光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250224001

面向激光芯片的铬锆铜微流道热沉SLM制造与散热性能研究

蔡益勋[1],杨光照[1],钟　鑫[1],潘琳琳[1],曹明轩[1*],付　斌[1],袁铭辉[2],李会军[1]

（1. 五邑大学 机械与自动化工程学院,广东 江门 529020；2. 香港科技大学 机械工程系,中国香港 999077）

摘　要： 采用选择性激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术制备铬锆铜(Cu-Cr-Zr)微流道热沉(Micro-Channel Heat Sink, MCHS)。对流道可成型最小尺寸进行优化和测试,当MCHS的流道高度和宽度的设计尺寸为1.7 mm时,实际流道高度和宽度成型尺寸约为1.078 mm,1.415 mm,若流道高度设计尺寸小于1.7 mm,则易发生流道堵塞现象。在热沉表面焊接半导体激光芯片后,测试输出特性,结果显示:激光芯片的阈值电流为1.02 A;当驱动电流为5.39 A时,激光芯片的输出功率为4.601 W、斜率效率为0.85 W/A;Cu-Cr-Zr微流道热沉的热阻为7.33 ℃/W。经过50 h的稳定性测试,激光芯片输出功率降低8.54%后趋于稳定。实验结果验证了SLM技术制备MCHS的可行性,并具有工业化生产的潜力。

关键词： 选择性激光熔化；Cu-Cr-Zr合金；微流道热沉；热管理

中图分类号： O351　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0630－08

Study on the Fabrication and Heat Sink Performance of Cu-Cr-Zr Micro-Channel Heat Sinking SLM for Laser Chips

CAI Yixun[1], YANG Guangzhao[1], ZHONG Xin[1], PAN Linlin[1], CAO Mingxuan[1], FU Bin[1], YUAN Minghui[2], LI Huijun[1]

（1. School of Mechanical and Automation Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, CHN; 2. Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, CHN）

Abstract: A micro-channel heat sink (MCHS) made of chromium-zirconium-copper (Cu-Cr-Zr) was fabricated using selective laser melting (SLM) technology. The minimum achievable dimensions of the MCHS flow channels were optimized and tested. When the designed height and width were set to 1.7 mm, the actual formed dimensions measure approximately 1.078 mm in height and 1.415 mm in width. Further experiments have shown that reducing the designed channel height below 1.7 mm significantly increases the likelihood of flow channel blockage. Following the soldering of a semiconductor laser chip onto the heat sink surface, its output characteristics were evaluated. The laser chip exhibited a threshold current of 1.02 A. At a driving current of 5.39 A, the output power reached 4.601 W with a slope efficiency of 0.85 W/A. Additionally, the thermal resistance of the MCHS made of Cu-Cr-Zr has been measured as 7.33 ℃/W. A 50 h stability test showed that the output power of the laser chip decreased by 8.54% before stabilizing. The experimental results confirm the feasibility of using SLM technology for MCHS fabrication and its potential for industrial-scale production.

Key words: selective laser melting; Cu-Cr-Zr alloy; micro-channel heat sink; thermal management

收稿日期：2025－02－24.

基金项目：广东省重点领域研发计划资助项目(2020B090922004)；粤港澳联合研发基金资助项目(2019WGALH22)

* **通信作者：**曹明轩

0　引言

半导体激光芯片具有体积小、效率高、波长范围广等优点，在激光泵浦、激光武器、工业加工等领域应用广泛[1-2]。随着半导体激光芯片输出功率的不断提高，工作过程中产生大量的废热[3]，如果多余的热量不能及时释放，将会造成管芯温度升高，激光芯片内部的禁带宽度发生改变，严重影响芯片输出光束的稳定性和寿命[4-5]。

微流道热沉（Micro-Channel Heat Sink，MCHS）具有结构简单、紧凑、单位体积散热能力强等特点[6]，广泛应用于航空航天、电子信息技术、微机电系统等领域，是高功率激光芯片的主流散热途径[7]。目前，微流道热沉由无氧铜箔经过机械加工或化学刻蚀，再经过键合而成，最后进行表面抛光和镀金处理[8]。生产过程中存在诸多缺陷：工艺流程繁琐、灵活性差，且难以制造复杂的流道结构；而镀金层在长期使用中可能脱落，影响热沉的稳定性[9]；此外，受加工材料和加工工艺的影响，微流道热沉内部的冷却剂容易泄漏，降低热沉的散热性能[10]。综上所述，制作热沉的传统方法在效率、精度和性能等方面存在诸多不足。因此，微流道热沉的生产急需一种可靠、实用而又高质量的精密制造方法。

选择性激光熔化（Selective Laser Melting，SLM）技术具有极高的制造自由度，在成型复杂结构的零件方面有着显著的优势[11]。该技术以金属粉末为原材料，通过计算机软件规划扫描路径，利用高能量密度激光在保护气体环境中快速熔化粉末，完成零件成型[12]。SLM技术通过逐层熔化金属粉末，可直接制造复杂的三维微流道结构，无需使用模具或多步加工工艺，提高了设计的灵活性，能够实现传统制造方法难以完成的创新设计。相较于传统加工方式，SLM技术仅消耗成型所需的金属粉末，剩余粉末可重复回收利用，材料浪费更少，经济性更强[13-16]。此外，SLM技术支持铝、铜及其合金在内的多种金属材料[17]，能够根据具体需求选择导热性能优异的材料制备热沉。

李丛洋等[6]以纯Ni粉末为原材料，使用SLM技术研制出能够满足半导体激光器单bar芯片散热需求的MCHS。王燕灵等[8]采用选择性激光熔化技术制备了能满足80 W激光bar条散热要求的Ni合金MCHS。Jia等[9]使用激光3D打印技术制备了Ni基合金热沉，将半导体激光阵列安装在Ni基合金热沉上进行热阻测试，测试结果表明，该Ni基合金热沉的热阻与传统无氧Cu热沉的热阻相当。综上所述，研究人员主要集中在采用SLM技术制备Ni基合金MCHS，而采用SLM技术制备Cu基合金热沉的研究尚未报道。尽管Ni基合金具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损及易加工等特点[18]，但Cu合金的导热性能远高于Ni基合金，且具有良好的铸造性和抗腐蚀性，适用于高功率激光器等高热流密度场景，在散热领域中具备更大的潜力[19]。

由于Cu合金具有极高的反射率和导热率，SLM技术在制造Cu合金零件时存在一定缺陷[20]，如裂纹[21]、球化[22]、孔隙[23]等。这些缺陷的不确定性降低了SLM制造Cu合金零件的力学性能。Guan等[24]通过优化SLM技术的工艺参数，成功制备出相对密度达97.65%的Cu-Cr-Zr合金。Kuai等[25]采用响应面法建立回归模型，预测了最佳工艺为激光功率360 W、扫描速度790 mm/s、扫描间距0.1 mm、采用棋盘格扫描策略，在此条件下制备了相对密度为99.57%的Cu-Cr-Zr合金。验证了SLM技术制备高激光反射率金属的能力。

本文使用Cu-Cr-Zr合金粉末，结合SLM技术制备了不同尺寸的方形流道，对流道成型效果进行测试和分析，根据流道实验结果，确定Cu-Cr-Zr MCHS内部的流道尺寸。随后，将半导体激光器单管芯片分别焊接在采用SLM技术和传统工艺制备的MCHS表面，对芯片的输出功率和光谱波长进行对比测试，根据测试数据计算MCHS热阻值，并进行稳定性测试。

1　实验程序

1.1　材料与SLM工艺

实验中所用粉末的组成成分、流动性和粒度分布等特性都会对制备热沉的表面形貌和性能产生影响。本研究所使用的气体雾化Cu-Cr-Zr合金粉末由北京友兴联有色金属有限公司提供，采用Bettersize2600型激光粒度分配器对粉末进行粒度测试。如图1所示为Cu-Cr-Zr合金粉末粒度分布图，测得粉末粒径分布为：$D10=24.05\ \mu m$，$D50=39.94\ \mu m$，$D90=63.08\ \mu m$，平均粒径为41.92 μm，呈现近似正态分布，满足实验要求。

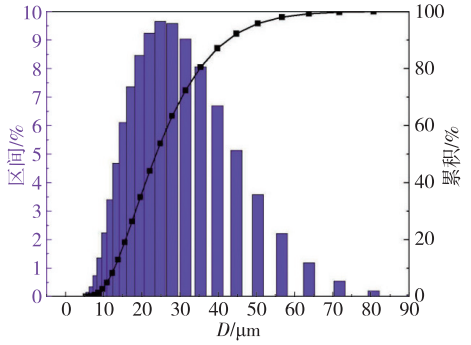


图1 Cu-Cr-Zr合金粉末粉末粒度分布

图2为Cu-Cr-Zr合金粉末的SEM形貌。大部分颗粒呈球形或椭圆形，表面光滑，存在极少量的卫星颗粒，流动性较好。小颗粒尺寸粉末有助于在激光能量下完全熔化，抑制成形过程中因粉末熔化引起的球化，提高样品的密度和力学性能。粉末在使用前置于80℃的真空烘箱中干燥8 h以去除水分、减少SLM成型过程中氧化物的生成。Cu-Cr-Zr合金粉末的主要成分见表1。

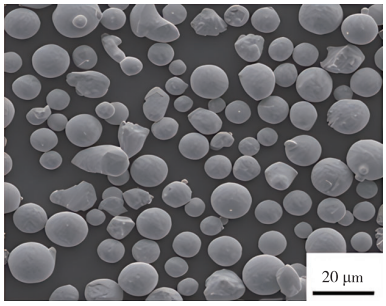


图2 Cu-Cr-Zr合金粉末颗粒形貌SEM图

表1 Cu-Cr-Zr粉末组成成分

元素	Cr	Zr	Fe	Si	P	Cu
含量(wt.%)	0.6	0.15	<0.05	<0.05	<0.01	Bal.

所使用的SLM工艺参数：激光功率为370 W、扫描速度为600 mm/s、扫描间距为90 μm、粉末层厚为30 μm，使用的选择性激光熔化设备为广州雷佳增材制造有限公司生产的DiMetal-300。在整个成型过程中，成型腔内的保护气体为高纯度氩气(纯度大于99.999 9%)。

采用67°旋转扫描策略和重熔扫描策略。67°旋转扫描策略如图3所示，每层扫描方向相对于上一层旋转67°，使金属粉末均匀熔化，减少热量积累，从而降低打印工件的热应力，提高工件的成型质量[26]。

重熔扫描策略如图4所示，此策略包括两个连续的扫描步骤：初始扫描和重新扫描。初始扫描作用于粉末层，重新扫描则对已完成初始扫描的固化层进行再次扫描。重熔扫描策略能有效提升打印工件的密度和机械性能，改善工件表面质量[27]。利用上述工艺参数和扫描策略获得了致密度为99.54%的Cu-Cr-Zr合金样件，保证热沉具有良好的水密性。

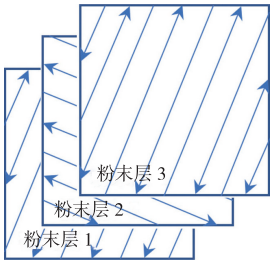


图3 67°旋转扫描策略

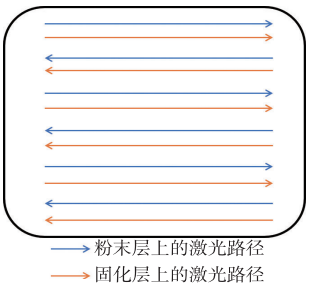


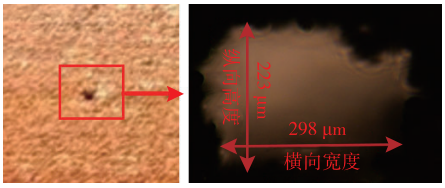
图4 重熔扫描策略

1.2 MCHS流道尺寸试验

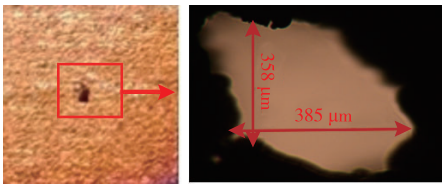
SLM技术理论上可以制造任意复杂形状的零件。然而，在实际应用中，该技术在成型某些几何特征时仍存在局限性，尤其对于悬垂结构的成型，难以完全达到预期效果[28]。悬垂结构是指未借助打印基板或已凝固材料作为承托基础，直接在未烧结粉末床上成形的三维实体结构。由于MCHS内部存在大量的悬垂结构，SLM技术在加工悬垂结构时，首层粉末直接在粉末层上熔融成形，而其他区域则在已烧结层上加工，这种差异导致热应力分布不均，从而引发悬垂区域的变形或塌陷。在铺粉过程中，刮刀施加的横向作用力使悬垂区域产生偏移或错位现象，导致工件成形失败[29]。此外，由于毛细作用的影响，熔池在SLM成型过程中不稳定，熔融金属向下扩散，导致悬垂表面下垂、塌陷，进而造成流道的几何形貌偏差，甚至堵塞流道，严重影响流道的成型质量[30]。因此，优化流道的成型质量是提升热沉散热性能的关键因素之一。

图5(a)～(h)展示了采用SLM技术制备的600～1800 μm方形流道表面形貌和轮廓尺寸特征，可以看出流道的实际成型尺寸小于设计尺寸。在

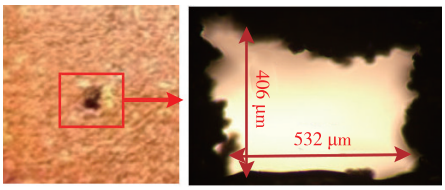
激光扫描过程中，未完全熔化的粉末在成型过程中粘附于流道内壁，导致流道的实际成型尺寸缩小；同时，熔池的扩展会引起粉末的额外堆积，进一步缩小流道的尺寸[31]。随着微流道设计尺寸的增加，挂渣对流道成型效果的影响逐渐减弱，且设计尺寸越大，实际成型尺寸越接近理论设计尺寸。实验结果表明：当流道的高度设计尺寸在 1 700 μm 及以上时，流道通畅；当流道高度的设计尺寸低于 1 700 μm 时，流道畅通性下降，存在堵塞现象。本研究的 MCHS 中流道高度的设计尺寸为 1 700 μm。



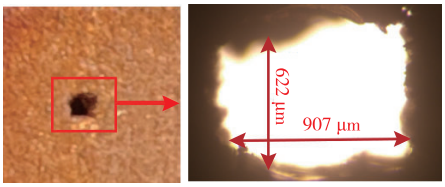
（a）设计尺寸 600 μm



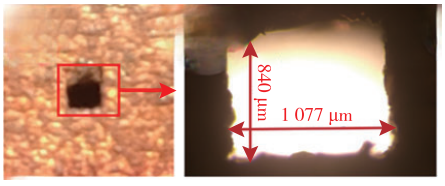
（b）设计尺寸 700 μm



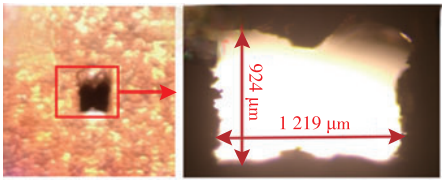
（c）设计尺寸 800μm



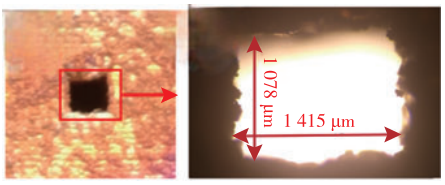
（d）设计尺寸 1 100 μm



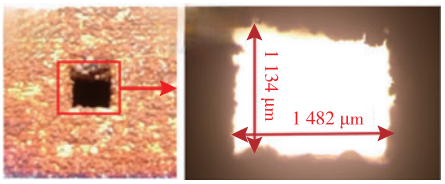
（e）设计尺寸 1 300 μm



（f）设计尺寸 1 500 μm



（g）设计尺寸 1 700 μm



（h）设计尺寸 1 800 μm

图 5　流道表面形貌图及实际成型轮廓图

SLM 技术制备的 MCHS 是一体成型的，但为了更好展示其内部结构，如图 6 将 MCHS 划分成五个部分，每一部分的厚度为 1.7 mm。SLM 所制备的 Cu-Cr-Zr MCHS 尺寸为 29 mm×10.8 mm×8.5 mm。热沉内部流道结构及相关尺寸如图 7 所示。图 8 为 SLM 技术制备 MCHS 时不同部分的形貌图，可以看出热沉内部流道结构清晰。

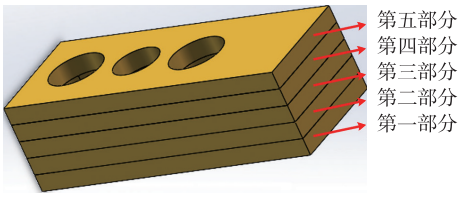


图 6　MCHS 三维图

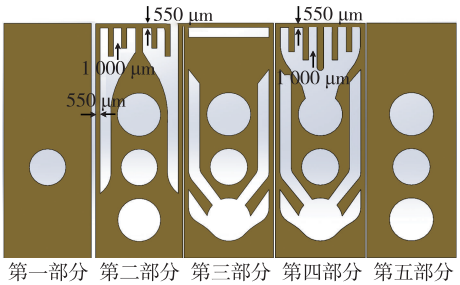


图 7　MCHS 内部结构尺寸



图 8　SLM 制备 Cu-Cr-Zr MCHS

2　光电性能测试

2.1　输出特性测试

半导体激光芯片是一种高效的电光转换器件，

其电光转换效率可达60%以上[32]。虽然输入芯片的电能大部分以光能的形式输出，但同样有相当一部分的电能以废热的形式释放。随着输出功率的不断提高，芯片发热量也随之增加。为了防止激光芯片过热失效，MCHS需提供足够的散热能力，保证器件的工作稳定性。为此，需对其进行输出特性测试。

如图9所示为测试的激光芯片功率-电流（*P-I*）与电压-电流（*V-I*）曲线。测试结果表明，激光芯片的阈值电流为1.02 A；当驱动电流达到5.39 A时，激光芯片的连续输出功率为4.601 W，斜率效率为0.85 W/A。测试结果说明Cu-Cr-Zr微流道热沉基本满足激光芯片散热要求。

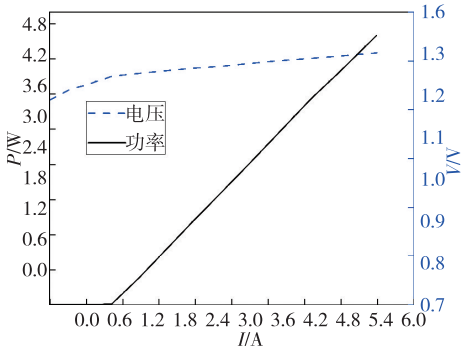


图9 半导体激光二极管*P-I-V*特性曲线

2.2 散热特性测试

热沉散热性能的好坏由热阻值的大小直接决定，热阻可表示为[33]：

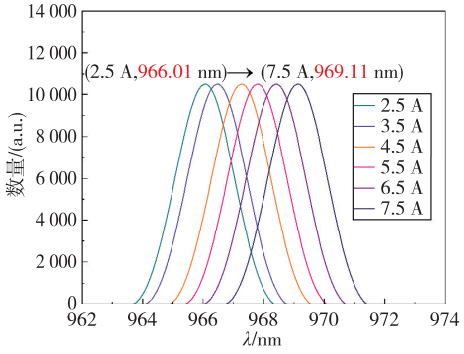
$$R_{th}=\frac{\Delta T}{\Delta P_t} \tag{1}$$

式中，ΔT, ΔP_t分别为两种不同驱动电流下激光芯片的温度变化量及热功率变化量。根据驱动电流为2.5 A和7.5 A时的激光芯片温度变化量以及热功率变化量，计算得到Cu-Cr-Zr MCHS的热阻为7.33 ℃/W，商用MCHS的热阻为4.59 ℃/W。

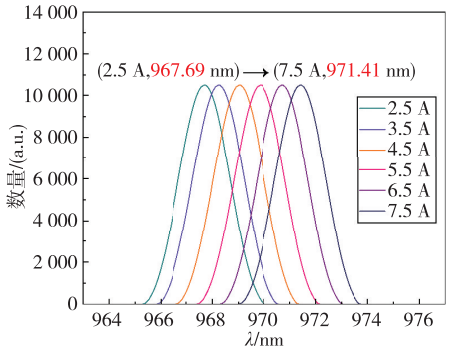
由于半导体激光芯片的输出光谱波长会随着输入电流、自身温度的变化而发生偏移，此现象称为波长红移，也可利用波长红移测试热沉的热阻，热阻也可表示为[8]：

$$R_{th}=\frac{\lambda_2-\lambda_1}{k\Delta P_t} \tag{2}$$

式中，$(\lambda_2-\lambda_1)$为两种不同驱动电流下激光芯片输出的光谱波长变化量；$k\approx0.177$ nm/℃，为半导体激光器芯片的温度漂移系数[8]。图10(a)为激光芯片焊接于Cu-Cr-Zr MCHS的光谱输出波长，波长红移3.1 nm。图10(b)为激光芯片焊接于商用MCHS的光谱输出波长，波长红移3.72 nm。由公式(2)算得Cu-Cr-Zr MCHS与商用MCHS得热阻分别为：7.3℃/W，4.59℃/W，此结果与公式(1)算得热阻值接近，表明热沉的热阻测试结果准确。



(a) Cu-Cr-Zr MCHS激光芯片输出波长



(b) 商用MCHS激光芯片输出波长

图10 激光芯片输出波长

微流道的几何尺寸对其换热性能具有重要影响。较大的流道尺寸虽可降低热沉压降，但会减少单位体积内的换热面积，降低局部扰流强度，导致热沉的热阻升高[34]。在本研究中，Cu-Cr-Zr MCHS的流道尺寸相较于商用热沉偏大，是导致其整体热阻较大的主要因素。

3 热沉工作稳定性测试

由于微流道结构尺寸较小，MCHS在长期工作期间容易受到机械疲劳、结构变形、冷却液腐蚀以及杂质沉积等多重作用的影响，导致流道堵塞或腐蚀产物堆积，从而降低热沉的换热效率。为评估Cu-Cr-Zr MCHS在实际工作条件下的稳定性，对激光芯片持续施加2.5 A驱动电流，进行50 h(每小时一次)的温度和光电性能采集测试。测试期间，MCHS内部的冷却液循环流动，环境温度为25℃。

图11展示了激光芯片的温度与输出功率随时间变化的趋势。随着测试时间的延长，芯片的温度略有波动，呈缓慢上升趋势，最终趋于平稳，温度变化范围为34.5～36.6℃；激光芯片的输出功率出现轻微下降，从1.112 W下降至1.021 W，减幅为0.091 W，最终同样趋于平稳状态。这种现象主要归因于SLM成形过程中部分粉末未能完全熔化或熔渣未被彻底清除，残留于流道内壁。在冷却液长时间冲刷下，这些微细颗粒逐渐脱落或移动，造成流道局部堵塞、换热面减小，从而引起换热效率下降。这些因素共同作用，导致热沉的散热效率下降，使激光芯片的温度上升输出功率下降。随着时间推移，冷却液长时间冲刷流道形成稳定的流动路径，因此温度与输出功率趋于稳定。

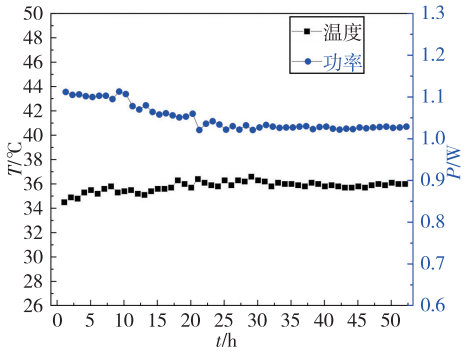


图11　激光芯片温度与输出功率关系

综上所述，尽管SLM成形过程中的粉末残留与熔渣颗粒对MCHS内部流动与传热性能产生的影响不可避免，但整个系统在长时间运行下，仍能保持激光芯片温度和输出性能在较小范围内波动，且逐渐趋于平稳。表明SLM制备的Cu-Cr-Zr MCHS在散热能力和结构稳定性方面具有一定的工程应用潜力。

4　结论

本研究以Cu-Cr-Zr合金为原材料通过SLM技术制备了不同尺寸的方形流道，对其成型效果进行了测量与分析。根据实验结果，选定了合适的流道尺寸制备MCHS。随后，将半导体激光芯片焊接到MCHS表面，测试激光芯片的输出功率和光谱波长，根据测试结果计算热阻。最后，对Cu-Cr-Zr MCHS进行了工作稳定性测试。主要研究结论如下：

（1）使用SLM技术制备的微流道热沉带有悬垂结构，悬垂面上缺乏支撑导致结渣、表面塌陷等现象出现。微流道尺寸越小，对其成型效果的影响越严重。为了减小结渣和表面塌陷对流道成型效果的影响，本研究的微流道热沉流道高度设计尺寸为1.7 mm，实际流道成型高度约为1.078 mm。

（2）在使用SLM技术制备的Cu-Cr-Zr MCHS和传统商用MCHS上焊接激光芯片，计算得出其热阻分别为7.33 ℃/W，4.59 ℃/W。

（3）对MCHS进行了长期稳定性测试，实验结果表明，激光芯片在50 h的持续运行过程中，输出功率波动范围控制在8.54%以内，最终逐渐趋于稳定运行状态。采用SLM技术制备的Cu-Cr-Zr MCHS在长期工作条件下具有良好的热管理能力与运行稳定性，能够保证激光芯片的性能稳定输出。

参考文献：

[1] 陈　芬，崔碧峰，冯靖宇，等. 大功率半导体激光器光束质量的研究与进展[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(21)：26-35.
Chen Fen，Cui Bifeng，Feng Jingyu，et al. Research and progress of high-power semiconductor lasers with high beam quality[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2023，60(21)：26-35.

[2] 吴子博，宋　悦，牛　岫，等. 大功率半导体激光器电极失效机理研究综述[J]. 激光与红外，2023，53(5)：643-650.
Wu Zibo，Song Yue，Niu Shen，et al. A review of electrode failure mechanisms of high power semiconductor lasers[J]. Laser & Infrared，2023，53(5)：643-650.

[3] 李　江，李　超，徐　昊，等. 高功率半导体巴条激光器的热特性分析[J]. 发光学报，2014，35(12)：1474-1479.
Li Jiang，Li Chao，Xu Hao，et al. Thermal analysis of high power semiconductor laser bar [J]. Chinese Journal of Luminescence，2014，35(12)：1474-1479.

[4] 袁庆贺，井红旗，仲　莉，等. 大功率半导体激光器封装热应力研究[J]. 中国激光，2019，46(10)：91-96.
Yuan Qinghe，Jing Hongqi，Zhong Li，et al. Thermal stressin high-power semiconductor laser packaging[J]. Chinese Journal of Lasers，2019，46(10)：91-96.

[5] 王　辉. 半导体激光器封装中热应力和变形的分析[J]. 半导体技术，2008，33(8)：718-720.
Wang Hui. Thermal stress and deformation analysis of semiconductor lasers packaging [J]. Semiconductor Technology，2008，33(8)：718-720.

[6] 李丛洋. 高功率半导体激光器微通道热沉模拟优化及SLM制造[D]. 北京：北京工业大学，2015.
Li Congyang. Simulation optimization and SLM manufacturing of microchannel heat sink for high power semiconductor laser [D]. Beijing：Beijing University of Technology，2015.

[7] 梁 迪，李晓凤，杨 卓，等. 微通道换热器研究与应用进展综述[J]. 制冷与空调，2023，37(2)：217-224.
Liang Di, Li Xiaofeng, Yang Zhuo, et al. Review on research and application of microchannel heat exchanger [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2023, 37(2): 217-224.

[8] 王燕灵. 基于3D打印技术的高效液冷热沉的理论与实验研究[D]. 北京：北京工业大学，2016.
Wang Yanling. Theoretical and experimental study on high efficiency liquid heat sink based on 3D printing technology[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.

[9] Jia G, Qiu Y, Yan A, et al. Laser three-dimensional printing microchannel heat sink for high-power diode laser array [J]. Optical Engineering, 2016, 55(9): 096105.

[10] Ebert T, Pajunk M, Mueller D, et al. New generation of corrosion-resistant microcoolers [J]. Proc. SPIE, 2005, 5711: 152-157.

[11] 张海洲，白 洁，马 瑞，等. 激光选区熔化成形技术在航空航天发动机制造领域的研究与应用现状[J]. 推进技术，2023，44(3)：6-21.
Zhang Haizhou, Bai Jie, Ma Rui, et al. Current progress and application of selective laser melting technology in aerospace engine manufacturing[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(3): 6-21.

[12] Liu B, Zhang P, Yan H, et al. A review on manufacturing pure refractory metals by selective laser melting[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(19): 9945-9975.

[13] 杨 强，鲁中良，黄福享，等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术，2016，59(12)：26-31.
Yang Qiang, Lu Zhongliang, Huang Fuxiang, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 26-31.

[14] Sun H, Chu X, Luo C, et al. Selective laser melting for joining dissimilar materials: investigations of interfacial characteristics and in situ alloying [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2021, 52(4): 1540-1550.

[15] 刘小辉，刘允中. 激光选区熔化成形高强铝合金晶粒细化抑制裂纹研究现状[J]. 材料工程，2022，50(8)：1-16.
Liu Xiaohui, Liu Yunzhong. Research status of crack inhibition *via* grain refinement of high-strength aluminum alloys fabricated by selective laser melting [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(8): 1-16.

[16] 李瑞锋，李 客，周伟召. 激光金属3D打印技术的研究进展[J]. 粘接，2022，43(7)：98-105.
Li Ruifeng, Li Ke, Zhou Weizhao. Research progress in laser metal 3D printing technology[J]. Adhesion, 2022, 43(7): 98-105.

[17] Ali M H, Sabyrov N, Shehab E. Powder bed fusion - laser melting (PBF - LM) process: latest review of materials, process parameter optimization, application, and up-to-date innovative technologies [J]. Progress in Additive Manufacturing, 2022, 7(6): 1395-1422.

[18] 张明正. 镍铜合金类零件渗透检测方法分析[J]. 世界有色金属，2024(1)：49-51.
Zhang Mingzheng. Analysis of penetration testing methods for nickel copper alloy parts[J]. World Nonferrous Metals, 2024(1): 49-51.

[19] 邓怀波，陈玉华，陈 伟，等. 铜合金增材制造技术研究进展[J]. 精密成形工程，2018，10(5)：95-101.
Deng Huaibo, Chen Yuhua, Chen Wei, et al. Research progress in additive manufacturing technology of copper alloy [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(5): 95-101.

[20] 傅 广，李舒玥，李泓历，等. 激光选区熔化铜合金多道成形的熔池行为和缺陷机理[J]. 表面技术，2024，53(15)：118-128.
Fu Guang, Li Shuyue, Li Hongli, et al. Melt pool behaviour and defect mechanism in multi-track formation of selective laser melting copper alloys[J]. Surface Technology, 2024, 53(15): 118-128.

[21] Zheng Y, Zhang K, Liu T T, et al. Cracks of alumina ceramics by selective laser melting [J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 175-184.

[22] Qiu Y D, Wu J M, Chen A N, et al. Balling phenomenon and cracks in alumina ceramics prepared by direct selective laser melting assisted with pressure treatment [J]. Ceramics International, 2020, 46(9): 13854-13861.

[23] Le K Q, Tang C, Wong C H. On the study of keyhole-mode melting in selective laser melting process [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145: 105992.

[24] Guan P, Chen X, Liu P, et al. Effect of selective laser melting process parameters and aging heat treatment on properties of CuCrZr alloy [J]. Materials Research Express, 2019, 6(11): 1165c1.

[25] Kuai Z, Li Z, Liu B, et al. Effect of heat treatment on CuCrZr alloy fabricated by selective laser melting: microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 2658-2671.

[26] Wang Q, Zhang Y, Wang K, et al. Effect of process parameters and heat treatment on the microstructure and properties of CuCrZr alloy by selective laser melting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 857: 144054.

[27] Hu R, Su K, Lao Z, et al. Process of pure copper fabricated by selective laser melting (SLM) technology under moderate laser power with re-melting strategy[J]. Materials, 2023, 16(7): 2642.

[28] 刘 杰，杨永强，王 迪，等. 选区激光熔化成型悬垂结构的计算机辅助工艺参数优化[J]. 中国激光，2012，39(5)：88-94.
Liu Jie, Yang Yongqiang, Wang Di, et al. Computer-aided

optimization of the process parameters for fabricating overhanging structure by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 88-94.

[29] 吴根丽. 金属悬垂特征结构件激光选区熔化成形工艺研究[D]. 南京：南京理工大学, 2016.
Wu Genli. Research on laser selective melting forming process of metal overhanging characteristic structural components[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[30] 段声勤, 刘婷婷, 廖文和, 等. 悬垂圆孔激光选区熔化成形质量研究[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 402007.
Duan Shengqin, Liu Tingting, Liao Wenhe, et al. Research on forming quality of overhanging round hole by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 402007.

[31] 王　飞, 杜星杰, 刘博玮, 等. SLM成形悬垂结构翘曲变形分析及修正[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(9): 91-97.
Wang Fei, Du Xingjie, Liu Bowei, et al. Analysis and correction of warping deformation of SLM forming overhanging structure[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(9): 91-97.

[32] Ling B, Jun W, Mark D, et al. Performance and reliability of high power 7xxnm laser diodes [J]. Proc. SPIE, 2011, 7953: 256-267.

[33] 吴胤禛. 808nm高功率半导体激光器封装热特性研究[D]. 长春：长春理工大学, 2020.
Wu Yinzhen. Thermal characteristics of 808nm High power semiconductor laser package [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.

[34] 汪鸿韬. 微通道热沉的流动与传热特性数值研究[D]. 南京：南京理工大学, 2017.
Wang Hongtao. Numerical study of flow and heat transfer characteristics of micro-channel heat sinks [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

作者简介：

蔡益勋(1999—)，男，湖南省衡阳市人，硕士研究生，主要研究方向为金属增材制造工艺研究；

曹明轩(1986—)，男，博士，研究生导师，主要研究方向为大功率激光芯片热管理、激光选区熔覆设备的研发。