

高功率光纤激光器包层光滤除器的温度场研究

胡志涛^{1,2} 陈晓龙² 何兵² 周军^{2,3*} 张建华¹

¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072

²中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

³南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038

摘要 双包层光纤激光器输出光中的包层光严重影响了激光的光束质量、光谱特性以及激光器的可靠性和稳定性,有效滤除包层光是双包层光纤激光器工程化的一个重要环节。对高功率包层光滤除器的热效应进行了理论与实验研究,利用 ANSYS 中流体动力学模块仿真分析了高功率包层光滤除器的温度场分布,在 15~600 W 的包层光滤除功率下进行了实验验证,在此基础上仿真优化了千瓦量级功率的包层光滤除器。优化后滤除器温度下降近 46 °C,可稳定工作在 80 °C 左右。

关键词 激光器; 光纤激光器; 包层光滤除器; 温度分布; 优化设计

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0701004

Temperature Distribution of Cladding Light Strippers in High Power All-Fiber Lasers

Hu Zhitao^{1,2} Chen Xiaolong² He Bing² Zhou Jun^{2,3} Zhang Jianhua¹

¹School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

²Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

³Nanjing Zhongke Shengguang Technology Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210038, China

Abstract Unwanted cladding light in output of double-cladding fiber lasers has major adverse effect on the beam quality, spectral characteristics, and reliability and stability of lasers. It is of vital importance to strip the cladding light for engineering of the double-cladding fiber lasers. The thermal effect of high power cladding light strippers is studied theoretically and experimentally. The temperature distribution is simulated by means of computational fluid dynamics based on ANSYS. The experiments validate that the temperature simulation is effective and applicable for stripping power ranging from 15 W to 600 W. Furthermore, a kW-level cladding light stripper is optimized based on the thermal simulation. After optimization, the temperature of the stripper declines by up to 46 °C, and the stripper can run stably at about 80 °C.

Key words lasers; fiber lasers; cladding light stripper; temperature distribution; optimized design

OCIS codes 140.3510; 140.5560; 140.6810

1 引言

光纤激光器具有结构紧凑、稳定性好、转换效率高、光束质量好、易于散热等优点,广泛应用于光通信传

收稿日期: 2016-01-29; 收到修改稿日期: 2016-03-28

基金项目: 国家 863 计划(2014AA041901)、国家自然科学基金(U1330134, 61308024)、江苏省科技支撑计划(BE2014001)

作者简介: 胡志涛(1990—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器热效应和轻量化方面的研究。

E-mail: lohazht@163.com

导师简介: 张建华(1972—),女,教授,博士生导师,主要从事光电材料器件与系统、先进封装等方面的研究。

E-mail: jhzhang@shu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: junzhouhd@siom.ac.cn

感、先进制造、医疗以及国防军事等领域。对于双包层光纤激光器,信号光在纤芯和包层界面发生全反射从而被束缚在纤芯中,抽运光在内包层和外包层的界面发生全反射,不断穿过掺杂纤芯并被吸收。虽然双包层光纤激光器有利于提高激光输出功率和抽运耦合效率,但输出光中包含一定的包层光,严重影响激光的光束质量和光谱特性,直接或者间接地影响高功率激光器在高功率下的安全稳定运行。包层光主要来源于未被吸收的抽运光、熔接损耗或模式不匹配导致的纤芯光泄漏、光纤弯曲导致的高阶模泄漏,以及放大自发辐射等^[1-4]。

包层光滤除技术尤为重要,国内外关于包层光滤除方法的研究主要有内包层外涂不同高折射率的导光材料^[2-4]、氢氟酸腐蚀光纤^[5-6]、软质金属填充^[7]以及使用二氧化碳激光器在剥除光纤上熔接石英管^[8]等。上述方法的原理都是将包层光从光纤中导出,滤除的包层光通过特定的结构和方法转换为热量,在高功率光纤激光器情况下,滤除的数百瓦的残余包层光在抽运滤除器中产生大量的热沉积,导致温度明显升高。设计合理的滤除器有效滤除光功率的同时,采用合适的散热结构保证温度均匀分布尤为关键。

本文利用 ANSYS 软件中的流体动力学模块(CFD)模拟仿真高功率光纤激光器包层光滤除器的温度场特性,搭建实验装置进行验证,在 15~600 W 不同输出功率下,温度模拟结果和实验结果高度吻合,验证了数值仿真方法的可行性。同时通过仿真实现了 1 kW 包层光滤除器稳定工作在 80 °C 左右时的优化设计。该方法不仅可以有效模拟包层光滤除器内外温度场,同时为包层光滤除器在更高功率下的散热设计以及优化方案提供了有价值的参考和指导。

2 包层光滤除器模型及原理

2.1 包层光滤除器模型

如图 1 所示,包层光滤除器热仿真模型的主要部件包括双包层光纤、包层光滤除器上下盖板以及铝热沉,各部分之间填充热界面材质^[9]。滤除的包层光在滤除器的内腔被吸收并转化为热量,铝热沉通水将滤除器转化和传导的热量以强制对流方式扩散。

滤除器尺寸设计为 150 mm×30 mm×10 mm,上盖板内腔尺寸为 80 mm×5 mm×2 mm,滤除器下底板放置光纤的贯穿式 U 型凹槽尺寸为 1 mm×1 mm,热沉总体尺寸为 150 mm×60 mm×15 mm,热沉冷却水入口和出口均为直径为 8 mm 的贯穿式圆孔。在不影响系统传热和散热的基础上,仿真时简化处理模型细小特征、装配孔特征等。合理划分网格有助于提高计算速度和精度,在关键的包层光滤除器内腔、流固耦合面以及各接触面等热交换表面进行网格加密。

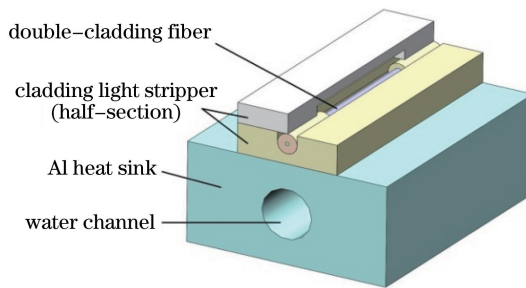


图 1 包层光滤除器模型简图

Fig. 1 Model of cladding light stripper

2.2 包层光滤除方法及原理

包层光滤除器模型中,在光纤剥除后的裸纤上采用氢氟酸腐蚀,使裸纤表面形成凹凸不平的小孔,破坏光的全反射条件,在光纤轴向均匀分布的小孔可以将包层光均匀导出,而包层光被直接散射在空气中,被滤除器的内腔吸收转换成热并进行热传导扩散。因此,了解光纤腐蚀长度和腐蚀时间与剥离度的关系,对滤除器的散热研究十分重要。实验研究了腐蚀长度分别为 80、100、130 mm 的光纤,得出三种不同腐蚀长度光纤的剥离度随时间的变化,如图 2 所示。

实验探究了三种不同腐蚀长度的光纤剥离度随时间的变化,测量了 80、100、130 mm 三种腐蚀长度条件下包层光剥离度从 0 dB 达到 17 dB 耗费的时间。实验模型的 80 mm 光纤腐蚀 15 min 后剥离度可达到

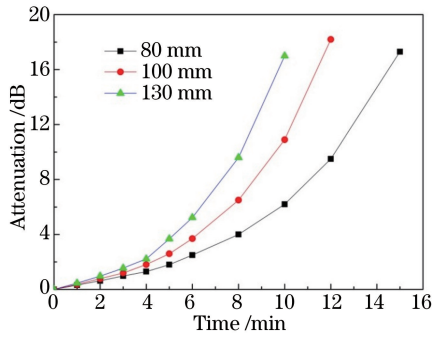


图 2 不同腐蚀长度下剥离度与时间的关系

Fig. 2 Relationship between attenuation and etching time with different etched fiber length

17.3 dB, 而 130 mm 光纤达到 17 dB 剥离度所需腐蚀时间最短, 约为 10 min。由图 2 可知, 同一腐蚀长度下, 随着腐蚀时间的增加, 包层光的剥离度不断增大; 而在相同腐蚀时间内, 腐蚀长度越长剥离度越大。

3 理论研究及边界条件设定

3.1 理论研究

在包层光滤除器的散热过程中涉及流体域的对流扩散、固体域的热传导以及流-固界面的热耦合等。热沉内的流体流动和传热规律都可以用流体力学中流动和传热控制方程组来描述。

对固体域(滤除器和热沉)内部应用泊松方程^[10]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'''}{\lambda} = 0, \quad (1)$$

式中 (x, y, z) 为固体内任一点的坐标, T 为该点温度, q''' 为该点的热源密度, λ 为该材料的导热系数。

对于流体域, 研究采用的流动冷却液为水, 可视为不可压缩黏性流, 根据冷却水通道结构和流速等可确定雷诺数以判断层流和湍流状态。对管流而言, 雷诺数小于 2000 为层流, 大于 4000 为湍流。管流的雷诺数定义为^[11]

$$Re = \rho \bar{U} L / \mu_0, \quad (2)$$

式中 ρ 为流体密度, μ_0 为流体的动态黏度, \bar{U} 为平均流速, L 为流动特征尺寸, 圆形截面即为直径, 矩形截面则为面积与周长之比的 4 倍。本文模型流体域为湍流模型, 流体域描述应用湍流动量方程、能量方程及 $k-\epsilon$ 湍流方程等 6 个方程联立的 Navier-Stokes 方程组^[10],

$$\frac{\partial(\rho_f u \Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v \Phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f \omega \Phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + S, \quad (3)$$

式中 Φ 为 x, y, z 三个方向的速度分量 u, v, ω , ρ_f 为任意点的流体密度, T 为温度, k 为湍流脉动动能, ϵ 为湍流动能耗散率, Γ 和 S 分别为相应的扩散项和源项。

3.2 边界条件设定

环境温度和初始工作温度恒定为 20 °C。对于流体域而言, 边界条件主要为入口、固壁、出口边界以及流体性质。冷却流体为纯净水, 入口处温度设定为 20 °C, 该温度下动态黏度为 $10.04 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 入口水流量为 10 L/min, 流速为 3.3 m/s, 根据(2)式计算得到该流体的雷诺数为 26247.5, 因为雷诺数大于 4000, 所以采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型^[12]; 在固壁上, 由于流体黏性作用附着, 速度和 k 均取为 0, 而 ϵ 取为 1; 出口参考压力设定为 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ (一个标准大气压)。对于固体的自然冷却面, 考虑到空气自然对流换热能力远小于冷却液强制对流换热能力, 因此忽略空气自然对流冷却和辐射散热的影响^[13]。在滤除器中滤除光吸收转化为热量, 仿真模型热源功率即为滤除光功率。在各部分接触界面处添加的热界面材质为导热硅脂, 其线性粘合厚度为 0.03 mm, 数值模型使用的主要材料参数如表 1 所示。

表 1 不同材料的热物理参数

Table 1 Thermal physical parameters of different materials

Material	Molar mass /(g·mol ⁻¹)	Density /(kg·m ⁻³)	Specific heat /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal conductivity /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Aluminum	26.98	2700	880	220
Cooling water	18.02	998.2	4183	0.599
Silicone paste	—	4200	—	2.5

4 实验研究与仿真分析

3 个 200 W 的激光二极管(LD)模块与 7×1 合束器中三根抽运输入纤熔接,合束器输入光纤参数为 200 μm/220 μm,数值孔径(NA)为 0.22,输出光纤参数为 20 μm/400 μm,纤芯和内包层的数值孔径分别为 0.06 和 0.46,合束器输出纤熔接到包层光滤除器的输入端,滤除器使用的双包层光纤参数为 20 μm/400 μm,纤芯和内包层的数值孔径分别为 0.06 和 0.46。滤除器使用的光纤中段外包层被剥除 8 cm 并经过氢氟酸处理,输出尾纤切 8°斜角,以防止输出光在光纤端面反射。滤除器下方连接通水的铝热沉散热,红外热像仪测量包层光滤除器的上表面温度分布,功率计测量输出功率。实验装置如图 3 所示。三个泵源经过合束器后的功率为 P_1 ,熔接包层光滤除器后,测量滤除后的功率为 P_2 ,用红外热像仪测量滤除器的上表面温度分布,最高温度为 T_c ,热仿真模拟中上表面的最高温度为 T_s 。实验环境温度恒定为 20 °C,滤除器在多个不同功率下工作,滤除器上表面最高温度记录如表 2 所示,滤除器的剥离度约为 17.3 dB,实验数据皆为滤除器稳定工作 5 min 待温度稳定后采集所得。

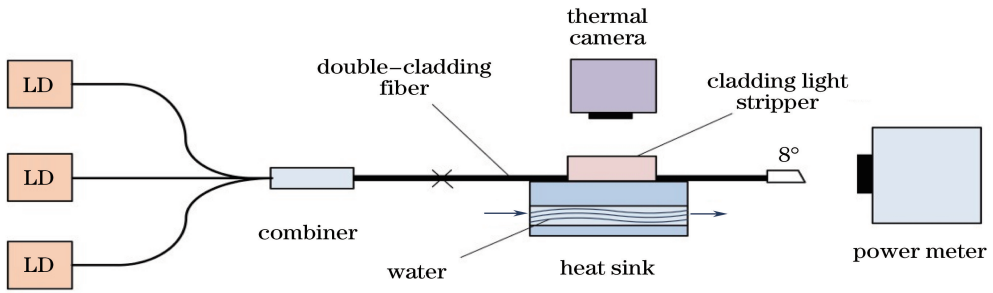


图 3 实验原理图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

表 2 不同滤除功率下的温度分布

Table 2 Temperature distribution under different stripping power

I / A	P_1 / W	P_2 / W	Attenuation / dB	$T_c / ^\circ C$
0.6	15.1	0.272	17.4	24.9
1	74.6	1.393	17.3	26.4
2	227.6	4.261	17.3	42.7
3	381	7.10	17.3	62.6
4	535	10	17.3	79.9
5	613	11.41	17.3	89.1

根据表 2 实验数据可知,不同滤除功率下,滤除器上表面的温度呈线性变化,运用 CFD 方法,按照设定的边界参数,针对实验中各个不同的滤除功率即热源功率进行数值模拟。图 4 所示为滤除器上表面最高温度的测量分布和模拟温度曲线,两条曲线基本吻合,最大温度差在 4 °C 以内,证明了该仿真模型的有效性。从图中曲线可知,滤除器上表面最高温度基本与滤除功率呈线性关系,该模型下每滤除 10 W 的功率温度约上升 1 °C。

对比滤除器在 460 W 稳定工作时的温度场分布,如图 5 所示。红外热像仪观测的滤除器上表面温度分布较为均匀,最高温度稳定在 71 °C 左右,如图 5(a)所示。滤除器中间切除区域部分的温度均匀表明包层光的滤除均匀。基于之前建立的包层光滤除器模型,在 CFD 模拟中得到 460 W 滤除的热分布云图,如图 5(b)

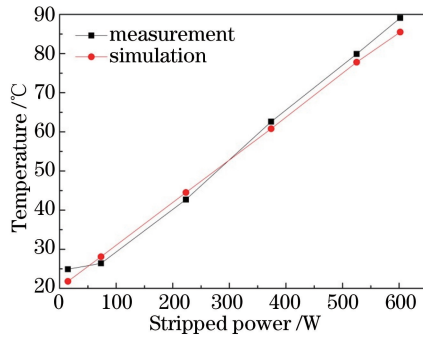


图 4 不同功率下滤除器实验测量温度和仿真温度曲线

Fig. 4 Temperature profiles of measurement and simulation at different stripped power

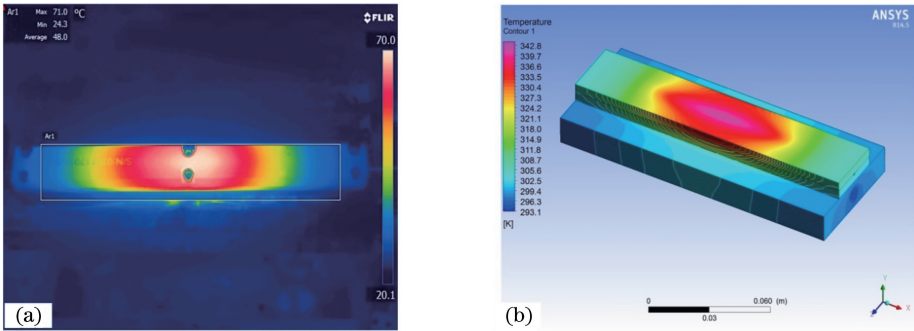


图 5 460 W 包层光滤除器温度分布。(a) 实验热像图；(b) 热模拟云图

Fig. 5 Temperature distribution of 460 W cladding light stripper. (a) Experimental thermography; (b) thermal simulation

所示,上表面的最高温度为 69.8 °C,基本与实验结果(71 °C)相符,同时与图 4 中曲线预测的温度基本吻合,仿真温度场分布也与热像图基本一致。

5 千瓦级滤除器仿真优化

按照原仿真模型继续增加滤除功率至 1 kW 时,滤除器的温度场分布如图 6(a)所示,滤除器最高温度达到 128.7 °C,实验证明滤除器工作温度为 80 °C 左右时可以很好地保证滤除器及激光器工作的稳定性。为了保证千瓦级滤除器以较低温度稳定正常工作,可以对滤除器进行仿真优化,在其他参数不变的情况下,增加光纤氢氟酸腐蚀长度,同时改变滤除器内腔尺寸,仿真温度随滤除长度增加而不断下降。长度增至 130 mm 时,在 1 kW 加载时滤除器温度场分布如图 6(b)所示,上表面最高温度降至 82.9 °C,较原模型温度下降了 46 °C,整个滤除器温度分布较为均匀。理想情况下,该优化模型可以保证滤除器及激光器安全稳定运行。当功率继续上升时,可扩大滤除器的外部尺寸,同时外部冷却可考虑微通道冷却方式,以保证滤除器以较低温度稳定运行^[14]。

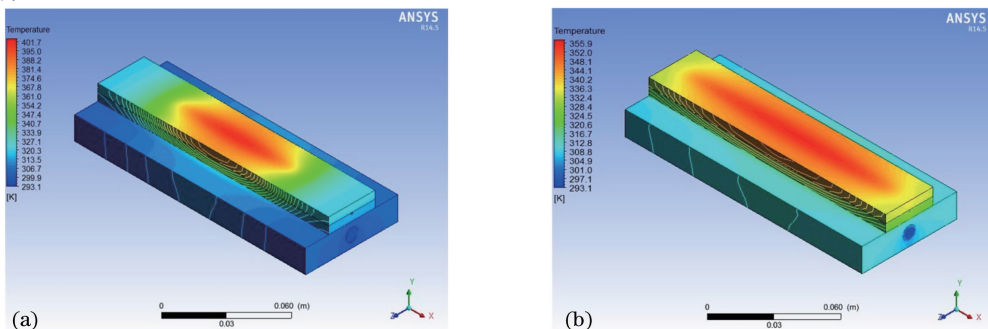


图 6 1 kW 包层光滤除器温度场模拟。(a) 原模型；(b) 优化模型

Fig. 6 Temperature distribution simulation for 1 kW cladding light stripper. (a) Original model; (b) optimized model

6 结 论

基于 CFD 方法研究了包层光滤除器的温度场分布特性,通过 15~600 W 包层光功率的滤除实验验证了模拟方法的有效性和可行性,并得出滤除器温度随包层光滤除功率呈线性变化的规律。为了实现包层光的有效安全滤除,在上述工作基础上,对 1 kW 包层光滤除器进行了优化设计,优化后滤除器温度下降近 46 °C,可稳定工作在 80 °C 左右。该方法为不同功率滤除器的散热设计以及优化方案提供了有意义的参考和指导。

参 考 文 献

- 1 Guo Liang, Chen Hongwei, Wang Zefeng, *et al.*. Experimental study on the generation of cladding light in passive double-clad fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 020602.
郭 良, 谌鸿伟, 王泽锋, 等. 被动双包层光纤中包层光产生实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 020602.
- 2 Guo W, Chen Z, Zhou H, *et al.*. Cascaded cladding light extracting strippers for high power fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(3): 1501106.
- 3 Wetter A, Faucher M, Sévigny B. High power cladding light strippers[C]. *SPIE*, 2008, 6873: 687327.
- 4 Anderegg J, Brosnan S J, Thielen P A. System and method to remove light from cladding: US7349596[P]. 2008-3-25.
- 5 Poozesh R, Norouzy A, Golshan A H, *et al.*. A novel method for stripping cladding lights in high power fiber lasers and amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(20): 3199-3202.
- 6 Kliner A, Hou K C, Plötner M, *et al.*. Fabrication and evaluation of a 500 W cladding-light stripper[C]. *SPIE*, 2013, 8616: 86160N.
- 7 Babazadeh A, Nasirabad R R, Norouzey A, *et al.*. Robust cladding light stripper for high-power fiber lasers using soft metals[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(12): 2611-2615.
- 8 Li T, Wu J, Sun Y, *et al.*. An improved method for stripping cladding light in high power fiber lasers[C]. *SPIE*, 2015, 9255: 92550M.
- 9 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0502003.
代守军, 何 兵, 周 军, 等. 高功率散热技术及高功率光纤激光放大器[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0502003.
- 10 Tao Wenquan. Numerical heat transfer (2nd edition)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 349-350.
陶文铨. 数值传热学(二版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 349-350.
- 11 Wei Yongtao, Zhang Yuming, Tang Chun, *et al.*. Coupled analysis of temperature distribution in laser crystals pumped by repetitive pulses[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(4): 912-916.
魏泳涛, 张玉明, 唐 淳, 等. 重复脉冲抽运下激光晶体温度场的耦合分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 912-916.
- 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 Liu Gang, Tang Xiaojun, Xu Liuqing, *et al.*. Fluid-solid coupled heat transfer design numerical study for water cooling CCEPS laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0402004.
刘 刚, 唐晓军, 徐臻婧, 等. CCEPS 激光器水冷设计的流固耦合传热数值研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0402004.
- 14 Wang Jianlei, Li Lei, Shi Xiangchun, *et al.*. Modeling and optimization of cooling system for high power slab laser amplifiers[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1553-1559.
王建磊, 李 磊, 施翔春, 等. 高功率板条放大器冷却系统模拟及优化设计[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1553-1559.