

引文格式: 裴旭, 白佳宾, 郝赫, 等. 高能光纤激光器浸没式相变冷却系统[J]. 航空制造技术, 2026, 69(4): 25020167.

PEI Xu, BAI Jiabin, HAO He, et al. Immersed phase-change cooling system for high-power fiber lasers[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(4): 25020167.

高能光纤激光器浸没式相变冷却系统

裴旭, 白佳宾, 郝赫, 高光波

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 高能光纤激光器在先进制造与国防等领域具有重要应用,但其高功率输出带来的日益严峻的热管理问题严重制约了其长期稳定运行与进一步发展。传统散热手段存在散热效率低、系统复杂等局限性。为此,提出一种浸没式相变冷却系统,利用低沸点工质 R245fa 的相变潜热,以及和热源表面的充分接触实现高效散热。采用通过数值模拟与试验验证相结合的方法,研究了系统热力学特性与结构设计,开发了集成化封装方案,最终实现了高能光纤激光器高效散热。仿真结果表明,系统在 100 s 内温度仅上升 8 °C,稳定在光纤激光器元器件安全工作温度范围内;工程样机通过试验同样验证了该方案的有效性,其总散热功率可达 25 kW。该系统显著提升了散热效率与可靠性,降低了能耗与体积,为高能激光装备的技术升级与应用拓展提供了创新解决方案,具有重要工程应用价值。

关键词: 高能光纤激光器; 浸没式; 相变冷却; 热管理; 数值模拟

中图分类号: V261.8

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020167

Immersed Phase-Change Cooling System for High-Power Fiber Lasers

PEI Xu, BAI Jiabin, HAO He, GAO Guangbo

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] High-power fiber lasers are critical in advanced manufacturing and defense applications, yet their high-power output poses severe thermal management challenges that limit long-term stability and further development. Traditional cooling methods suffer from inefficiency and system complexity. This study proposes an immersed phase-change cooling system utilizing the latent heat of the low-boiling-point working fluid R245fa for efficient heat dissipation. By integrating numerical simulations with experimental validation, the thermodynamic characteristics and structural design were analyzed, leading to an optimized integrated packaging solution. Simulation results demonstrated a temperature rise of only 8 °C within 100 s, maintaining stability within the safe operating range of laser components. Experimental tests on an engineering prototype confirmed the system's effectiveness, achieving a total heat dissipation capacity of 25 kW. The proposed system significantly improves thermal efficiency and reliability while reducing energy consumption and system volume, offering an innovative solution for advancing high-power laser technology and broadening its applications with substantial engineering value.

Keywords: High-energy fiber laser; Immersion; Phase-change cooling; Thermal management; Numerical simulation

高能光纤激光器凭借光束质量优异、转换效率高及结构紧凑等优势,已成为航空航天、先进制造、精密加工及国防科技等领域不可或缺的核心光源。然而,随着光

纤激光器输出功率的不断提升,其内部热管理系统面临的问题日益严峻,严重制约其长期工作的稳定性和可靠性。若无法对光纤激光器进行充分的热管理,不仅会产

收稿日期: 2025-06-05; 退修日期: 2025-06-25; 录用日期: 2025-07-10

通信作者: 高光波, 高级工程师, 研究方向为光学精密结构设计、热管理系统设计。

生激光介质的量子效率下降、模式不稳定等热效应问题,还可能引起非线性效应加剧、光谱展宽,甚至关键光学元器件不可逆热损伤^[1-3]。因此,高效稳定的热管理技术成为高能光纤激光器进一步发展的关键技术瓶颈之一。

传统的热管理方式,如风冷和间接液冷,虽然在一定程度上能够满足光纤激光器的散热需求,但在高功率或极端环境下,其散热效率、系统复杂性和环境适应性均面临严峻挑战^[4-7]。

浸没式相变冷却技术作为一种新型的散热方式,已经在数据中心和服务器散热系统中取得了较好的工程化应用成果,在高能激光系统的热管理领域展现出了巨大的潜力^[8]。该技术利用低沸点冷却液的局部沸腾和冷凝过程,实现了热量的高效耗散^[9]。通过将高能激光器件直接浸泡在冷却介质中,利用介质的相变潜热快速吸收并带走设备产生的巨大热量,从而确保设备在极端工况下的温度稳定。

这种直接接触散热机制不仅显著提高了散热效率,还有效避免了热量的积聚和扩散,对于高能激光系统这种瞬时功率高、热流密度大的设备而言,具有至关重要的意义^[10]。同时,浸没式相变冷却技术还通过高能激光与热管理结构的高度集成化设计,实现了冷却系统体积和重量的显著减小。

针对上述问题,本文系统研究了浸没式相变冷却系统在高能光纤激光器应用上的热力学特性,结合数值模拟与试验验证,探讨工质选型、结构设计及系统集成方法,旨在为下一代高能光纤激光器热管理提供创新解决方案,推动高能光纤激光器的进一步发展。

1 激光器热损耗分析

采用传统液冷方式的高能光纤激光器,其结构采用光电元器件加液冷冷板的形式,如图1所示。其中,高能光纤激光器的热源主要包括半导体泵浦源、光纤光栅、有源光纤、高功率包层光滤除器(CLS)、泵浦合束器及电源6部分。其中,半导体泵浦源可以将电流转换为

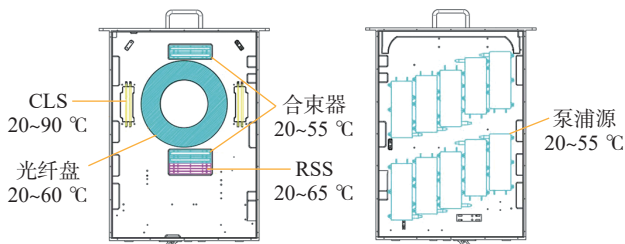


图1 传统液冷高能光纤激光器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of a traditional liquid-cooled high-power fiber laser

特定波长的激光,受限于光电转换效率,一部分电能会在转换过程中以热能的形式释放到环境中;光纤光栅在激光器工作时吸收一部分光能,并将其转换为热能;有源光纤通过内部掺杂的稀土离子提高激光的亮度,其转换过程存在热损耗;高功率包层光滤除器将工作状态下的光纤包层激光剥离至其外壳上,并以热能的形式耗散;泵浦合束器在光纤熔接及自身耦合的过程中会产生热损耗;电源负责向光电元器件供电,此过程中有部分电能转换为热能^[11]。

此外,高能光纤激光器的其他光电器件在工作时也会产生部分热量,但与上文中提及的主要热源相比,这部分热源的发热功率较低,因此不单独列出。本文拟采用5个高能光纤激光器单元组成高能光纤激光器模块,总发热功率可达25 kW,其中单个高能光纤激光器单元发热功率见表1,单个高能光纤激光器单元的发热功率约为4.8 kW。

2 浸没式相变冷却系统及激光器一体化封装设计

2.1 浸没式相变冷却系统设计

浸没式相变液冷系统主要由激光器工作罐体、气体增压泵、储液罐、储气罐、冷凝器、电子膨胀阀EEV、激光器组件、温度/压力监控系统、控制系统等构成,为密闭式循环相变冷却系统。系统通过内置的流量、压力、温度等传感器对运行状态进行监控和调节。

该系统利用相变工质在激光器工作罐体内受热蒸发,通过气化潜热带走热源的热量。由于蒸发过程中工质温度基本保持不变,可以精确地保证热源温度的均匀性。相变工质气化过程中,蒸气压力不断升高,因此在腔体气化区出口配置气体增压泵,不断抽取腔体上方的气体,保证相变蒸气压力稳定。低温低压的相变蒸气经过气体增压泵变成高温高压气体,随后进入储气罐(储

表1 光纤激光器元器件发热功率

Table 1 Heat generation power of fiber laser components

材料名称	数量	单件发热量/W	工作温度/°C
半导体泵浦源	4只	700	20~55
光纤光栅	1对	100	20~55
有源光纤	30 m	650	20~60
高功率包层光滤除器	1只	150	20~90
泵浦合束器	2只	100	20~55
DC-DC 电源	1个	150	-10~50
其他	—	650	—
合计	—	4800	—

气罐起到储存气态冷却介质的作用),最终进入冷凝器,将高温高压的气体转化成高温高压的液体。

液态相变工质从冷凝器流出后进入储液罐,储液罐起到储存液态相变工质的作用。随后,从储液罐出来的高温高压液体进入电子膨胀阀 EEV 完成降压过程,被转化成低温低压的液体,最后进入激光器工作罐体内,形成下一个循环。系统原理图如图 2 所示。

通过直接接触热源和相变潜热吸收,浸没式相变冷却系统可将散热效率提升 5~10 倍。散热效率提升是实现热管理系统高效温控及轻量化小型化的基础。在浸没式冷却技术中,材料的兼容性是实现系统可靠的关键前提。激光器核心部件对冷却液的化学惰性要求极高,冷却液需避免腐蚀、溶解密封材料或导致光学性能衰减,同时兼具对激光电源的绝缘性。通过系统集成结构优化减少冷却液用量是进一步降低系统质量的关键。

本研究中涉及的高能光纤激光器元器件的材料主要包括无氧铜、不锈钢、铝合金等金属材料,以及二氧化硅、硅橡胶、丙烯酸酯等非金属材料,各材料的特性如表 2 所示。

依据高能光纤激光器的工作特点及相关元器件的材料特质,进行相变冷却工质的选择,总结出以下 3 点选型原则:

- (1) 冷媒化学性质稳定、能够兼容光纤激光器材料;
- (2) 在一般压力下的沸点与光纤激光器工作温度相近;
- (3) 安全可靠,操作风险低。

结合以上选型原则,将几种常用的液气相变冷却工质的物理热力学特性进行对比,如表 3 所示^[12-13]。可以发现, R245fa 的沸点接近于高能光纤激光器元器件工作温度,临界温度远高于其他液气相变工质,且安全性较好,因此最终选择 R245fa 作为本文的相变冷却工质^[14]。

2.2 激光器一体化封装设计

本研究设计的光纤激光器模块主体尺寸 460 mm ×

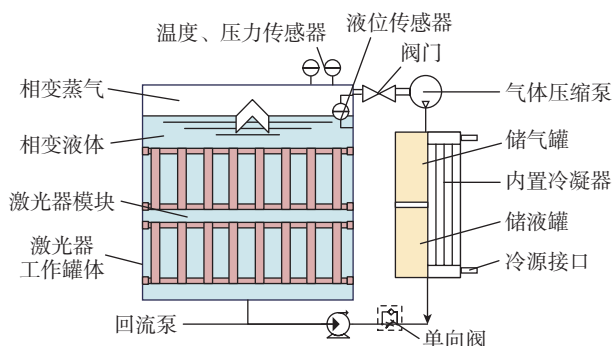


图 2 浸没式相变冷却系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of an immersed phase change cooling system

420 mm × 520 mm,上方预留不小于 100 mm 的空间用于布置光纤输出头及电缆接头,同时作为 R245fa 的蒸气腔。

高能光纤激光器模块采用单元化结构,每个单元既是独立的个体,能单独置换,便于维护和维修;又可以与其他单元之间共同作用实现整机系统的高稳定性输出。单元与单元之间的互联,以简化为原则,减少不必要的连接线。在保证性能的前提下,模块内部的布局也做了精简优化,光机电系统有序组合。

整体结构结合了强度要求、密封性能、轻量化等设计原则。在整体结构设计上,通过大面积镂空设计来保证气态冷媒上升的通道。为保证泵浦源与相变工质液充分接触,需对泵浦源安装方式进行优化:通过垫块抬高泵浦源,使其底面与冷却液充分接触,从而提高散热效率。对激光器部件及光纤安装方式进行优化,取消反向 2+1 光路,对合束器等光学器件进行涂胶密封。通过支撑结构将 5 个高能光纤激光单元组合为高能光纤激光器模块,其结构如图 3 所示。

表 2 光纤激光器元器件材料特性

Table 2 Material properties of fiber laser components

器件	材质	
半导体泵浦源	热沉	无氧铜
	顶盖	不锈钢
	光纤	二氧化硅
光纤光栅	封装	铝合金
	光纤	二氧化硅
有源光纤	纤芯、包层	二氧化硅
	涂覆层	丙烯酸酯、硅橡胶等
高功率包层光滤除器	封装	铝合金
	光纤	二氧化硅
泵浦合束器	封装	铝合金
	光纤	二氧化硅
电源模块	常规电子元器件、IT, 本研究不再详述	

表 3 常用液气相变工质性质^[12-13]

Table 3 Properties of common liquid-gas phase change working fluids^[12-13]

冷媒类型	沸点/°C	临界温度/°C	安全性	主流应用
R245fa	15.3	154	不易燃	浸没冷却
R410A	-51.6	71.5	不可燃	空调
R32	-52	78.1	微可燃	空调、热泵
R134a	-26.1	101	不可燃	冰箱、汽车空调

将高能光纤激光器模块浸没于相变工质中,利用相变工质的导热和比热容特性吸收热量。相变工质受热沸腾后,气化的工质通过气体压缩泵做功形成高温高压气体,再通过冷凝器向环境散热降温,最后通过膨胀阀释放压力成为低温低压的液化冷媒流回冷媒罐,循环往复。该系统具有高效散热、降低能耗、提高功率密度、提高设备可靠性、优化空间利用率等优势。

如图4和图5所示,将高能光纤激光器模块与其工作罐体进行一体化封装,对电源及控制对外接口采用密封性能良好的陶瓷套管进行穿舱,两端螺母锁死。接插件采用接线柱+深海连接器的方式来保证密封性能,其中接线柱的方式已经通过缩比样机的验证,能够满足

密封要求;深海连接器能够满足几十兆帕的压力,同样能够满足本研究中对于密封的要求。激光输出头采用自主研发的密封式激光输出头,其使用超低损耗熔接技术、高效包层光剥离技术及光纤整体密封等技术,以确保高功率激光的稳定输出和密封性能。

3 浸没式相变冷却系统数值模拟

为验证系统设计方案的可行性,对浸没式相变冷却系统中的激光器工作罐体内部温度变化及相变工质的相变情况进行数值模拟。

3.1 模型建立

由于本文中涉及的高能光纤激光器浸没式相变冷却系统的尺寸及发热功率较大,因此在数值模拟时对模型进行简化。对于涉及相变工质相变及流动的区域,采用较细的网格划分以提高计算精度;对于激光器等不涉及相变及流动的区域,采用较粗的网格划分以提高计算速率;同时在固体和流体交界面处设置膨胀层,以增加计算的收敛性。最终建立的二维仿真模型如图6所示。使用层流、相场及流体传热模块对二维模型进行数值模拟。

3.2 边界条件设置

根据表1中单个光纤激光器元器件的总发热功率

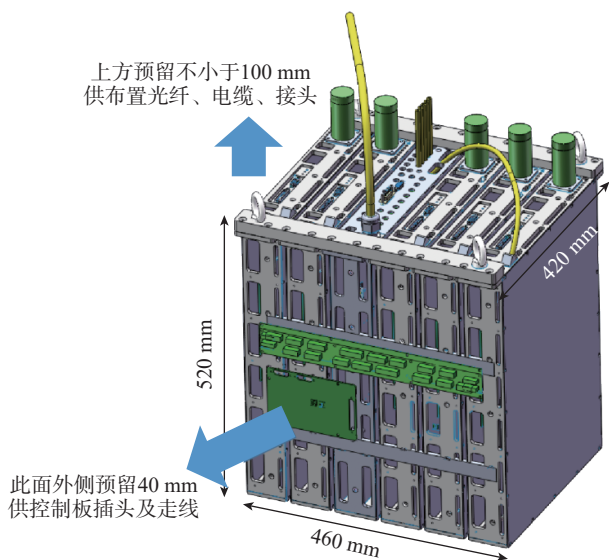


图3 高能光纤激光器模块结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of a high-power fiber laser module structure

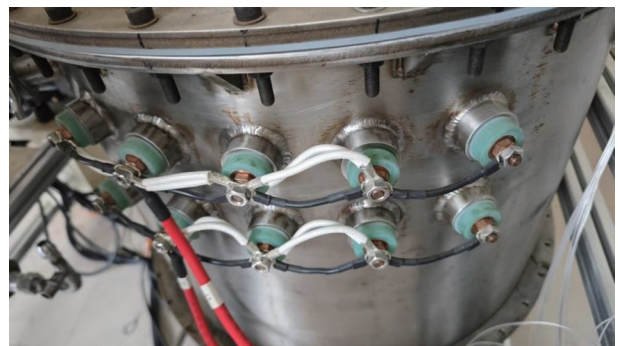


图5 高能光纤激光器工作罐体密封结构

Fig.5 Hermetic sealing structure of the high-power fiber laser operational chamber

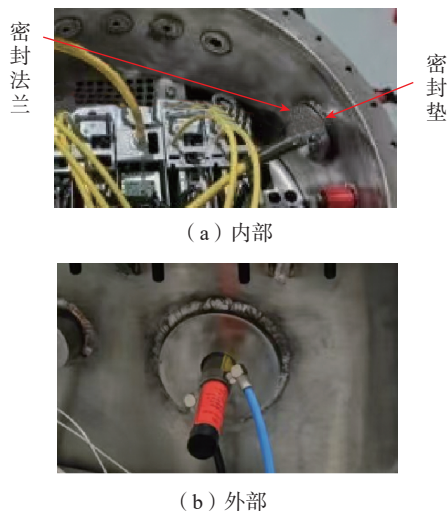


图4 高能光纤激光器模块 QBH 安装接口

Fig.4 QBH mounting interface of high-power fiber laser module

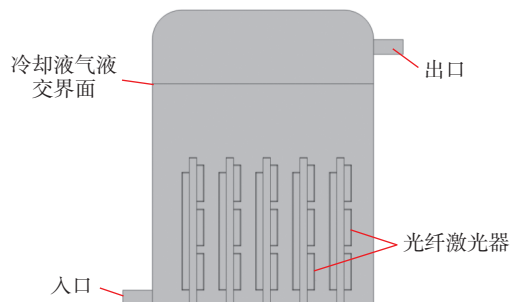


图6 浸没式相变冷却系统二维仿真模型

Fig.6 Two-dimensional simulation model of an immersed phase change cooling system

设置热源,根据表 2 中相关元器件的材料特质在材料库中选择相应的材料域,并将表 3 中 R245fa 的热力学参数输入到流体域中。其中,R245fa 涉及液气两相的变化,且两相的热力学参数差异较大,因此分别输入,具体参数如表 4 所示^[15]。

以环境温度 25 ℃、工作时长 100 s 为典型场景,入口采用速度边界条件,流速设定为 0.1 m/s,流体初始温度为 20 ℃;出口采用压力边界条件,设定压力值为 0.17904 MPa (该压力为相变工质 R245fa 在接近 30 ℃ 相变点时的临界压力);初始状态下,液相相变工质需完全浸没光纤激光器模块;模拟过程中考虑重力作用,方向竖直向下。

表 4 R245fa 热力学参数^[15]

Table 4 Thermodynamic parameters of R245fa^[15]

参数	液相	气相
密度/(kg/m ³)	1338.8	8.6
比热容/(kJ/(kg·K))	1.35	0.95
导热系数/(W/(m·K))	0.077	0.012
潜热/(kJ/kg)	190	—

3.3 仿真结果

基于 3.2 节中的边界条件进行 100 s 的瞬态计算,时间步长为 0.01 s,监测 100 s 内系统内温度、相变工质相变、相变工质流速及压力的变化。

图 7 所示为温度变化云图。可知,在 100 s 内,光纤激光器模块温度上升 8 ℃ (由 25 ℃ 上升至 33 ℃),满足高能光纤激光器各元器件安全工作温度范围,相变工质温度基本不发生变化。

图 8 所示为相变工质液相比云图。其中,红色为气相相变工质,蓝色为液相相变工质。由图 8 可以看出,光纤激光器工作时产生的热量使得其周围有大量气泡产生,并且相变工质液面逐渐下降。

图 9 所示为相变工质流速云图。随着光纤激光器工作的进行,相变工质流速逐渐加快,在 100 s 时达到最大值。

4 试验验证

基于本研究设计方案制造的高能光纤激光器浸没式相变冷却系统工程样机,如图 10 所示。对该样机进行试验以验证其散热性能,其冷却系统包括了图 2 中所示的各个组件,电控箱采用 PLC 控制冷却系统内各组

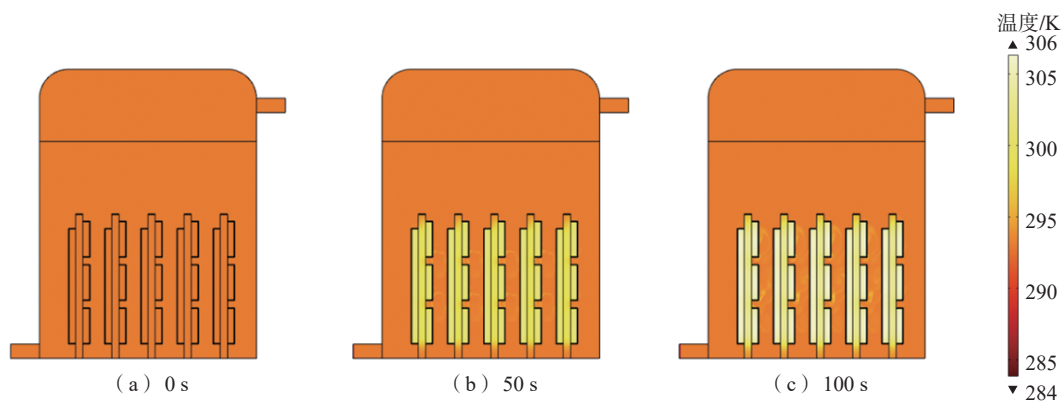


图 7 温度变化云图

Fig.7 Cloud map of temperature change

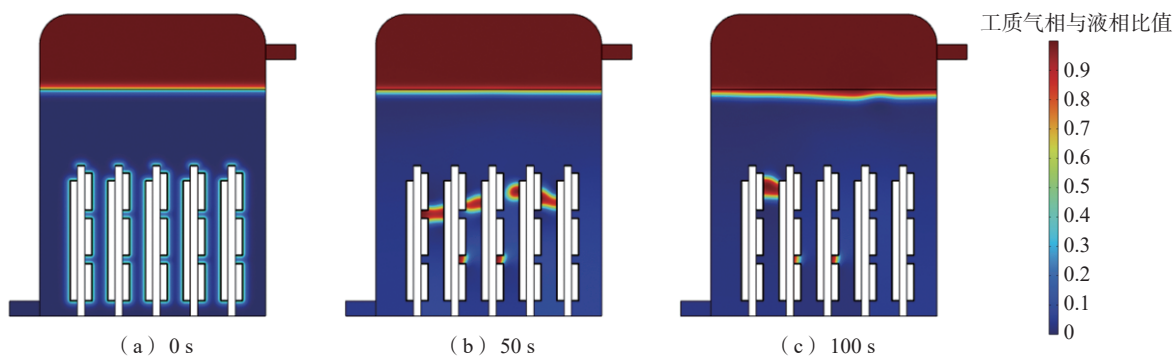


图 8 相变工质液相比云图

Fig.8 Liquid phase ratio cloud map of phase-change working fluid

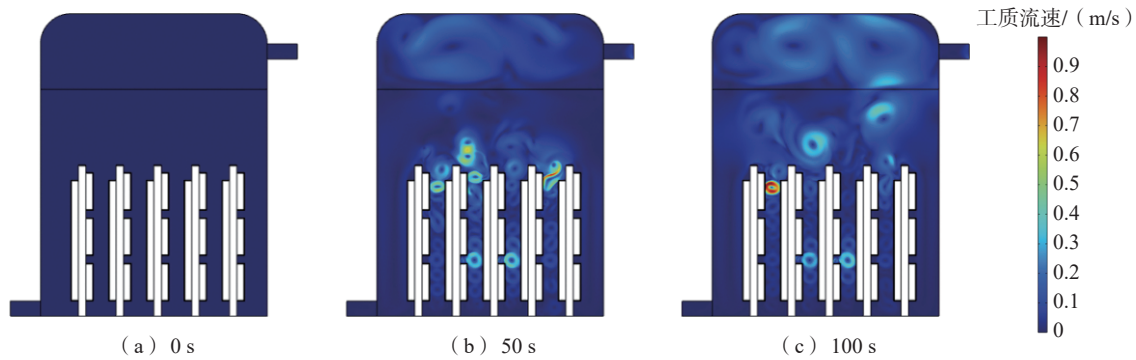


图9 相变工质流速变化云图

Fig.9 Cloud diagram of flow velocity change of phase-change working fluid



(a) 冷却系统

(b) 电控箱

图10 高能光纤激光器浸没式相变冷却系统工程样机

Fig.10 Engineering prototype of an immersed phase-change cooling system for high-energy fiber laser

件的运行,包括气体泵的运行速率、阀门的开合率、冷凝器风扇的运行速率等。

在室温条件下开启光纤激光器,记录高能光纤激光器运行时长 100 s 电控箱上激光器工作罐体内温度传感器读数变化,并在激光器工作罐体出光口处放置高温砖。图 11 所示为激光器工作罐体温度变化曲线。可以看出,激光器工作罐体内温度从初始的约 27.5 °C,经过 100 s 升至约 33.5 °C,升温幅度约 6 °C;温度变化曲线斜率逐渐减小,最终趋于稳定,且稳定温度保持在高能光纤激光器元器件的安全工作温度区间内。

图 12 所示为高能光纤激光器的激光照射高温砖效果,其激光输出功率随时间变化曲线如图 13 所示。可以看出,光纤激光器的输出功率在 100 s 内保持在 5.4~5.5 kW 区间,这一结果证明了本文设计的浸没式相变冷却系统的可行性。

5 结论

本文根据高能光纤激光器的工作特点,设计了一套与之工作模式匹配的浸没式相变冷却系统,包括浸没式相变冷却系统整体设计、相变工质选型、激光器一体化封装结构设计;并通过对系统中的激光器工作罐体部分

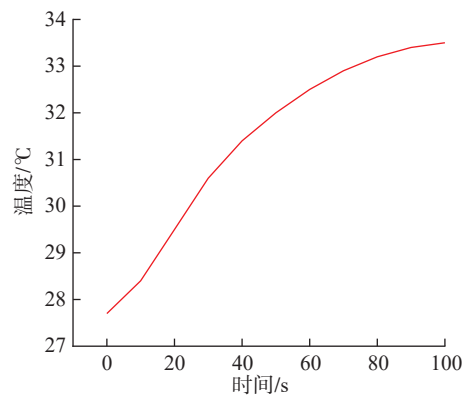
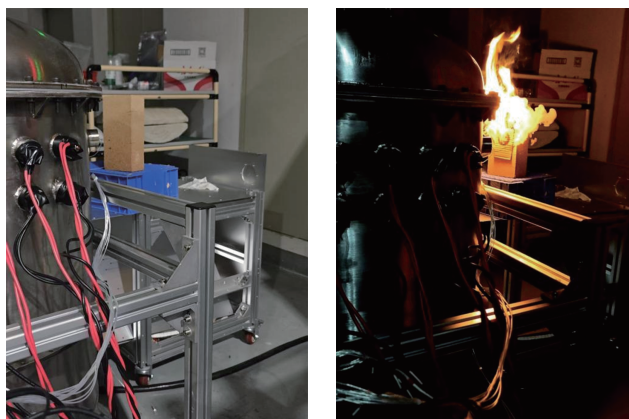


图11 激光器工作罐体温度变化曲线

Fig.11 Temperature variation curve of the laser operating chamber

进行数值模拟,重点分析了其温度、相变工质液相比及相变工质流速变化,证明了该系统设计的合理安全性;最终制造了一套工程样机,并对其进行试验验证,通过监测样机罐体内部温度变化情况及光纤激光器的出光功率证明了该方案的可行性。

本文设计的浸没式相变冷却系统采用新型浸没式相变冷却方式,实现了发热功率为 25 kW 的高能光纤激光器稳定工作 100 s 的散热需求,从而有效突破了制约



(a) 出光前 (b) 出光过程中

图 12 高能光纤激光器出光能力验证

Fig.12 High-energy fiber laser emission capability verification

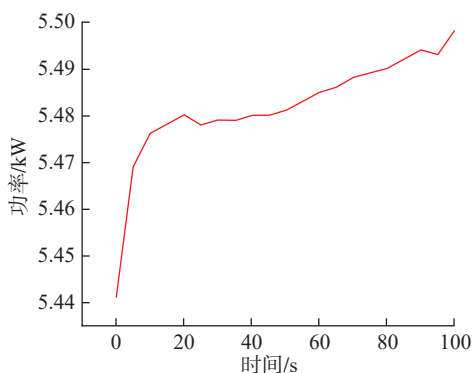


图 13 光纤激光器出光功率变化曲线

Fig.13 Output power variation curve of fiber laser

大功率激光装备广泛应用的技术瓶颈,为大功率激光装备的技术升级和广泛应用提供了坚实的技术支撑,在提升大功率激光装备性能、拓展其应用领域,以及小型化、轻量化发展等方面均产生了显著的综合效益。

参考文献

- [1] 高琼. 工作温度对光纤激光器输出特性影响的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- GAO Qiong. Theoretical and experimental research on fiber laser performance working at different temperatures[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [2] CANAT G, MOLLIER J C, JAOUËN Y, et al. Evidence of thermal effects in a high-power Er^{3+} - Yb^{3+} fiber laser[J]. Optics Letters, 2005, 30(22): 3030.
- [3] BRILLIANT N A, LAGONIK K. Thermal effects in a dual-clad ytterbium fiber laser[J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1669.
- [4] 张志军, 刘云, 付喜宏, 等. 百瓦级半导体激光器模块的风冷散热系统分析[J]. 发光学报, 2012, 33(2): 187-191.

ZHANG Zhijun, LIU Yun, FU Xihong, et al. Analysis of air-cooled heat system in hundred-watt level semiconductor laser module[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2012, 33(2): 187-191.

[5] SHU S L, HOU G Y, WANG L J, et al. Heat dissipation in high-power semiconductor lasers with heat pipe cooling system[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(6): 2607-2612.

[6] 乔迁, 赵虎, 谢兰强. 全固态风冷式激光器散热设计及优化[J]. 激光技术, 2024, 48(2): 235-239.

QIAO Qian, ZHAO Hu, XIE Lanqiang. Heat dissipation design and optimization of air cooled all solid-state laser[J]. Laser Technology, 2024, 48(2): 235-239.

[7] ZHAO H, LI B, WANG W J, et al. Water cooling radiator for solid state power supply in fast-axial-flow CO_2 laser[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2016, 9(4): 585-591.

[8] 潘永莉, 王会娟, 宗皓男, 等. 数据中心服务器浸没式液冷技术研究进展[J]. 润滑油, 2024, 39(6): 7-13.

PAN Yongli, WANG Huijuan, ZONG Haonan, et al. Research progress on immersion liquid cooling technology for data center servers[J]. Lubricating Oil, 2024, 39(6): 7-13.

[9] 黄子洋, 党光跃, 陈志列. 浸没式液冷服务器PCB的信号完整性仿真分析[J]. 现代信息科技, 2024, 8(20): 15-18, 22.

HUANG Ziyang, DANG Guangyue, CHEN Zhilie. Signal integrity simulation analysis of submerged liquid cooling server PCB[J]. Modern Information Technology, 2024, 8(20): 15-18, 22.

[10] 阳东, 张婷, 郭鑫. 浸没式液冷系统氟化液冷凝散热与沸腾换热匹配研究[J]. 制冷学报, 2023, 44(6): 85-91.

YANG Dong, ZHANG Ting, GUO Xin. Balance between condensing and boiling heat exchange of the dielectric liquid in immersion liquid cooling system[J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(6): 85-91.

[11] 罗正钱, 宋鲁明, 阮秋君. 可见光掺稀土光纤激光器研究进展: 从连续波至飞秒脉冲[J]. 中国激光, 2024, 51(1): 33-51.

LUO Zhengqian, SONG Luming, RUAN Qiujun. Progress in research on visible rare-earth-doped fiber lasers: From continuous wave to femtosecond pulses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(1): 33-51.

[12] DHADAN N S, KHODADADI J M. Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 449-477.

[13] SHARMA A, TYAGI V V, CHEN C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(2): 318-345.

[14] 李冲, 方贤德. 微通道内R245fa 沸腾换热和压降特性[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(12): 3750-3755.

LI Chong, FANG Xiande. Boiling heat transfer and pressure drop characteristics of R245fa in microchannel[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(12): 3750-3755.

[15] 曹洸, 赵露星, 王光辉, 等. R245fa 水平管内流动沸腾特性的实验研究[J]. 低温与超导, 2023, 51(3): 39-47.

CAO Shuang, ZHAO Luxing, WANG Guanghui, et al. Experimental study of flow and boiling characteristics of R245fa in horizontal tube[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2023, 51(3): 39-47.

(责编 阳光)