

激光介质温度场及应力场的流固耦合数值模拟

张 威¹, 俞 路¹, 刘易航¹, 潘娜娜¹, 贾春燕², 刘万发², 桑凤亭², 潘艳秋¹

¹大连理工大学化工与环境生命学部, 辽宁 大连 116024;

²中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023

摘要 激光介质的热效应会导致固体激光器在工作过程中产生像差,造成激光光束质量下降,严重影响了固体激光器的发展与应用。以一种固体激光器用微通道双面冷却系统为研究对象,建立其三维物理模型,采用流固耦合方法模拟冷却系统的流场、温度场及介质应力场,并考察了流动雷诺数与 Nd:YAG 晶体薄片内部热流量对薄片热变形的影响。结果表明,冷却系统内流场对薄片温度场及应力场的影响不可忽略;薄片的最大 Von Mises 等效应力出现在边缘位置,且随着雷诺数的增大而减小;薄片的热变形因流动状态的变化而存在不同的分布形式;热流量只对薄片热变形的程度有影响,热流量越大,薄片的热变形越大。

关键词 激光器;数值模拟;流固耦合;热变形

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0801001

Numerical Simulation on Fluid-Structure Interaction of Temperature and Stress Fields in Laser Medium

Zhang Wei¹, Yu Lu¹, Liu Yihang¹, Pan Nana¹, Jia Chunyan², Liu Wanfa²,
Sang Fengting², Pan Yanqiu¹

¹Faculty of Chemical, Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

²Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China

Abstract Heat effect of laser medium can cause the aberration of the laser in the process of operation, resulting in the decrease of the laser beam quality, and seriously affecting the development and application of the solid-laser. A three-dimensional physical model of a double-side fluid cooling system with microchannel structure is established in the present work. Flow, temperature and Nd:YAG crystal slices' stress fields of the cooling system are simulated, and effects of Reynolds number and heat flux inside crystal slice on thermal deformation of the slice are investigated with fluid-solid coupling method. Results show that the flow field significantly influences temperature and stress fields of the crystal slice. The maximum Von Mises equivalent stress decreases with the increase of the Reynolds number, and its maximum value is located at the edge of the slice. There are different distributions of the thermal deformation under different flow conditions. The heat flux is found to only affect the extent of the thermal deformation, the higher the heat flux, the more obvious the thermal deformation.

Key words lasers; numerical simulation; fluid-solid coupling; thermal deformation

OCIS codes 140.3320; 140.6810; 140.3580

1 引 言

固体激光器具有体积小、波长短、功率高等优点,自提出以来受到了科研工作者的关注。随着研究的不断深入,激光器的功率不断提高,尺寸日益小型化,这导致激光介质的热效应对激光器性能的影响愈发严重,

收稿日期: 2017-01-12; 收到修改稿日期: 2017-03-02

作者简介: 张 威(1992—),男,硕士研究生,主要从事化工传递方面的研究。E-mail: zhangwei1106@mail.dlut.edu.cn

导师简介: 潘艳秋(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事化工过程模拟与优化方面的研究。

E-mail: yqpan@dlut.edu.cn(通信联系人)

已成为制约固体激光器进一步发展的严重障碍^[1-3]。为了保证激光系统稳定工作,需要采用特殊设计的冷却器将激光介质中的热量导出^[4]。但由于冷却器性能的限制,激光介质内部会存在一定的温度场,进而产生一定的热应力和热变形,最终导致输出的激光发生波前畸变^[5-6],严重影响输出激光的质量。

目前对激光器热效应的研究主要以实验与数值模拟为主。在实验研究方面,Schepler等^[7]测量了端面抽运圆盘式激光器的热透镜焦距,结果表明,热透镜焦距与抽运功率呈正比关系。刘善超等^[8]测得了不同平均抽运功率下的波前畸变,认为波前畸变并不全是由热效应引起的。综合文献可以发现,目前多通过实验测量温度、热透镜焦距等物理量,进而间接确定激光器热效应的影响,而如此测得的结果并不单是由激光介质的热效应引起的,还存在其他因素。

因为实验研究的局限性,近年来越来越多的学者采用数值模拟的方法来研究激光介质的热效应。Bavil等^[9]利用 ANSYS 软件对端面抽运式 Nd:YAG 板条激光器的温度场和应力场进行了分析;胡浩等^[10]对热容激光器的温度及应力进行三维瞬态分析后发现,等效应力的极值出现在抽运区下方以及与非抽运区相接的区域;Ye等^[11]通过对双面冷却式 Nd:YAG 激光介质进行热力光耦合数值分析,得到了不同流速下允许的最大抽运功率和最大主应力,并发现流速对光程差有影响。在这些研究中,基本上都是基于热传导方程来求解激光介质内部的温度分布,未考虑流体与激光介质换热的影响,由此求得温度分布与实际的温度分布相差较大,会对进一步的模拟产生巨大影响。

本文基于前期的研究结果^[4],利用 ANSYS 软件建立了固体激光器用微通道冷却系统的三维模型,采用热流固耦合计算方法分析了 Nd:YAG 晶体薄片的热效应和热应力,讨论了流体雷诺数 Re 、薄片内部热流量对薄片热效应及热变形的影响。

2 数值模拟

2.1 物理模型

建立的微通道冷却系统的三维物理模型见图 1,红色区域为流固耦合换热部分。Nd:YAG 晶体薄片的长度 $a=50$ mm,宽度 $b=30$ mm,高度 $h=1.5$ mm,在薄片的上下两面加工出高度 $e=0.3$ mm 的微通道。

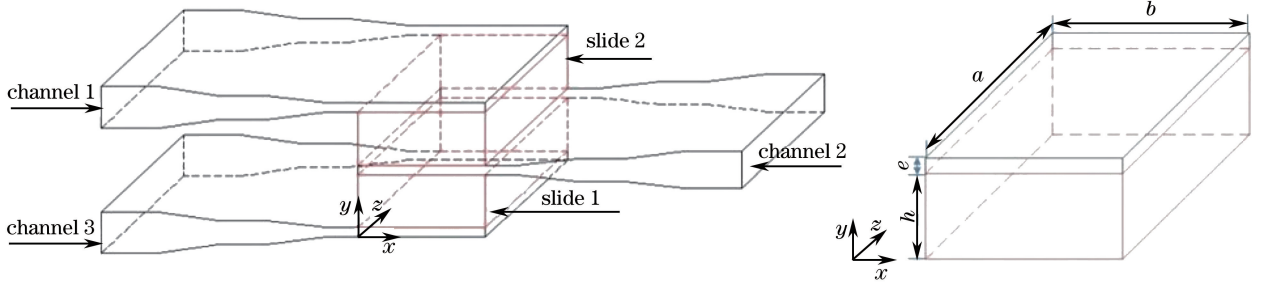


图 1 固体激光器冷却系统的三维物理模型

Fig. 1 Three-dimensional physical model of cooling system in solid-laser

模拟时做出以下假设:1)过程稳定;2)流体不可压缩;3)不考虑体积力;4)忽略热辐射和表面张力对温度场与应力场的影响;5)固体材料呈完全线弹性和各向同性,可使用 Von Mises 应力进行分析。

2.2 控制方程

主要讨论微通道中的液体对工作中的固体激光器薄片进行冷却的过程。针对这一过程,采用热流固耦合方法进行稳态数值模拟。微通道中的液体对固体激光器薄片进行冷却的过程包括流体的流动与传热、界面处的耦合传热和固体结构的热传导过程,其控制方程包括流体的质量方程、动量方程和能量方程,以及固体的热传导方程等^[12]。

计算中的流场为三维不可压缩层流流动,连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (u\rho), \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \nabla \cdot (\eta \nabla U) - \nabla p, \quad (2)$$

能量守恒方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(uT) = \nabla \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \text{grad } T \right) + \frac{S_T}{\rho}, \quad (3)$$

式中 ρ 为冷却液的密度, t 为时间, u 为冷却液的流速, p 为压力, η 为动力黏度, T 为温度, c_p 为冷却液的比热容, S_T 为黏性耗散项, ∇ 为哈密顿算子, ∇^2 为拉普拉斯算子。

对于本文中的模型, 固体薄片只需要考虑热传导即可, 热传导方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad (4)$$

式中 λ 为流体的传热系数。

对于本文的单向热流固耦合问题, 忽略固体变形对流体的影响。流固耦合作用通过流固界面处流体与固体的热流密度 q 相等以及温度 T 相等来实现, 即 $q_f = q_s, T_f = T_s$ 。

2.3 物性参数

固体激光器内的激光介质为 Nd:YAG 晶体, 由于该晶体在研究范围内的物性变化不大, 所以计算时采用固定的物性参数, 见表 1。微通道内的冷却液体为水, 由于进出通道处水的温度变化较大, 故模拟时采用变物性参数^[13]。

表 1 Nd:YAG 晶体的物性参数

Table 1 Physical property parameters of Nd:YAG crystal

Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Heat conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thermal expansion coefficient / (10^{-6}K^{-1})	Young's modulus / GPa	Poisson ratio
4560	590	14	7.5	283.6	0.226

2.4 数值计算方法

结合课题组前期的研究成果^[4,14]对模型进行网格划分。在保证网格无关性的前提下, 对壁面边界层区域取 $y^+ = 4$ 进行网格加密, 以保证能准确模拟边界层内的流动与传热。流体网格共计 1332 万个, 结构网格共计 230.4 万个。采用热流固耦合方法计算固体激光器的热应力, 利用 Fluent 软件计算流场、温度场和压力场, 并在此基础上利用 ANSYS 软件计算薄片的热应力和热变形。

2.5 边界条件

在流场与温度场的模拟中, 采用光滑无滑移的壁面, 外壁面均为绝热边界; 微通道入口选择速度入口边界条件, 进口温度 $T = 288.15 \text{ K}$; 出口压力 $p = 100 \text{ kPa}$; 薄片内部为均匀热源。

3 模拟结果与分析

利用建立的模型进行数值模拟, 流动雷诺数 $Re = 2900$ ^[15], 薄片热流量 $\Phi = 3000 \text{ W}$ 。

3.1 薄片内部的温度场

模拟得到的薄片的温度场见图 2。从图 2(a)可以看出, 薄片的最低温度出现在刚与流体接触的壁面上, 最高温度出现在薄片内部的中心区域。这主要是因为, 在流体刚与薄片接触的位置, 温度边界层还未形成, 传热效果较好, 从而使得薄片壁面的温度较低。为了更清楚地观察薄片内部的温度分布, 图 2(b)给出薄片中心垂直于对称面的温度分布。由图 2(b)可以看出, 靠近绝热壁面的薄片温度稍低(图中黑色圆圈部分), 分析认为是近壁区流体的流动受到壁面效应的影响, 扰动增加, 导致边界层变薄, 传热效果较好, 带走了更多的热量, 从而使得该壁面周围的温度相对较低。

由薄片内部温度场的模拟结果可以看出, 薄片内部的温度分布不均匀, 这势必将导致薄片内产生热应力和热变形, 而这正是造成波前像差的根本原因^[16]。

3.2 薄片内部的热应力分布

利用 Fluent 软件模拟得到的压力场及温度场数据, 计算得到了薄片内部的 Von Mises 等效应力分布云

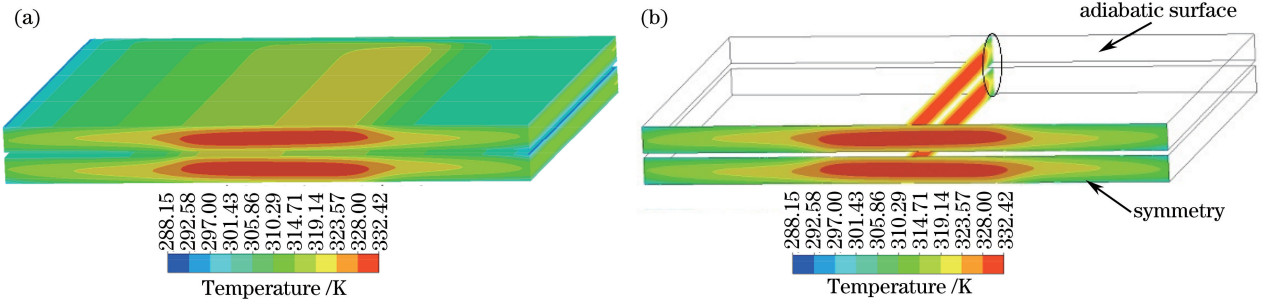


图 2 薄片的温度分布云图。(a)整体；(b)对称面与中心截面

Fig. 2 Distributions of temperature field in Nd:YAG crystal slice. (a) Whole view; (b) symmetrical surface and central section

图,见图 3。

由图 3 可以看出,在温度、压力及固定约束的共同作用下,薄片中的最大应力为 226 MPa(Nd:YAG 晶体的抗拉强度为 341 MPa),出现在薄片外侧固定约束面的中部及薄片边缘位置(见放大部分),即固体边缘容易出现热疲劳;而固体薄片内部的应力较小。从对称面可以看出,应力沿薄片厚度方向的分布并不均匀,内部的应力略大于表面的应力。

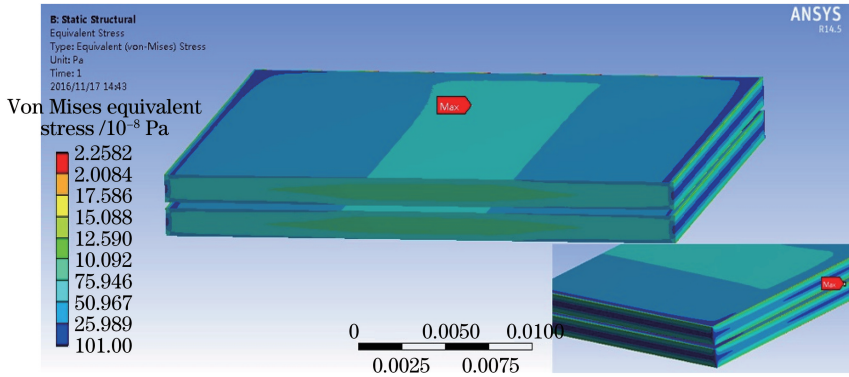


图 3 薄片中的 Von Mises 等效应力分布

Fig. 3 Von Mises equivalent stress distribution in Nd:YAG crystal slice

3.3 薄片的热变形分布

薄片的热变形用整体变形的大小来表示。整体变形是指结构在载荷作用下产生的位移量,是 x 、 y 、 z 三个方向分量的和,表达式如下^[17]:

$$U_{\text{total}} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}, \quad (5)$$

式中 U_{total} 、 U_x 、 U_y 、 U_z 分别为总变形量及其在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

图 4 为薄片的热变形分布云图。由图 4(a)、(b)可以发现,在温度、压力及固定约束的共同作用下,热变形的最大值(图中的红色部分)为 521 nm,较大变形位置靠近流体的入口与出口区域。从图 4(c)、(d)所示的 y 方向变形可以看出,由于上下薄片的结构对称,两薄片的变形量沿流动方向对称且方向相反,最大热变形为 390 nm。

常见的 Nd:YAG 晶体的波长为 1064 nm,而以上计算出的固体的最大整体变形量为 521 nm,说明热变形对激光输出质量的影响不能忽略。

3.4 流动雷诺数对薄片变形的影响

选取雷诺数 Re 为 1000~8000、薄片热流量 $\Phi = 3000$ W 进行分析。模拟得到了不同雷诺数下薄片的 Von Mises 等效应力分布规律,见图 5。图 5 的规律与图 3 基本一致,最大应力均出现在固定约束面的薄片边缘。

由图 5 可以看出:薄片的最大 Von Mises 等效应力随着雷诺数的增加而减小;在层流($Re < 2900$)到过渡区域($2900 \leq Re \leq 5000$)范围内^[15],最大 Von Mises 等效应力随着雷诺数增加而急剧下降。这是因为在层流

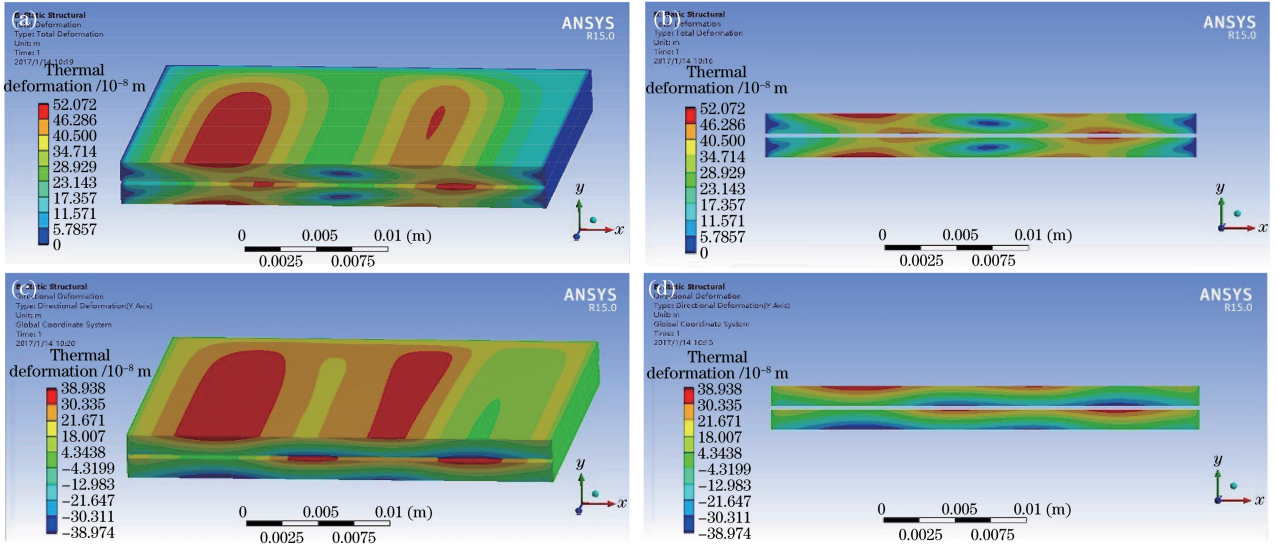


图 4 薄片的热变形分布云图。(a)整体变形;(b)对称面的整体变形;(c) y 方向变形;(d)对称面的 y 方向变形
 Fig. 4 Thermal deformation distributions of Nd:YAG crystal slice. (a) Global deformation; (b) global deformation on the symmetrical surfaces; (c) directional deformation (y axis); (d) directional deformation (y axis) on the symmetrical surfaces

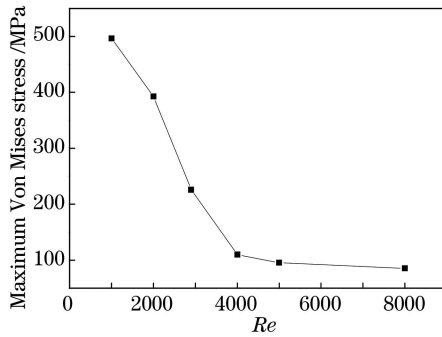


图 5 雷诺数对薄片最大 Von Mises 等效应力的影响

Fig. 5 Effect of Reynolds number on maximum Von Mises equivalent stress of Nd:YAG crystal slice

区和过渡区这两个区间内,随着雷诺数增大,固体内部的温度及最大温差下降的趋势明显。在湍流区域 ($Re > 5000$),随着雷诺数增大,最大 Von Mises 应力的变化较小,这是由于在该区域内固体的温差变化缓慢,所以最大应力的变化较小。

不同雷诺数下薄片内部的温度分布及热变形分布分别见图 6 和图 7。

由图6和图 7 可以看出,在层流区域 ($Re = 1000, Re = 2000$),薄片内部的温度分布基本一致,对应的热变形分布也很接近,较大热变形位置靠近流体入口区域,并且流道 2 入口区域的变形最大;在过渡区域 ($Re = 2900$),温度的最大值出现在薄片的中心区域,在温度及固定约束的共同作用下,流体入口区域与流体出口区域均存在较大的热变形,且靠近流道 1 和流道 3 入口处的热变形最大;在湍流区域 ($Re = 5000, Re = 8000$),薄片内部的温度分布均匀,在厚度方向约呈抛物线分布,此时薄片内部的热变形分布与层流区域的热变形分布相反,最大热变形位置靠近各流道的出口区域。

3.5 薄片内部热流量对薄片热变形的影响

在 $Re = 2900$ 的情况下,考察薄片内部热流量对薄片热变形的影响。为了方便观察,选取上薄片上表面与流体的流固耦合线上的热变形进行分析,结果见图 8。可以看出:在不同热流量下,薄片的热变形分布趋势基本一致,最大变形出现的位置一致;虽然热变形的分布趋势一致,但热流量越大,薄片的热变形就越大,并且薄片的最大热变形随着热流量的增加基本呈线性增大。由以上结果可以知道,薄片的热变形分布趋势是由冷却系统内的流场决定的,热流量只对薄片内部的温度及薄片热变形的大小有影响。

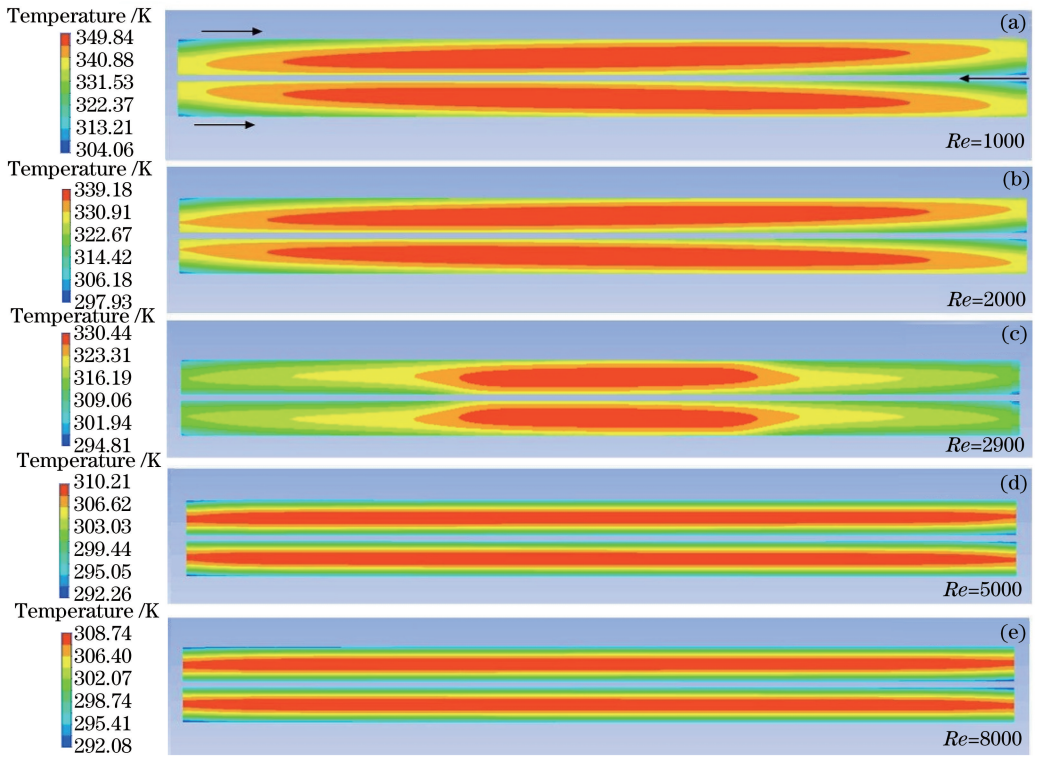


图 6 对称面上薄片内部的温度分布云图

Fig. 6 Internal temperature distributions of Nd:YAG crystal slice on symmetrical surfaces

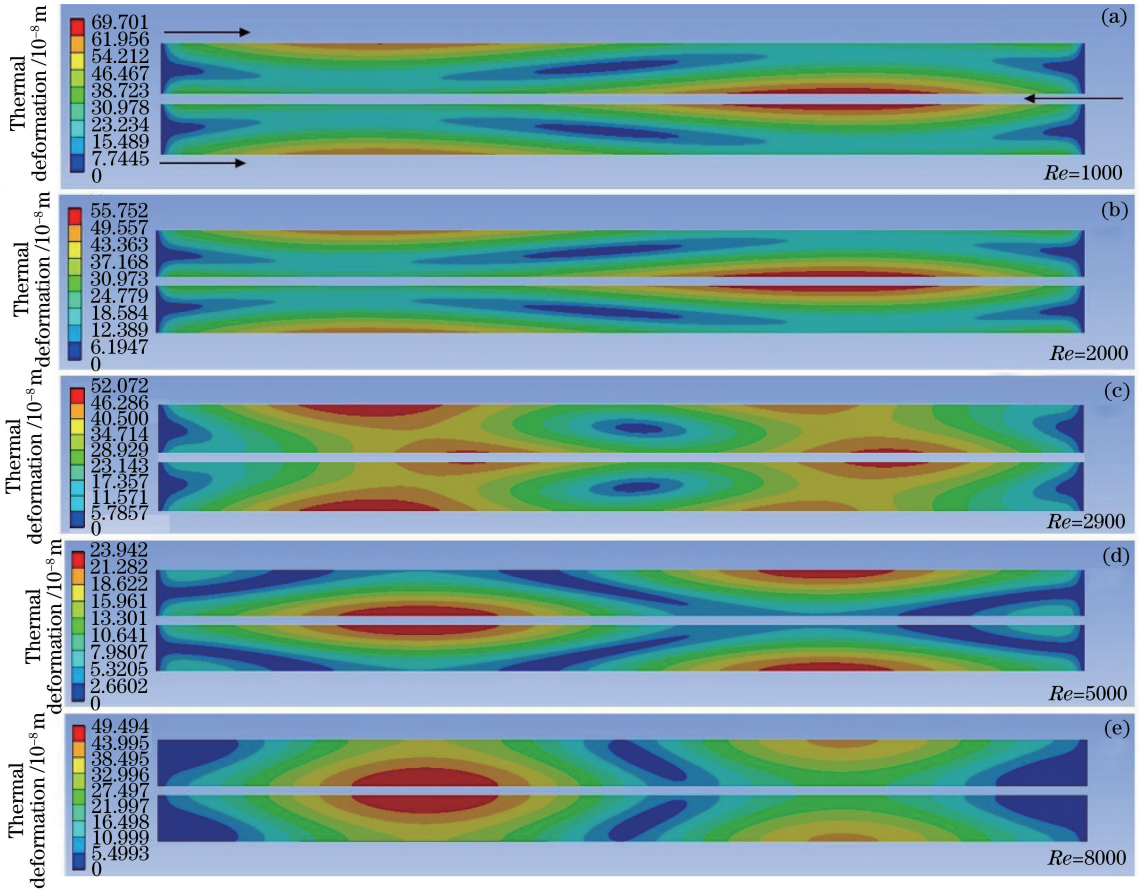


图 7 对称面上薄片的热变形分布云图

Fig. 7 Thermal deformation distributions of Nd:YAG crystal slice on symmetrical surfaces

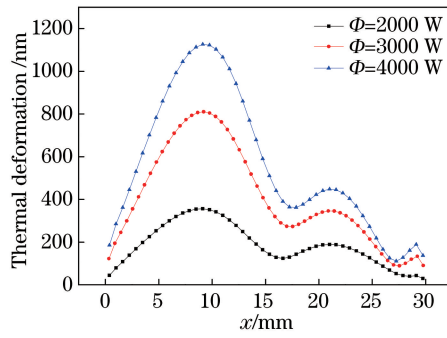


图 8 不同热流量下上薄片热变形沿 x 方向的分布

Fig. 8 Thermal deformation distributions of upper Nd:YAG crystal slice along x direction under different heat fluxes

4 结 论

建立了固体激光器流固耦合模型,利用 ANSYS 软件模拟得到了固体激光器的热效应及热应力分布结果。模拟研究发现,薄片约束面的边缘位置容易出现热疲劳,热变形较大的位置靠近流体的各入口区域。分析流动雷诺数对薄片热变形的影响后发现:最大应力均出现在薄片固定约束面的边缘位置,最大 Von Mises 等效应力随着雷诺数的增加而减小;薄片的热变形在不同的流动状态下有不同的分布方式,层流区域的最大热变形位置靠近流体的各入口区域,而湍流区域的最大热变形位置靠近流体的各出口区域。分析薄片热流量对薄片热变形的影响后发现,在不同的热流量下,薄片的热变形分布趋势基本一致,最大变形出现的位置一致;而且热流量越大,薄片的热变形越大,并且随着热流量增加,薄片的最大热变形基本呈线性增加。薄片的热变形分布趋势由冷却系统内的流场决定,热流量仅对薄片内部的温度以及薄片热变形的大小有影响。

参 考 文 献

- [1] Hu Hao, Cai Zhen, Jiang Jianfeng, *et al.* Numerical simulation of thermodynamics in cooling for heat capacity laser [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(11): 1507-1511.
胡 浩, 蔡 震, 蒋建锋, 等. 热容激光器冷却过程的热力学数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1507-1511.
- [2] Welch D F. A brief history of high-power semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1470-1477.
- [3] Wang Dongliang. Finite element analysis on thermal effect of solid-state laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 31-38.
王栋梁. 固体激光器工作介质热效应的有限元分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006: 31-38.
- [4] Pan Nana, Pan Yanqiu, Yu Lu, *et al.* Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics in microchannel cooler[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(2): 7-12.
潘娜娜, 潘艳秋, 俞 路, 等. 微通道冷却器内流动和传热特性的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(2): 7-12.
- [5] Hou Liqun, Zu Jifeng, Dong Yue, *et al.* Numerical simulation of thermal induced effects and cooling characteristics of Nd:GSG laser crystal slabs in the heat capacity operation mode[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1025-1029.
侯立群, 祖继锋, 董 玥, 等. Nd:GSG 激光晶体热容工作下的热致效应与冷却特性数值模拟[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1025-1029.
- [6] Miao Qingjie, Pan Sunqiang, Liu Bin, *et al.* Investigation of thermally induced birefringence effect in natural birefringent crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0626001.
苗青杰, 潘孙强, 刘 斌, 等. 自然双折射晶体中热致双折射效应的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0626001.
- [7] Schepler K L, Peterson R D, Berry P A, *et al.* Thermal effects in $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ thin disk lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 713-720.
- [8] Liu Shanchao, Liu Yan, Liu Lei, *et al.* Research on wave front distortion of liquid cooled side-pumped slab laser[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(3): 266-270.
刘善超, 刘 洋, 刘 磊, 等. 液体冷却大面泵浦板条激光器的波前畸变研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(3): 266-270.
- [9] Bavit M B, Safari E. Thermal and stress analyses in an end-pumped Nd:YAG slab laser using finite element method

- [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(8): 3231-3236.
- [10] Hu Hao, Tu Bo, Jiang Jianfeng, *et al.* Numerical simulation of thermodynamics in laser medium for heat capacity laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(S0): 180-184.
胡 浩, 涂 波, 蒋建锋, 等. 热容激光器激光介质的热力学数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(S0): 180-184.
- [11] Ye Z, Cai Z, Tu B, *et al.* Numerical approach to temperature and thermal stress in direct-liquid-cooled Nd:YAG thin disk laser medium[C]. SPIE, 2014, 9255: 92550T.
- [12] Yang Huomu, Feng Guoying, Wei Yongtao, *et al.* Study on temperature distribution of disk-type laser based on heat-fluid-solid multiphysics coupling method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902004.
杨火木, 冯国英, 魏泳涛, 等. 基于热-流-固多物理场耦合的薄片激光器温度场研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902004.
- [13] Yun Heming. Study on flow and heat transfer characteristics of single phase in mini-channels[D]. Jinan: Shandong University, 2007: 39-40.
云和明. 细通道单相流动和传热特性的研究[D]. 济南: 山东大学, 2007: 39-40.
- [14] Lu Peng. Numerical simulation of fluid-solid coupled heat transfer process in microchannel cooler[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 29-33.
卢 鹏. 微通道冷却器内流固耦合传热过程的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 29-33.
- [15] Pan Y Q, Lu P, Yu L, *et al.* Numerical simulation of flow characteristic in microchannel between parallel flat plates [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 423/426: 1763-1767.
- [16] Yang H, Feng G, Zhou S. Thermal effects in high-power Nd:YAG disk-type solid state laser[J]. Optics and Laser Technology, 2011, 43(6): 1006-1015.
- [17] Zhu Hongjun. ANSYS 14.5 actual combat guide of the fluid-solid-heat coupling[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 162-165.
朱红钧. ANSYS 14.5 热流固耦合实战指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 162-165.