

大口径 KDP 晶体夹持方式对面形的影响

曹庭分 熊 召 徐 旭 倪 卫 袁晓东

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 对大口径 KDP 晶体的夹持方式以及夹持对面形的影响进行了研究。利用 ANSYS 建立 KDP 晶体侧面和正面夹持的有限元模型。研究了侧面均布荷载、侧面均匀及非均匀两点荷载作用时 KDP 晶体面形, 得出了总荷载大小是影响晶体面形的关键因素。讨论了理想状态和实际状态下 KDP 晶体正面夹持面形, 得出了元件表面平面度是影响晶体夹持面形主要因素。通过分析和计算, 找到了降低元件平面加工精度对晶体正面夹持面形影响的理论技术方案。

关键词 材料; 面形; 有限元模型; 加工误差

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.081404

Mounting Ways and Surface Figure of Large-Aperture KDP Crystal

Cao Tingfen Xiong Zhao Xu Xu Ni Wei Yuan Xiaodong

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

Abstract The research of clamping modes to large aperture KDP crystal and influence on surface figure by different clamping modes are done. Utilizing ANSYS the finite element model to simulate the obverse clamping and the flank clamping of KDP crystal, has been founded. KDP surface figure acted by flankly distributed load, equal flank two-point load and unequal two-point load is researched, and the conclusion shows that the whole load amount is a key factor to surface figure. KDP surface figures both in ideal state and in actual state have been discussed, and the conclusion that artifactitious errors for obverse clamp are a key factor has been obtained. The theoretical project has been acquired to minish the effect on artifactitious errors.

Key words materials; surface figure; finite element method; artifactitious errors

OCIS codes 140.3380; 350.5030; 190.4360

1 引言

在惯性约束核聚变(ICF)驱动器中, 高强度、大口径的高效三倍频技术是衡量驱动器总体技术指标的一个重要方面, KDP 晶体作为关键光学元件在满足频率转换要求方面扮演着重要角色^[1]。要想实现高效频率转换的前提是保持良好的面形, 否则会增大相位失配, 从而降低转换效率^[2,3]。KDP 晶体的口径较大, 而厚度较小, 并且弹性模量较小, 容易变形。在精密装校环节中, 为了严格控制 KDP 晶体面形形变, 世界上各 ICF 实验室均提出了相应的晶体夹持方案。美国国家点火装置(NIF)提出了四角支撑、四边简支和四边固定支撑等夹持方式, 并对各个夹持方式进行了倍频效率的分析^[4]; 法国 LMJ 系统也提出了用于优化三倍频转换效率的粘胶方式^[5]。除此之外, 其他光学系统中的大口径光学元件装校面形控制方式也是可以借鉴和学习的^[6~11]。

为了保证晶体夹持安全, 我们最初采用粘胶方式, 即将晶体四周用胶粘在晶体框上, 避免晶体的晃动。但是, 由于胶体在干燥后产生了较大的形变, 对晶体的拉力较大, 而且拉力大小不均匀并很难控制, 因此晶体

收稿日期: 2011-03-01; **收到修改稿日期**: 2011-03-18; **网络出版日期**: 2011-07-21

作者简介: 曹庭分(1977—), 男, 硕士, 主要从事大口径光学元件精密装校面形控制技术方面的研究。

E-mail: caotingfen1977@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)

粘胶后的面形很难保证。为了减小夹持对 KDP 晶体面形的影响,使夹持前后面形畸变小于 $2\ \mu\text{m}$,在对以前工作总结的基础上本文提出了侧面多点夹持配合正面三点低应力夹持的技术方案。侧面多点夹持可以保持晶体的稳定性。正面三点夹持一方面用来保持晶体的稳定性,另一方面用来减小晶体倾斜放置时重力对面形的影响。

2 KDP 晶体材料属性及有限元模型建立说明

KDP 晶体的尺寸为 $330\ \text{mm} \times 330\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$,定义晶体的应力张量 σ_{ij} ,应变张量 ϵ_{ij} 和弹性张量 c_{ij} 来描述 KDP 晶体的各向异性(胡克定律):

$$\begin{pmatrix} \sigma_{XX} \\ \sigma_{YY} \\ \sigma_{ZZ} \\ \sigma_{YX} \\ \sigma_{XZ} \\ \sigma_{XY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{XX} \\ \epsilon_{YY} \\ \epsilon_{ZZ} \\ 2\epsilon_{YZ} \\ 2\epsilon_{XZ} \\ 2\epsilon_{XY} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 XYZ 坐标系为晶体的材料坐标系,Z 代表 KDP 晶体光轴方向。

KDP 晶体密度为: $\rho = 2340\ \text{kg}/\text{m}^3$,弹性强度为: $c_{11} = 71.2\ \text{GPa}$, $c_{12} = -5.0\ \text{GPa}$, $c_{13} = 14.1\ \text{GPa}$, $c_{33} = 56.8\ \text{GPa}$, $c_{44} = 12.6\ \text{GPa}$, $c_{66} = 6.22\ \text{GPa}$ 。

KDP 晶体在机械框中的装配如图 1 所示。晶体搁置在机械框内侧 $10\ \text{mm}$ 宽的支撑面上。固定在框体侧面螺孔内的胶钉对晶体实施侧面夹持,固定在框体底座上的弹性压片对晶体实施正面夹持。在 ANSYS 建模时,为了简化,只建立 KDP 晶体模型,机械框、侧面胶钉和正面压片通过约束方式和荷载大小将它们的作用反映出来。同时,由于只研究夹持对面形的影响,本文的计算没有计入重力的因素。KDP 晶体按理论尺寸建模,不考虑实际状态中表面的微小起伏。计算结果反映夹持前后晶体面形的改变量。单元类型选取 SOLID45。由于晶体的厚度较小,在厚度方向网格划分较密。

3 KDP 晶体侧面多点夹持的关键影响因素

3.1 侧面均布荷载作用时的计算结果

为了考察不同荷载形式对面形的影响,先分析均布荷载的情形。选择 KDP 晶体的两个对边进行约束和加载(四边受力结果可由此叠加获得)。约束方式为简支,具体如图 2 所示。

图 3 是均布荷载为 $1\ \text{N}/\text{cm}$ 作用时的晶体面形图,图中中部红色区域为凸起部分,最大凸起值为 $0.871\ \mu\text{m}$ 。从中心向两侧面形变化逐渐减小,至边缘达到最小,即图中蓝色部分。改变荷载的大小,分别计算了荷载为 $1, 1.5, 2\ \text{N}/\text{cm}$ 时的形变量,对表面形变的峰谷(PV)值进行了统计,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,晶体面形 PV 值与荷载成正比例关系。要控制晶体面形,必须控制侧面夹持力的大小。

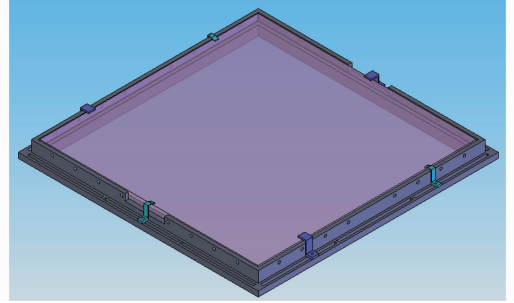


图 1 KDP 晶体装配图

Fig. 1 Mounting figure of KDP crystal

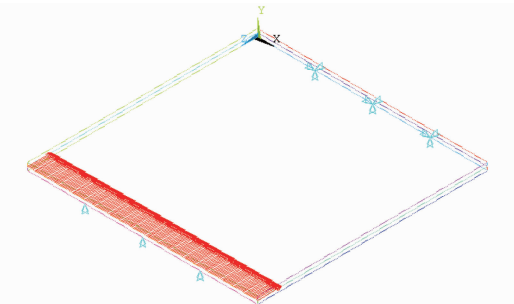


图 2 侧面均布荷载夹持时的约束和荷载图

Fig. 2 Restriction and load figure mounting by distributed load on side face

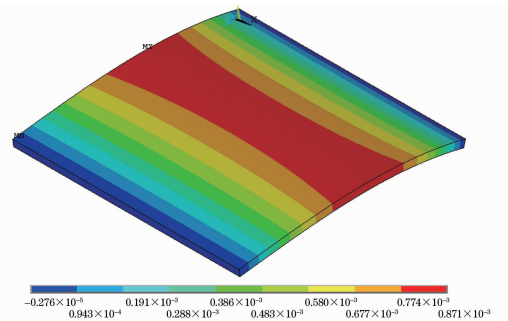


图 3 侧面均布荷载夹持时的晶体面形图

Fig. 3 Crystal surface figure mounting by distributed load on side face

按照晶体面形的控制要求,侧面夹持力不得大于 2 N/cm。

3.2 侧面点荷载作用时的计算结果

侧面两点荷载均匀分布作用的约束方式与 3.1 节一致,点荷载对称分布。当总荷载为 30 N 时,晶体面形变化计算结果如图 5 所示。

与均布线荷载类似,图 5 中中部红色区域为凸起部分,最大凸起值为 $0.787 \mu\text{m}$ 。由于两者的变化数值相当,形态一致,因此可以得出结论:在保持荷载大小不变时,荷载形式由均匀线分布变为均匀两点分布对晶体面形变化产生的影响不大。点荷载的大小与晶体面形之间成正比例变化关系,两点总荷载大小应控制在 60 N 以内。

进一步研究两点荷载由均匀分布变为非均匀分布,可以得到如下结论:两点荷载由均匀分布变为非均匀分布对晶体面形基本没有影响。

4 KDP 晶体正面三点低应力夹持的实现

4.1 理想状态下 KDP 晶体正面夹持后的面形

假设 KDP 晶体通光面(即大面)和机械框支撑面平面度加工误差均为零,为绝对平面,此理想状态下,装校时晶体与晶体框的支撑面处完全贴合。以此建立了 KDP 晶体在支撑面处完全约束模型。对晶体的正面均匀地取点夹持,单点夹持力为 50 N。经计算得出,在施加夹持力处,晶体表面向下最大凹陷了 $0.41 \mu\text{m}$;在中心区域,晶体表面向上凸起,最大值为 $0.13 \mu\text{m}$,如图 6 所示。这些形变量在允许的范围内。

保持约束和夹持力大小不变,在支撑区域内改变夹持点位置,计算结果改变很小,晶体形变量在允许的范围内。由此可得出结论:理想状态下 KDP 晶体夹持后面形符合要求,并且面形改变与夹持点位置无关。

4.2 实际晶体与晶体框的正面接触与夹持

实际晶体和机械框由于加工精度的原因,晶体表面和框体支撑面均存在高低起伏,那么,装校时二者不会像理想状态那样处处完全贴合,存在着接触区域和非接触区域。如图 7 中所示,图中红色圆圈表示接触区域。

从理想状态下 KDP 晶体夹持后的面形计算结果可以得到启发:对于实际的情形,如果将正面夹持力作用在接触区域,那么夹持力对晶体面形的影响和理想状态时一致。基于这种想法,建立了 KDP 晶体与机械框接触区域内施加约束和夹持力、非接触区域无约束和荷载的有限元模型。计算结果表明,在夹持区域,晶体表面向下最大凹陷了 $0.78 \mu\text{m}$;在中心区域,晶体表面向上凸起,最大值为 $0.406 \mu\text{m}$,如图 8 所示。这些形变量在允许的范围内。

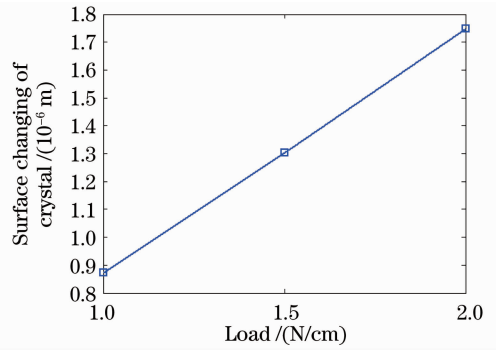


图 4 荷载与晶体面形变化关系图

Fig. 4 Relation figure between load and surface changing of crystal

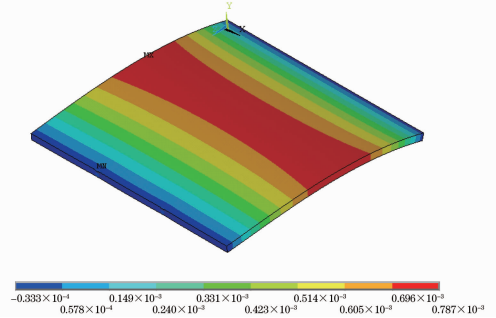


图 5 侧面两点荷载均匀分布作用时的面形变化图

Fig. 5 Surface changing figure mounting by equal two-point load on side face

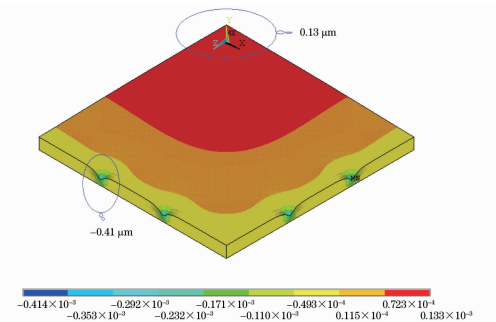


图 6 理想状态下夹持后的晶体形变图(1/4 晶体模型)

Fig. 6 Crystal surface changing figure mounted under ideal conditions (1/4 crystal model)

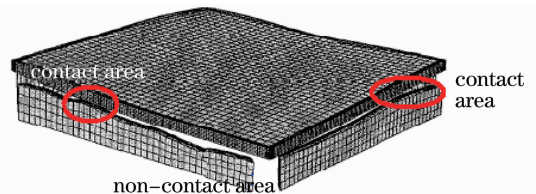


图 7 晶体与机械框接触微观放大图

Fig. 7 Microcosm enlargement figure of touching between crystal and mechanism frame

反之,如果夹持力作用在非接触区域内,经过 ANSYS 模拟计算,对于机械框支撑面平面度较差的情形,夹持力产生的弯曲作用将使晶体发生 $10\ \mu\text{m}$ 以上的变形,这已经超出了允许的范围。

从上面的论述中可知,在机械框支撑面平面度无法保证时,KDP 晶体低应力夹持的实现取决于夹持点的位置。由于晶体表面和机械框支撑面形态各异,不同晶体与晶体框的接触区域肯定各异。因此机械框的设计应尽可能多地提供可供选择的正面夹持点位置。

4.3 正面夹持对重力引起的晶体形变的抑制

实际应用中 KDP 晶体呈 45° 倾斜放置,重力的作用使晶体面形向下凹陷,使相位失配,带来不利影响。从图 8 可以看出,正面点夹持将使晶体中心区域向上凸起,这一作用正好可以减小重力引起的凹陷,因此正面夹持具有对重力引起的晶体形变的抑制作用。

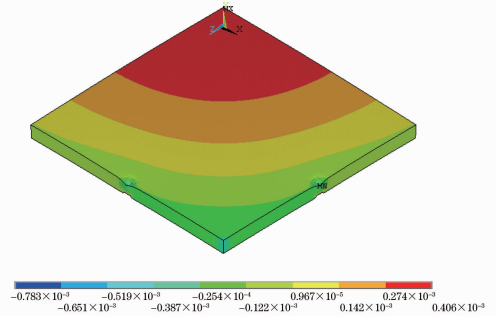


图 8 夹持力作用在接触区域时晶体形变图
(1/4 晶体模型)

Fig. 8 Crystal surface changing figure clamped by force in tangency zone (1/4 crystal model)

5 结 论

对于侧面均布荷载作用,KDP 晶体面形变化与荷载成正比例关系。要控制晶体面形,必须控制侧面夹持力的大小。按照晶体面形的控制要求,侧面夹持力不得大于 $2\ \text{N/cm}$ 。对于侧面点荷载作用,点荷载的形式和作用位置的改变对晶体面形产生的影响可以忽略,晶体面形的变化仅仅取决于点荷载的大小,总荷载大小应控制在 $60\ \text{N}$ 以内。

对于正面三点夹持方式,在元件平面度加工精度无法保证时,晶体面形的改变主要由夹持力与接触区域的位置关系决定。夹持力作用在接触区域内,引起的晶体面形改变在允许的范围。夹持力作用在非接触区域时,可能会引起 $10\ \mu\text{m}$ 以上的晶体面形改变。因此,将正面夹持力置于接触区域内是十分必要的。

参 考 文 献

- 1 Du Xiangwan. Factors influencing key characteristic quantity of high energy laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(5): 945~947
杜祥琬. 影响高能激光系统核心特征量的要素[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(5): 945~947
- 2 J. M. Auerbach, D. Eimerl, D. Milam *et al.*. Perturbation theory for electric field amplitude and phase ripple transfer in frequency doubling and tripling[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3): 606~612
- 3 P. W. Milonni, J. M. Auerbach, D. Eimerl. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams [C]. *SPIE*, 1997, **2622**: 230~241
- 4 J. M. Auerbach, D. Milam, C. E. Barker *et al.*. Frequency conversion modeling[R]. UCRL-LR-105821-9604, 1996, 199~206
- 5 Olivier Lubin, Claude Guedard. Modeling of the effects of KDP crystals gravity sag on third harmonic generation[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 802~808
- 6 Feng Shulong, Zhang Xin, Weng Zhicheng *et al.*. Study on support way of large aperture mirror with flat rear surface[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(6): 679~681
冯树龙, 张 新, 翁志成 等. 大口径平背形主镜支撑方式的选择[J]. *光学技术*, 2004, **30**(6): 679~681
- 7 Alson E. Hat heway. Mountings for a four meter glass mirror[C]. *SPIE*, 1990, **1303**: 142~147
- 8 B. C. Bigelow. Finite element analysis of large lenses for the Keck telescope high resolution echelle spect rograph[C]. *SPIE*, 1991, **1532**: 15~26
- 9 Jin Shengzhen, Wang Sen, Yang Shimo. Recent advances in the project of space solar telescope[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2000, **20**(s1): 8~15
- 10 Jin Shengzhen, Wang Sen, Yang Shimo *et al.*. Recent progress in the project of space solar telescope[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2002, **22**(z1): 21~28
- 11 Robinson D. W.. Minimizing gravity sag of a large mirror with an in-verted hindle-mount [C]. *SPIE*, 2000, **4093**: 142~150