

机械夹持状态下 KDP 晶体的热应力

苏瑞峰, 黄湛*, 朱明智, 汪宝旭, 吴文凯

中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 从机械结构角度对机械夹持状态下吸收了高能激光束能量的磷酸二氢钾(KDP)晶体内部产生热应力的问题进行了研究。理论分析了 KDP 晶体吸收激光能量引起的温升,研究了机械夹持状态下 KDP 晶体内部热应力的生成机理。采用有限元方法对 KDP 晶体的温度分布和热应力分布进行了仿真计算,分析了夹持装置结构参数、预紧力、摩擦系数和弹性模量对热应力的影响。结果表明,夹持装置对 KDP 晶体的机械夹持作用是 KDP 晶体内部产生热应力的重要因素,热应力的大小与夹持装置的结构参数有关。

关键词 激光技术; 固体激光器; 热应力; 光机结构; KDP 晶体

中图分类号 TH122 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1214001

Thermal Stress of Mechanically Mounted KDP Crystals

Su Ruifeng, Huang Zhan, Zhu Mingzhi, Wang Baoxu, Wu Wenkai

Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract From the perspective of mechanical structures, the problem of the thermal stress within the mechanically mounted KDP crystals after the energy absorption from a high-energy laser beam is studied. The temperature rise within KDP crystals induced by the laser energy absorption is theoretically analyzed, and the generation mechanism of the thermal stress within the mechanically mounted KDP crystal is investigated. By the finite element method, the temperature distribution and the thermal stress distribution in KDP crystals are simulated, and the effects of the structural parameters of the mounting set, the preforce, the friction coefficient, and the elastic modulus on the thermal stress are investigated. The results show that the mechanical mounting action provided by the mounting set is a major factor which causes the thermal stress within KDP crystals, and the thermal stress value is associated with the structural parameters of the mounting set.

Key words laser technique; solid-state lasers; thermal stress; opto-mechanical structure; KDP crystal

OCIS codes 140.3580; 140.6810; 350.4600

1 引 言

高能激光束的二次谐波转换是惯性约束聚变(ICF)领域的研究热点,通常采用一块大口径磷酸二氢钾(KDP)晶体实现^[1-2]。高能激光束在 KDP 晶体内部传播时,KDP 晶体吸收激光束的能量^[3],温度升高,产生热应力,最终对二次谐波转换产生不利影响。

类似于 ICF 装置中的 KDP 晶体,其他广泛应用于空间相机^[4]、光谱成像仪^[5]、大口径望远镜^[6]和固体激光器^[7]等大型科学仪器和设备中的光学元件,同样面临热应力和热变形等热问题。科研人员对这些热问题进行了广泛和深入的研究,研究成果可为解决 KDP 晶体的热应力问题提供思路和方法。光学元件的热应力和热变形主要由温度变化造成,当环境温度变化时,光学元件的支撑部件受温度影响而发生形变,由此导致光学元件变形,产生应力^[8-9]。此外,环境温度经支撑部件传导至光学元件,会引起光学元件自身温度的变化;而支撑部件对光学元件施加了位移约束,光学元件的热膨胀或收缩受到限制不能自由发生,导致光学

收稿日期: 2017-06-29; **收到修改稿日期:** 2017-07-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA804217)

作者简介: 苏瑞峰(1984—),男,博士,工程师,主要从事惯性约束聚变装置中光机结构设计方面的研究。

E-mail: ruifsu@alu.hit.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: hzcaep@163.com

元件产生变形和应力^[10]。

一般从温度控制、机械结构设计和光学补偿三个方面解决上述热问题。在温度控制方面,可采用气体或液体冷却的方式对光学元件进行冷却^[6,11];也可采取相应的隔热设计^[12-13],以减少传导至光学元件的热量。在机械结构设计方面,主要的做法是针对影响热问题的关键因素进行相应的结构设计。大多数情况下,光学元件的变形和应力的产生主要由支撑部件的变形引起。针对这种情况,通常的做法是对关键支撑部件进行有针对性的设计和改进^[14-15]。同时,也可将支撑部件设计为柔性结构形式^[16],或采用低热膨胀系数的材料制作支撑部件^[17-18]。此外,变形的光学元件与支撑部件及胶胶的不匹配也是光学元件产生应力的重要原因。针对这种情况,应选择与光学元件热膨胀系数相匹配的材料制作支撑部件^[9,19]及粘胶^[20]。在光学补偿方面,主要的方法是进行相应的光学设计,以对变形和应力所影响的光学性能进行补偿。在光学系统中增加一块光学元件,通过调节这块光学元件的位置^[21]和折射率^[22],可以达到调节光学系统整体光学性能的目的。更进一步,可设计由多块光学元件组成的光学消热差系统^[23-24],用以补偿受到影响的光学性能。

本文针对机械夹持状态下的 KDP 晶体,从机械结构角度入手,研究了吸收激光束能量的 KDP 晶体产生热应力的问题。首先,对 KDP 晶体的吸热升温过程进行了分析,采用理论公式计算了 KDP 晶体吸收激光束能量引起的温升。其次,从机械结构角度入手,研究了夹持状态下 KDP 晶体热应力的生成机理,根据弹性力学理论分析了机械夹持作用下 KDP 晶体温升导致的热应力;同时,采用有限元方法对 KDP 晶体的温升和热应力进行了仿真计算。最后,分析了夹持装置结构参数对热应力的影响,得出热应力随结构参数的变化规律。研究结果表明,夹持装置对 KDP 晶体的夹持作用是产生热应力的重要因素,夹持装置的结构参数对热应力有重要影响。

2 KDP 晶体夹持装置

激光束的二次谐波转换由 KDP 晶体实现,如图 1 所示。激光束为平面波,沿 $-Z$ 方向传播,垂直入射于 KDP 晶体表面,并在 KDP 晶体的内部传播。激光束的口径为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,KDP 晶体的尺寸为 $430\text{ mm} \times 430\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,激光束在 KDP 晶体内部 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的区域内传播,将这一区域称为通光区域。为了实现 KDP 晶体在整体光路中的安装和定位,采用夹持装置对 KDP 晶体进行夹持,如图 1 所示,由于夹持装置关于 YZ 平面对称,故只显示了一半结构。夹持装置主要包括支撑框、定位板、胶钉、压片、施载螺钉和连接螺钉等零件。支撑框为窗口形结构,与 KDP 晶体下表面四周的边缘部分接触,以此实现对 KDP 晶体 Z 方向的支撑和定位。压片分布于 KDP 晶体上表面四周的边缘部分,压片通过施载螺钉连接于定位板。当施载螺钉被拧紧时,压片被压缩,进而对 KDP 晶体产生力的作用,该作用力被称为预紧力。预紧力均匀分布于压片与 KDP 晶体间的接触区域,沿 $-Z$ 方向挤压 KDP 晶体,以此实现 KDP 晶体 Z 方向的固定。定位板分布于 KDP 晶体的四侧,通过连接螺钉与支撑框固定连接。定位板横向方向开有胶钉安装孔,胶钉穿过安装孔,与 KDP 晶体的侧面接触,并在侧面对 KDP 晶体施加位移约束,以此实现对 KDP 晶体 X 和 Y 方向的位移约束。为了便于控制温度,将 KDP 晶体和周围环境的温度设置为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了减小对 KDP 晶体的损伤,KDP 晶体的工作环境保持真空,以保证工作环境的高洁净度。

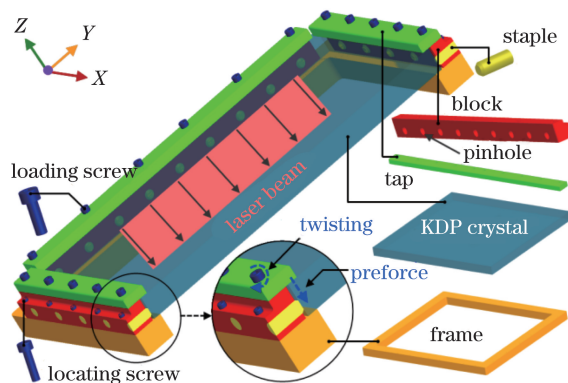


图 1 KDP 晶体夹持装置示意图

Fig. 1 Schematic of mounting set of KDP crystal

3 基本原理

高能激光束在 KDP 晶体内部传播时, KDP 晶体吸收激光束的部分能量, 引起自身温度的升高。温度升高后, KDP 晶体产生热膨胀趋势。由于夹持装置的机械夹持作用, KDP 晶体不能自由发生热膨胀, 由此导致 KDP 晶体内部产生热应力。该过程主要包括 KDP 晶体吸热升温 and 热应力生成两部分。需要说明的是, 所研究的激光束为单脉冲激光, 而且脉冲间隔时间较长(约 1 h), 因此只考虑 KDP 晶体吸收激光束单次脉冲能量的情况。

3.1 KDP 晶体吸热升温

高能激光束在 KDP 晶体内部传播时, KDP 晶体吸收激光束的部分能量, 转换为自身的热量。由于能量吸收过程的时间较短, 忽略能量吸收过程中的热传导、热对流和热辐射效应。假设 KDP 晶体吸收的能量全部转换为热量, 则热量^[25]为

$$\begin{cases} Q = Q_0 \times \alpha \times l \\ Q_0 = P_0 \times \tau \\ P_0 = I_0 \times A \end{cases}, \quad (1)$$

式中 Q 为 KDP 晶体生成的热量; Q_0 、 P_0 、 $I_0 = 2 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $\tau = 3 \text{ ns}$ 分别为激光束基频光的能量、功率、光强和脉宽; $\alpha = 0.043 \text{ cm}^{-1}$ 为 KDP 晶体对基频光的线性吸收系数; $l = 12 \text{ mm}$ 为 KDP 晶体的厚度, 即通光区域在 Z 方向的尺寸; $A = 1.6 \times 10^3 \text{ cm}^2$ 为 KDP 晶体表面被激光束辐照的面积, 即通光区域在 XY 平面内的横截面积。

KDP 晶体吸收基频光能量的同时, 也吸收二倍频光的能量。但 KDP 晶体对二倍频光的线性吸收系数较小 (0.009 cm^{-1}), 而且生成二倍频光的能量也较小。在这种情况下, KDP 晶体吸收二倍频光的能量较少, 由此转化为 KDP 晶体自身热量的部分也较少。故忽略 KDP 晶体对二倍频光的吸收, 只考虑对基频光的吸收。

KDP 晶体内部生成的热量引起晶体自身温度升高, 升温过程为瞬态过程, 即温度在能量吸收过程中逐渐上升, 最终达到最高温度。只考虑 KDP 晶体吸收激光束能量后的最终温升, 因此忽略温升的瞬态效应, 只求解温升的稳态解, 即最终温升。假设 KDP 晶体产生的热量全部用于温升, 则最终温升值^[26]为

$$\Delta t = \frac{Q}{c_h \times m}, \quad (2)$$

式中 Δt 为 KDP 晶体通光区域内的最终温升, $c_h = 981.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为 KDP 晶体的比热容, m 为 KDP 晶体在通光区域的质量。

需要说明的是, 光强在光束口径内均匀分布, 因此 KDP 晶体在通光区域内生成的热量也均匀分布, 由此导致通光区域内的温升均匀分布, 即通光区域内不同位置和方向的温升值相同。此外, 由于激光束只在 KDP 晶体的通光区域内传播, 因此只有通光区域吸收激光束的能量而升温, 通光区域外的四周边缘区域保持初始温度不变。

3.2 热应力生成

吸热升温过程结束后, KDP 晶体通光区域的温度升高, 边缘区域保持初始温度不变。理论上, 热量将由通光区域向边缘区域传递, 最终在两个区域内达到平衡, 使两个区域的温度保持一致。由于 KDP 晶体的导热系数较小, 热量的传递速率小, 因此 KDP 晶体达到热平衡所需的时间较长。在此时间内, 通光区域的温度高, 边缘区域的温度低, 造成通光区域和边缘区域之间的温差。在温差作用下, KDP 晶体产生热膨胀趋势, 即由中心向四周扩张的趋势。由于夹持装置对 KDP 晶体的夹持作用, KDP 晶体的热膨胀趋势受到抑制而不能自由发生, 导致 KDP 晶体内部产生应力。对热膨胀趋势的抑制作用来自于夹持装置, 主要包括支撑框对 KDP 晶体的摩擦作用、压片对 KDP 晶体的挤压作用和胶钉对 KDP 晶体的位移约束作用。KDP 晶体内部生成的应力由温度引起, 故称之为热应力, 可根据弹性力学知识对热应力进行求解^[27], 即

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f_{xx} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + f_{yy} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_{zz} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 σ_{ij} 为应力, 下标 xx, yy, zz, xy, xz 和 yz 分别表示 X, Y, Z, XY, XZ 和 YZ 方向, f_{ij} 为约束力。应变和形变的关系为

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \epsilon_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \epsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \epsilon_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 ϵ_{ij} 为应变, u, v 和 w 分别表示 X, Y 和 Z 方向的位移大小, 位移主要由热膨胀趋势引起。考虑温升时, 应变和应力的关系为

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = \frac{1}{E}[\sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \gamma_{xx} \Delta t_{xx} \\ \epsilon_{yy} = \frac{1}{E}[\sigma_{yy} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] + \gamma_{yy} \Delta t_{yy} \\ \epsilon_{zz} = \frac{1}{E}[\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \gamma_{zz} \Delta t_{zz} \\ \epsilon_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \sigma_{yz} \\ \epsilon_{xz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \sigma_{xz} \\ \epsilon_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \sigma_{xy} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 γ_{ij} 为 KDP 晶体的热膨胀系数; Δt_{ij} 为各个方向的温差, 由于通光区域内的温升分布均匀, 因此它们的数值相等, 都等于通光区域内的温升值 Δt ; E 和 μ 分别为 KDP 晶体的弹性模量和泊松比。KDP 晶体为各向异性材料, 应力和应变间的关系^[28]可表示为

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{11} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{13} & D_{13} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ 2\epsilon_{yz} \\ 2\epsilon_{xz} \\ 2\epsilon_{xy} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中 $D_{11} = 71.2$ GPa, $D_{12} = -5.0$ GPa, $D_{13} = 14.1$ GPa, $D_{33} = 56.8$ GPa, $D_{44} = 12.6$ GPa, $D_{66} = 6.22$ GPa。

3.3 有限元法求解热应力

理论上, 联立求解(1)~(6)式即可得出 KDP 晶体吸收激光束能量产生的热应力。但夹持装置的结构复杂, 而且支撑框、压片和胶钉等分别对 KDP 晶体施加摩擦、挤压和位移约束等作用, 导致用于解析求解的理论公式和边界条件较难获得。为此, 采用有限元方法对热应力进行数值求解。在求解过程中, KDP 晶体和夹持装置构成的整体求解域被分解为有限个节点和单元。先对节点和单元进行求解, 最后再对节点和单元的解进行综合以得出整体求解域的解。对节点和单元进行求解时, 只需考虑节点处的理论公式和局部边界条件, 避免了整体求解域理论公式和边界条件较难获得的问题。

采用有限元软件 ANSYS 对 KDP 晶体夹持装置进行有限元建模和分析, 有限元模型如图 2 所示, 模型关于 YZ 平面对称, 只显示了模型的一半。有限元模型主要包括 KDP 晶体、支撑框、压片、定位板和胶

钉等零件,这些零件采用实体建模方式建立,并采用实体单元划分网格。有限元模型中忽略了连接螺钉和施载螺钉,二者的功能通过 ANSYS 软件中相应的操作实现,将在下面内容中作介绍。分别在 KDP 晶体与支撑框、KDP 晶体与压片以及 KDP 晶体与胶钉的接触面间建立接触对,用以分析 KDP 晶体与这三个零件的实际接触情况。对定位板和支撑框的交界面进行布尔运算“GLUE”操作,使二者交界面上的节点具有相同的运动趋势,以表征二者间的固定连接。类似地,分别对压片和定位板的交界面以及胶钉和定位板的交界面进行布尔运算“GLUE”操作,以表征这些零件间的固定连接。经过上述步骤,建立的有限元模型共包括约 7 万个节点和 6 万个单元。有限元模型中各零件的材料和性能见表 1,由于 KDP 晶体为各向异性材料,不同方向的导热系数和热膨胀系数不同,因此用“//c”和“⊥c”分别表示 KDP 晶体的光轴方向及其垂直方向。此外,KDP 晶体的弹性模量和泊松比没有具体数值,二者通过应力和应变间的关系表示,如(6)式所示。

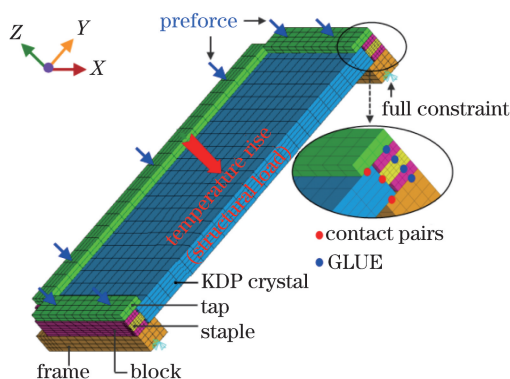


图 2 KDP 晶体夹持装置有限元模型

Fig. 2 Finite element model of mounting set of KDP crystal

表 1 KDP 晶体夹持装置中零件的材料及其性能

Table 1 Materials and properties of components in mounting set of KDP crystal

Component	Material	Thermal conductivity / ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Specific heat / ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	Thermal expansion coefficient / ($10^{-6} K^{-1}$)	Density / ($10^3 kg \cdot m^{-3}$)	Elastic modulus /MPa	Poisson ratio
KDP crystal	KDP	1.21(//c)	981.2	42.1(//c)	2.34	—	—
		1.34(⊥c)		26.4(⊥c)			
Frame	Steel	60	450	13	7.8	2×10^5	0.3
Block	Steel	60	450	13	7.8	2×10^5	0.3
Tap	Steel	60	450	13	7.8	2×10^5	0.3
Staple	Teflon	0.256	1.05	10	2.2	500	0.4

采用这一有限元模型依次进行热计算和结构计算,以分别求解 KDP 晶体吸收激光束能量后的整体温升及其导致的热应力。首先进行热计算,设置夹持装置和 KDP 晶体的初始温度为 20 °C。KDP 晶体通光区域的温升值根据(1)~(2)式计算得出,并将计算所得的温升值施加于 KDP 晶体的通光区域,由此计算 KDP 晶体整体的温升。热计算完成之后进行结构计算,预紧力施加于压片表面,以表征施载螺钉压缩压片进而挤压 KDP 晶体的预紧力施加方式。支撑框的下表面施加固定约束,以表征夹持装置的位置固定,并设置参考温度为 20 °C。将热计算所得 KDP 晶体的整体温升以结构载荷的形式施加至 KDP 晶体,以此计算 KDP 晶体温升导致的热应力。

4 分析与讨论

4.1 KDP 晶体的温度

KDP 晶体吸收激光束能量后,温度升高,如图 3 所示。由(1)~(2)式计算得出 KDP 晶体通光区域内的温升值为 0.1124 °C,并且在通光区域内均匀分布。KDP 晶体的初始温度为 20 °C,通光区域的温度升高后,热量向四周边缘区域扩散,引起边缘区域温度升高。由于 KDP 晶体的导热系数较小,这一热扩散将持续较长时间。在此期间,KDP 晶体的温度分布趋势为通光区域温度高、边缘区域温度低,由通光区域至边缘区

域,温度逐渐降低,由此形成通光区域和边缘区域间的温差。此外,KDP 晶体温度升高后,轴向(Z 方向)的温度均匀分布,理论上没有温差,此处不作具体讨论。

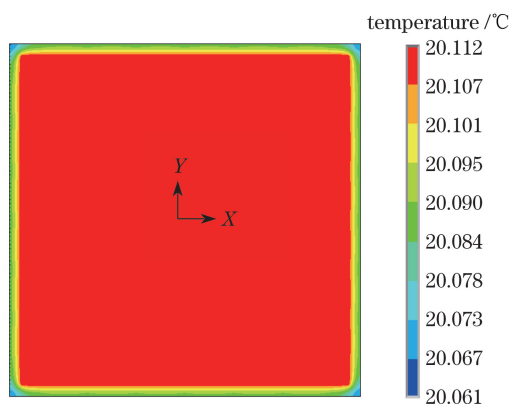


图 3 吸热后 KDP 晶体的整体温度分布

Fig. 3 Overall temperature distribution within KDP crystal after heat absorption

4.2 KDP 晶体的热应力

通光区域与边缘区域之间的温差引起 KDP 晶体由中心向四周扩张的热膨胀趋势,但由于夹持装置对 KDP 晶体的夹持作用,热膨胀受到抑制而不能自由发生,由此导致 KDP 晶体内部产生热应力,如图 4 所示。对热膨胀趋势的抑制作用主要来自三个方面。一是支撑框的摩擦作用。支撑框与 KDP 晶体紧密接触,当 KDP 晶体具有向四周扩张的热膨胀趋势时,在支撑框与 KDP 晶体间的接触界面处产生了摩擦力,从而抑制了 KDP 晶体的热膨胀。二是压片的挤压作用。挤压作用的实质是引起压片对 KDP 晶体的摩擦力。在挤压作用下,压片与 KDP 晶体紧密接触。KDP 晶体发生热膨胀趋势时,在压片与 KDP 晶体间的接触界面处产生了摩擦力,进而抑制了 KDP 晶体的热膨胀。三是胶钉的位移约束作用。KDP 晶体发生热膨胀时压缩胶钉,导致胶钉变形,由此引起胶钉对 KDP 晶体的反作用力,形成对热膨胀趋势的抑制作用。三种作用分别存在于 KDP 晶体与支撑框、压片和胶钉间的接触区域,主要在这些区域引起热应力。上述区域位于 KDP 晶体的四周边缘部分,由此形成 KDP 晶体热应力四周大、中心小的分布趋势。KDP 晶体的热应力包括压应力和拉应力。在 KDP 晶体四周边缘部分及其他绝大部分区域,由于热膨胀趋势受到抑制,KDP 晶体的内部相互挤压,这些区域的热应力主要为压应力。在 KDP 晶体中心部分,热膨胀引起 KDP 晶体微小的外凸变形,在外凸部分的表面,KDP 晶体内部相互拉伸,这一区域的热应力主要为拉应力。相较于拉应力,压应力的数值较大,所发生区域的范围也较大,故 KDP 晶体内部的热应力主要是压应力。

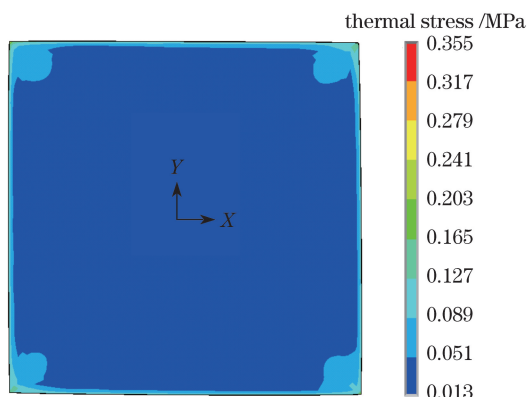


图 4 KDP 晶体的热应力分布

Fig. 4 Thermal stress distribution within KDP crystal

4.3 夹持装置结构参数的影响

上述分析表明,热应力主要由支撑框和压片对 KDP 晶体的摩擦力以及胶钉对 KDP 晶体的反作用力引起,而摩擦力和反作用力又与夹持装置的结构参数有关。摩擦力主要与两个结构参数有关,一是压片处的预

紧力,二是 KDP 晶体与支撑框以及 KDP 晶体与压片间的摩擦系数。预紧力和摩擦系数不同时,支撑框和压片对 KDP 晶体施加的摩擦力不同。而胶钉对 KDP 晶体的反作用力,主要与胶钉的弹性模量有关。具有不同弹性模量的胶钉受压后产生的变形不同,由此产生的反作用力也不同。上述三个结构参数不同时,KDP 晶体热膨胀趋势受到的抑制作用不同,最终导致热应力不同,本小节主要研究上述三个结构参数对热应力的影响。

由 4.2 节可知,KDP 晶体的热应力分布不均匀,KDP 晶体的整体热应力水平无法由某一局部处的热应力表示。由此,采用热应力的均方根(RMS)值表征 KDP 晶体的整体热应力水平。热应力 RMS 值由求解 KDP 晶体所有节点处热应力的 RMS 值而得出,与 KDP 晶体的整体热应力水平直接相关。整体热应力水平增大时,热应力的 RMS 值也增大,反之亦然。

4.3.1 预紧力的影响

预紧力通过影响摩擦力而对热膨胀的抑制作用产生影响,进而影响热应力,热应力随预紧力的变化趋势如图 5 所示。由图 5 可以看出,预紧力增大时,热应力增大,这主要是由于预紧力不同时,摩擦力对热膨胀的抑制作用不同。根据经典力学理论,KDP 晶体与支撑框以及 KDP 晶体与压片间接触界面处的摩擦力分别等于预紧力与两个接触界面处摩擦系数的乘积。预紧力增大时,两个接触界面处的摩擦力分别增大,热膨胀受到的抑制作用随之增强,热应力因而增大。在 KDP 晶体与支撑框以及 KDP 晶体与压片间的摩擦系数为 0.16、胶钉弹性模量为 8.5 GPa 的条件下,预紧力由 0 增大到 1.0 kN 时,热应力由 0.062 MPa 增大至 0.072 MPa。

需要说明的是,图 5 中预紧力取零时表示无预紧力作用,是一种理想情况。此时,支撑框和压片对 KDP 晶体的摩擦力均为零,两处的摩擦力对热膨胀无抑制作用。但由于此时胶钉的弹性模量不为零,胶钉反作用力对热膨胀的抑制作用一直存在,并引起相应的热应力,因此此时的热应力并不为零。

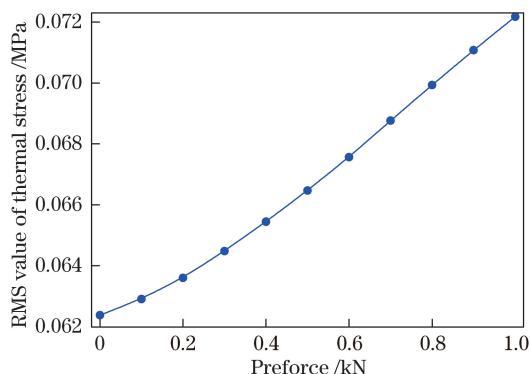


图 5 预紧力对热应力 RMS 值的影响

Fig. 5 RMS value of thermal stress versus preforce

4.3.2 摩擦系数的影响

摩擦系数与零件的制作材料和表面精度有关。支撑框和压片均由钢材料制作,且二者的表面精度相同。根据经验,KDP 晶体与支撑框间接触界面处的摩擦系数和 KDP 晶体与压片间接触界面处的摩擦系数相近。为便于分析,这两处的摩擦系数取相同数值,统一称之为摩擦系数。摩擦系数通过影响摩擦力而对热膨胀的抑制作用产生影响,进而影响热应力,热应力随摩擦系数的变化如图 6 所示。从图 6 可以看出,摩擦系数增大时,热应力增大,这主要是由于摩擦系数不同时,摩擦力对热膨胀的抑制作用不同。根据经典力学理论,KDP 晶体与支撑框间接触界面处的摩擦力以及 KDP 晶体与压片间接触界面处的摩擦力分别等于两个接触界面处摩擦系数与预紧力的乘积。摩擦系数增大时,KDP 晶体与支撑框和 KDP 晶体与压片间的摩擦力分别增大,热膨胀受到的抑制作用随之增强,热应力因而增大。在预紧力为 1.0 kN、胶钉弹性模量为 8.5 GPa 的条件下,摩擦系数由 0 增大至 0.16 时,热应力由 0.058 MPa 增加至 0.072 MPa。摩擦系数取零时表示 KDP 晶体与支撑框和 KDP 晶体与压片间无摩擦力,是一种理想情况。与预紧力为零时的情况类似,由于胶钉的弹性模量不为零,胶钉反作用力对热膨胀的抑制作用一直存在,因此摩擦系数为零时热应力并不为零。

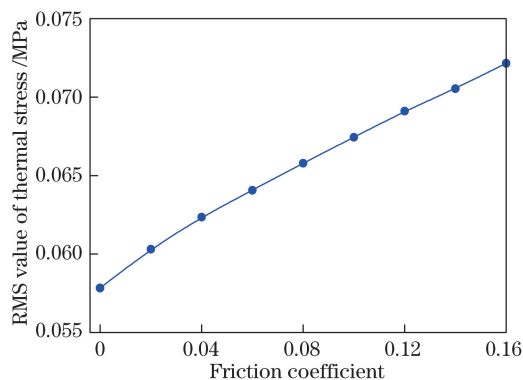


图 6 摩擦系数对热应力 RMS 值的影响

Fig. 6 RMS value of thermal stress versus friction coefficient

4.3.3 弹性模量的影响

胶钉弹性模量通过影响 KDP 晶体的位移约束而对热膨胀的抑制作用产生影响,进而对热应力产生影响,热应力随胶钉弹性模量的变化如图 7 所示。从图 7 可以看出,胶钉弹性模量增大时,热应力随之增大,这主要是因为此时胶钉较难变形。在这种情况下,胶钉变形后对 KDP 晶体施加的反作用力增大,KDP 晶体热膨胀受到的抑制作用增强,导致热应力随之增大。在预紧力为 1.0 kN、摩擦系数为 0.16 的条件下,弹性模量由 0.5 GPa 增加至 8.5 GPa 时,热应力由 0.037 MPa 增加至 0.072 MPa。

需要说明的是,所研究的胶钉由聚四氟乙稀制作而成,其弹性模量与制作材料、结构和工作温度等因素有关。研究胶钉弹性模量在 0.5~8.5 GPa 范围时热应力的变化情况,所得数据可为胶钉的选材和制作提供依据。

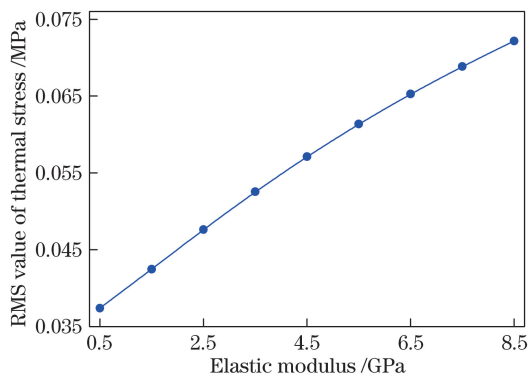


图 7 弹性模量对热应力 RMS 值的影响

Fig. 7 RMS value of thermal stress versus elastic modulus

以上分析结果表明,当预紧力、摩擦系数和弹性模量分别增大时,热应力均增大。由此可见,减小预紧力、摩擦系数和弹性模量是减小热应力的有效方法。不过,在合理选择上述三个结构参数的具体数值时还需考虑其他因素。夹持装置的主要作用是对 KDP 晶体施加夹持作用以减小 KDP 晶体在重力作用下的变形^[28],上述三个结构参数在这一方面有重要作用。确定合理的结构参数,需综合考虑三个结构参数对热应力和变形的影响。

5 结 论

从机械结构角度对机械夹持状态下吸收了激光束能量的 KDP 晶体内部产生热应力的问题进行了研究。分析了 KDP 晶体吸收激光束能量引起的温升,研究了夹持作用下 KDP 晶体温升导致生成热应力的机理,得出了夹持装置中影响热应力的结构参数以及这些结构参数对热应力的具体影响规律。研究结果表明,夹持装置对 KDP 晶体的夹持作用是造成热应力的重要因素。夹持装置中预紧力、KDP 晶体与支撑框间的

摩擦系数和 KDP 晶体与压片间的摩擦系数及胶钉的弹性模量分别增大时,热应力均增大。这也说明,对夹持装置的结构进行优化设计,选择合适的结构参数,优化夹持装置对 KDP 晶体的夹持作用,可以达到减小热应力的目的。此外,从机械结构角度研究光学元件热应力的思路可为光机结构领域类似问题的研究提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] Cai Xijie, Mao Jianhua, Chen Wannian, *et al.* Φ 200 mm large aperture KDP crystal high power frequency doubling laser system[J]. Chinese J Lasers, 1994, 21(11): 853-859.
蔡希洁, 茅建华, 陈万年, 等. 神光装置 Φ 200 mm 口径 KDP 晶体高功率倍频激光系统[J]. 中国激光, 1994, 21(11): 853-859.
- [2] Liu Chong, Ji Lailin, Zhu Baoqiang, *et al.* Numerical simulation analysis of high efficient SFG and color separation in far field in high power laser facility based on noncollinear phase matching by KDP crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(14): 144202.
刘崇, 季来林, 朱宝强, 等. 高功率激光终端 KDP 晶体非共线高效三倍频及远场色分离方案数值模拟分析[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 144202.
- [3] Wang Duanliang, Li Tingbin, Zhang Guanghui, *et al.* Research on nonlinear optical absorption of large-aperture KDP/DKDP crystals[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(10): 2492-2496.
王端良, 李廷斌, 张光辉, 等. 大尺寸 KDP/DKDP 晶体的非线性吸收研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(10): 2492-2496.
- [4] Li Zhilai, Xu Hong, Guan Yingjun. Structural design of 1.5 m mirror subassembly for space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(6): 1635-1641.
李志来, 徐宏, 关英俊. 1.5 m 口径空间相机主镜组件的结构设计[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1635-1641.
- [5] Xian Guang, Yan Changxiang, Shao Jianbing. Thermal effect on spectral-line shift of an airborne imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0428002.
贤光, 颜昌翔, 邵建兵. 温度对某机载成像光谱仪谱线漂移的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0428002.
- [6] Zhang Jun, Xian Hao, Zhang Cheng, *et al.* Telescope primary mirror seeing and air knife effect analysis based on theoretical calculation of temperature field[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0811005.
张俊, 鲜浩, 张程, 等. 基于温度场理论的望远镜主镜视宁度及“气刀”效应分析[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0811005.
- [7] Liu Gang, Tang Xiaojun, Zhao Hong, *et al.* New designs and CFD numerical simulations for solid-state laser heat sink[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1111-1116.
刘刚, 唐晓军, 赵鸿, 等. 固体激光器新型冷却热沉的设计和 CFD 数值研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1111-1116.
- [8] Liu Ju, Dong Deyi, Xin Hongwei, *et al.* Temperature adaptation of large aperture mirror assembly[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3169-3175.
刘巨, 董得义, 辛宏伟, 等. 大口径反射镜组件的温度适应性[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3169-3175.
- [9] Li Haixing, Ding Yalin, Zhang Hongwen. Support system study of rectangular mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0523002.
李海星, 丁亚林, 张洪文. 矩形反射镜结构支撑技术研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0523002.
- [10] Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Thermal optical analysis of off-axis three-mirror system and its thermal control requirements[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1213-1220.
巩盾, 田铁印, 王红. 离轴三反射系统的热光学分析和温控指标的制定[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1213-1220.
- [11] Zhou Chao. Thermal analysis of large telescope structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0422006.
周超. 大口径望远镜结构热分析[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0422006.
- [12] Shanguan Aihong, Wang Chenjie, Zhang Haosu, *et al.* Thermal-structural coupled analysis and verification of 2-D mirror gimbal for lunar-based telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1956-1964.
上官爱红, 王晨洁, 张昊苏, 等. 月基望远镜反射镜转台的热-结构耦合分析及验证[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1956-1964.
- [13] Shi Kui, Yang Hongtao, Chen Weining, *et al.* Thermal design for the optical-structure system of high resolution high-altitude camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(5): 0522005.
史魁, 杨洪涛, 陈卫宁, 等. 高空相机光机系统的热设计[J]. 光子学报, 2015, 44(5): 0522005.

- [14] Xin Hongwei, Guan Yingjun, Li Jinglin, *et al.* Design of support for large aperture rectangular mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1560-1568.
辛宏伟, 关英俊, 李景林, 等. 大孔径长条反射镜支撑结构的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1560-1568.
- [15] Zhao Lei, Gong Yan. Design and analysis for the high-precision lens support structure of objective lens for lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922001.
赵磊, 巩岩. 光刻物镜中透镜高精度支撑结构的设计及分析[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922001.
- [16] Yuan Jian, Sha Wei, Ren Jianyue. Structure design of a deformable mirror used on space camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(1): 0122001.
袁健, 沙巍, 任建岳. 空间相机中变形镜的结构设计[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 0122001.
- [17] Yang Guanghua, Li Yanqiu. Thermal and structural deformation of projection optics and its influence on optical imaging performance for 22 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322005.
杨光华, 李艳秋. 22 nm 极紫外光刻物镜热和结构变形及其对成像性能影响[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322005.
- [18] Yang Liang, Li Zhaohui, Zhang Liping, *et al.* Design of reflector subassembly for lunar-based extreme ultraviolet camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(11): 1321-1326.
杨亮, 李朝辉, 张立平, 等. 月基极紫外相机反射镜组件的设计[J]. 光子学报, 2012, 41(11): 1321-1326.
- [19] Xu Hong, Guan Yingjun. Structural design of 1 m diameter space mirror component of space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1488-1495.
徐宏, 关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1488-1495.
- [20] Fan Zhigang, Chang Hong, Chen Shouqian. Design of bonding layer in lens athermal mount[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2573-2581.
范志刚, 常虹, 陈守谦. 透镜无热装配中粘结层的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2573-2581.
- [21] Mei Gui, Zhai Yan, Miao Jianyu, *et al.* Design of a high resolution and wide field space infrared optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222004.
梅贵, 翟岩, 苗建宇, 等. 空间高分辨率宽视场红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222004.
- [22] Chen Hua, Su Dongqi, Sui Yongxin, *et al.* Active compensation of thermal aberrations in lithographic projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0811001.
陈华, 苏东奇, 隋永新, 等. 光刻机投影物镜热像差主动补偿方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0811001.
- [23] Zhang Xin, Qiao Yanfeng, Zhu Mingchao, *et al.* Two-lens athermalized infrared telephoto objective[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822004.
张鑫, 乔彦峰, 朱明超, 等. 两片式远距结构消热差红外物镜[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822004.
- [24] Zhang Xinting, An Zhiyong. Design of infrared athermal system with double-layer harmonic diffractive element[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(12): 1524-1527.
张欣婷, 安志勇. 双层谐衍射红外消热差系统设计[J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1524-1527.
- [25] Xu D G, Yao J Q, Zhang B G, *et al.* 110 W high stability green laser using type II phase matching KTiOPO₄ (KTP) crystal with boundary temperature control[J]. Optics Communications, 2005, 245: 341-347.
- [26] Bugene F J, Hecht E. Schaurm's outlines of theory and problems of college physics[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 2012: 213-220.
- [27] Xu Zhilun. Elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 15-22.
徐芝伦. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 15-22.
- [28] Lubin O, Gouedard C. Modeling of the effects of KDP crystals gravity sag on third harmonic generation[C]. SPIE, 1999, 3492: 802-808.