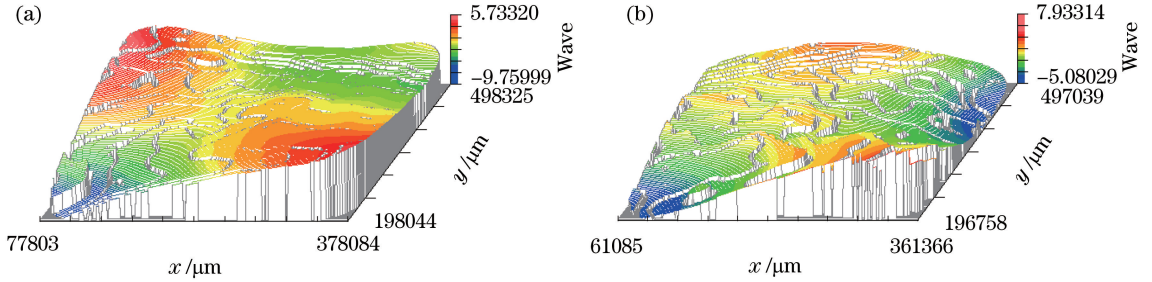


图 9 自由状态下的晶体波前测量分布。(a) A 面 15.493λ ;(b) B 面 13.013λ

Fig. 9 Crystal wavefront measured values at free condition. (a) 15.493λ on side A; (b) 13.013λ on side B

晶体光机单元装配完成后,当晶体处于垂直工作姿态时,B面与夹持框承重面接触,使用力矩扳手施加夹持力。使用干涉仪再次测量晶体的上框面形,检测结果如图 10 所示,A面反射波前为 15.340λ ,B面反射波前为 15.678λ ,计算得到晶体 A 面面形畸变为 $4.854\ \mu\text{m}$,B 面面形畸变为 $4.961\ \mu\text{m}$ 。

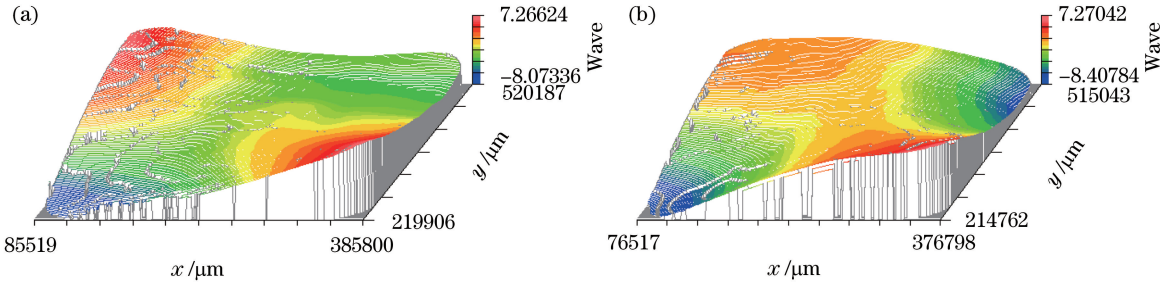


图 10 光机精密装配完成后的晶体波前测量分布。(a) A 面 15.340λ ;(b) B 面 15.678λ

Fig. 10 Crystal wavefront measured values after precision mounts. (a) 15.340λ on side A; (b) 15.678λ on side B

4.2 结果分析与讨论

对比控制目标和实验结果,进行分析与讨论。

1) 由于晶体的 B 面与夹持框承重面接触,因此以 B 面为研究对象。如图 8 所示,有限元仿真得到晶体

夹持所导致的面形畸变 $e_1 = 2.5 \mu\text{m}$, 图 9 所示实验得到的晶体自由状态 B 面面形畸变为 $e_2 = 4.12 \mu\text{m}$ 。计算得到实际晶体夹持后的理论面形畸变应该为

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} \quad (13)$$

图 10 所示的夹持状态下测量得到的 B 面面形畸变为 $4.96 \mu\text{m}$, 两者误差在 5% 以内, 吻合较好, 说明采用该有限元模型分析晶体夹持面形变化是正确的; 同时夹持框的平面度误差在 $5 \mu\text{m}$ 以内, 基本能够满足晶体夹持面形的要求。如果承重面的精度更高, 则得到的面形变化更小。

2) 从图 5、9 和 10 可以看出, 自由状态下晶体 A 面和 B 面的面形畸变不同, 由于晶体夹持中以 B 面为定位基准, 并且 B 面畸变小于 A 面畸变, 因此夹持后矫正了部分 A 面的面形畸变, A 面面形畸变在夹持后反而有所减小。

5 结 论

为了减小面形畸变对倍频效率和晶体准直的双重影响, 以控制大径厚比 KDP 晶体装配后的面形畸变为目标, 从光学和力学双模型出发, 分析了面形畸变过大的严重后果, 设计了一种低应力新型夹持方法——四周回形全紧固夹持法, 并采用有限元计算和实验两种手段, 对该方法的面形畸变控制效果进行了理论分析和实验验证。验证结果表明, 当夹持框承重面平面度小于 $5 \mu\text{m}$ 时, 理想平面晶体的机械夹持附加面形小于 $2.5 \mu\text{m}$, 而对于加工后初始平面度为 $4.12 \mu\text{m}$ 的晶体, 夹持后的面形小于 $5 \mu\text{m}$, 上述数据的实验结果与有限元分析结果基本吻合。由此表明, 所探索的 KDP 晶体低应力新型夹持方法, 能够满足大口径超薄晶体的面形畸变控制要求, 可以应用到我国正在建设的 ICF 装置中, 并为 ICF 装置的高效谐波转换和装置的高效率运行奠定良好基础。

参 考 文 献

- [1] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National Ignition Facility laser performance status[J]. Appl Opt, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [2] Fleurot N, Cavailler C, Bourgade J L. The laser megajoule (LMJ) project dedicate to inertial confinement fusion: Development and construction status[J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 74(1): 147-154.
- [3] Zhu Q, Zheng W, Wei X, *et al.* Research and construction progress of SG-III laser facility[C]. Proc SPIE, 2013, 8786: 87861G.
- [4] Barker C E, Auerbach J M, Adam C H, *et al.* National Ignition Facility frequency converter development[C]. Proc SPIE, 1997, 3047: 197-202.
- [5] Auerbach J M, Barker C E, Couture S A, *et al.* Modeling of frequency doubling and tripling with converter refractive index spatial non-uniformities due to gravitational sag[C]. Proc SPIE, 1999, 3492: 472-479.
- [6] Hibbard R L. Design of precision mounts for optimizing the conversion efficiency of KDP crystals for the National Ignition Facility[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, CA (United States), 1998.
- [7] Auerbach J M, Milam D, Barker C E, *et al.* Frequency conversion modeling[J]. Foreword iii WARP3d, a Three-Dimensional PIC Code for High-Current 129 Ion-Beam Propagation Developed for Heavy-Ion Fusion, 1996.