

基于螺旋流道水冷技术的千瓦级包层功率剥离器研究

夏情感^{1,3}, 肖文波^{1,2,3*}, 姜迪友^{1,3}, 金鑫^{1,3}, 叶国敏^{1,3}, 何银水⁴

¹南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;

²南昌航空大学江西省图像处理与模式识别重点实验室, 江西 南昌 330063;

³江西省光电检测技术工程实验室, 江西 南昌 330063;

⁴南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031

摘要 基于螺旋流道水冷技术提出一种新的千瓦级包层功率剥离器结构, 并对其散热性能进行了研究。首先, 将该结构与传统水冷式包层功率剥离器及热沉吸热式包层功率剥离器对比, 验证了其实用性与优越性。其次, 通过研究螺旋流道参量, 发现热沉初始温度对剥离器的散热性能无明显影响, 大直径的螺旋冷却管道及合适的冷却水初始温度将有利于散热。最后, 实验发现在优化条件下该剥离器能有效剥离 4200 W 以下的包层功率。在剥离 1000 W 包层功率时, 该剥离器温度峰值为 300.49 K、温度谷值为 284.29 K、温差为 16.2 K; 同等功率下, 相比于上述传统剥离器, 其温度峰值最多降低了 15.1%, 温度谷值最多降低了 10.3%, 温差最多缩小了 73.4%。

关键词 激光器; 光纤激光器; 包层功率剥离器; 螺旋流道水冷; 热效应; 优化结构

中图分类号 TN 248

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.231407

Study on Kilowatt-Level Cladding Power Stripper Using Spiral Flow Channel Water-Cooling Technology

Xia Qinggan^{1,3}, Xiao Wenbo^{1,2,3*}, Jiang Diyou^{1,3}, Jin Xin^{1,3}, Ye Guomin^{1,3},
He Yinshui⁴

¹Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University,
Nanchang Jiangxi, 330063, China;

²Key Laboratory of Image Processing & Pattern Recognition in Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University,
Nanchang, Jiangxi 330063, China;

³Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang, Jiangxi 330063, China;

⁴College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

Abstract In this paper, a new structure of kilowatt-level cladding power stripper is proposed based on spiral flow channel water-cooling technology, and its heat dissipation performance is studied. First, the structure is compared with the traditional water-cooled cladding power stripper and the heat sink endothermic cladding power stripper to verify its practicability and superiority. Second, by studying the parameters of the spiral flow channel, it is found that the initial temperature of the heat sink has no significant effect on the heat dissipation performance of the stripper. The large diameter spiral cooling pipe and the appropriate initial temperature of the cooling water will help heat dissipation. Finally, it is experimentally found that the stripper can effectively strip the cladding power below 4200 W under optimized conditions. When stripping 1000 W cladding power, the peak temperature of the striper is 300.49 K, the temperature valley is 284.29 K, and the temperature difference is 16.2 K. Under the same power, compared with the above-mentioned traditional stripper, the peak temperature is reduced by up to 15.1%, the temperature valley is reduced by up to 10.3%, and the temperature difference is reduced by up to 73.4%.

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-05-02; 录用日期: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(12064027)、航空科学基金项目(2017ZC56003)、江西省图像处理与模式识别重点实验室开放基金(ET201908119)、江西省研究生创新专项基金(YC2019-S348)、无损检测技术教育部重点实验室开放基金(EW201908442、EW201980090)

*E-mail: xiaowenbo1570@163.com

Key words lasers; fiber laser; cladding power stripper; spiral flow channel water-cooling; thermal effect; structure optimization

OCIS codes 140.3460; 060.2310; 120.6810

1 引言

随着光纤激光器输出功率不断提升,残余抽运光及高阶激光等的包层光功率(简称包层功率,用物理量表示)也随之提升。为保证光纤激光器的光束质量,需要用包层功率剥离器(CPS)去除残余抽运光等^[1-3]。Wetter 等^[4]于 2008 年使用高折射率胶替代原光纤外包层的方法,实现了对双包层光纤的包层功率剥离;Kliner 等^[5]于 2013 年使用氢氟酸腐蚀双包层光纤的包层,制作了可以剥离 500 W 包层光的剥离器;龚凯等^[6]于 2017 年利用优化的高折胶法制作的包层功率剥离器,在有效提高剥离功率的同时还能获得较为均匀的热分布。实际上,上述包层功率剥离器在改进剥离技术及优化热沉结构等条件下,可以将数百瓦的包层光功率剥离^[7]。但如今光纤激光器的输出功率要求已达万瓦级,其所需要剥离的包层功率高达数千瓦^[8-10]。为了满足光纤激光器长时间稳定运行温度低于 353.15 K 的要求^[11],传统包层功率剥离器的制备工艺以及热管理技术已经无法满足需求^[12-13]。

为此,本文将螺旋流道水冷技术应用到千瓦级包层功率剥离器中,并提出一种新的剥离器结构。首先将该结构与传统千瓦级包层功率剥离器进行对比,研究其实用性;其次通过改变螺旋流道中冷却水的初始温度等,对其散热性能进行优化研究。研究结果为千瓦级包层功率剥离器的制作提供了指导思想。

2 传统千瓦级 CPS 与螺旋流道水冷千瓦级 CPS 热性能对比

2.1 传统千瓦级 CPS

胡志涛等^[14]于 2016 年采用酸腐蚀法制作了一种千瓦级 CPS,结构如图 1(a)所示,称其为剥离器 1;该剥离器以普通水冷方式散热,其热沉材料为铝,热沉尺寸为 150 mm×30 mm×10 mm,上盖板内腔尺寸为 80 mm×5 mm×2 mm,剥离器下底板放置光纤的贯穿式圆孔直径为 1 mm,冷却水入口和出口的直径为 8 mm;实验证明该剥离器剥离 1000 W 包层功率时,其最高温度为 353.15 K,并且可以稳定的工作。

Zou 等^[15]于 2018 年采用酸腐蚀法制作了一种千瓦级 CPS,结构如图 1(b)所示,称其为剥离器 2;该剥离器依靠热沉吸热方式散热,热沉材料为铝,热沉尺寸为 150 mm×10 mm×10 mm;其用氢氟酸将光纤包层腐蚀成粗细不均匀的两段,第一段长 95 mm,包层半径为 0.2 mm,第二段长 50 mm,包层半径为 0.0325 mm;两段光纤中间由长 5 mm 的圆锥台形光纤衔接;实验证明该剥离器剥离 1010 W 包层功率时,其最高温度为 351.65 K,并且内部热分布均匀。

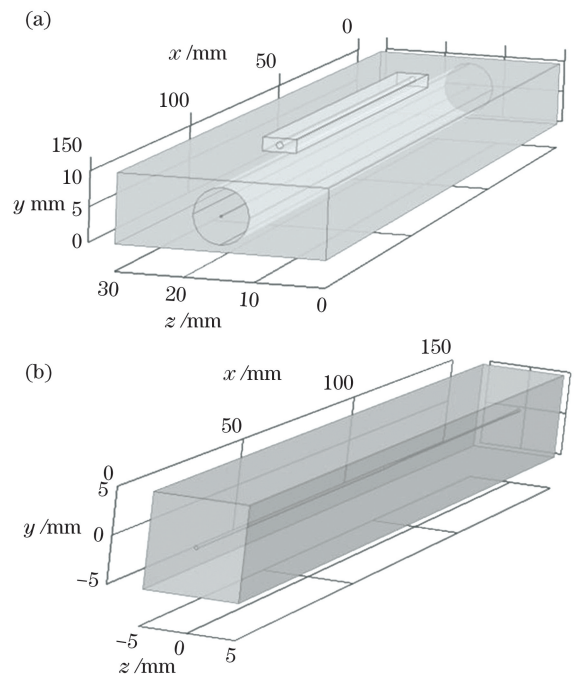


图 1 传统千瓦级 CPS 的结构图。(a)剥离器 1;(b)剥离器 2

Fig. 1 Structure diagram of traditional kilowatt CPS.

(a) Stripper 1; (b) stripper 2

2.2 螺旋流道水冷千瓦级 CPS

螺旋流道水冷技术应用到包层功率剥离器上,是依靠强制对流将包层光的热能通过水流耗散出。具体是在文献[7]设计的包层功率剥离器内部(靠近高折胶和热沉金属界面处),围着光纤绕一圈螺旋水冷管道,称其为剥离器 3,结构如图 2 所示。剥离器 3 的热沉材料为铝,热沉呈方形,尺寸为 120 mm×25 mm×25 mm;填胶孔呈圆锥台形,顶面半径为 10 mm,底面半径为 5 mm。内部螺旋水冷管道直径为 3 mm,共 30 匝管道,外环半径为 9 mm,轴向节

距为 4 mm, 径向节距为 -0.2 mm, 手性为右旋。剥离器 3 中光纤用氢氟酸腐蚀成粗细不均匀的两段^[16], 粗端光纤呈圆柱形, 长为 60 mm, 半径为 0.156 mm; 细端光纤也呈圆柱形, 长为 55 mm, 半径为 0.1 mm; 两段光纤由一段呈圆锥台形的光纤衔接, 其长为 5 mm, 顶面半径为 0.156 mm, 底面半径为 0.1 mm。

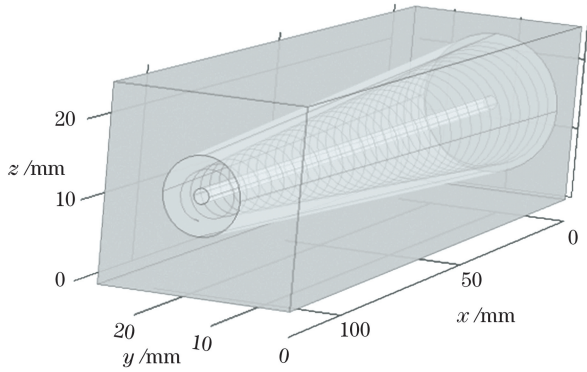


图 2 螺旋流道水冷千瓦级 CPS 的结构图

Fig. 2 Structure diagram of spiral channel water-cooled kilowatt CPS

2.3 仿真边界条件

使用有限元仿真软件 Comsol 对剥离器 1、2 和 3 进行热效应仿真。为方便对比研究, 将外部环境温度都设为 293.15 K。仿真网格划分参数: 最大单元尺寸为 12 mm, 最小单元尺寸为 0.003 mm, 最大

单元增长率为 1.5, 曲率因子为 0.55, 狭窄区域分辨率为 0.5。胶-热沉界面的网格划分选择超细化。剥离器 1 和 2 的其余仿真条件与引文中的条件相同。因为剥离器 3 依靠自然热传导和螺旋流道水冷两种方式散热, 故将 Comsol 软件的固体传热模块和非等温管道流模块耦合; 剥离器 3 设整个高折胶填胶孔为热源域; 热通量边界设为热沉的外表面, 对流换热系数为 1546 W/(m² · K)。热沉初始温度(用物理量 T_{mold} 表示)为 293.15 K, 冷却水初始温度(用物理量 T_{cool} 表示)为 288.15 K, 水流率(用物理量 Q_w 表示)为 1 L/min, 研究时长为 120 s, 步长为 10 s。包层功率剥离器封装在光纤激光器中, 故不考虑其热沉外表面对流散热^[17-18]。

2.4 结果分析

对剥离器 1、2 和 3 剥离 1000 W 包层功率进行了热效应仿真, 热效应仿真图分别对应图 3(a)~(c)。将以上仿真结果记录到表 1, 且将剥离器 1、2 的原实验数据也记录到表 1 中, 对比研究。

首先, 由表 1 可知, 剥离 1000 W 包层功率时。剥离器 1 仿真时的温度峰值 $T_{max} = 354$ K, 温度谷值 $T_{min} = 293$ K, 温差 $T_{dif} = 61$ K; 由文献[14]可知, 其剥离 1000 W 包层功率时, 原实验温度峰值为 353.15 K, 温度谷值为 293.15 K, 温差为 60 K, 仿真结果与原实验数据基本吻合。剥离器 2 仿真时的温度峰值为 352 K, 温度谷值为 317 K, 温差为 35 K; 由

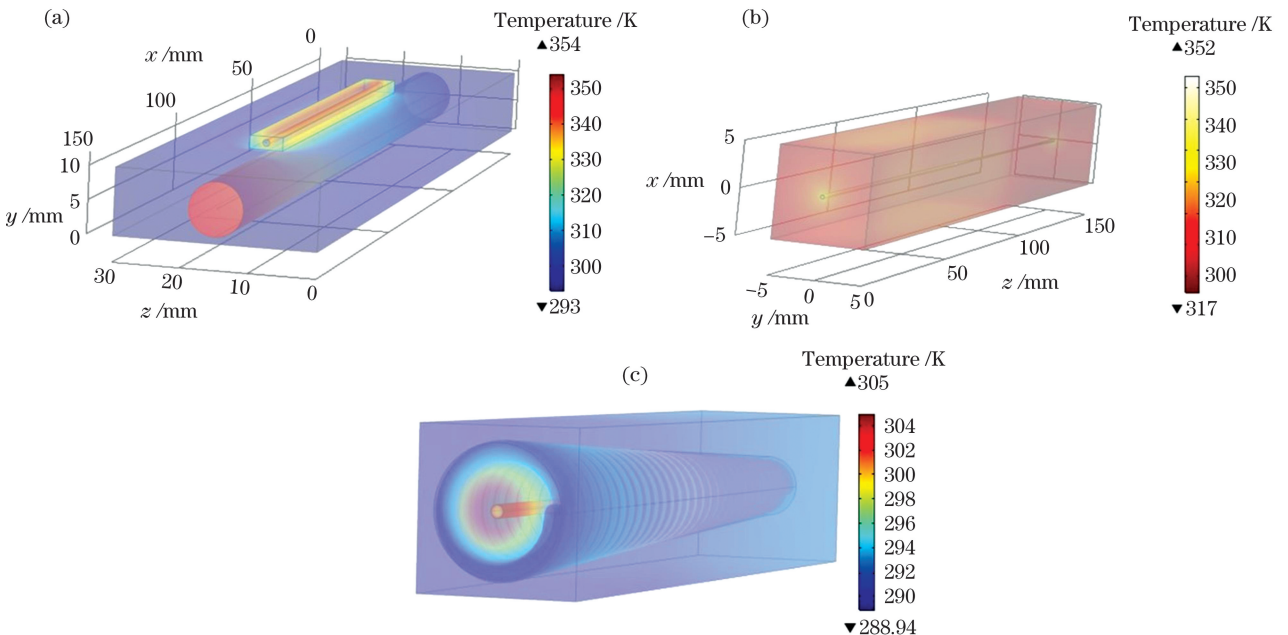


图 3 热效应仿真图。(a)剥离器 1; (b)剥离器 2; (c)剥离器 3

Fig. 3 Simulation diagram of thermal effect. (a) Stripper 1; (b) stripper 2; (c) stripper 3

表1 剥离器 1、2 和 3 的热性能数据

Table 1 Thermal performance data of strippers 1, 2, and 3

Serial number		T_{\max}/K	T_{\min}/K	T_{dif}/K
Stripper 1	Simulation data	354.00	293.00	61.00
	Experimental data	353.15	293.15	60.00
Stripper 2	Simulation data	352.00	317.00	35.00
	Experimental data	351.65	315.65	36.00
Stripper 3	Simulation data	305.00	289.00	16.00

文献[15]可知,其剥离 1010 W 包层功率时,原实验温度峰值为 351.65 K,温度谷值为 315.65 K,温差为 36 K,该仿真结果与原实验数据也基本吻合。以上仿真研究验证了剥离器 1、2 的仿真可靠性;但是,同时发现无论是实验数据还是仿真结果,剥离器 1 和剥离器 2 在剥离 1000 W 包层功率时,其最高温度接近甚至超过了 353.15 K,而光纤激光器系统长时间稳定运行一般要求低于 353.15 K^[11]。因此,以上分析也证实了剥离器 1 和 2 的散热性能并非最优。

其次,对比表 1 中剥离器 1、2 和 3 的仿真热性能数据可知,剥离器 3 剥离 1000 W 包层功率时,其温度峰值仅为 305 K,比剥离器 1 和 2 的温度峰值分别低 49 K 和 47 K;温度谷值仅为 289 K,比剥离器 1 和 2 的温度谷值分别低 4 K 和 28 K;温差仅为 16 K,比剥离器 1 和 2 的温差分别低 45 K 和 19 K,且热分布更加均匀。

最后,结合图 3(c)可知,实验中剥离器 3 的温度谷值出现在入水口附近,该温度略高于冷却水初始温度(288.15 K),温度峰值出现在出水口,这说明剥离器中的大部分热量是通过冷却水耗散的;并且除了出水口,整个冷却流道(螺旋管道)的温度均低

于内部光纤的温度,内部光纤的前端温度高于后端温度,说明光纤上的热量随着螺旋流道中的水流逐渐耗散;整个剥离器除了内部光纤、出水口、入水口、热源,其余部分的温度均接近环境温度且十分稳定,说明该剥离器中的热量分布十分均匀。通过以上分析,使用螺旋流道水冷技术设计的千瓦级包层功率剥离器相比于传统千瓦级包层功率剥离器,具有更低的温度峰、谷值,并且热分布更加均匀;证明了螺旋流道水冷千瓦级包层功率剥离器的实用性。

3 螺旋流道水冷千瓦级 CPS 热性能优化

为了进一步提升剥离器 3 的散热性能,在不同的热沉初始温度(T_{mold})、冷却水初始温度(T_{cool})、冷却管道直径(D_i)下,对剥离器 3 进行优化研究;并改变包层功率(P_b)以研究剥离器 3 可剥离的最大包层功率。

3.1 T_{mold} 的影响

在 $T_{\text{cool}}=288.15\text{ K}$, $Q_w=1\text{ L/min}$, $D_i=3\text{ mm}$, $P_b=1000\text{ W}$ 的条件下,研究 T_{mold} 分别为 290.15、293.15、295.15、353.15 K 时,剥离器 3 的热性能,结果记录在表 2 中。

表2 不同 T_{mold} 对剥离器热性能影响的数据表Table 2 Data table of the influence of different T_{mold} on the thermal performance of the strippers

Variable name	Serial number			
	1	2	3	4
T_{mold}/K	290.15	293.15	295.15	353.15
T_{\max}/K	305.00	305.00	305.00	305.00
T_{\min}/K	288.94	288.94	288.94	288.94
T_{dif}/K	16.06	16.06	16.06	16.06
$V_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	23.59	23.59	23.59	23.59

对比表 2 中的四组数据可以发现,当 T_{mold} 分别为 290.15、293.15、295.15、353.15 K 时,剥离器 3

的温度峰值、温度谷值、温差、管内水最大流速 (V_{\max}) 均无变化,分别为 305.00 K、288.94 K、

16.06 K、23.59 m/s。说明热沉初始温度 T_{mold} 对剥离器的散热性能几乎无影响;其原因可能是水耗散热能的速度非常快,整个剥离器的热仅由热源域包层功率转化而来,热沉的初始热量虽然高,但是该

热能在短时间内会被水快速耗散,所以热沉初始温度对剥离器的散热性能无明显影响。进一步研究了 $T_{\text{mold}}=353.15\text{ K}$ 时整个包层功率剥离器的平均温度随时间变化,如图 4 所示。

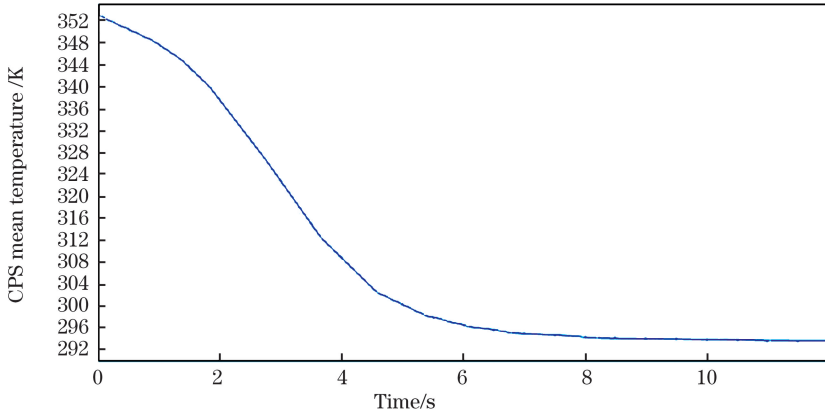


图 4 $T_{\text{mold}}=353.15\text{ K}$ 时 CPS 平均温度随时间的变化

Fig. 4 CPS mean temperature changes with time when $T_{\text{mold}}=353.15\text{ K}$

由图 4 可知,剥离器 3 开始工作的前 5 s,整个 CPS 的平均温度从 353.15 K 急剧下降至 300 K;在 5~9 s, CPS 的平均温度从 309 K 缓慢下降至 294 K;9 s 后,整个 CPS 的平均温度稳定在 294 K。该结果证实了上述分析,说明热沉初始温度对剥离器的散热性能无明显影响。

3.2 T_{cool} 的影响

在 $T_{\text{mold}}=293.15\text{ K}$, $Q_w=1\text{ L/min}$, $D_i=3\text{ mm}$, $P_b=1000\text{ W}$ 的条件下,研究 T_{cool} 分别为 283.15、288.15、293.15 K 时,剥离器 3 的热性能,结果记录在表 3 中。

表 3 不同 T_{cool} 对剥离器热性能影响的数据表

Table 3 Data table of the influence of different T_{cool} on the thermal performance of the stripper

Variable name	Serial number		
	1	2	3
T_{cool}/K	283.15	288.15	293.15
T_{max}/K	300.49	305.00	309.62
T_{min}/K	284.29	288.94	283.61
T_{dif}/K	16.20	16.06	16.01
$V_{\text{max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	23.59	23.59	23.59

对表 3 中的数据分析,对比第 1 组和第 2 组数据可知,当冷却水初始温度上升 5 K 时,其温度峰值上升了 4.51 K,温度谷值上升了 4.65 K,温差缩小了 0.14 K;对比第 2 组和第 3 组数据可知,当冷却水初始温度上升 5 K 时,其温度峰值上升了

4.62 K,温度谷值上升了 4.67 K,温差缩小了 0.05 K。由此可知,冷却水初始温度越高,剥离器的温度峰、谷值越高,但是其温差越小。原因是使用水冷技术对器件进行强制对流散热时,水的比热容是确定的常数,吸收相同热量的情况下,其温度变化也是常数,所以,冷却水初始温度越高,其吸收热量后的温度就越高;而冷却水初始温度越接近热沉初始温度时,两者之间的热交换相对减少,温差自然缩小^[19]。根据以上结论,降低冷却水初始温度可以有效降低温度峰、谷值,尽管温差会随之略微增大。综合考虑将最优冷却水初始温度可设定为 283.15 K。

3.3 D_i 的影响

在 $T_{\text{mold}}=293.15\text{ K}$, $T_{\text{cool}}=288.15\text{ K}$, $Q_w=1\text{ L/min}$, $P_b=1000\text{ W}$ 的条件下,研究 D_i 分别为 2、2.5、3 mm 时,剥离器 3 的热性能,结果记录在表 4 中。

表 4 不同 D_i 对剥离器热性能影响的数据表

Table 4 Data table of the influence of different D_i on the thermal performance of the stripper

Variable name	Serial number		
	1	2	3
D_i/mm	2.00	2.50	3.00
T_{max}/K	307.12	305.76	305.00
T_{min}/K	289.30	289.12	288.84
T_{dif}/K	17.82	16.64	16.16
$V_{\text{max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	53.20	33.99	23.59

对表 4 中的数据分析,对比第 1 组和第 2 组数据可知,当冷却管道直径增加 0.5 mm 时,其温

度峰值下降了 1.36 K, 温度谷值下降了 0.18 K, 温差缩小了 1.18 K, 管内水最大流速下降了 19.21 m/s; 对比第 2 组和第 3 组数据可知, 当冷却管道直径增加 0.5 mm 时, 其温度峰值下降了 0.76 K, 温度谷值下降了 0.28 K, 温差缩小了 0.48 K, 管内水最大流速下降了 10.40 m/s。由此可知, 冷却管道直径越大, 温度峰、谷值越小, 温差越小, 管内水最大流速越小; 并且随着冷却管道直径进一步增大, 其温度峰值下降的速率、温差缩小的速率、管内水最大流速下降的速率均变小, 温度谷值下降的速率变大。原因是当冷却管道的直径变大时, 其表面积和体积自然随之增加, 但是因为冷却管道直径很小, 其表面积增长率远大于其体积增长率, 所以其热源与传热介质间的表面积一体积比随之增大, 其温度峰值和温差也随之降低^[20-21]; 其次因为研究中将水流率 Q_w 设定为常量 1 L/min, 即, 每分

表 5 最优环境下不同 P_b 的热性能数据表Table 5 Thermal performance data table of different P_b under optimal environment

Variable name	Serial number					
	1	2	3	4	5	6
P_b/W	1000	2000	3000	4000	4200	4500
T_{max}/K	300.49	316.92	333.41	349.91	353.21	358.16
T_{min}/K	284.29	284.82	285.34	285.87	285.97	286.13
T_{dif}/K	16.20	32.10	48.07	64.04	67.24	72.03
$V_{max}/(m \cdot s^{-1})$	23.59	23.60	23.61	23.61	23.62	23.62

对表 5 中的 1~4 组数据进行分析可知, 包层功率每上升 1000 W, 剥离器 3 的温度峰值约上升 16.47 K, 温度谷值约下降 0.53 K, 温差约上升 15.94 K, 管内水最大流速稳定在 23.60 m/s 附近。再观察表 5 中的第 5、6 组数据发现, 当 $P_b=4200$ W 时, 剥离器的温度峰值为 353.21 K, 当 $P_b=4500$ W 时, 剥离器的温度峰值为 358.16 K; 而光纤激光器系统稳定工作的温度极限值为 353.15 K^[11], 所以剥离器 3 在最优环境下可剥离的包层功率极限值为 4200 W。

4 结 论

基于螺旋流道水冷技术提出了一种新的千瓦级包层功率剥离器结构, 并对其散热性能进行了研究。首先将该结构与普通水冷式包层功率剥离器及热沉吸热式包层功率剥离器进行对比, 发现螺旋流道水冷千瓦级包层功率剥离器结构的温度峰谷值和温差均低于普通水冷及热沉吸热方式的包层功率剥离

器, 说明将螺旋流道水冷技术应用于千瓦级包层功率剥离器是可行的, 证实了该剥离器的实用性与优越性。其次通过研究螺旋流道参量, 发现热沉初始温度对剥离器的散热性能无明显影响, 大直径的冷却管道及合适的冷却水初始温度将有利于剥离器散热。为此, 设计的剥离器实验条件: 热沉初始温度为 293.15 K, 冷却水初始温度为 283.15 K, 冷却管道直径为 3 mm; 其最高可剥离 4200 W 包层功率, 温度峰值为 353.21 K, 温度谷值为 285.97 K, 温差为 67.24 K。相比于普通水冷和热沉吸热的两种传统千瓦级包层功率剥离器, 其剥离功率不仅提升近了 4 倍, 而且剥离同等包层功率(1000 W)时, 其温度峰值最多降低了 15.1%, 温度谷值最多降低了 10.3%, 温差最多缩小了 73.4%, 该剥离器具有优秀的散热性能且能在安全温度范围内稳定工作。

3.4 最优环境下可剥离功率的极限值

通过以上的数据对比和优化研究, 确定了剥离器工作的最优环境, 即 $T_{mold}=293.15$ K, $T_{cool}=283.15$ K, $Q_w=1$ L/min, $D_i=3$ mm; 为此, 拟在最优环境下通过改变包层功率研究剥离器 3 可剥离功率的极限值; 将 P_b 分别设定为 1000、2000、3000、4000、4200、4500 W 进行热效应研究, 其热性能仿真数据记录在表 5 中。

参 考 文 献

- [1] Zhu H T, Lou Q H, Zhou J, et al. Experimental and

- theoretical study on designing of cooling device for the kilowatt-level double cladding fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8): 4966-4971.
- 朱洪涛, 楼祺洪, 周军, 等. 千瓦级双层光纤激光器冷却方案设计理论和实验研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 4966-4971.
- [2] Huang Z H, Liang X B, Li C Y, et al. Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multilongitudinal-mode oscillators[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 297-302.
- [3] Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, et al. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3296-3301.
- [4] Wetter A, Faucher M, Sevigny B. High power cladding light strippers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6873: 687327.
- [5] Kliner A, Hou K C, Plötner M, et al. Fabrication and evaluation of a 500 W cladding-light stripper[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8616: 86160N.
- [6] Gong K, Hao M M, Li J B. The thermal effect of cladding power stripper for high power fiber lasers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(32): 3768-3773.
- 龚凯, 郝明明, 李京波. 光纤激光器中包层功率剥离器的热效应[J]. *科学通报*, 2017, 62(32): 3768-3773.
- [7] Xia Q G, Xiao W B, Li J H, et al. Optimization of thermal performance of cladding power stripper in fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(1): 014204.
- 夏情感, 肖文波, 李军华, 等. 光纤激光器中包层功率剥离器散热性能的优化[J]. *物理学报*, 2020, 69(1): 014204.
- [8] Gong K. The research on cladding power stripper in fiber laser[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019: 5-16.
- 龚凯. 光纤激光器中包层功率剥离器的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019: 5-16.
- [9] Hou J D, Xiong C, Qi Q, et al. Optimization design of epitaxially-stacked multiple-active-region lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1014001.
- 侯继达, 熊聪, 祁琼, 等. 外延叠层多有源区激光器的结构优化设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1014001.
- [10] Yang C S, Xu S H, Zhou J, et al. Research advance on the key technology of high-power fiber laser materials and components [J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2017, 47(10): 1038-1048.
- 杨昌盛, 徐善辉, 周军, 等. 大功率光纤激光材料与器件关键技术研究进展[J]. *中国科学(技术科学)*, 2017, 47(10): 1038-1048.
- [11] Lapointe M A, Chatigny S, Piché M, et al. Thermal effect in high power CW fiber lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7195: 71951U.
- [12] An H X, Deng K, Bi Z Y. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 321-330.
- 安海霞, 邓坤, 闭治跃. 高功率激光装备小型化轻量化技术[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 321-330.
- [13] Yuan Q H, Jing H Q, Zhang Q Y, et al. Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 040003.
- 袁庆贺, 井红旗, 张秋月, 等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 040003.
- [14] 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.
- [15] Zou S Z, Chen H, Zhang J Y, et al. Cladding light stripper of high average stripped power density with high attenuation of 39 dB and low temperature rise [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-10.
- [16] Yin L, Yan M J, Han Z G, et al. High power cladding light stripper using segmented corrosion method: theoretical and experimental studies [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8760-8776.
- [17] 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.
- [18] Chen X L, Lou F G, He Y, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0336001.
- 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率全国产化 10 kW 光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0336001.
- [19] Chen T Q, Zhang P, Peng B, et al. Effect of packaging on thermal stress and smile of high power

- semiconductor laser arrays [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 0614001.
- 陈天奇, 张普, 彭勃, 等. 封装对大功率半导体激光器阵列热应力及 Smile 的影响[J]. *光子学报*, 2018, 47(6): 0614001.
- [20] Zhang G Q. Optimization design and application basic research on the implant manufactured by selective laser melting [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 24-38.
- 张国庆. 激光选区熔化成型植入体优化设计及应用基础研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 24-38.
- [21] Bansal L, Supradeepa V R, Kremp T, et al. High power cladding mode stripper [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9344: 93440F.
- [22] Brown D C, Hoffman H J. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(2): 207-217.
- [23] Jia Z X, Yao C F, Jia S J, et al. Progress on novel mid-infrared glass fibers and relative lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170604.
- 贾志旭, 姚传飞, 贾世杰, 等. 新型中红外玻璃光纤及相应激光器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170604.
- [24] Tan T, Yuan Z Y, Chen Y F, et al. Graphene-based fiber functional sensors and laser devices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170613.
- 谭腾, 袁中野, 陈远富, 等. 基于石墨烯的光纤功能化传感器件和激光器件 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170613.