



## 高功率板条激光介质的纵向强制对流换热技术

何建国 李明 翁泽强 王金舵 余锦 代守军 陈艳中 葛文琦 刘洋 凡炼文

### Longitudinal forced convection heat transfer for high power slab laser media

He Jianguo, Li Ming, Mo Zeqiang, Wang Jinduo, Yu Jin, Dai Shoujun, Chen Yanzhong, Ge Wenqi, Liu Yang, Fan Lianwen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20200556>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 导光镜镜面温度场的模拟分析

Simulation analysis of the temperature field of the light guide mirror on mirror surface

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1106008–1106008(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1106008>

#### 某空间气体监测仪热设计及试验验证

Thermal design of one space gas monitoring sensor and test validation

红外与激光工程. 2020, 49(4): 0413007–0413007–10 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0413007>

#### 有机电致发光器件的热学特性分析

Analysis of thermal characteristics of organic light emitting device

红外与激光工程. 2018, 47(7): 720001–0720001(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0720001>

#### 高功率板条激光技术现状与发展趋势

Status and development trend of high power slab laser technology

红外与激光工程. 2020, 49(7): 20190456–1–20190456–8 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190456>

#### GaSb基光泵浦半导体碟片激光器的研究进展(特邀)

Research progress of GaSb based optically pumped semiconductor disk lasers (*invited*)

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1003004–1003004(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1003004>

#### 180 W单频全光纤激光器

180 W single frequency all fiber laser

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1105001–1105001(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1105001>

## 高功率板条激光介质的纵向强制对流换热技术

何建国<sup>1,2,3</sup>, 李明<sup>4</sup>, 谯泽强<sup>1,2,3</sup>, 王金舵<sup>1,2</sup>, 余锦<sup>1,2\*</sup>, 代守军<sup>1,2</sup>, 陈艳中<sup>1</sup>, 葛文琦<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1,3</sup>, 凡炼文<sup>5</sup>

- (1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094;
4. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
5. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

**摘要:** 液体强制对流换热因具有较高的可靠性和性能稳定性而被广泛用于高功率板条激光介质的制冷,但沿流场方向产生的温度梯度会显著改变激光介质的热应力状态而带来不良影响。提出了基于冷却流场与目标温度匹配控制思路的双大面侧泵激光介质纵向强制对流冷却方案 (Longitudinal forced convection), 利用非定常边界条件的流-固耦合有限元仿真方法对比了全腔浸泡对流冷却 (Cavity forced convection)、微通道传导冷却技术方案 (Micro-channel conduction), 针对入口流量、流场状态、流道壁面条件等因素进行了详细研究。在 30 L/min 入口流量下, 该方案热交换区域固液界面平均对流换热系数达  $10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  量级, 且均匀分布。此外, 通过改变壁面粗糙程度能够获得更高的对流换热系数。根据设计结果研制了一套板条激光放大器, 实验监测点的温度结果与模拟仿真预测结果相吻合, 冷却性能达到预期。

**关键词:** 热管理; 板条晶体; 计算流体力学; 强制对流换热; 温度分布

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200556

## Longitudinal forced convection heat transfer for high power slab laser media

He Jianguo<sup>1,2,3</sup>, Li Ming<sup>4</sup>, Mo Zeqiang<sup>1,2,3</sup>, Wang Jinduo<sup>1,2</sup>, Yu Jin<sup>1,2\*</sup>, Dai Shoujun<sup>1,2</sup>,  
Chen Yanzhong<sup>1</sup>, Ge Wenqi<sup>1</sup>, Liu Yang<sup>1,3</sup>, Fan Lianwen<sup>5</sup>

- (1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
4. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
5. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Thermal problem becomes more prominent in the highly-pumped laser gain mediums, for which, the forced convective heat transfer with the advantages of reliability and durability is widely used. However, a flow direction induced temperature gradient always appears within the laser operating substance during the convective

收稿日期:2019-11-26; 修订日期:2020-01-05

基金项目:国家重点研发计划项目 (2018YFB0407400); 中国科学院科研仪器设备研制项目 (YJKYYQ20170035); 中国科学院光电研究院创新项目 (Y70B15A13Y); 陕西省重点研发计划项目 (2018ZDXM-GY-058); 国家重大科研仪器设备研究专项基金 (ZDYZ2013-2)

作者简介:何建国 (1988-), 男, 工程师, 博士生, 主要从事激光加工技术与光电器件热控技术方面的研究工作。Email: hejianguo@aoe.ac.cn

通讯作者:余锦 (1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光与激光加工技术及其装备技术方面的研究工作。Email: jinyu@aoe.ac.cn

heat transfer. Subsequently, it is significantly responsible for the detrimental thermal stress which mainly cause the wave front distortion. Herein, considering the idea of temperature matching between flow field and the operating substance, a cooling configuration for double face pumped slab crystal based on longitudinal forced convective heat transfer was presented, which showed a more efficient cooling and achieved a most homogeneous temperature distribution within the crystal. The influences of flow rate, state of flow field and surface roughness were systematically studied that a fully developed flow state, higher flow rate and rougher surface lead to an improvement in cooling capability. In the simulation with 30 L/min flow rate, the calculated convective heat transfer coefficient was as high as  $10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , and even higher when a more coarse surface was implemented. Furthermore, a module based on the configuration was fabricated and the experimental results agree well with the simulation, which shows a good temperature distribution and very weak thermal lensing is achieved.

**Key words:** thermal management; slab crystal; computational fluid dynamics; forced convection heat transfer; temperature distribution

## 0 引言

高功率固体激光器是当前激光技术研究中的重要发展方向。为提升固体激光器的平均功率,大量泵光被注入到增益介质中,造成了有害热量积累与不良热光效应,如,热致应力双折射、热退偏等,使得光束质量、波前、功率等指标的严重下降,甚至造成晶体断裂。因此,在高功率固体激光技术中,冷却技术的研究是一项极其重要的工作<sup>[1]</sup>。高效的激光介质冷却技术能够保证其正常的工作温度和理想的温度分布,从而获得更高功率、更高光束质量的激光输出。另一方面,大功率激光介质尺寸增大与有害热累积间的矛盾,研究人员开发了多种几何形状的增益介质与冷却方案<sup>[2]</sup>。不同于常规轴对称的棒状激光晶体,板条形的增益介质具有较高的面积体积比<sup>[3-8]</sup>。

冷却换热方法包括传导换热、对流换热与辐射换热<sup>[9]</sup>。以水为基础的传导、对流冷却技术以其长期可靠、效率高、稳定换热的特点而被广泛采用。Jingchun Min<sup>[10]</sup>提出一种基于微通道热沉的新型高效传导冷却方案,用于高功率固体板条激光器,其主要参数为  $Re=2\ 000$ , 平均对流换热系数  $2\times 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , 然而该方案由于界面热阻的原因使换热效率无法进一步提升,此外流体方向也使得温度分布的不均匀性出现在了垂直于光束传输的方向; J. R. Wang<sup>[11]</sup>采用类薄板高速流动方案对板条晶体进行直接冷却,通过控制狭缝的高度与雷诺数,成倍增大了局部对流换热系数,然而流体方向使得晶体出现了不均匀热应变,影响光束放大的效果; Xing Fu<sup>[12]</sup>对 30 kW 级多板条阵列进行了数值仿真,通过对面放置的相同板条晶体组

成振荡器,利用相反的流体运动方向控制晶体热应变,在信号光通过多块晶体后实现整体热补偿。

信号光在板条形激光介质中以 zig-zag 形式传播连续渡越前后反射面,这使得厚度方向上热梯度所带来的影响被消除。结合大面积换热,板条晶体能够在高功率注入下实现高效、高质量的激光输出。然而晶体壁面上流体温度的非定常特性与流场的方向性,传统冷却方案一般会在板条的宽度方向上引入有害热梯度,鉴于此文中基于冷却流场与目标温度匹配控制的思路,提出了一种用于双大面侧泵的大功率板条激光器的冷却结构,实现沿板条晶体长度方向的均匀流场。利用非定常边界条件的流-固耦合有限元方法对其冷却过程中的流动与传热状态进行了详细分析,对比其它传统冷却结构方案,研究了该冷却结构的工作特性及参数特性,并利用实验对仿真结果进行了验证。

## 1 板条介质的液体冷却基本原理

激光晶体受到泵浦光激励,由于存在量子亏损等原因,部分能量转化为热能。理想掺杂情况下晶体内部泵浦空间内生热均匀。在液体冷却系统中,热交换形式包括液直接对流换热、传导间接换热,考虑到间接热交换会产生附加的热阻从而降低平均导热系数,因而,晶体与液体直接对流热交换可获得更好的冷却效率。

在直接对流热交换系统中涉及固液界面热传导与流体边界层换热,二者对对流系统换热能力有着至关重要的影响。根据傅里叶导热定律

$$q = h \times \Delta T = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (1)$$

式中:  $q$  为热流密度;  $T$  为流体温度;  $\lambda$  为流体导热率;  $y$  轴垂直于固体壁面向外, 原点位于固体壁面, 公式 (1) 说明在贴壁处的极薄无滑移边界层上, 换热靠液体热传导进行。换热量与液体静态导热率及温度梯度相关, 对于同种液体, 温度梯度越大, 则换热量越大; 而在这无滑移边界层以外的流动空间里, 换热量主要取决于流场状态。

流场分析可通过  $N-S$  方程组求解, 能够获得特定时间点上流场空间内任意一点的速度矢量、压力以及温度<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i \mathbf{u}) = F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \text{div}(\mu \text{grad} u_i) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T \mathbf{u}) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T\right) \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{u}$  为流体流动速度矢量;  $u_i$  为速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的分量;  $p$  为水压;  $\rho$  为流体密度;  $\mu$  为流体动力粘度;  $F_i$  为所受的体力;  $c_p$  为定压比热容。基于液体的相对不可压缩性及常物性假设, 方程组中  $\rho$ 、 $\mu$ 、 $c_p$  可视为常数。

流体的对流换热过程几乎全部发生在边界层内, 边界层的流动情况直接决定了冷却系统的对流换热能力, 边界层内的局部对流换热系数为:

$$h_x = \frac{\lambda c_f Re_x}{2x} \quad (5)$$

$$Re_x = \frac{\rho U_\infty x}{\mu} \quad (6)$$

式中:  $h_x$  为晶体表面距离流道入口  $x$  处的局部对流换热系数;  $c_f$  为流体的范宁摩擦系数;  $Re_x$  是以  $x$  为特征的局部雷诺数;  $U_\infty$  为主流速度。可以看出:  $h_x$  正比于主流速度, 主流速度越大, 则对流换热越强。

此外, 在湍流边界层下, 由于流速在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个

方向上发生随机脉动, 这种随机脉动能产生相对层流边界层额外的换热过程, 将能量迅速匀化, 因此, 湍流边界层具有更强的对流换热能力<sup>[11-13]</sup>。

对于均匀生热板条增益介质, 双大面均匀散热, 忽略其他表面换热, 则有公式 (7)<sup>[14]</sup>:

$$T = T_c + \frac{Qt}{2} \left( \frac{1}{h} + \frac{t}{6k} \right) + \frac{Qt^2}{8k} \left[ \frac{1}{3} - \left( \frac{2y}{t} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中:  $T_c$  为冷却液温度;  $Q$  为晶体内部发热量;  $t$  为板条晶体厚度;  $k$  为晶体热导率;  $h$  为冷却表面的换热系数, 均为常数。说明晶体温度仅沿  $y$  一维方向呈二次分布,  $T=T(y)$ ; 而对于非均匀冷却, 由于冷却液流场的不均匀分布使换热系数  $h$  变为一个关于  $x$ 、 $z$  的函数, 则对于板条温度分布  $T = T(x, y, z)$ , 沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的三维不均匀分布。

综上, 板条晶体对流换热冷却方案应考虑通过冷却流道结构设计增加主流速度, 控制场分布, 增强边界层湍流强度, 提升流体的对流换热能力与均匀性。

## 2 模型与仿真实验参数

### 2.1 晶体冷却方案

将基于前述研究讨论的结果, 采用如图 1、图 2(a) 所示的冷却方案, 冷却结构采用双大面直接对流冷却, 通过流道截面设计, 减小冷却液层厚度, 提高热交换工作区的液体流速; 通过导向结构, 减小高速水流对板条晶体的冲击动压作用, 减少水流动能损失; 基于相似性原理设计流道, 使流体在加速之前匀化, 在  $z$  方向上流场趋于均匀。两大面一致的冷却状态能够保证板条晶体的一维热分布, 由于冷却面是光束的两个 zig-zag 反射面,  $x$ - $y$  平面上两侧晶体的热应力方向相反、大小相等, 使得种子光波前在两反射面之间所跨越的热梯度之和为 0, 消除了  $y$  方向上热梯度的不良影响。因此, 该冷却方案在控制流场均匀分布的前

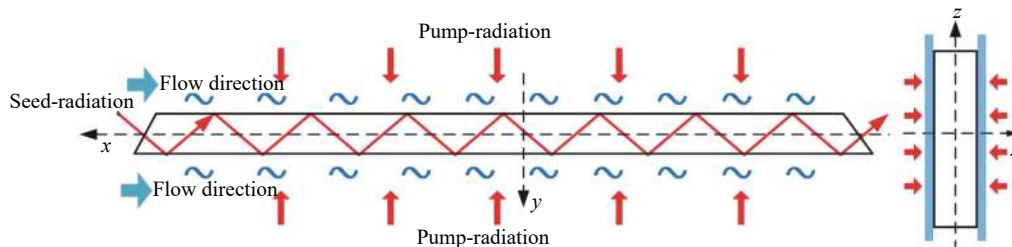


图 1 双大面均匀泵浦、均匀冷却的板条放大器方案示意图

Fig.1 Side-faces even pumping and cooling schematic for slab amplifier

提下,能够实现晶体温度的均匀分布,提供高效、高质量的换热能力。

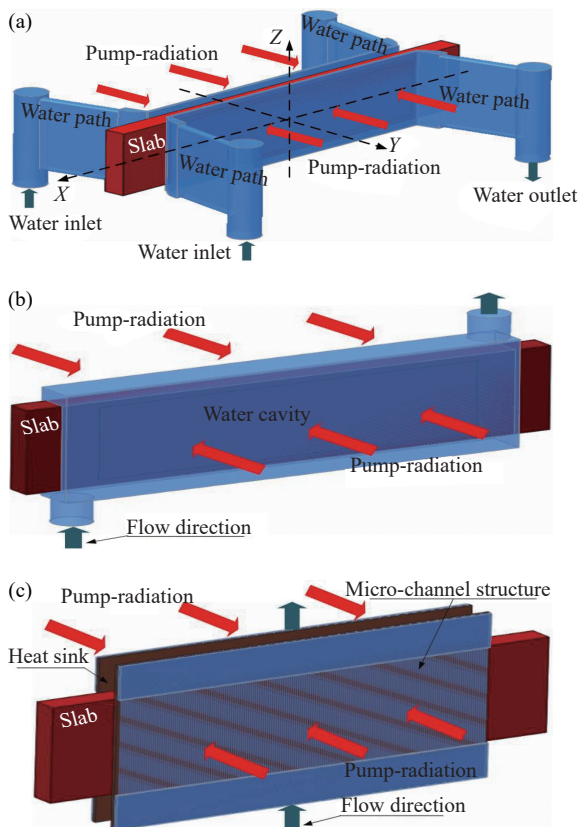


图 2 冷却结构方案示意图。(a) 全腔直接冷却; (b) 微通道传导冷却; (c) 纵向强制对流换热

Fig.2 Schematic diagrams of cooling configuration. (a) Cavity forced convection; (b) Conduction through micro-channel heat sink; (c) Longitudinal forced convection

## 2.2 模拟实验参数设置

设板条晶体为各项同性均质材料,在泵浦光照射的空间内均匀发热<sup>[15]</sup>,板条晶体发热功率 300 W,为体热源,模拟固体初始温度 25 °C,液体初始温度 18 °C。

为详细考虑流场内各因素对系统换热效率的影响,文中采用非定常边界条件的流-固耦合有限元分析方法实时模拟系统工作特性。另外,考虑到冷却过程中流场状态是一个逐渐发展充分的过程,因此在模拟过程中应分别考虑流体充分发展前后的系统冷却情况。

如图 2(b)、(c) 所示,列举了两种常见的冷却方案作为横向对比,分别为浸入式的全腔直接对流换热方案与微通道传导液体冷却方案。

这里,微通道传导冷却方案的水流流向与 zig-zag 光轴平面垂直,是由于微通道水流越长,水阻升高极大,一般来说是不具备实际意义的。在微通道方案分析计算过程中,也说明了该问题,文中微通道方案的流体流量在 0.6 L/min 以下时才具备一定实际意义,水压在可控范围之内。

## 3 计算结果讨论与分析

### 3.1 仿真计算结果

统计模拟计算结果,如表 1 所示。从表 1 明显看出:纵向强制对流冷却方案要优于全腔直接冷却方案,且优于实际可行的微通道冷却方案,板条晶体的最高温度、平均温度、温度均匀性等各项指标均优于其他冷却方案。

表 1 几种冷却方案的模拟结果

Tab.1 Simulation results of several cooling configurations

Cooling configuration	Flow rate/ L·min <sup>-1</sup>	Max static pressure/ MPa	Max flow velocity/ m·s <sup>-1</sup>	Max temperature/ °C	Average temperature/°C	Temperature variance
Cavity forced convection	40.00	0.31	13.72	32.23	23.55	3.78
Micro-channel conduction	0.60 (one side)	0.87	5.95	32.30	29.00	2.05
Longitudinal forced convection	20.00 (one side)	0.22	11.33	26.1	22.69	0.95

全腔直接冷却是一种较为简单的流体冷却方案,没有考虑腔体内发热元件的热分布情况,其温度分布极为不均匀,在水流入口端由于水流温度最低,此处板条晶体温度较低,在水流出口附近的水流已经被一定程度的加热,这附近的板条晶体温度相对较高,纵观水流流向,可以看出:其速度矢量方向大体为入口

端指向出口端,是一个斜穿过板条晶体发热区域的方向,而在方向矢量的两侧,则因为结构而出现大量低速漩涡,因此,在此方向矢量的两侧出现了不同程度的热积累,最终形成了如图 3(a) 的温度场分布。这种温度分布下的板条晶体,热应力作用非常不均匀,板条晶体热畸变及热致应力折射效应较大,对波前会产

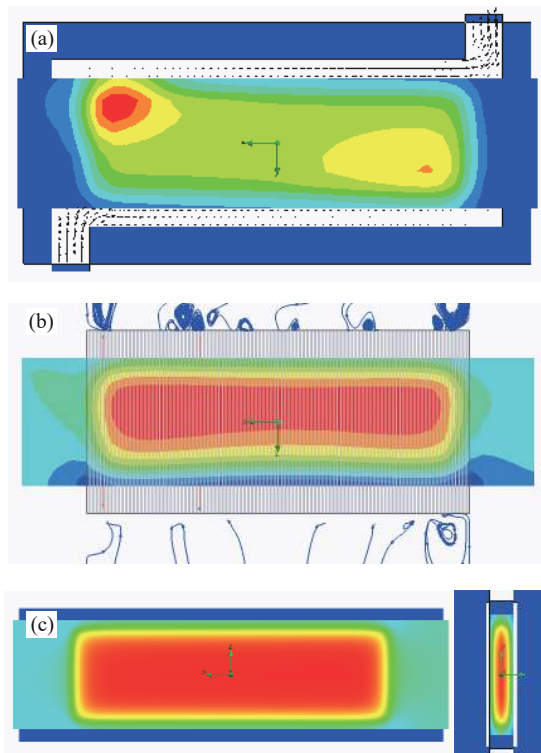


图 3 板条晶体  $x-z$  中心截面温度分布。(a) 全腔直接冷却方案；(b) 微通道传导冷却方案；(c) 纵向强制对流冷却方案

Fig.3 Temperature contour on the  $x-z$  center cross section of laser slab.  
(a) Cavity forced convective configuration; (b) Micro-channel conductive configuration; (c) Longitudinal forced convective configuration

生极不良的影响。

在微通道传导冷却方案中，基于文中所用板条晶体，其模拟仿真结果如图 3(b) 所示，热积累区域集中且分布较均匀，当较小的种子光束通过板条晶体时，即通过图中红色区域，其波前在  $z$  轴方向上能量放大相对均匀。但也应该看到，如此特征的温度分布仍不理想，温度场沿着水流方向向上稍偏移了一些，这是由于流体流动的入口效应以及流动过程中流体温度升高带来的合理现象<sup>[10]</sup>。分析流道，宏通道水流在宏通道与微通道界面处会因为水阻的骤然增大而产生大量涡流，一方面消耗了水流动能，另一方面还产生了大量有害动压作用，使水流的冷却效能进一步下降，这也是微通道冷却方案必然要面对的问题。

在纵向强制对流冷却方案中，如图 3(c) 所示，泵浦区温度分布非常理想，其温度分布是沿  $x-z$  平面、 $x-y$  平面基本中心对称的分布状态，沿  $z$  方向上的温度梯度非常小，仅在板条晶体的边缘及非泵浦区边缘存在

热梯度，对于较大种子光斑，该红色热积累区域都能够完全覆盖。该方案能够很好地消除  $z$  方向上的一阶热应力问题，而在  $x$  轴方向上同样具有良好的 consistency，结合 zig-zag 传输方式，在板条晶体中传输的激光能够被均匀放大。

### 3.2 纵向强制对流换热冷却方案分析

图 4 为纵向强制对流冷却方案中各参数与入口流量的关系，可以看出：当流量为 20 L/min 时，板条晶体已经处于一个较理想的温度水平以及静压条件。继续增加水流量，流道内流速近似线性增加，水压的增加趋势也较为平缓，说明流道通路并没有达到其最大可承载的流量，同时也说明该结构还具备较大的冷却潜力；从插入的曲线来看，随着水流量增加，温度均方差随之下降，当水流量超过 20 L/min 时，均方差接近于 1，此后曲线稳定波动于 0.95 附近，可知该流量已能够获得较理想的温度场分布均匀性。当然，过高的流速与静压容易引发密封失效、流体泄漏、设备短路等问题。

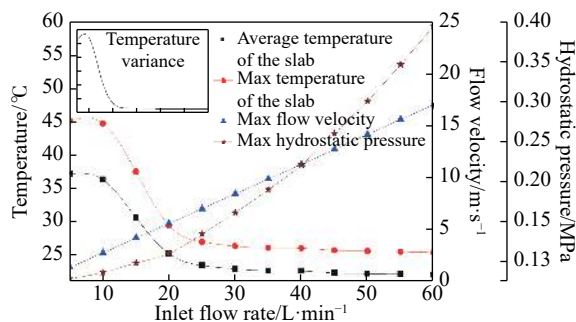


图 4 纵向强制对流冷却方案中不同参数下入口流量变化，插入曲线为温度均方差随入口流量的变化关系

Fig.4 Different parameters of longitudinal forced convective configuration vs the inlet flow rate, insert figure is temperature variance varying with the inlet flow rate

#### 3.2.1 流场状态对冷却性能的影响

在研究充分发展流与非充分发展流两种不同流场状态时发现，两者冷却性能有一定差距，文中用非充分发展流温度场参数曲线减去充分发展流参数曲线，得到图 5 的非充分发展流温度场参数相对充分发展流温度场参数在同等入口流量情况下的差值曲线。红色斜线部分代表充分发展流的板条晶体平均温度与最高温度均较非充分发展流大，而绿色斜线则代表充分发展流的温度场均匀性要好于非充分发展流。

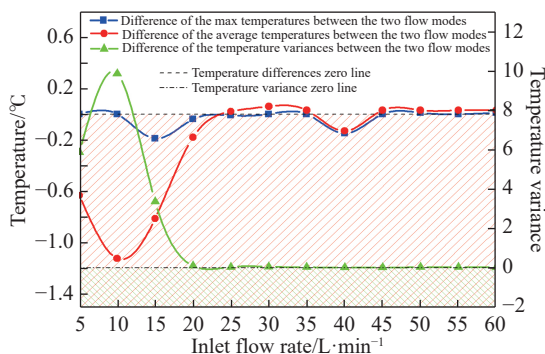


图 5 非充分发展流与充分发展流在同入口流量下不同参数的差值曲线

Fig.5 Relationships of the different parameter differences vs inlet flow about fully developed and developing flow

基于流体壁面阻力系数与表面对流换热系数的共性方程, 推导得到公式 (8):

$$h_x = \frac{\tau_w \lambda}{\rho \nu U_\infty}, \quad (8)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho c_f U_\infty^2, \quad (9)$$

式中:  $\tau_w$  为壁面剪切力。

考虑到充分发展流场的特征, 流动道内流场沿流动方向均匀不变, 沿水流方向压力损失呈线性, 则公式 (8)、(9) 中  $\tau_w$  在整个流场范围内应保持不变, 则对流换热系数  $h_x$  也保持不变, 说明在整个流场范围内流体的冷却效率具有良好的一致性; 另一方面, 由于充分发展流的壁面附近速度要小于非充分发展流, 因此, 充分发展流在壁面附近的湍流强度、湍流脉动速度等相对较小, 也就使得流场整体的对流换热能力略小。

取 30 L/min 入口流量充分发展流与非充分发展流的模拟结果作比对, 图 6 为两种流场在  $x$ - $y$  中心截面上板条晶体固-液界面对流换热系数随  $x$  轴的变化曲线, 黑色曲线与红色曲线为对流换热系数沿  $x$  轴分布, 绿色与蓝色曲线分别为黑色与红色曲线的高阶多项式拟合结果。观察两条拟合曲线, 能够看到充分发展流场的对流换热系数沿  $x$  轴变化较小, 曲线较平缓。仿真结果与前述分析一致, 说明充分发展流流场的换热能力在整个流场范围内较为稳定。如图 6 所示, 在入口段的初期, 由于流体速度在沿板条晶体大面方向上的速度分量较小, 此时流体对板条晶体的正压力作用大于剪切作用, 根据公式 (8), 此时对流换热系数较小, 进入入口段的中后期由于水流沿板条表面

速度分量基本达到最大值, 加上由来流扰动造成的大量湍流, 使入口段中后期的对流换热系数大大增加, 并出现较大的跳跃; 在距板条晶体中心  $\pm 50$  mm 冷却区域内, 对流换热系数在  $\pm 30$  mm 的范围内分布均匀, 考虑到波前畸变的影响, 在冷却结构设计过程中, 应增加入口段的长度, 使得在冷却液换热工作区的流场处于充分发展流的状态。

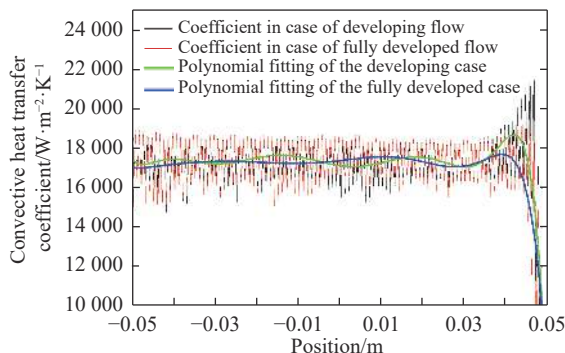


图 6 板条界面处对流换热系数模拟结果随  $x$  轴坐标变化曲线

Fig.6 Simulation result of convective heat transfer coefficient vs  $x$  axis at the slab surface

### 3.2.2 流动壁面条件的影响

为研究流道壁面质量在纵向强制对流冷却方案中所起的作用, 以入口流量为 30 L/min 为基础, 设流道壁面粗糙度水平 ( $R_z$ : 轮廓最大高度) 由  $3e-4$ 、 $1e-3$ 、 $0.01$ 、 $0.05$ 、 $0.1$  等变化至  $30 \mu\text{m}$ , 模拟结果如图 7 所示。当在表面粗糙度小于  $3.2 \mu\text{m}$  时, 各参数曲线较平缓, 当表面粗糙度大于  $3.2 \mu\text{m}$  后, 板条晶体温度水平明显下降。另一方面看, 随着表面粗糙度的增大, 晶体对流换热表面的平均对流换热系数逐渐增大, 并在大于  $20 \mu\text{m}$  后几乎提升了一个数量级。表面粗糙度的增大能够提升表面对流换热系数水平, 一方面是由于表面粗糙度增大, 使流体边界层情况复杂化, 在高速主流的带动下, 流体边界层内的湍流时均动能增加, 边界层换热系数增加; 另一方面, 表面粗糙度的增大也意味着固-液接触面积的增加, 降低了固-液系统的宏观界面热阻, 增强了固-液界面的热传导。当然一般光学元件表面粗糙度极低, 因此为提高系统对流换热系数, 可在不影响泵浦光照射的情况下, 在板条晶体表面加工一定形状的粗糙结构, 这与 Nd:YAG 螺纹晶体棒的做法是一致的。

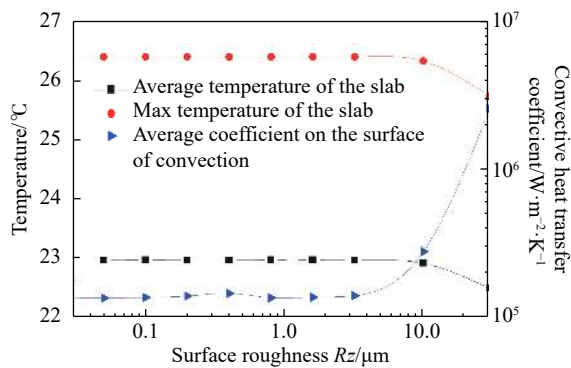


图 7 壁面粗糙度对冷却系统性能的影响

Fig.7 Effection of the surface roughness on performance of cooling system

### 4 实验结果

根据模拟结果设计装配了一款大功率板条激光放大器, 水冷机出口总流量设置约为 40 L/min。在短腔的储能测试过程中, 待系统稳定运行, 利用红外热像仪拍摄板条晶体端面温度, 列举仿真模拟结果, 截取晶体端面温度云图并图例归一化。

结合图 8 与表 2 数据能够发现: 系统仿真结果与实际模块工作时的结果基本吻合, 达到了预期冷却效能; 通过测量, 纵向强制对流冷却方案下的板条晶体放大器其热焦距能够达到数十米, 在大功率全固态激

Max temperatures in the images are 34.6°C, 36.3°C, 38.6°C, 40.1°C

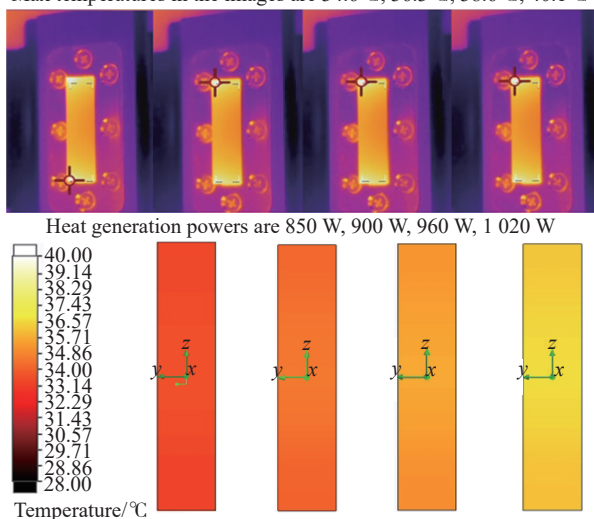


图 8 纵向强制对流冷却方案中实验用激光放大器工作状态晶体端面温度图-红外热像仪(上)与模拟结果(下)

Fig.8 Crystal end faces temperature in investigation with laser amplifier working in longitudinal forced convection- infrared thermal imager (up) and simulation results (down)

光器系统中能够提供低热畸变与低热透镜效应的放大效能。

表 2 纵向强制对流冷却方案中实验用激光放大器工作状态晶体端面温度

Tab.2 Crystal end faces temperature in investigation with laser amplifier working in longitudinal forced convection

Parameter	Value			
Thermal power/W	850	900	960	1 020
Measurement/°C	34.6	36.3	38.6	40.1
Simulation/°C	33.51	34.38	36.44	38.17

### 5 结束语

文中就双大面侧泵大功率板条激光放大器提出了纵向强制对流换热的技术方案, 基于非定常边界条件的流固耦合流体力学仿真方法, 分析了入口流量、流场状态、壁面粗糙条件等因素对冷却效果的影响, 结合实验检验了该方案的冷却能力, 在 30 L/min 的流量下, 实现了  $18\ 000\ \text{W}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  的平均对流换热系数。

(1) 提出流场与热源分布匹配的思路, 即纵向强制对流冷却技术, 将流场方向约束在板条晶体内光传播的方向上, 避免其正交方向的热梯度分量, 实现高效、高质量均匀换热。

(2) 流场参数与换热效率密切相关, 入口流量起主要作用, 流量越大换热效率越高; 入口处流场处于趋稳过程, 湍流较强, 出现换热效率的极值。

(3) 对比流场发展状态, 充分发展流下晶体散热的温度均匀性有所提高, 这归因于充分发展流道截面速度分布呈稳定状态, 流场整体变化趋稳。

(4) 增加壁面粗糙度能够提升对流换热。这是由于粗糙的壁面能够增加换热面积, 同时由于粗糙壁面对流体边界的扰动作用, 在边界层内湍流被大量激发, 增强了局部对流换热系数。

### 参考文献:

[1] Eggleston J, Kane T, Kuhn K, et al. The slab geometry laser - part I: theory[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, 20(3): 289-301.

[2] Kane T, Eggleston J, Byer R. The slab geometry laser - part II:



- thermal effects in a finite slab[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1985, 21(8): 1195-1210.
- [3] Lang Ye, Chen Yanzhong, Liao Lifan, et al. Investigation on efficiency declines due to spectral overlap between LDAs pump and laser medium in high power double face pumped slab laser[J]. *Results in Physics*, 2018, 8: 281-285.
- [4] Tian Xiao, Qi Bing. Temperature field of Nd: YAG crystal under air heat transfer [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 686-692. (in Chinese)  
田晓, 齐兵. 空气导热作用下Nd:YAG晶体温场特性[J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 686-692.
- [5] Bai Bing, Shi Peng, Li Long, et al. Semianalytical analysis of the thermal process of a heat capacity ndglass laser rod [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 601-606. (in Chinese)  
白冰, 史彭, 李隆, 等. 圆棒Nd:glass热容激光器的热过程半解析分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 601-606.
- [6] Li Cui, Hongwei Geng, Yizhuo Zhang, et al. Analysis and experimental research on liquid cooling slab laser[C]//SPIE, 2018, 10798: 107980I.
- [7] Li Yan, Zhang Yixuan, Na Quanxin, et al. Temperature distribution calculation and experiments of Tm:YLF laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0506001. (in Chinese)  
李岩, 张艺轩, 纳全鑫, 等. Tm:YLF激光器温度场分布计算与实验[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(5): 0506001.
- [8] Xiao Chen, Ping Zhou, Ren-ke Kang, et al. Structural optimization design of water-cooling mirror with straight flow channels[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 81: 154-160.
- [9] Madhav Datta, Hae-Won Choi. Microheat exchanger for cooling high power laser diodes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 90(5): 266-273.
- [10] Min Jingchun, Wang Junrong, Song Yaozu. Cooling of laser slab by forced convection through a heat sink[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2011, 28(11): 931-939.
- [11] Wang J R, Min J C, Song Y Z. Forced convective cooling of a high-power solid-state laser slab[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26( 5-6): 549-558
- [12] Xing Fu, Qiang Liu, Peilin Li, et al. Numerical simulation of 30-kW class liquid-cooled Nd:YAG multi-slab resonator [J]. *Opt Express*, 2015, 23: 18458-18470.
- [13] Moghtader Dindarlu M H, Maleki A, Kavosh Tehrani M, et al. New analysis of temperature distribution in side diode-pumped laser slab[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2017, 55(4): 1704-1712.
- [14] Tang Bing, Zhou Tangjian, Wang Dan, et al. Optical distortions in end-pumped zigzag slab lasers [J]. *Appl Opt*, 2015, 54: 2693-2702.
- [15] Li Yao, Li Yang, Wang Chao. Absorption light field of side-pumped Nd: YAG crystal in LD planar arrays [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 206-211. (in Chinese)  
李耀, 李阳, 王超. LD面阵侧面泵浦Nd:YAG晶体吸收光场研究[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 206-211.