

文章编号: 0258-7025(2004)02-0145-04

# 激光器窗口的旋转效应

郭少锋, 陆启生, 程湘爱, 曾学文, 黎全, 陈前荣

(国防科技大学理学院定向能技术研究所, 湖南长沙 410073)

**摘要** 通过数值计算比较研究了静止、同心旋转、偏心旋转三种模式下高能激光器窗口工作过程中温度场和应力场的特征及其演变规律。研究表明, 旋转式激光器窗口不但可使温度场和应力场轴对称化, 且可降低最高温升、最大拉应力和最大剪应力; 一定偏心距的偏心旋转可以起到消去拉应力、减小剪切应力的作用, 从而使激光器窗口的抗激光损伤的能力有较大幅度的提高。

**关键词** 激光技术; 温度场; 应力场; DF激光; 激光器窗口; 激光破坏阈值

中图分类号 TN 243 文献标识码 A

## Rotation Effects of Intensive Laser Window

GUO Shao-feng, LU Qi-sheng, CHENG Xiang-ai,  
ZENG Xue-wen, LI Quan, CHEN Qian-rong

(Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Theoretical model is established to study the effects of rotating window irradiated by high energy laser output. Laser induced thermal profiles and stress profiles are obtained by numerical computation. The results show that window rotation causes the axial symmetry of thermal stress, therefore the maximum tensile stress can decrease and the window can endure much more laser output if appropriate rotation mode is chosen. At last, the application perspective of rotating laser window is outlined.

**Key words** laser technique; thermal profile; stress profile; DF laser; laser window; damage thresholds

## 1 引言

随着高能激光器输出功率的逐步增加, 窗口问题日益严重。一般而言, 中小功率的激光器使用物质窗口, 窗口材料一般为  $\text{CaF}_2$  单晶、氟铝酸盐玻璃<sup>[1]</sup>或白宝石<sup>[2]</sup>。超高功率时使用气动窗口。但气动窗口也有其致命的弱点, 例如引射器的引入增加了运行功耗和系统的振动强度, 输出光路上波系的存在使得流场密度变化极度不均, 对光束质量影响较大。而物质窗口简便, 可操作性好的特点使我们希望能进一步发挥它的作用。事实上, 通过改进激光和窗口的作用方式和作用环境, 物质窗口的抗激光能力可以得到相当程度的提高<sup>[3-5]</sup>。

余文峰等<sup>[5]</sup>设计制作了一套旋转晶体的实验

装置, 在 2 kW  $\text{CO}_2$  激光器上的联机实验表明, 旋转结构可以提高窗口的破坏阈值, 延长窗口的使用寿命, 这说明旋转式物质窗口具有长远的应用前景。在理论分析和数值模拟方面, 余文峰等<sup>[5]</sup>用 Algor 有限元计算了旋转与非旋转情况下的温度场, 而本文通过有限元程序模拟了旋转  $\text{CaF}_2$  窗口对强激光的热力学响应过程, 将研究的视野扩展到转动模式对应力场以及破坏阈值的影响, 并对物质窗口的应用前景进行了展望。

## 2 热弹性物理模型

当高能激光束通过其输出窗口时, 总不可避免地有一小部分能量沉积在光学材料中, 从而引起材料的温升和热应力, 材料最终可能由于温度达到熔

收稿日期 2002-09-28; 收到修改稿日期 2002-11-19

基金项目 国防预研项目(批准号 2002AA8240901)资助课题。

作者简介 郭少锋(1975—), 男, 河南平顶山市人, 博士, 主要从事激光破坏机理研究工作。E-mail: guoshaofeng@163.net

点而熔融,也可能由于热应力超过强度极限而破裂,或者两者兼而有之。 $\text{CaF}_2$  晶体属于立方晶系,实际工作的激光器窗口的表面切割方向皆为[111],晶体具有各向同性的性质<sup>[2]</sup>,其各热力学参量可以看作是标量形式,在理论分析和计算中,采用各向同性的热传导方程和弹性力学方程组即可。

耦合温度场方程<sup>[6]</sup>

$$K \nabla^2 T = \rho c_p T' + \frac{\alpha E T}{1 - 2\nu} u_{i,i} - Q \quad (1)$$

其中  $K$ 、 $\rho$ 、 $c_p$ 、 $E$ 、 $\nu$  和  $\alpha$  分别为热传导系数、密度、比热、杨氏模量、泊松比和热膨胀系数,  $u_i$  为弹性体的位移,  $Q$  为输入的热流,这里为单位体积的光学材料吸收的激光功率密度。

平衡方程:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (2)$$

几何方程:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

本构方程:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}^e, \\ \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^{\theta}, \varepsilon_{ij}^{\theta} = \alpha_T \theta \delta_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

这里  $\sigma_{ij}$  和  $\varepsilon_{ij}$  分别为应力张量和应变张量,  $f_i$  为体积力分量,  $\theta$  为温度增量,  $\varepsilon_{ij}^e$  和  $\varepsilon_{ij}^{\theta}$  分别为弹性应变和温度应变,  $\alpha_T$  为热膨胀系数。

以上方程组加上适当的热力学边界条件,就构成了完整的定解问题。这里我们打算深究边界条件对热力学行为的影响,为简便起见,热学边界选为绝热,力学边界选为固支。

窗口旋转的问题,实际上是一个运动热源加热的问题,选取固定在窗口平面上的运动坐标系为参考坐标系,则光斑位置随着时间连续变化。设激光光强的时空分布形式在极坐标系中为  $K(r, \theta, t)$ ,窗口材料的吸收系数为  $\alpha$ ,窗口旋转的角速度为  $\omega$ ,则热传导方程中的热源项应为:  $Q = \alpha K[r(\theta - \omega t), t] e^{-\alpha}$ 。另一方面,窗口旋转还使窗体受到惯性力的作用,在平衡方程中表现为非零的体积力项  $f_r = -\rho \omega r^2$ 。

从实际情况出发,可以对以上方程作如下简化:

1) 忽略掉温度场方程中的耦合项。激光器窗口的最高温升一般只有几十摄氏度,应变率很小,耦合项的影响很小,可以忽略。

2) 忽略掉平衡方程中的惯性项。在我们考虑的范围,  $\omega$  不会取得太大,只有几十 rad/s,由此产生的应力为  $10^4$  量级,和热应力相比,可以忽略。

即使如此,对以上问题进行解析求解仍存在很大的困难,因此选用有限元法进行数值计算。

### 3 数值模拟方法及算例

有限元法是工程技术领域内常用的数值模拟方法,它的基本思想是将问题的求解域化为一系列单元,单元之间仅靠节点连接。单元内部点的待求量可由单元节点量通过选定的函数关系插值求得。由于单元形状简单,易于由平衡关系或能量关系建立节点量之间的方程式,然后将各个单元方程“组集”在一起而形成总体代数方程组,计入边界条件后即可对方程组进行求解。单元划分越细,计算结果就越精确。

我们采用有限元方法,针对激光与窗口的不同作用情形进行了仿真模拟。

如图1所示,考虑了三种模式。模式1:激光光斑中心和窗口中心重合,窗口并不转动;模式2:激光光斑中心和窗口中心重合,窗口转动的角速度为  $\omega$ ;模式3:激光光斑中心和窗口中心相距  $d$ ,且中心连线垂直光斑边缘,窗口转动的角速度为  $\omega$ 。

激光器窗口的转动问题其实就是运动光源加热的问题,数值模拟中不可能真实反映光源移动的连续性,只能采用“跳跃式”的算法,即假设光源在  $\vec{r}_0$  处加热  $\Delta t$  时间后,再移至  $\vec{r}_1 = \vec{r}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}_0 \Delta t$  ( $\vec{\omega}$  为光斑运动角速度矢量,  $\vec{r}_0$  为光斑内点光源的初始位置)处加热  $\Delta t$ ,然后再移动,直至加热结束。只要  $\Delta t$  足够小,  $\omega$  足够大,模拟效果还是相当不错的。实际计算中取  $\omega = 2\pi$  rad/s,  $\Delta t$  取为 0.05 s。

计算中用到的  $\text{CaF}_2$  的热力学参数如下<sup>[7]</sup>:热膨胀系数  $\alpha = 18.38 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,热传导系数  $K = 9.74$  W/m $\cdot$ °C,比热  $c_p = 0.8568 \times 10^3$  Ws/kg $\cdot$ °C,杨氏模量  $E = 75.79 \times 10^9$  Pa,断裂模量  $E_b = 3.65 \times 10^7$  Pa,密度  $\rho = 3.179 \times 10^3$  kg/m $^3$ 。

计算中选取  $\text{CaF}_2$  晶体对激光的吸收系数为 0.1/m,激光器输出功率为 40 kW,光斑为 11 cm  $\times$  4 cm 的矩形(实心),出光时间为 5 s。

激光器窗口直径为 20 cm,厚度为 5 mm,在转动情形中,角速度  $\omega$  一律取为  $2\pi$  rad/s,在模式3中,取偏心距  $d$  为 5 cm。

计算中采用非耦合平面单元,忽略了对流、辐射等热量散失。

计算结果如图2~4所示。图2为加热结束时三种模式的温度场比较;图3、4分别为拉应力和最

大剪切力的比较。本文所涉及的问题 ,可看作二维

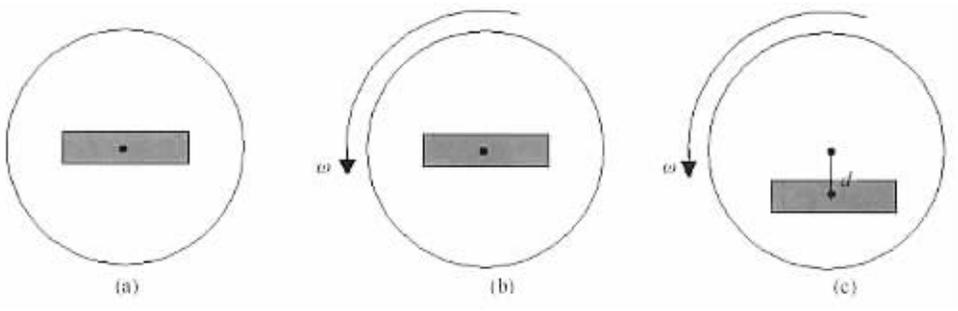


图 1 激光与激光器窗口作用的三种模式

( a ) 模式 1 ( b ) 模式 2 ( c ) 模式 3

Fig. 1 Three modes of window interacted with intensive laser

( a ) mode 1 ; ( b ) mode 2 ; ( c ) mode 3

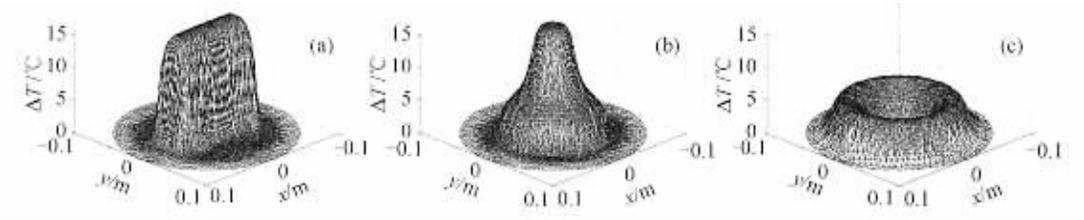


图 2 激光辐照结束时三种模式下温度场的比较

Fig. 2 Thermal profiles of laser window under three interaction modes

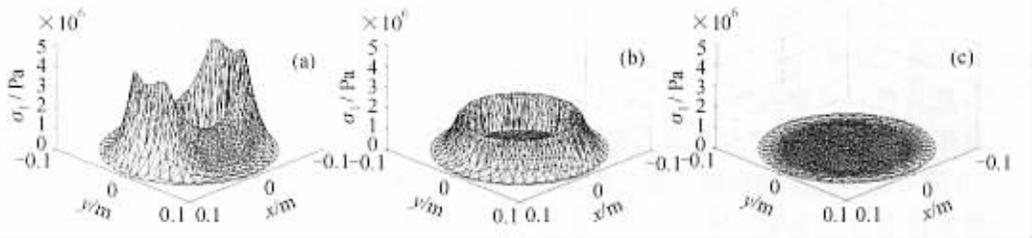


图 3 激光辐照结束时三种模式下拉应力场的比较

Fig. 3 Tensile stress profiles of laser window under three interaction modes

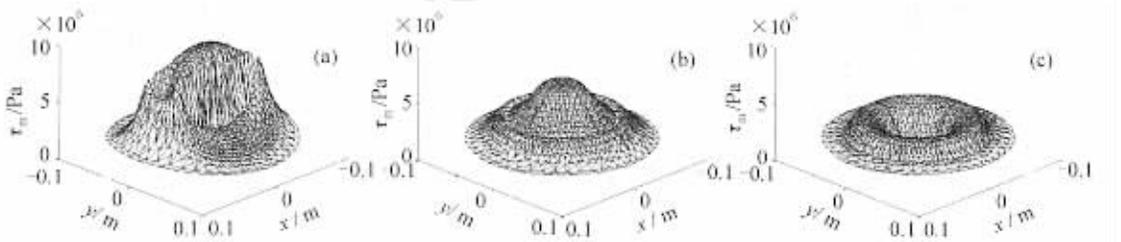


图 4 激光辐照结束时三种模式下最大剪应力场的比较

Fig. 4 Maximum shear profiles of laser window under three interaction modes

问题。在温度场方面 ,由于窗口材料对激光的吸收系数非常小 ,能量在厚度方向基本为均匀沉积 ,温度沿厚度方向基本不变。在力学方面 ,由于厚度远小于直径 ,近似为平面应力问题 ,计算所得的应力场结果

在厚度方向差别也很小。图 2 ~ 4 给出的是窗口前表面(激光入射面)的情形。

## 4 结果分析

激光器窗口的温度场和应力场决定着输出激光的最高功率,对激光的光束质量有着不可忽略的作用。针对一种特定材料,其断裂强度已定,考察其抗激光能力就是考察激光照射期间的应力状态。 $\text{CaF}_2$ 晶体属脆性材料,其抗压能力远大于抗拉、抗剪能力,适用的破坏准则一般为最大拉应力准则或最大剪应力破坏准则。所以,重点比较三种模式下温度场、拉应力( $\sigma_1$ )分布和最大剪应力( $\tau_m$ )分布的不同。

图2给出了温度场的比较。模式1的最高温升为 $16.8^\circ\text{C}$ ,模式2为 $16.6^\circ\text{C}$ ,略有下降,而模式3的最高温升只有 $5.6^\circ\text{C}$ ,为模式1的三分之一;从温度分布的状况看,模式1为中心对称,而模式2、3为轴对称。偏心转动在相当大程度上降低了温升。

拉应力的比较如图4。模式1的最大值为 $0.448 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,出现在矩形光斑的两个短边处;模式2的最大值为 $0.177 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,出现在半径为5 cm的圆上;模式3的拉应力在整个窗口平面上都为零。偏心旋转起到了“消拉”的作用。

最大剪应力的比较如图4。模式1的最大值为 $1.01 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,出现在窗口的中心区域;模式2的最大值为 $6.9 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,同样出现在窗口的中心区域;模式3的最大剪应力为 $0.38 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,出现在半径为5 cm的圆上。偏心旋转起到了“减剪”的作用。

综上所述,旋转窗口使温度场、应力场轴对称化,且降低了最高温升、最大拉应力和最大剪应力;一定偏心距的非同心旋转进一步降低了温升和最大剪应力,且可能使拉应力均为零。窗口材料一般都是脆性材料,其破坏的主导因素是拉应力和最大剪应力,当拉应力和最大剪应力减小或消失时,破坏的主导因素转移为压应力,而脆性材料的抗压强度都远大于抗拉强度,这样窗口的抗激光能力就大大加强了。

当然,我们所绘出的温度场、应力场是在光斑扫描过整数周后的情形,此时温度场和应力场正好轴

对称化,如果光斑尚未完成整数周扫描时,此时温度场和应力场在周向上是有起伏的,但可以通过加大旋转速度使之趋于轴对称化。

## 5 结 论

通过旋转激光器窗口可以改变温度场和应力场的分布形式,使之能承受更大功率的激光输出。从模式3的计算结果看,在出光时间保持不变的前提下,偏心旋转可使窗口的抗激光能力提高3倍。应该存在一个偏心距 $d_m$ ,使窗口的抗激光能力达到最大。另外,也可能存在光斑与窗口之间的其他运动方式,更大幅度地提高抗激光能力。

## 参 考 文 献

- Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Shu Bohong. Measurement of LIDT in fluoride glass irradiated by CW DF laser and analysis of damage mechanism [ J ]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**( 3 ) 272 ~ 274  
郭少锋, 陆启生, 舒柏宏. DF 激光作用下氟玻璃破坏阈值的测量及机理 [ J ]. *红外与激光工程*, 2002, **31**( 3 ) 272 ~ 274
- Claude A. Klein. Diamond windows for high-power lasers: an initial assessment [ C ]. *SPIE*, 1992, **1624** #75 ~ 492
- Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Yang Fen *et al.*. Influence of mechanical boundary on laser induced damage threshold in optical materials [ J ]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**( 6 ) 687 ~ 690  
郭少锋, 陆启生, 杨 奋 等. 力学边界对透射型光学元件激光破坏阈值的影响 [ J ]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**( 6 ) 687 ~ 690
- Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiang'ai *et al.*. Spot size effect of CW laser induced damage threshold in optical materials [ J ]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**( 9 ) :1055 ~ 1058  
郭少锋, 陆启生, 程湘爱 等. 连续激光辐照下光学材料损伤阈值的光斑效应 [ J ]. *光学学报*, 2002, **22**( 9 ) :1055 ~ 1058
- Yu Wen-feng, Wang Shou-zeng, Cheng Zu-hai *et al.*. Experimental investigation of rotating crystal window on stable resonator [ C ]. The 6<sup>th</sup> Adolescent Symposium on Laser Science and Technology, 2001. 95 ~ 99
- Wang Hong-gang. Thermal-Elastic Mechanics [ M ]. Beijing : Tsinghua University Press, 1989. 326 ~ 358  
王洪钢. 热弹性力学概论 [ M ]. 北京 : 清华大学出版社, 1989. 326 ~ 358
- Li Jing-zhen. Optics Handbook [ M ]. Xi 'an : Shanxi Science and Technology Press, 1986. 1263 ~ 1339  
李景镇. 光学手册 [ M ]. 西安 : 陕西科技出版社, 1986. 1263 ~ 1339