

文章编号: 1001-3806(2007)02-0196-04

热容模式下片状激光介质瞬态温度及热应力分析

杨建坤¹, 曹一象^{1,2}, 郑万国², 贺少勃², 袁晓东², 於海武², 韩伟²

(1. 国防科学技术大学, 长沙 410073 2 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究激光介质热畸变对固体热容激光器的影响, 数值计算了高功率激光二极管阵列抽运片状激光介质的瞬态温度场和热应力分布。结果表明, 在相同的抽运功率密度下, 激光介质中的温度分布和热应力分布不仅与激光介质几何构型及抽运光空间分布有关, 还与抽运光斑在介质表面的填充因子密切相关。当抽运光斑未充满激光介质时, 介质的表面靠近边缘处会出现大的拉应力集中, 并且介质表面的最大轴向位移和最大拉应力随光斑填充因子增大而增大; 而当抽运光充满介质时, 表面是压应力, 较小的拉应力存在于介质内部。

关键词: 激光技术; 二极管抽运; 瞬态温度分布; 热应力; 有限元分析

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Analysis of transient temperature and thermal stress distribution for heat capacity disk laser

YANG Jian-kun¹, CAO Ding-xiang^{1,2}, ZHENG Wan-guo², HE Shao-bo²,
YUAN Xiao-dong², YU Hai-wu², HAN Wei²

(1. National University of Defence Technology, Changsha 410073 China, 2. Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract Based on a 3-D transient thermal model with inhomogeneous heat generation, the temperature and thermal stress distribution in the disk of heat capacity laser pumped by high power laser diode array (LDA) are simulated and analyzed by means of finite element methods. The results indicate that for the same pump intensity, the temperature and thermal stress distribution in the disk are not only related with the medium's geometry and the special distribution of pump intensity but also related with the fill factor of pump area. When the fill factor is less than 1, the concentrated tensile stress appears near edge of disk surface; while the fill factor reaches up to 1, the surface exhibits compressive stress, and the center is less tensile stress.

Key words laser technique; diode pumped; transient temperature distribution; thermal stress; finite element methods

引 言

热容激光器最重要的特征是激光“发射”与“冷却”过程的分离, 这种热管理模式造成激光介质与传统的实时主动冷却方式有着不同的温度分布及热应力分布特点^[1]。CAI 等人^[2]基于均匀抽运的假设, 讨论了热容激光片的温度场及热应力。作者基于激光介质内非均匀内热源模型, 利用 ANSYS 有限元分析软件, 计算分析了热容模式下不同形状、不同尺寸的抽运光

斑抽运不同几何构型片状激光介质时, 介质内的温度场和热应力分布, 计算结果可以对高功率激光二极管阵列 (laser diode array LDA) 抽运片状热容激光器的优化设计提供参考。

1 物理模型

激光介质吸收的抽运光能量只有部分转化为激光输出, 其余则以“废热”形式沉积在激光介质中^[3~6]。考虑到实际激光器的光抽运腔结构及激光介质的几何构型, 本文中假设抽运光同时从片状激光介质两侧面对称抽运, 并在抽运腔内多次反射被介质充分吸收, 为简化模型, 设抽运光斑面内光强分布均匀, 而在抽运光的传输方向上, 抽运光能量按吸收定律呈指数函数形式分布, 见图 1。考虑一般情况下, 抽运光斑并不能够充满整个激光介质片表面, 因此, 激光介质片内的热沉积分布可由下式表示^[7]:

基金项目: 中国工程物理研究院重大基金资助项目 (z0405)

作者简介: 杨建坤 (1966), 男, 副教授, 研究方向为紫外光传输和固体激光技术。

E-mail: jk_yang06@163.com

收稿日期: 2006-02-17; 收到修改稿日期: 2006-04-18

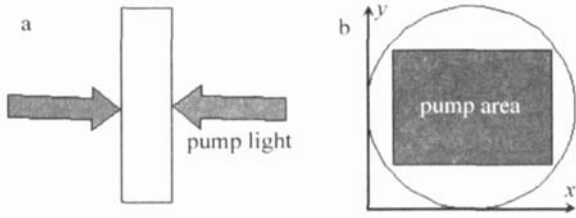


Fig 1 a- the schematic of LDA pump heat capacity laser b- cross section of the pumping block

$$P_{th}(z) = \alpha \frac{P}{A_p} \tau f \eta \times \times \left\{ \begin{aligned} & \{ \exp(-\alpha \cdot z) + \exp[-\alpha \cdot (Z - z)] \} / (1 - \exp(-\alpha \cdot Z)) \quad (A \leq A_p) \\ & P_{th} = Q \quad (A > A_p) \end{aligned} \right.$$

式中, z 为纵向坐标, α 为激光介质对抽运光的吸收系数 (cm^{-1}), P 为脉冲抽运光的峰值功率, τ 和 f 分别是抽运脉冲的脉宽和重复频率, A_p 为抽运光斑的面积, η 为抽运光耦合效率, \times 为产热比 (热沉积和所吸收的抽运光能量的比值), Z 为激光介质片的厚度。

由于激光介质温度呈不均匀分布, 必然存在热应力。根据应力应变关系的虎克定律, 可以得到反映片状介质内部的热应力关系式为^[6, 8, 9]:

$$\sigma_{i,j} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) \times (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \delta_{ij} - \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \alpha T \delta_{ij} \right] \quad (2)$$

式中, E 为杨氏模量; ν 为材料的泊松比; T 为温度梯度; ε_{ij} 表示应变分量, δ_{ij} 表示克鲁尼彻-迪尔塔符号, 当 i 与 j 相同时, $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$ α 为材料的热膨胀系数, 其与温度 T 的关系为: $\alpha(T) = -1.78 \times 10^{-6} + 3.3 \times 10^{-8} T$ 。

2 数值模拟结果与讨论

选取圆形和方形的抽运光斑及片状介质构型作模拟计算, 既可分析研究不同形状的抽运光斑和介质几何构型对热容模式下激光介质的热效应影响, 又具有对称性, 利于简化物理模型。模型中激光介质的力学边界条件取为自由边界 (实际中对介质采用简支夹持, 这一假设可近似满足)。原点取在入射面中心位置, 数值模拟中取介质的 $1/8$ 部分进行计算; 计算中每个面总的平均抽运功率 $P = 3.7 \text{ kW}$, 抽运脉冲参数 $\tau = 300 \mu\text{s}$, $f = 500 \text{ Hz}$, 抽运光传输效率 $\eta = 0.8$, 产热比 $\times = 0.3$ 激光介质采用质量分数为 0.006 的 Nd:GGG 片, 吸收系数为 $1.8/\text{cm}$, 激光介质的热力学物性参数分别为: 密度 $7100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 比热容 $410 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 热传导率 $9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 杨氏模量 220 GPa , 泊松比 0.28 。

2.1 方形光斑抽运方形激光介质片

方形片状激光介质的尺寸为 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 1.8 \text{ cm}$,

抽运光斑的面积从 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 到 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 不等。为了讨论问题方便, 定义抽运光斑尺寸和介质的抽运面口径之比为抽运光“填充因子”。图 2 是在相同抽

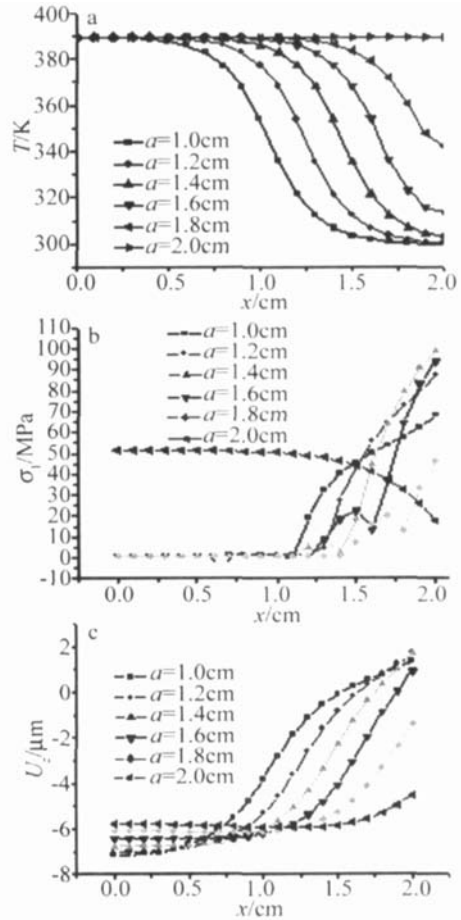


Fig 2 1-D distribution on the surface of square-shaped cross section laser medium, with square-shaped cross section pumping light beam
a- temperature b- max principal stress c- thermal axial strain

运功率密度条件下, 不同大小的抽运光斑抽运 2s 后方片激光介质的表面温升、拉应力和表面的轴向热形变的分布, 由于激光介质的抗压性能大大强于抗拉性能, 在激光介质的热力学分析中, 主要关心激光介质的最大拉应力是否超过激光介质的破碎应力 (Nd:GGG 材料所能承受的破碎应力大致在 $130 \text{ MPa} \sim 260 \text{ MPa}$ 的范围)。由图 2 可以看到, 当抽运光完全充满激光介质片的抽运面时, 在激光介质片的横向 (垂直于光传输方向) 温度分布均匀, 只存在纵向的温度梯度, 因而介质表面的热变形相对较小, 表面是压应力, 中间是拉应力, 这种情况下拉应力是比较小的。当抽运光斑没有充满介质表面时, 介质片内出现横向的不均匀温度分布, 同时, 介质表面出现大的拉应力集中和热形变。最大拉应力发生在抽运光斑的顶点处, 并且随着抽运光斑的填充因子增大, 最大拉应力先是逐渐增大, 当接近于激光介质的几何边界时, 最大拉应力开始变小, 当抽运光斑完全充满介质表面时, 介质表面表现为压应力,

中间是较小的拉应力。介质表面的轴向热形变分布(正值表示位移沿 z 轴方向, 负值表示位移和 z 轴方向相反)和表面温度分布基本一致, 中心温度较高的地方, 介质表面出现明显的“鼓包”。横向温度分布不均匀和介质表面的热形变是导致光束畸变的主要因素。

2.2 圆光斑抽运圆片激光介质

圆形片状激光介质的尺寸为 $\varnothing 5\text{cm} \times 1.8\text{cm}$, 抽运光斑的直径分别取 $\varnothing 2\text{cm}$, $\varnothing 3\text{cm}$, $\varnothing 4\text{cm}$ 和 $\varnothing 5\text{cm}$ 。

图 3 是抽运 2s 后圆片激光介质的表面温升、拉应力和表面的轴向热形变的分布。和前面方光斑抽运方

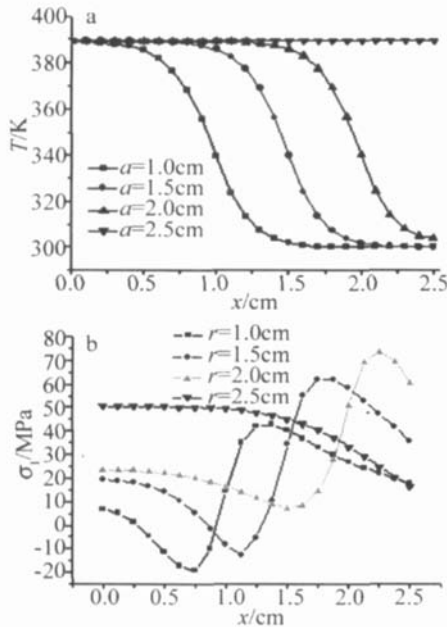


Fig 3 1-D distribution on the surface of circular shaped cross section laser medium, with circular shaped cross section pumping light beam
a—temperature b—max principal stress

介质片相比, 圆光斑抽运圆片时的温度分布和前者极为相似, 抽运光斑的边缘附近存在大的温度梯度, 但是拉应力分布和前者略有不同, 当抽运光斑没有充满介质表面时, 介质表面的拉应力沿径向呈 S 形分布, 并具有轴对称性, 因而拉应力在表面上呈环带状分布, 最大拉应力并不在介质片的几何边界上。当抽运光完全充满激光介质片表面时, 表面是压应力, 中间是拉应力, 而这个拉应力是相对比较小的。

2.3 方光斑抽运圆片激光介质

在实际应用中, 激光介质多为圆片状, 而抽运光斑呈方形分布, 并且功率密度和光斑面积成反比关系。图 4 是口径为 4cm 的方光斑抽运 $\varnothing 5\text{cm} \times 1.8\text{cm}$ 的圆片介质 4s 后的表面温升、拉应力和表面的轴向热形变的分布云图, 由图可见, 介质表面边缘上出现了拉应力集中, 和文献 [2] 中的计算结果一致。最大拉应力为 14MPa 发生在抽运方光斑和介质圆片几何边界相交处。图 5 中给出了表面温度的一维分布以及最大拉应

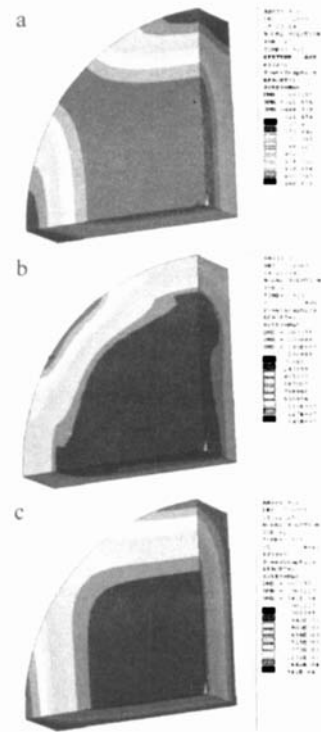


Fig 4 a—temperature contour b—tensile stress contour c—axial strain contour

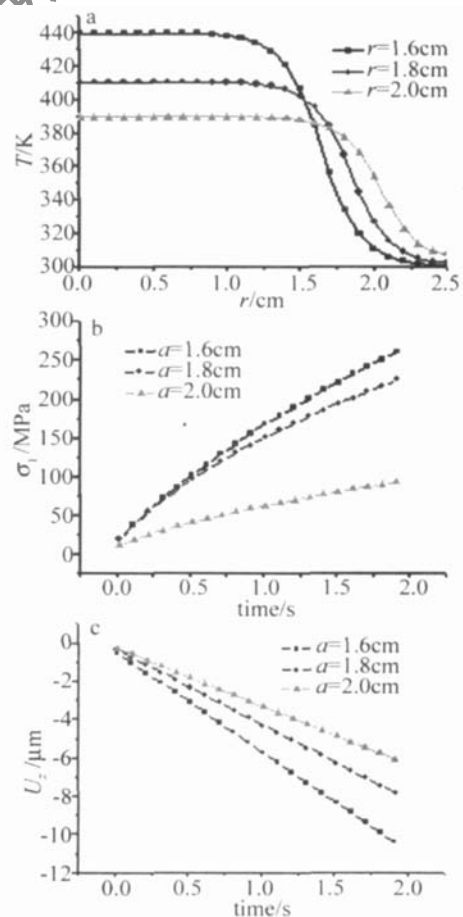


Fig 5 Circular shaped cross section laser medium, pumped by circular shaped cross section pumping light beam
a—1-D temperature distributions on the surface b—max principal stress vs time c—thermal axial strain vs time

力和最大轴向热形变随时间变化的曲线,可知,当平均功率一定时,抽运光斑越小,功率密度就越大,则在介质中产生更大的横向温度梯度,最大拉应力和热形变也随之增大。因此,从减小热效应角度来讲,抽运耦合设计时,在保证一定的抽运能量密度的前提下,应尽量增大抽运面积,并尽可能使得抽运光斑边界和激光介质几何边界一致,这样可以避免拉应力集中,减少热断裂风险。

介质中的热应力及热形变还和平均抽运功率有关。其它抽运参数同前,口径为 4cm 的方光斑抽运 $\varnothing 5\text{cm} \times 1.8\text{cm}$ 的圆片介质,通过改变抽运脉冲的重复频率来改变平均功率,分别得到抽运重复频率为 100Hz、200Hz、300Hz、400Hz、500Hz 时介质的最大拉应力和表面最大轴向形变随时间的变化关系,见图 6。

由图 6 可知,在高重复率脉冲抽运 (大于 100Hz) 下,介质上的最大拉应力和最大轴向热形变随抽运光的平均功率增大近似成线性关系增大。

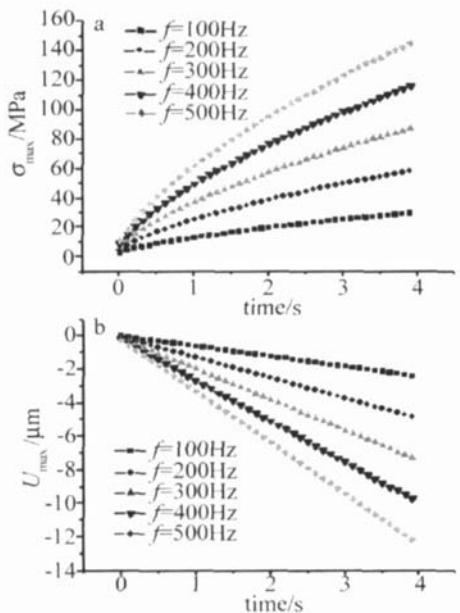


Fig 6 Circular-shaped cross section laser medium, pumped by circular-shaped cross section pumping light beam with different repetition rate

a—max principal stress vs time b—thermal axial strain vs time

3 结论

数值计算结果和分析表明,在热容模式下,当抽运区域达不到整个介质的几何边界时,在高强度高重复

频率脉冲光的抽运下,也会出现严重的热畸变;本文中基于非均匀内热源的三维瞬态热模型,利用有限元数值方法,计算分析了不同形状、不同尺寸的抽运光斑抽运不同几何构型的激光介质的各种情况下片状激光介质内的温度场和热应力分布。结果表明,在相同的抽运功率密度下,激光介质中的温度分布和热应力分布与激光介质几何构型及抽运光空间分布有关,还与抽运光斑在介质表面的填充因子密切相关。当抽运光斑未充满激光介质时,介质的表面靠近边缘处会出现大的拉应力集中,并且介质表面的最大轴向位移和最大拉应力随光斑填充因子增大而增大;热破坏主要集中于激光介质片的表面边沿。而当抽运光充满介质时,表面是压应力,较小的拉应力存在于介质内部。因此,从热管理角度来讲,在抽运耦合系统设计时,在保证一定的抽运能量密度的前提下,应尽量增大抽运面积,并尽可能使得抽运光斑边界和激光介质几何边界一致,这样可以避免拉应力集中,减少热断裂风险。在高重复频率抽运下,最大拉应力和轴向热形变随抽运光平均功率的增大近似成线性关系增大。

参考文献

- [1] ALBRECHT G F, SUTTON S B, GEORGE E V *et al*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beams* 1998, 16(4): 605 ~ 625
- [2] CAI Zh, HU H, JIANG J F *et al*. 300W diode pumped solid state heat capacity laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 1997, 17(S1): 49 ~ 52 (in Chinese).
- [3] COMSDKEY B. Characterization of the heat loading of Nd-doped YAG, YOS YLF, and GGG excited at diode pumping wavelengths [J]. *IEEE J Q E* 1995, 31(7): 1261 ~ 1264
- [4] BRENT D C. World's most powerful solid-state laser [DB/OL]. <http://www.llnl.gov> 2002-10-02
- [5] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing Science Press 2002, 82 (in Chinese).
- [6] WANG JR, MIN J Ch, SONG Y Z. Analysis and optimization of the thermal stress field in a high power laser slab [J]. *Laser Technology* 2004, 28(6): 575 ~ 579 (in Chinese).
- [7] CHEN Z L, MA L K, JIANG Z F *et al*. Finite element analysis of the thermal effect of LD end-pumped laser medium [J]. *Laser Technology* 2005, 29(5): 543 ~ 545 (in Chinese).
- [8] ZHAI Q, LÜ B D. Two dimensional temperature and stress distributions in a diode side pumped slab laser medium [J]. *Laser Technology* 1998, 22(4): 231 ~ 234 (in Chinese).
- [9] LIM H, LU A G, SONG Y Z. A numerical simulation for temperature and thermal stress distribution in Nd³⁺:YAG amplifiers [J]. *Laser Technology* 2002, 26(2): 86 ~ 89 (in Chinese).