

文章编号:1672-3392(2007)03-0033-04

LD 侧面抽运板条激光器热效应分析

胡 涛 朱 晓 朱长虹 齐丽君 朱广志

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要 针对板状 Nd:YLF 激光介质,在高斯光束抽运情况下,用 ANSYS 有限元软件模拟了激光介质的热效应,对激光介质中各点的温度和应力分布进行了分析和比较。研究发现双侧抽运与单侧抽运相比,更易获得对称的温度分布,随着抽运光斑横截面变大,抽运面中心温度变低。同时得到板条的棱边、端角处存在较大热应力,且引入的机械应力不可忽视,因此,激光器运转时此区域需防止断裂。

关键词 热效应;热应力;有限元分析;板条激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

1 引言

LD 抽运的固体激光器(DPSSL)被认为是固体激光器的一次革命^[1],相对于闪光灯抽运而言,它具有很多优点:总效率高,能量损耗低;器件结构紧凑、体积小、重量轻、寿命长;频率及输出稳定性高。传统的 DPSSL 采用棒状工作物质,存在一系列的负面效应,如热聚焦、应力导致的双轴聚焦和双折射等,严重影响激光束的光束质量。美国 GE 公司于 1972 年提出了板条结构的固体激光器^[2],通过合理的“之”形光路设计,获得了比棒状工作物质更好的光束质量和更高的平均功率,成为高功率激光器一个新的研究方向。

与研究较为广泛的 Nd:YAG 板条激光器相比, Nd:YLF 作为二极管抽运的材料有许多优越性^[3],其荧光寿命高达 480 μs,为 Nd:YAG 的 2 倍,因此相同的二极管数目能够提供更多的存储能量;荧光寿命与受激辐射截面乘积比 Nd:YAG 大,具有更低的阈值抽运功率;该材料的自然双折射大大超过热致双折射,消除了 Nd:YAG 等光学各向同性基质的热退偏问题。鉴于工作物质 Nd:YLF 的优越性,国内外逐步展开了对板条状 Nd:YLF 激光器的研究^[4-6]。

本文从热传导方程出发,利用有限元仿真软件 ANSYS 对板状 Nd:YLF 介质进行了热分析,其主要过程包括:建立模型、划分网络、加热负载、求解和后处理。

2 热效应模型

2.1 板条温度分布

如图 1 所示为板条模型示意图。

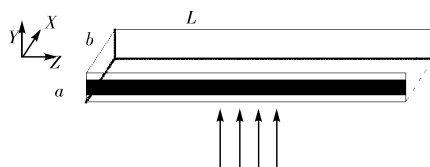


图 1 板条模型

Fig. 1 Slab model

LD 发出的抽运光在空间为近高斯分布,稳态情况下,侧泵板条的热传导方程为泊松方程^[7]:

$$\nabla^2 T(x, y, z) + Q(x, y, z)/k = 0 \quad (1)$$

其中, T 为板条温度分布, Q 为热源函数, k 为材料热导率。

我们忽略抽运光在 z 向的差异,即认为每一个通光截面(XY 面)抽运光分布相同,单侧抽运时,抽运光 Y 向为高斯分布, X 向为正常的指数吸收,热源函数可以写为

$$Q(x, y) = \frac{P \cdot \eta \cdot \alpha}{A} \exp(-2y^2/\omega^2) \cdot \exp(-\alpha \cdot x) \quad (2)$$

其中, P 为光热转换效率, η 为光热转换效率, α 为吸收系数, A 为抽运面面积, ω 为抽运光半径。双侧抽运时:

收稿日期 2006-04-30; 收到修改稿日期 2006-06-12

作者简介 胡涛(1981-),男,硕士,主要从事激光二极管抽运固体激光器的研究。E-mail: hutao@hust@163.com

$$Q(x, y) = \frac{P \cdot \eta \cdot a}{A} \exp(-2y^2/\omega^2) \cdot \{\exp(-a \cdot x) + \exp[-a(b-x)]\} \quad (3)$$

XZ 两个大面进行强制传导冷却:

$$T = T_c \quad (4)$$

其余各面与空气自由对流:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = h \cdot (T_s - T) \quad (5)$$

其中, T_c 为冷却温度, T_s 为外界空气温度, h 为对流换热系数, n 为介质表面法线方向。

2.2 板条热应力分布

板状激光介质在抽运光作用下, 由于光吸收带来的内热源不均匀以及边界施加的冷却, 激光介质内部的温度分布是不均匀的, 不同部分热膨胀不同, 由此必然产生热应力。根据应力应变关系的胡克定律, 可以得到反映板状介质内部的热应力关系式^[8]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1+\nu)} \cdot \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \delta_{ij} - \frac{1+\nu}{1-2\nu} \cdot \alpha_p T \delta_{ij} \right] \quad (6)$$

其中, E 为弹性模量, ν 为材料泊松比, δ_{ij} 是克鲁尼彻-迪尔踏符号, α_p 为材料的热膨胀系数。

3 有限元模拟

我们模拟的 Nd:YLF 板条尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ($a \times b \times L$), 沿 a 轴切割, 光轴 $c \parallel Y$, 抽运面为 $2.5 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 面, 冷却面为 $6 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 面。单个激光二极管线阵功率为 40 W , 偏振方向 $\parallel Y$, 光热转化效率 50% ; Nd:YLF 热导率 $6.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 热膨胀系数为 $8.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($\parallel c$), $13.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($\perp c$), 吸收系数 10.8 cm^{-1} , 弹性模量 85 GPa , 泊松比 0.33 , 抽运光半径 0.2 mm , TEC 强制冷却温度 20°C , 外界空气温度 25°C , 换热系数 $50 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 。

3.1 单侧面抽运

如图 2 所示为板条温度分布图。在抽运面上, 中心位置温度最高, 边缘温度最低, 存在较大的温度梯度。温度沿着抽运光的传播方向递减, 最后趋于稳定。

由于 Nd:YLF 的热导率为 $6.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 温度不能及时传递到非抽运区域及热沉上面, 因此产生了一定的热应力分布。如图 3 所示为单侧面

抽运时的应力分布。可以看出, X 方向应力分布不均匀, 沿着抽运光传播方向存在一定的应力差, 当温度达到稳定后, 应力分布也逐渐变得均匀。 Y 向应力梯度主要集中在抽运面附近。另外, 在抽运面与各侧面交线附近应力较大, Z 向热应力在抽运面的上下棱边处尤为突出。

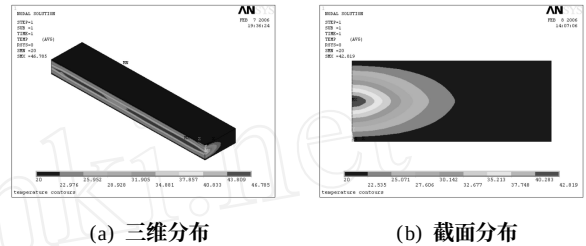


图 2 板条温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of the slab

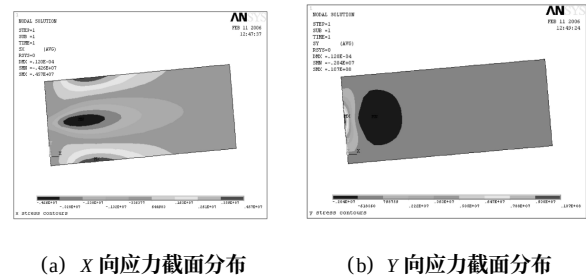


图 3 板条应力分布

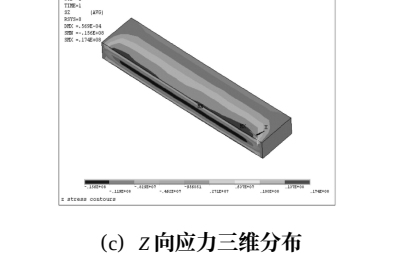


图 3 板条应力分布

Fig. 3 Stress distribution of the slab

3.2 双侧面抽运

双侧面抽运时温度分布如图 4 所示。我们可以发现, 此时温度分布较单侧面抽运时对称, 温度值大小差别不大。板条中心的温度分布最均匀。我们对抽运光斑半径大小对温度分布的影响也进行了研究。图 4(a)、(b)、(c) 分别是抽运光斑半径为 0.2 mm 、 0.3 mm 、 0.4 mm 时截面温度分布图。此时截面温差分别为 23.079°C 、 22.01°C 、 21.002°C , 在其他条件相同情况下, 随着抽运光斑变大, 抽运面中心温度逐渐变低, 温差也相应变小, 光斑半径越大, 温度分布越均匀。

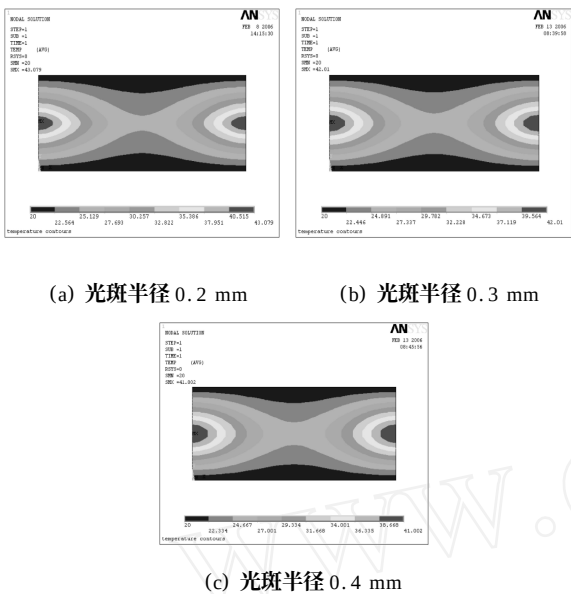


图 4 板条温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of the slab

如图 5 所示为双侧面抽运时应力分布。此时 X,Y 向应力在 XY 截面均呈对称分布,其梯度特性与单侧面抽运时相似,而在两个冷却大面上 Z 向应力有最大值。

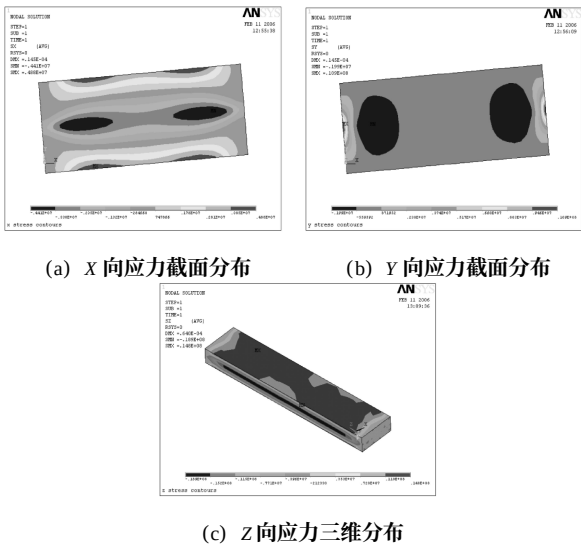


图 5 板条应力分布

Fig. 5 Stress distribution of the slab

通过计算可以总结出表 1 所示的结果。

表 1 温度及热应力计算结果(三维模型)

Table 1 Calculation results of the temperature and thermal stress (3D model)

抽运方法	温度/ $^{\circ}\text{C}$	热应力/ Mpa		
		X 向	Y 向	Z 向
单侧面抽运	$20\sim 46.785$	$6.06\sim 12.9$	$-4.76\sim 25$	$15.6\sim 17.4$
双侧面抽运	$20\sim 47.109$	$7.58\sim 13.1$	$-4.81\sim 25.7$	$18.9\sim 14.8$

以上只是对于无约束情况下,即对由于温度分布不均匀而造成的热应力进行了计算,而实际工作时,常常需要进行一系列的机械操作,比如进行冷却的两个大面需要固定,此时就存在位移的约束,应力的分布会发生变化。如图 6 所示是双侧抽运并对两个冷却面进行约束的情况下 XY 截面的应力分布。可以看到,由于冷却面的固定,此时应力的分布发生了较大变化,截面端角附近应力明显,并且由于应力的作用,侧面发生了形变,向外突出,而晶体中心位置应力分布比较均匀。

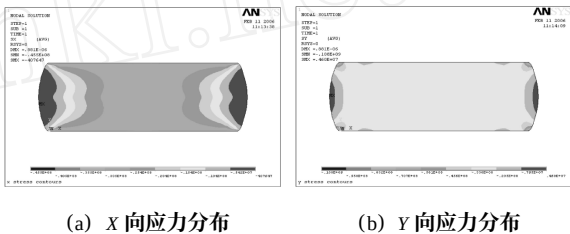


图 6 板条截面应力分布

Fig. 6 Stress distribution of the cross section of the slab

4 结 论

通过对 LD 单、双侧抽运 Nd : YLF 板条晶体进行有限元模拟,发现两种情况下温度、应力的 大小相差不大,双侧抽运较单侧抽运温度分布对称,板条中心温度分布均匀,但必须注意到实际操作中存在部分抽运光没有被完全吸收而透过板条,这一方面会造成效率下降,另一方面这些无用光会对异侧 LD 发出的抽运光造成一定影响;而单侧抽运时通过在抽运源异侧引入全反镜或是对板条镀反射膜可以减少这部分的损失,但缺点是在板条一边需要放置数目较多的 LD 阵列。另外,板条的棱边、端角处容易断裂,在板条激光器的设计中需在靠近端面附近留有一定的区域而不被抽运光照射到,以此来减小棱边、端角处的应力。

参 考 文 献

[1] 黄德修,刘雪峰. 半导体激光器及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2001: 200.

[2] W S Martin, J P Chernoch. Multiple internal reflection face pumped laser: US, 3633126[P]. 1972.

[3] W 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,江浙文,程国祥,译. 北京:科学出版社,2002: 52~54.

[4] J Harrison, P F Moulton, G A Scott. 13 W, $M^2 < 1.2$ Nd : YLF laser pumped by a pair of 20 W diode laser bars[C]// CL EO'95 Post Deadline Papers. Washington D. C: Optical Society of America, 1995:20.

[5] Zhang Hengli, Du Keming, Li Daiju, et al. Diode-

- end-pumped electro-optically Q-switched Nd : YLF slab laser [J]. Appl. Opt., 2004, 43 (14) : 2940-2943.
- [6] Zhang Hengli, Li Daijun, Shi Peng, *et al.* Efficient high power, Q-switched Nd : YLF slab laser end-pumped by diode stack [J]. Opt. Commun., 2005, 250(3) :157-162.
- [7] 翟群,吕百达,杨成龙. 二极管抽运板条激光介质的二维温度和应力分布[J]. 激光技术, 1998, 22(4) : 231-234.
- [8] J MEggleston, T J Kane, K Kuhn, *et al.* The slab geometry laser-Part I: theory [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1985, 21(8) :1195-1209.

Analysis of Thermal Effect in LD Side-Pumped Slab Laser

HU Tao ZHU Xiao ZHU Chang-hong QI Li-jun ZHU Guang-zhi

(School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Based on finite element (FE) analysis, the thermal effect of Nd : YLF slab medium, which is pumped by Gaussian beam, is studied and the temperature and thermal stress distribution in Nd : YLF slab medium are analysed and compared. It's easy to achieve symmetrical temperature distribution by using two-side pumping method than one-side pumping method. And the central temperature of the pumping face grows lower when the cross section of the pump beam becomes larger. Also, great thermal stress exists on the edge and border of the slab, and the stress introduced by the mechanical operation cannot be ignored. So we must pay more attention to this area which is susceptible of fracture.

Key words thermal effect; thermal stress; finite element analysis; slab laser

(上接第 21 页)

5 结 论

本文根据系统的特性对其机械和电气部分分别进行建模,这种建模的优点在于降低了建模的复杂程度,而且可移植性好。仿真结果显示,系统稳定、响应速度快具有良好的鲁棒性。并且在驱动步进电机的步距发生变化时,通过 PID 控制器的调节能够满足系统快速性的要求,且系统的动态品质变化很小。

参 考 文 献

- [1] 宋葵,李增发,张光寅,等. 光学显微镜的最新发展[J]. 物理,1993,22(2) :81.
- [2] 高兴宇,萧泽新,伍世荣. 基于 OSLO 的无限远像距消色差显微扫描镜的设计[J]. 光学与光电技术,2006,4(4) :4-7.
- [3] 王积伟,吴振顺. 控制工程基础[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [4] 华军君,刘长青,杨晓红. 全数字水轮机调速器电液随动系统的仿真研究[J]. 水力发电,2003(11) :41-43.
- [5] 王正林,王胜开,陈国顺. MATLAB/ Simulink 与控制系统仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

System Modeling and Dynamic Analysis for Scanning Work Table of Confocal Microscope

WU Yao-chun XIAO Ze-xin

(Institute of Opto-Mechatronics, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract The dynamic model of confocal microscope scanning work table is one of the most important basis in studying the control system. It directly affects the repetition positioning accuracy of the work table. A method for modeling the mechanical part and the electrical part separately is proposed, and the system mathematical model is established. This method has good portability, and the modeling process is simple. It's favorable to analyse the effect of system segment on control performance. Simulation is carried out via MATLAB/ Simulink, and the system will be stabilized in 2 s. The result shows that the system has good dynamic characteristics, and satisfies the requirement of control.

Key words controll system; dynamic modeling; MATLAB simulation