

文章编号: 1001-3806(2016)05-0695-06

碟片激光器晶体模块阵列射流冲击冷却的研究

邵娜, 朱晓*, 朱广志, 王牧, 冯珂璠, 黄彦

(华中科技大学 光学与电子信息学院 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430070)

摘要: 为了研究影响碟片激光器晶体模块射流冲击冷却单元换热效果的核心因素, 采用数值计算的方法, 在喷孔总面积一定的条件下对孔径、孔间距及喷射距离进行了冲击冷却的分析, 通过实验对换热系数进行了对比分析, 并在实际的碟片激光器上对降温效果进行了验证。结果表明, 孔径为 0.6mm 且孔间距为 1.6mm 的喷嘴 B 具有最好的换热效果, 在 3L/min 的流量及 3mm 的喷射距离下, 换热系数达到 $55000\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; 不同泵压下, 存在最佳喷射距离, 喷嘴 B 在 0.2MPa 时, 最佳喷射距离为 0.5mm; 当流量为 6.5L/min、喷射距离为 5mm 及注入电流为 200A 时, 喷嘴 B 对碟片晶体的冷却温度比喷嘴 C 低 5℃。此结论为碟片激光器晶体模块射流冲击冷却单元的优化设计提供了参考。

关键词: 激光器; 阵列射流; 仿真分析; 冷却效果

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.016

Study on jet array impingement cooling for crystal module of thin disk laser

SHAO Na, ZHU Xiao, ZHU Guangzhi, WANG Mu, FENG Yufan, HUANG Yan

(National Engineering Research Center for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to analyze the core factor of cooling effect of jet array impingement unit of disk-laser crystal module, the effect of apertures, hole-to-hole spacing and nozzle-to-plate spacing on jet array impingement cooling was analyzed by numerical calculation under certain total area of each nozzle. Heat transfer coefficient was analyzed comparatively by experiment. The cooling effect was verified in actual disk laser. The results show that nozzle B of hole aperture 0.6mm and hole-to-hole spacing 1.6mm has the highest heat transfer coefficient. Heat transfer coefficient can reach $55000\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ at water flow rate of 3L/min and nozzle-to-plate spacing of 3mm. There is optimum value of nozzle-to-plate spacing at different inlet pressures. The optimum value of nozzle-to-plate spacing of nozzle B is 0.5mm at inlet pressure of 0.2MPa. Verification experiment on actual disk-laser shows that the cooling temperature of nozzle B declines 5℃ lower than of nozzle C, at water flow rate of 6.5L/min, nozzle-to-plate spacing of 5mm and current of 200A. The conclusion provides a reference for the design and the optimization of jet impingement cooling unit of thin-disk laser crystal module.

Key words: lasers; jet array; simulation analysis; cooling effect

引言

碟片固体激光器薄片状的增益介质及其轴向的冷却方式,使其热效应大幅度地降低,为高光束质量、高输出功率激光束的输出提供了可能。目前德国 Trumpf 公司采用 Yb:YAG 碟片固体激光器已经实现单碟片连续运行 4kW 近衍射极限的激光输出 ($M^2 = 1.38$),多模运行高于 10kW。在高端焊接、切割、热处理等工业领域发挥越来越重要的作用。碟片固体激光器的思想最早由 GIESEN 教授提出,其多次抽运技术

和高效冷却技术成为实现高光束质量、高转换效率、高输出功率激光输出的核心技术^[1-4]。由于准三能级的 Yb:YAG 激光晶体的玻尔兹曼分布系数、吸收截面、发射截面和热导率均是温度的函数^[5-7],因此激光晶体的高效冷却、面型控制就显得尤为重要。相比于传统的冷却技术,射流冲击冷却技术以其换热能力高(最大负载热流密度可达 $10\text{kW}/\text{cm}^2$ ^[8])成为了碟片固体激光器冷却单元的首选方案,其冷却单元的设计与优化技术成为碟片固体激光器研究的热点之一。

基于不同的冷却面积的射流冲击冷却可以分为单射流冲击冷却和阵列射流冲击冷却。而针对碟片激光器晶体模块射流冲击冷却单元研究的相关文献很少。2007年,TSUNEKANE 与 TAIRA 研究了在单管冲击的情况下,通过在换热面增加微散热肋片来增加散热面积,从而减小对流换热热阻^[9]。2014年,西南技术物

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61475057)

作者简介:邵娜(1990-),女,硕士研究生,现主要从事激光技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail:zx@mail.hust.edu.cn

收稿日期:2015-08-17;收到修改稿日期:2015-09-01

理研究所的 GUO 等人以面均对流换热系数和平均最大温差为评价喷嘴换热能力的参量,在直接冲击碟片即无热沉的情况下,采用流体力学仿真软件分析了喷孔的排布方式、孔的形状及喷射距离对换热效果的影响^[10]。

本文中从流体力学 (Navier-Stokes, N-S) 方程出发,针对碟片激光晶体大增益区 (大热源区) 的特点,在喷孔总面积一定的条件下,对碟片激光晶体模块阵列型冲击冷却单元的 3 个核心参量,即孔径、孔间距以及冲击距离对换热效果的影响进行了分析,指出冲击射流驻点区中心冷却液的流动路径问题、相邻喷孔间冷却液的卷吸干扰问题及喷射过程中的速度损失和水阻变化的问题是影响冲击冷却换热效果的核心因素。通过优化设计和对比分析得出最优的设计方案,并开展相应的实验研究。

1 碟片激光器晶体模块射流冲击冷却的分析模型

碟片晶体通过焊接技术封装在 CuW 合金的热沉表面,构成碟片激光器增益模块并装配在冲击冷却系统中。冷却液在泵的压力驱动下从喷管入口进入,通过喷孔阵列后直接冲击到热沉底面。高速流动的冷却液将碟片晶体内部产生的热量迅速带走,从而有效实现温度的控制。图 1 为碟片激光器射流冲击冷却的结构模型示意图。图 2 为对应的实物图。其中 D 为碟

片抽运区直径, D_1 为碟片晶体直径, D_2 为热沉的直径, l 为热沉的厚度, H 为喷射距离。

对于图 1 所示的碟片激光器晶体模块射流冲击冷却模型而言,从喷孔喷出的冷却液雷诺数很高,属于湍流换热。湍流流动的质量、动量、能量守恒的控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij,R}) + S_i, (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\tau_{ij} + \tau_{ij,R}) + q_i] +$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij,R} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + S_i u_i + Q \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} \quad (4)$$

式中, x_i 和 x_j 为空间位置坐标, u 是流体的速率, u_i 和 u_j 表示速度分量, i, j 服从爱因斯坦求和约定,即遍历取其值求和, t 是时间, ρ 是流体的密度, S_i 表示质量力, h 是热焓, Q 是热源, τ_{ij} 是粘性剪切应力张量, $\tau_{ij,R}$ 是雷诺应力张量, q_i 是扩散热通量。

而湍流流动作为一种非常复杂的流动方式,其物理参量随时间和空间发生不断的变化,解析求解技术相当困难。所以,基于计算机的数值求解方式成为解决此类问题的主要方法之一。对 N-S 方程做系综平均,可以描述湍流统计量的演化并大大减小对计算机资源的消耗,这样处理会使方程中出现雷诺应力项使方程不封闭,通常采用湍动能和湍动能耗散率的输运方程,即 $k-\varepsilon$ 模型来使方程封闭^[11]。

$k-\varepsilon$ 方程为:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中, k 是湍动能, ε 是湍动能耗散率, μ 是动力粘度系数, μ_t 是涡粘系数, S_k 和 S_ε 是源项, σ_ε 和 σ_k 均为系

Table 1 Parameters and boundary conditions of the model

thin-disk crystal		heatsink		boundary conditions	
diameter	15mm	diameter	23mm	diameter of radiation heating area	9mm
thickness	0.2mm	thickness	2mm	heating power	120W
material	Yb:YAG	material	copper	coolant temperature	20°C
thermal conductivity	5.5W/(m·K)	thermal conductivity	405W/(m·K)	rate of flow	3L/min

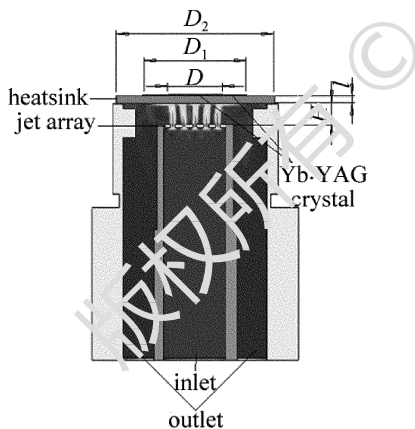


Fig. 1 Model of jet impingement cooling structure of disk laser

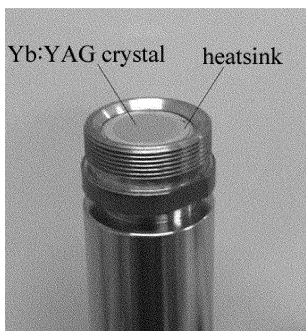


Fig. 2 Cooling unit arrangement of disk laser

数,是常数,由实验经验获得其具体值。

本文中采用一款商业化流体仿真软件进行分析^[12],它是基于流体力学的 Navier-Stocks 方程并采用了有限体积法计算。相关模型尺寸及边界条件设定如表 1 所示。

2 射流冲击冷却的数值模拟及喷嘴的优化设计

2.1 孔径及孔间距的优化设计

为了分析孔径与孔间距对喷嘴换热能力的影响,表 2 中给出了 3 种典型的喷嘴孔型的参量。 d 为喷孔直径, L 为孔间距,这里定义刚好包含所有喷孔的圆直径为布孔的范围,用 D_3 表示。各喷嘴模型如图 3 所示。

Table 2 Parameters of nozzles

parameters	nozzle A	nozzle B	nozzle C
d/mm	1.53	0.6	0.6
D_3/mm	7	7	4
L/mm	4.74	1.6	0.85
the number of orifices	3	19	19
total area of the orifices		5.5mm ²	
nozzle-to-plate spacing		3mm	
configuration of holes	regular triangle arrangement		

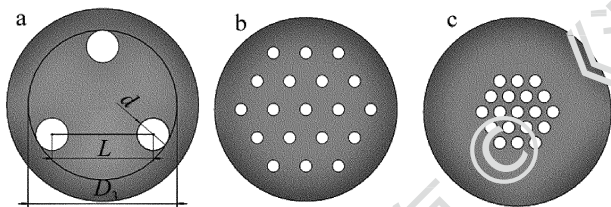


Fig. 3 Diagram of nozzle A, B and C
a—nozzle A b—nozzle B c—nozzle C

图 4 为喷嘴 A 射流冲击换热所获得的换热面速度与换热系数分布的计算彩云图。在速度图上有 3 个高速区,其空间位置与每一个喷孔的驻点区相对应。该区域的冷却液流速迅速滞止为零,并由轴向转为径向,此时边界层最薄,通常对应换热系数的峰值区^[13]。然而,由于喷嘴 A 的孔径过大,使得驻点区中心冷却液的流动路径受到驻点区边缘冷却液的阻碍,无法顺畅流出,从而使驻点区中心出现了一个明显的速率降

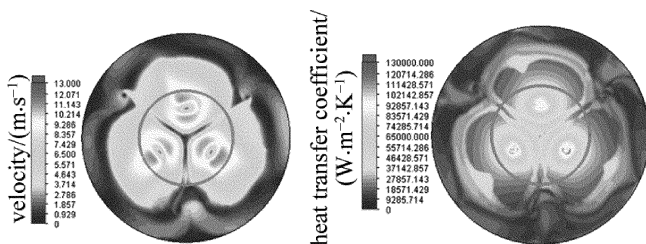


Fig. 4 Jet impingement cooling surface liquid velocity and heat transfer coefficient distribution of nozzle A

低的区域,故驻点区中心的换热系数不高,甚至低于驻点区边缘的换热系数,从而导致整体的冷却效果降低。

为了解决喷嘴 A 孔径过大所导致驻点区域内中心冷却液滞留问题,在保证布孔范围和喷孔总面积不变的条件下,将喷嘴 A 的结构修正为喷嘴 B,其结构如图 3b 所示。图 5 为喷嘴 B 射流冲击换热所获得的换热面速率与换热系数分布的计算彩云图。可以看出,减小孔径使得驻点区中心冷却液不存在滞留现象,驻点区的换热系数也有明显提高。而如果进一步缩小喷孔,一方面会给机械加工带来极大的困难,另一方面会导致喷孔处水阻过大,反而造成冷却效率的降低。因此,喷孔的孔径大小刚好使驻点区中心冷却液不再出现滞留问题为最佳。

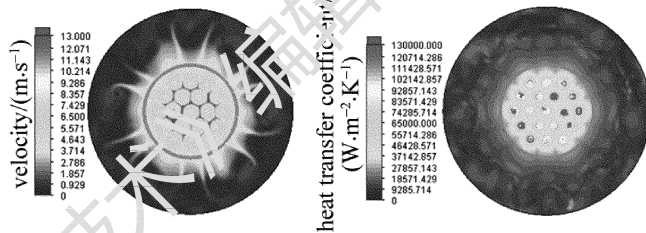


Fig. 5 Jet impingement cooling surface liquid velocity and heat transfer coefficient distribution of nozzle B

图 6 为喷嘴 C 射流冲击换热所获得的换热面速度与换热系数分布的计算彩云图。与喷嘴 B 相比,喷嘴 C 的孔径和喷孔数量与喷嘴 B 相同,仅减小了孔间距。可以看出,由于孔间距的减小,每个喷孔所对应的驻点区存在明显的交叠现象,因此在换热系数分布图中,每个驻点区峰值换热特征变得模糊,从而造成换热面整体换热系数的下降。

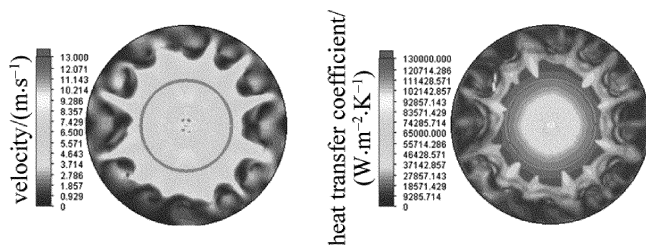


Fig. 6 Jet impingement cooling surface liquid velocity and heat transfer coefficient distribution of nozzle C

图 7 为喷嘴 B 和喷嘴 C 射流冲击换热时轴向剖面速度矢量分布的对比图。可以看出,与喷嘴 B 相比,喷嘴 C 由于孔间距较小,相邻喷孔射流之间在冲击到换热面之前就形成了明显的卷吸干扰^[14],这是造成每个喷孔所对应的驻点区存在明显的交叠现象的主要原因。因此,在孔间距的优化设计中,要尽量避免相邻喷孔冲击冷却液之间的卷吸干扰,使得在换热面获得清晰的驻点换热系数峰值区。

综上所述,对于喷孔阵列型喷嘴,孔径和孔间距是

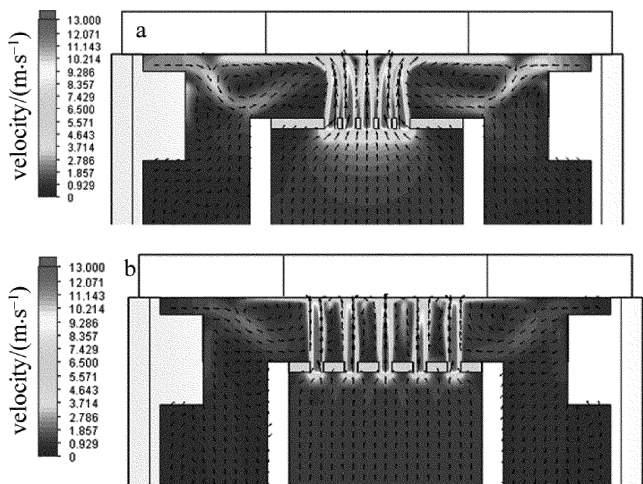


Fig. 7 Jet impingement cooling liquid velocity vector distribution of nozzle B and C
a—nozzle B b—nozzle C

影响换热系数的主要因素。在追求最佳换热能力的设计过程中,孔径的优化设计应在避免驻点区中心冷却液滞留问题的同时,权衡机械结构和水阻的影响;而孔间距的优化则应尽量避免相邻喷孔间冷却液卷吸干扰影响。图8为A,B,C3种喷嘴平均换热系数及碟片晶体最高温度的分析曲线,可以看出,由于B喷嘴解决了孔径驻点区中心冷却液滞留问题,也避免了喷孔间冷却液卷吸干扰影响,故冷却效果最优。

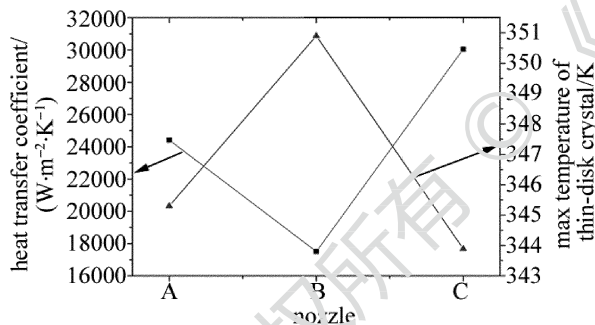


Fig. 8 Average heat transfer coefficient and max temperature of thin-disk crystal with different nozzles

2.2 冲击距离的优化设计

图9为不同泵压下喷嘴B射流冲击换热时碟片最高温度随喷射距离的变化曲线。一方面,当入口压力增加时,曲线整体下降,这是由于当压力增加,流速变大,换热效果也就会提高,但是每一个压力下,曲线的变化趋势几乎是一样的。另一方面,就某一个压力来说,随着喷射距离的减小,碟片的最高温度逐渐降低,而当喷射距离小于0.4mm时,碟片温度出现显著地上升。其原因是,喷射距离越小,冷却液冲击到换热面时速度损失越小,换热效果就越好,而当喷射距离小到一定程度,射流的流动路径受到阻碍,冷却液滞留现象严重,导致碟片温度显著上升。因此,不同泵压下,都存在一个最佳喷射距离。

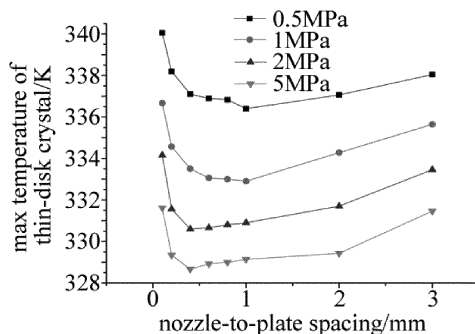


Fig. 9 Relationship between max temperature of thin-disk crystal and nozzle-to-plate spacing at different inlet pressures

3 实验数据分析

为了测量不同喷嘴射流冲击换热系数,搭建了如图10所示的实验装置。图11所示为实验测量原理。其中,柱状导热棒长为100mm,直径8mm,为紫铜材料。其一端与碟片热沉尺寸相同,并装配在射流冲击冷却单元上,换热面到喷嘴的距离设置为3mm,入口

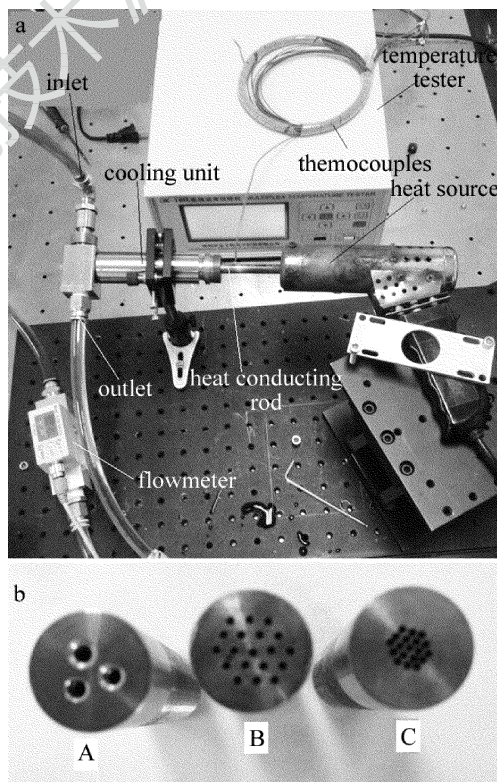


Fig. 10 Experiment equipment of jet impingement cooling

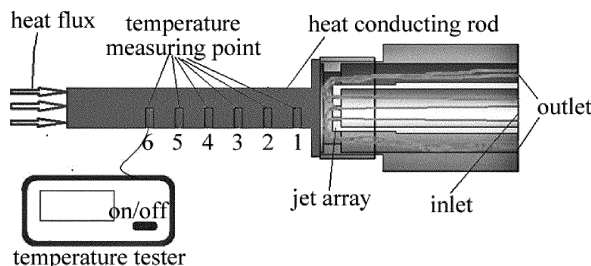


Fig. 11 Diagram of experimental measurement principle

流量为 3L/min, 水温 20℃。另一端与功率为 500W 的电热源充分接触。柱状导热棒侧面设有 6 个等间距分布的测温点。在热平衡的条件下, 对所采集的测温点数据进行曲线拟合, 获得沿一条沿着导热棒轴线 x 方向的温度曲线 $T = T_0 + ax$, 其中 T_0 表示被冲击面中心温度, a 表示斜率。结合 1 维热传导方程^[15], 可计算出沿轴向传输的热流量 q 。将实验中所获得的热流量

q 带入柱状导热棒的有限元分析模型中, 通过调整碟片热沉换热面上的平均换热系数, 使模型中柱状导热棒测量点的计算温度 T_r 与对应的实测温度 T_r' 相同, 此时加载到模型上的平均换热系数 h_e 即为实验装置中冲击冷却面的平均换热系数^[16]。实验数据处理流程如图 12 所示, 其中 A 表示导热柱的截面积, λ 表示导热柱的导热率。

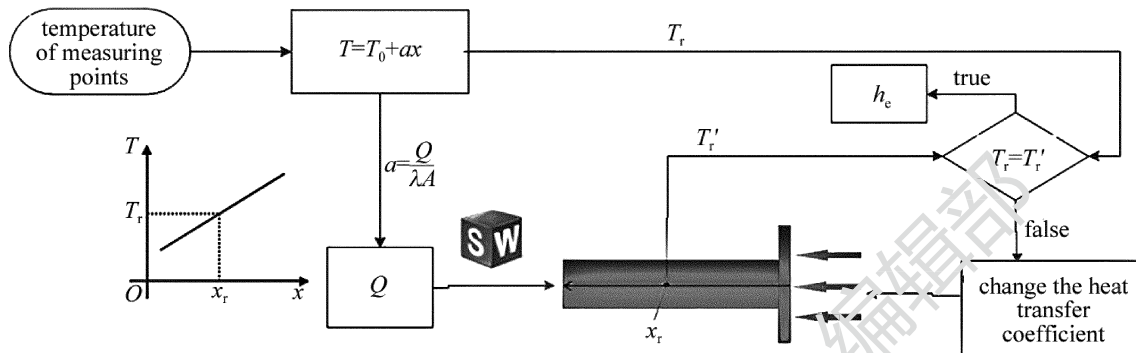


Fig. 12 Flow chart of experimental data processing

采用上述实验装置和测量方法, 对图 10 所示的 3 个不同喷嘴的平均换热系数进行测量和比较, 其实验结果如图 13 所示。可以看出, 喷嘴 B 的换热系数最高, 喷嘴 C 的换热系数最低, 而喷嘴 A 的换热系数位于喷嘴 B 和喷嘴 C 之间, 这一结果与模拟计算的结果是一致的。

0.2MPa 下, 喷射距离为 0.5mm 左右时有最佳换热效果, 这一结果符合模拟分析所得出的结论。

4 在实际碟片激光器上的验证

图 15 为在实际碟片激光器上验证喷嘴换热效果的实验装置图。碟片激光晶体及其射流冲击冷却单元装配在多程抽运光腔中。设置入口流量为 6.5L/min, 喷射距离 5mm, 水温 24℃。碟片晶体吸收抽运光后生成热量, 同时冷却液通过喷嘴对其进行射流冲击换热, 待其稳定后, 用红外热像仪记录下碟片晶体抽运区的温度。图 16 为在喷嘴 B 与喷嘴 C 冲击冷却下, 碟片晶体抽运区温度随注入电流的变化曲线, 可以看出, 在

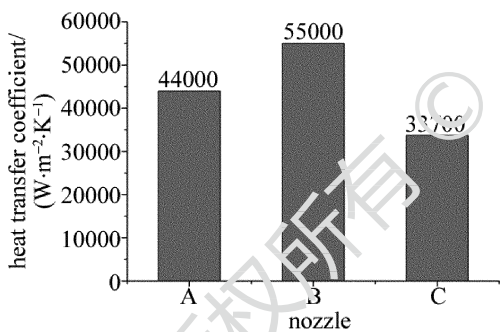


Fig. 13 Experimental result of heat transfer coefficient of different nozzles

另一方面, 采用上述实验方法对喷嘴 B 在不同喷射距离下的平均换热系数进行了测量和比较, 设定入口压力为 0.2MPa, 实验结果如图 14 所示。可以看出,

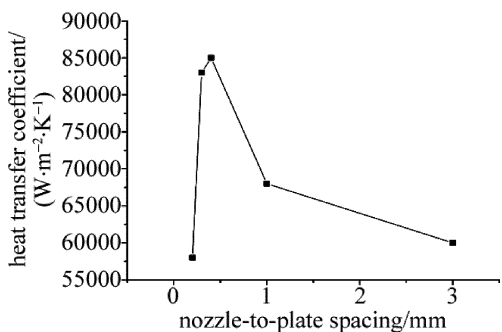


Fig. 14 Relationship between heat transfer coefficient and nozzle-to-plate spacing at 0.2MPa

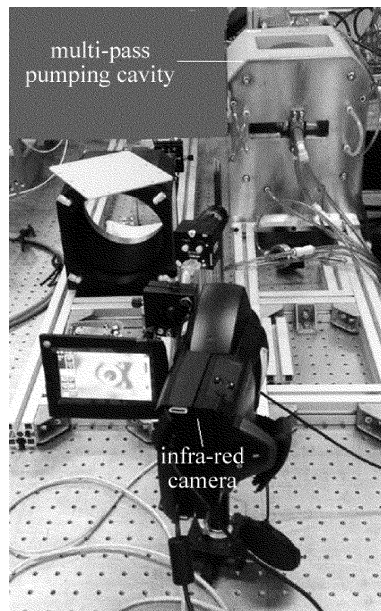


Fig. 15 Experiment equipment of jet impingement cooling on disk laser

喷嘴 B 冲击冷却下,碟片晶体的温度整体低于在喷嘴 C 冲击冷却下碟片晶体的温度,当注入电流为 200A 时,两个喷嘴对碟片晶体的冷却温度相差 5℃。图 17 为碟片晶体温度随激光输出功率的变化曲线,可以看出其与图 16 中的曲线趋势一致。

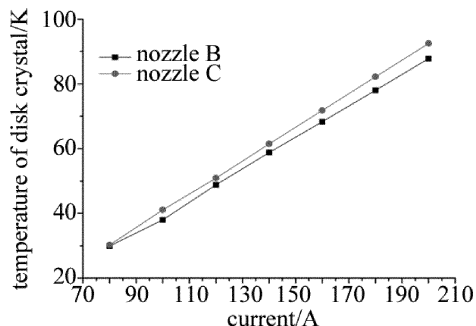


Fig. 16 Experimental result of temperature of disk crystal as a function of current

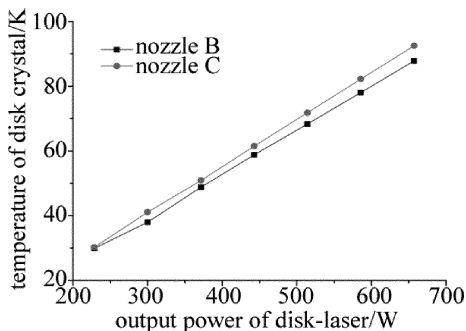


Fig. 17 Experimental result of temperature of disk crystal as a function of laser power

5 结 论

研究了碟片激光晶体模块阵列射流冲击冷却单元的 3 个核心参量,即孔径、孔间距及喷射距离对换热效果的影响。

(1) 研究了在喷嘴总面积为 5.5mm^2 的条件下,不同孔径及孔间距喷嘴对换热效果的影响。模拟分析得到孔径为 0.6mm 且孔间距为 1.5mm 的喷嘴 B 具有最好的换热效果。实验上得到了验证,其在 3L/min 的流量及 3mm 的喷射距离下,换热系数达到 $55000\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

(2) 研究了不同泵压下的最佳喷射距离。模拟分析得到不同的入口压力下,喷射距离都存在最佳值,最佳值在 0.5mm ~ 1mm 之间,且换热效果随喷射距离的变化趋势一致。对其进行了实验验证,在 0.2MPa 下,喷射距离为 0.5mm 时,换热效果最好,可达 $84000\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

(3) 在实际的碟片激光器上对喷嘴 B 和喷嘴 C 进

行了射流冲击冷却的对比验证。喷嘴 B 对碟片晶体具有更好的降温效果。当流量为 6.5L/min、喷射距离为 5mm 及注入电流为 200A 时,喷嘴 B 与喷嘴 C 对碟片的冷却温度相差 5℃。

参 考 文 献

- [1] GIESEN A, SPEISER J. Fifteen years of work on thin-disk laser: result and scaling laws[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3):598-609.
- [2] KILLI A, ZAWISCHA I, SUTTER D, *et al.* Current status and development trends of disk laser technology [J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 6781:68710L.
- [3] SPEISER J, GIESEN A. Numerical modeling of high power continuous-wave Yb:YAG thin disk lasers, scaling to 14kW[C]// Advanced Solid-State Photonics. New York, USA: IEEE, 2007:WB9.
- [4] DEILE J, BROCKMANN R, HAVAJLLO D. Current status and most recent developments of industrial high power disk lasers[C]// Conference on Laser and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference. New York, USA: IEEE, 2009: CThA4.
- [5] NAJAFI M, SEPEHR A, GOLPAYGANI A, *et al.* Simulation of thin disk laser pumping process for temperature dependent Yb:YAG property[J]. Optical Communications, 2009, 282(20): 4103-4108.
- [6] SHANG J L, ZHU X, ZHU G Z. Analytical approach to thermal lensing in end-pumped Yb:YAG thin-disk laser[J]. Applied Optics, 2011, 50(32):6103-6120.
- [7] WU Y, LONG X L, JIAO Z X, *et al.* Optimal design of high power Nd:YAG laser based on compensation of thermal lens effect[J]. Laser Technology, 2015, 39(3):377-380 (in Chinese).
- [8] CHEN P. Research of impinging cooling technology for disk laser crystal[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011:1-2 (in Chinese).
- [9] TSUNEKANE M, TAIRA T. Design and performance of compact heatsink for high-power diode edge-pumped, microchip lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 619-625.
- [10] GUO J W, JIA K, YANG F, *et al.* Study of jet cooling on disk laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1):22-26 (in Chinese).
- [11] ZHANG Z S, CUI G X, XU C X. Theory and modeling of turbulence[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:1-232 (in Chinese).
- [12] CHEN C X, HU Q D. Solidworks flow simulation [M]. Beijing: China Machine Press, 2013:1-101 (in Chinese).
- [13] LI D R, WANG W. Simulation and experiment of laser jet impingement cooling system[J]. Cryogenics, 2010, 23(2):46-50 (in Chinese).
- [14] DONG Z Y. Jet mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2005:11-111 (in Chinese).
- [15] ZHANG J Z, CHANG H P. Heat transfer theory [M]. Beijing: Science Press, 2015:1-80 (in Chinese).
- [16] KUZNETSOV I I, MUKHIN I B, SILIN D E, *et al.* Thermal effect in end pumped Yb:YAG thin-disk and Yb:YAG/YAG composite active element[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(3):133-140.