

基于相变材料冷却的光纤包层光滤除器的设计

董守增^{1,2**}, 陈晓龙², 赵翔², 谢可迪², 何兵², 漆云凤², 周军², 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

摘要 针对高功率光纤激光器在空间等特殊环境下无水冷却的热管理要求,设计并研制了一种基于相变材料的高功率光纤包层光滤除器。采用正十八烷作为相变材料吸收包层光滤除器的产热,利用 Ansys 的 Fluent 模块仿真分析相变材料的相变过程及 200 W 下滤除器温度分布特性,实验采用 0.246 kg 质量分数为 99% 的正十八烷对 200 W 级滤除器进行热管理,在室温为 25.6 °C、滤除的包层光为 206 W 的情况下,该滤除器可稳定、安全工作 360 s。实验结果和仿真结果基本吻合。

关键词 激光器; 高功率光纤激光器; 包层光滤除器; 相变材料; 温度分布

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0906001

Design of Optical Fiber Cladding Filter Based on Phase Change Material Cooling

Dong Shouzeng^{1,2**}, Chen Xiaolong², Zhao Xiang², Xie Kedi², He Bing²,
Qi Yunfeng², Zhou Jun², Zhang Jianhua^{1*}

¹School of Mechanical 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

Abstract A high power fiber cladding optical filter with phase change material is designed and developed for the thermal managements of high power fiber laser in the space and other special environments. The phase change material of 18-alkanes is applied to absorbing cladding light heat. The Fluent module of Ansys is used to simulate the phase change process of phase change material and the temperature variation of the stripper at 200 W. 18-alkanes with the mass of 0.246 kg and the mass fraction of 99% is used as the phase change material. The experiment verifies that the stripper can work stably for 360 s at the room temperature of 25.6 °C and the light power of 206 W. The simulation results are basically coincident with the experiment.

Key words lasers; high power fiber laser; cladding light stripper; phase change material; temperature distribution

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.6810

1 引 言

大功率空间激光器在科学探测、空间遥感、环境监测以及地形探测等领域有着极为重要的应用价值,已成为当前各国争相研究的热点。为了满足高探测精度和长探测距离的要求,需要进一步提高探测光源的发射功率和光束质量^[1]。光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、分布式散热等特点,作为空间激光光源得到了广泛应用。受真空

环境下热传导方式和载荷的限制^[2],高功率激光器无法采用常规的水冷热管理方式,而且空间应用的激光器件冷却方式绝大部分采用单面贴合热传导的方式^[3],该方式存在散热不均匀等缺点,无法满足高功率下散热的需求^[4-6]。单位质量的相变材料在相变过程中吸收大量的热量,相变材料温度基本恒定^[7-8],而且应用相变材料的装置结构简单、占用空间小、使用方便^[9-10]。基于相变储热的无水冷却可以满足空间全固态、轻量化的要求^[9]。

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-04-23

基金项目: 国家重点研发计划支持项目(2016YFB0402201)

* E-mail: jhzhang@shu.edu.cn; ** E-mail: dongshouzeng@163.com

光纤激光器中的包层光滤除器(CPS),其作用是将剩余的抽运光和纤芯中泄露的信号光从光纤包层中导出,从而保证输出激光的光束质量和光纤输出头的安全稳定工作。通常当高功率光纤激光器输出激光功率达到千瓦量级时,残留的包层光功率在百瓦量级^[11],滤除器冷却方式设计不合理将会导致其温度瞬时升高,严重影响激光器的安全运行^[12]。因此,作为高功率光纤激光器中热流密度最高的无源光纤器件,包层光滤除器的热管理问题备受重视^[5]。目前,已报道的包层光滤除器大都采用水循环冷却,由于使用环境的限制,无法将其应用到空间光纤激光器中。

本文采用正十八烷作为相变材料,实现了光纤包层光滤除器内均匀散热。通过 Ansys 软件仿真分析了包层光滤除器内相变材料在工作过程中的液相质量分数、温度分布和流动速度变化情况,并搭建实验装置进行了验证。在室温 25.6 °C、滤除功率 200 W 的包层光下,包层光滤除器能够稳定工作 360 s,实验结果和仿真模拟结果吻合,验证了仿真方法的可行性。200 W 相变材料的包层光滤除器能够应用到千瓦量级的空间光纤激光器中,为应用相变材料实现更高激光功率输出的散热方案奠定了基础。

2 包层光滤除器的设计和仿真

2.1 包层光滤除器模型

光纤内的包层光影响输出激光的光束质量和光纤输出头的安全稳定工作,包层光滤除器能够有效地消除这部分影响^[13]。双包层光纤由纤芯、内包层、外包层和涂覆层组成,如图 1 所示。内包层和外

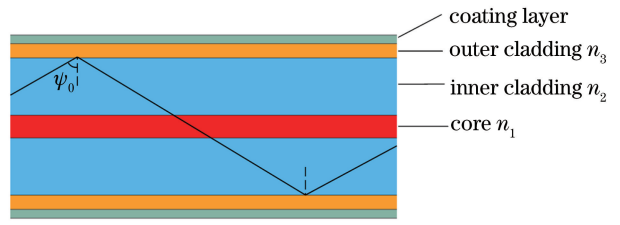


图 1 双包层光纤全反射示意图

包层的折射率不同,光纤中的包层光在内包层和外包层界面实现全反射,光被限制在纤芯和内包层中。

能够使光线在光纤内包层产生全反射的条件为

$$\psi > \psi_0 = \arcsin(n_3/n_2), \quad (1)$$

式中: n_2 为内包层的折射率; n_3 为外包层的折射率; ψ_0 为光在内包层和外包层界面的临界角; ψ 为入射角。由(1)式可以看出,光能完全被限制在内包层以内传输的条件是入射角 ψ 大于临界角 ψ_0 。

包层光滤除器内的光纤经过氢氟酸的腐蚀,内包层表面粗糙度增大,光在内包层与外部界面的全反射条件被破坏^[14]。将腐蚀过的光纤沿着滤除器圆柱形内筒中心轴线放置,在内外筒之间填充足够的相变材料。

选择石蜡类相变材料作为储热材料,正是因为它具有化学性质稳定、工作过程中没有过冷和相分离现象、品种多、可满足不同温度下的使用要求、相变潜热高等优点^[8,15]。其中相变材料正十八烷的相变温度满足滤除器的工作温度要求,故采用正十八烷作为储热材料。正十八烷在相变过程中基本没有质量变化,存在明显的固-液相变过程,相关参数如表 1 所示。

表 1 材料物理属性参数

Table 1 Physical properties of materials

Material	Phase change temperature / °C	Latent heat / (kJ · kg ⁻¹)	Density / (kg · m ⁻³)	Thermal conductivity / (W · m ⁻¹ · k ⁻¹)	Heat capacity / (J · kg ⁻¹ · k ⁻¹)	Dynamic viscosity / (g · m ⁻¹ · s ⁻¹)
n-octadecane	28	244.0	$\frac{776}{0.001(T-301)+1}$	0.1507	2160	0.00346
Aluminum	-	-	2719	202.4	871	-

Note: T is temperature, of which unit is °C.

根据滤除器的工作时间和热功率,计算滤除器工作过程中的总热量,假设由光纤内折射出来的光功率转化成的热量全部由相变材料吸收,则需要的相变材料的质量为

$$m = \frac{Q\tau}{c_f}, \quad (2)$$

式中: Q 为滤除器内光纤的热功率,单位为 W; τ 为设定的温度控制周期,单位为 s; c_f 为相变材料的比热容,为 244 J · kg⁻¹ · k⁻¹^[16]。对于千瓦级的高功率光纤激光器,假设光纤内热功率为 200 W,温度控制周期为 300 s,根据(1)式计算得到的相变材料的质量为 0.246 kg。

考虑到相变材料热膨胀问题,需进行冗余度设计。实验中光纤的腐蚀长度为130 mm,为了强化滤除器的导热能力,在内筒外侧添加肋片强化传热^[17],内筒壁由固定功率包层光加热,滤除器的机械结构如图2所示。滤除器内筒孔直径为20 mm,壁厚为3 mm,长度为150 mm,肋片与内筒一体,肋片厚度为2 mm,共36个肋片。肋片间距为2 mm,

外径为80 mm,外筒内径为86 mm,壁厚为3 mm,滤除器外桶侧壁M6的螺纹孔为灌装口,将滤除器放在热水中,M6的螺纹孔露出水面,使用注射器将融化的0.246 kg相变材料正十八烷装入滤除器内,两端通过焊接密封环密封,灌装口密封,腐蚀后的双包层光纤沿内筒轴线由两端的端盖固定。

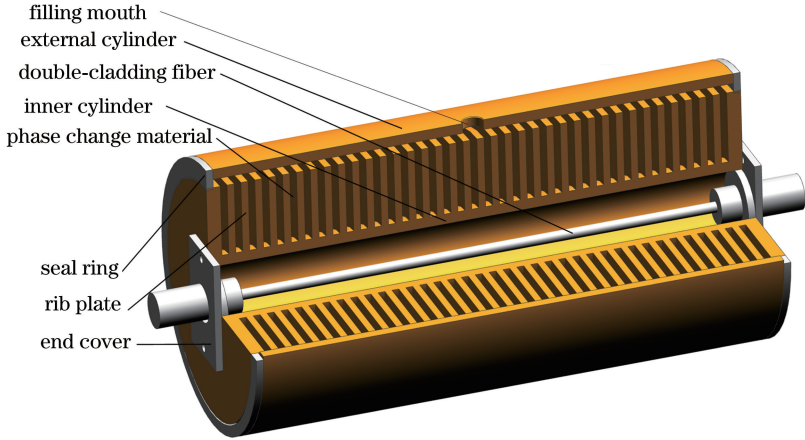


图2 滤除器机械结构

Fig. 2 Structure of cladding light stripper

2.2 仿真模拟

采用上述滤除器结构模拟了滤除200 W的包层光时滤除器内的相变材料相变过程及滤除器温度分布特性。仿真模型的热功率为从腐蚀后的光纤滤出的光功率,光在滤除器的内壁上转化为热量。由于仿真模拟整个滤除器结构的计算量大,考虑到双

包层光纤的腐蚀是均匀的^[18],数值模拟过程中,取滤除器中最小重复单元作为数值模拟单元,即一个周期的铝质肋片和相变材料,两侧边界设为对称面。用此单元模拟整个滤除器中肋片和相变材料的传热过程。相变热沉单元如图3所示。

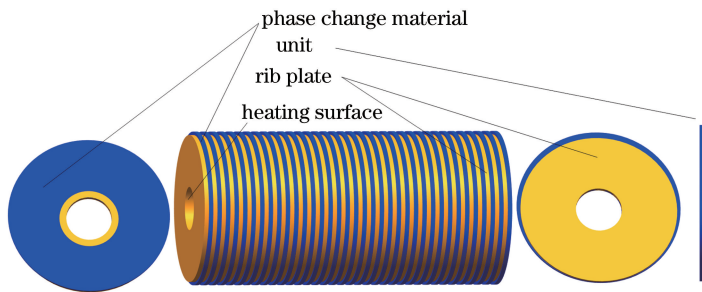


图3 相变材料的热沉单元

Fig. 3 Heat sink unit of phase change material

环境温度和初始工作温度恒定为25.6 °C。在仿真模拟中,根据热源功率除以对应的内筒壁的面积,可以得到滤除器内筒壁的热流密度值为21220.66 W·m²,并且热流密度值从t=0时开始施加并在整个加热过程中维持恒定。相变材料的密度由压强与温度决定,研究对象的压强变化不大,相变材料的密度主要受温度变化的影响,因此假设密度仅是温度的单值函数,使用Fluent模块自带的用户

自定义函数设定相变材料的密度,其表达式为

$$\rho = \frac{\rho_1}{\beta(T - T_1) + 1}, \quad (3)$$

式中: ρ 为相变材料在相变温度 T_1 时的密度; β 为相变材料热膨胀系数,取0.001。

通过数值模拟方法,仿真观察肋片处相变材料导热、内部传热和相变过程。在内筒壁和片状肋片中热量通过导热方式传递,假设液态相变材料中的流动为

层流,并且外加热量都被计算单元吸收。热沉单元具有移动界面的固液相变,考虑到自然对流对融化的影响,采用焓-多孔介质模型^[19],在多孔介质模型中设置相同的流动阻力,对于全凝固的模型区域,多孔性为0,流动速度为0^[10]。

连续方程、动量方程、能量方程依次表示为

$$\frac{d\alpha_n}{dt} = 0, \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S}, \quad (5)$$

$$\rho \frac{dh}{dt} = k \nabla^2 T, \quad (6)$$

式中: α_n 为计算单元中第 n 个流体的体积分数; ρ 为密度; k 为热传导系数; μ 为动力黏度; \mathbf{S} 为动量源项; \mathbf{v} 为速度; \mathbf{g} 为重力加速度; h 为比焓,是显热焓 $h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT$ 和由于相变而产生的潜热焓 γL 之和(其中 h_{ref} 是在参考温度 T_{ref} 下的参考焓; c_p 为比热容); L 为融化的潜热焓; γ 为相变过程中液态体积分数。 γ 具体数值定义为

$$\begin{cases} \gamma = 0, & T < T_s \\ \gamma = \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s < T < T_1 \\ \gamma = 1, & T > T_1 \end{cases} \quad (7)$$

动量方程中的源项 $\mathbf{S} = -A(\gamma)\mathbf{v}$ 。在相变过程中 $A(\gamma)$ 从一个给定的值逐渐减小,直至在固相中为0。对于多孔介质中流动的Carman-Kozeny(卡尔曼-科泽尼)方程,若要使用动量方程来模拟此方程^[10],需先定义 $A(\gamma)$,为

$$A(\gamma) = \frac{C(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \epsilon}, \quad (8)$$

式中: ϵ 为恒等于0.001的计算小量,用来消除分母为0时产生的震荡; C 为反映融化前沿形态的模糊区常数,一般取 $10^4 \sim 10^7$,本文取 $C = 10^5$ 。

通过仿真得到滤除器内相变材料的液相质量分数随时间的变化情况,在滤除功率为200 W的条件下,相变材料的液相质量分数随时间变化如图4所示。

滤除器开始工作后,相变材料逐渐融化,在0~300 s内融化百分比保持线性,融化速度为 0.003 s^{-1} ,超过300 s相变材料的融化速度减缓,融化速率为 0.001 s^{-1} ,原因是滤除器主要有内筒和外筒两个结构,内筒铝质肋片的边缘和外筒的铝质壳结构之间的空隙填充了相变材料,相变材料导热率低,导致没有肋片两侧面传热的相变材料融化速率变小。

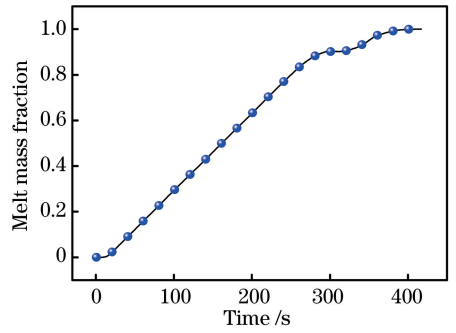


图4 相变材料液相质量分数演化的仿真曲线

Fig. 4 Melt mass fraction of phase change material versus time

通过软件仿真得到滤除器内部相变材料的液相质量分数、温度分布和速度分布情况,液相质量分数分别为20%,40%,60%,80%,100%时,对应相变材料的温度分布和速度分布如图5所示。

图5中,(a1)~(e1)为仿真模拟相变材料液相质量分数为20%,40%,60%,80%,100%时的情况,(a2)~(e2)和(a3)~(e3)为相应液相质量分数下相变材料的温度分布和速度分布图,通过仿真可直观地了解相变材料在滤除器内的融化过程、温度变化和速度分布情况。在滤除器工作过程中,同一区域相变材料的融化程度与温度分布和流动速度成正相关,靠近热源中心位置的相变材料最先融化,流动速度最快,向四周扩展;滤除器内部结构的工作温度在要求的范围之内,相变过程符合实际应用要求,融化过程中未出现因温度过高而损坏的现象,滤除器在使用过程安全稳定;当相变材料完全融化后,滤器最热的位置为滤除器内壁,其温度为 $42.35 \text{ }^\circ\text{C}$,在光纤正常的工作温度范围内。

3 实验验证

3.1 实验过程

实验装置如图6所示,1个700 W的激光二极管(LD)模块与 $(6+1) \times 1$ 合束器(combiner)中的一根抽运纤熔接,合束器的输出尾纤与包层光滤除器的输入纤再次熔接,经滤除器末端光纤切 8° 斜角输出,并在输出端放置400 W功率计(PM)测量输出激光的功率。滤除器内光纤外包层剥除长度为130 mm,并经过氢氟酸(HF)处理。采用点温计1(digimite 1)记录外筒壁的温度变化,点温计2(digimite 2)记录滤除器内筒端面的温度变化,同时用红外热像仪观察记录滤除器表面的温度变化和温度分布。

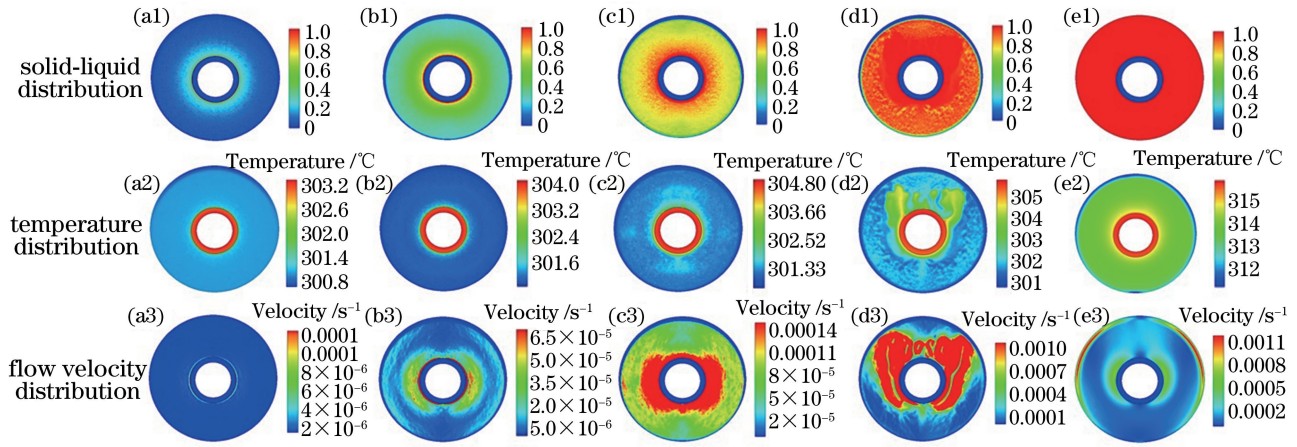


图 5 不同液相质量分数下固液两相分布、温度分布和速度分布。(a1)~(a3)液相质量分数为 20%；(b1)~(b3)液相质量分数为 40%；(c1)~(c3)液相质量分数为 60%；(d1)~(d3)液相质量分数为 80%；(e1)~(e3)液相质量分数为 100%
 Fig. 5 Solid-liquid distribution, temperature distribution, and flow velocity distribution of phase change material at different melt mass fractions. (a1)-(a3) Melt mass fraction at 20%；(b1)-(b3) melt mass fraction at 40%；(c1)-(c3) melt mass fraction at 60%；(d1)-(d3) melt mass fraction at 80%；(e1)-(e3) melt mass fraction at 100%

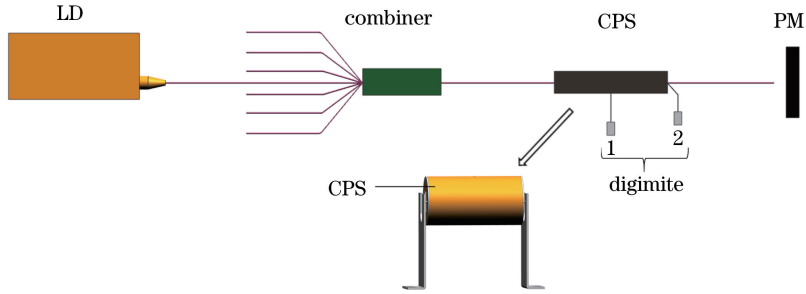


图 6 实验原理图

Fig. 6 Schematic of experiment setup

在熔接滤除器之前,电源电压为 137 V,电流为 3.5 A,功率计读数为 209.3 W,熔接滤除器之后,在同样的电流和电压下,功率计的读数为 2.9 W。可知滤除器滤除的光功率约为 206 W。

3.2 实验结果及分析

当滤除器滤除的功率为 206 W 时,滤除器的温度随时间的变化曲线如图 7 所示。

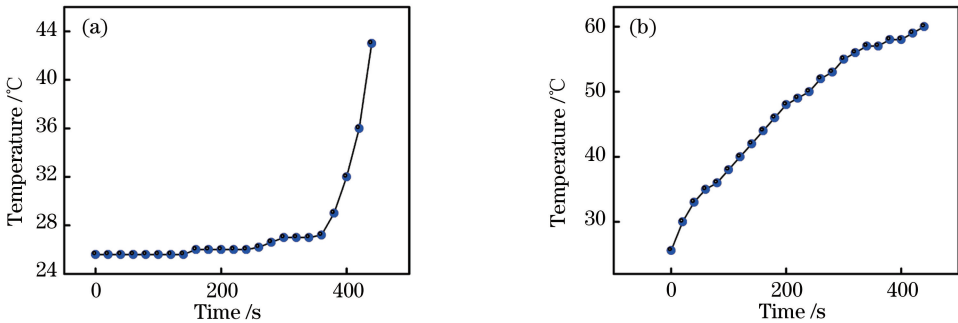


图 7 206 W 功率下点温计温度变化曲线。(a)点温计 1；(b)点温计 2

Fig. 7 Temperature change curves of the digimites at 206 W. (a) Digimite 1；(b) digimite 2

由于滤除器铝质内筒和外筒通过中间填充相变材料实现热传导,而相变材料的相变温度为 28 °C,相变材料的潜热储能密度远高于显热储能,因此,可

以将外筒壁温度变化曲线的斜率作为相变材料融化情况的判据。如图 7 所示,在 0~360 s 范围内,温度增长比较缓慢,此时外筒温度低于 28 °C,说明热

量主要由相变材料的潜热吸收,是相变材料的融化过程。超过 360 s 后,温度由 28 °C 上升到 40 °C 时间相对较短,温度增长斜率明显增大,说明相变材料进入显热阶段,相变材料已充分融化。通过仿真得出相变材料融化需要 400 s。

通过热像仪观察滤除器表面的温度分布情况,滤除器热量最高的地方为点温计 2 测量的位置,当点温计 2 的温度显示为 60 °C 时,点温计 1 的温度显示为 43 °C,滤除器表面的温度分布如图 8 所示。

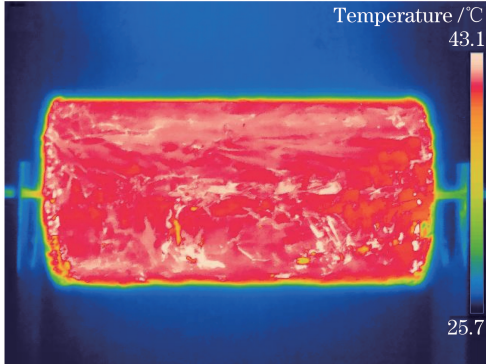


图 8 滤除器表面温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of the surface of stripper

通过热像仪观察,此时滤除器表面的温度达到了 43.1 °C,由点温计 2 的示数可知,已经达到滤除器稳定工作的上限,对应滤除器的工作时间为 420 s。通过实验验证,在功率为 206 W 的功率条件下,利用相变材料潜热吸热,滤除器能够稳定工作 360 s,符合空间高功率光纤激光器的应用要求。

4 结 论

设计了一种用于空间激光器的光纤包层光滤除器,采用相变材料实现了滤除器内各个方向的热传导。利用 Ansys 软件仿真了包层光滤除器内相变材料各项指标的变化情况,包括液相质量分数、温度分布和流动速度分布,实验中采用了优化设计后的滤除器结构,具备了较好的热传导和集热能力。实验结果表明,设计的包层光滤除器在 206 W 滤除功率、安全工作温度 60 °C 下,可以稳定工作 360 s,实验结果符合理论计算和仿真模拟的趋势,验证了应用相变材料方案的有效性和可行性。由于滤除器内腐蚀后光纤漏出的激光能量大,热功率高,在以后应用相变材料设计器件时,不仅要减少相变材料的厚度,而且要增强金属结构的导热能力,增加轴向和纵向的肋片有利于实现快速热传导,同时可以在相变材料中掺杂增强导热性能的材料。该种基于相变储

热的无水冷却方案,减少了热沉质量,降低了光纤激光器的工作占空比,满足空间全固态、轻量化的应用需求。

参 考 文 献

- [1] Daukantas P. Lidar in space: from apollo to the 21st century[J]. Optics and Photonics News, 2009, 20(6): 30.
- [2] Zhu M Z, Cheng Y, Tan C Y, *et al.* Development of foreign spaceborne laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3241-3248.
朱孟真,程勇,谭朝勇,等. 国外空间激光的发展现状[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3241-3248.
- [3] Han X M, Yang D X, Zhao J L, *et al.* Thermal effect in high-power Yb³⁺-doped photonic crystal fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(11): 2822-2826.
韩晓明,杨德兴,赵建林,等. 掺镱大功率光子晶体光纤激光器热效应分析[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2822-2826.
- [4] Kliner D, Tucker D A, Lugo J. Scalable cladding mode stripper device: US 8027555[P]. 2011-09-27.
- [5] Anderegg J, Brosnan S J, Thielen P A. System and method to remove light from cladding: US 7349596 [P]. 2008-03-25.
- [6] Dai S J, He B, Zhou J, *et al.* Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier[J]. Chinese Journal of 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.
- [7] Zhang Y P, Hu H P, Kong X D, *et al.* Phase change energy storage-theory and application [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1996: 8-33.
张寅平,胡汉平,孔祥冬. 相变储能-理论和应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996: 8-33.
- [8] Zhang J C, Sheng Q, Tong T F, *et al.* Thermal storage experiment of n-octadecane/foam phase change composite [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(6): 61-65.
张靖驰,盛强,童铁峰,等. 正十八烷/泡沫相变复合材料蓄热实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(6): 61-65.
- [9] Son C H, Morehouse J H. An experimental investigation of solid-state phase-change materials for solar thermal storage[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1991, 133(4): 244-249.
- [10] Ye W B. Enhanced heat transfer numerical simulation and experimental research on phase change thermal

- energy storage heat exchanger of heat pump [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- 叶为标. 热泵相变储能换热器强化传热数值模拟和实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [11] Zhao S, Duan Y F, Wang Q, *et al.* Research progress of the cladding light strippers in fiber lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(7): 749-752.
- 赵水, 段云锋, 王强, 等. 光纤激光器中包层光滤除器的研究进展[J]. *激光与红外*, 2015, 45(7): 749-752.
- [12] Hu Z T, He B, Zhou J, *et al.* Research progress in thermal effect of high power fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080002.
- 胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080002.
- [13] Wetter A, Faucher M, Sévigny B. High power cladding light strippers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6873: 687327.
- [14] 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.
- [15] Chen A Y, Wang X Y, Cao X Z. Research and application of phase change material (PCM) used as energy storing material[J]. *Materials Review*, 2003, 17(5): 42-44, 72.
- 陈爱英, 汪学英, 曹学增. 相变储能材料的研究进展与应用[J]. *材料导报*, 2003, 17(5): 42-44, 72.
- [16] Zhang L, Research on the thermal control technology for high power fiber laser [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- 张琳. 高功率光纤激光器热控技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [17] Fan L, Khodadadi J M. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 24-46.
- [18] Hu Z T, Chen X L, He B, *et al.* Temperature distribution of cladding light strippers in high power all-fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0701004.
- 胡志涛, 陈晓龙, 何兵, 等. 高功率光纤激光器包层光滤除器的温度场研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0701004.
- [19] Bertrand O, Binet B, Combeau H, *et al.* Melting driven by natural convection A comparison exercise: first results [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 1999, 38(1): 5-26.