

# 水帘结构同步水冷装置对光-粉同路 激光熔覆温度场的影响研究

杨高林<sup>1</sup>, 刘谭亮<sup>1</sup>, 雍兆<sup>1</sup>, 郑权航<sup>1</sup>, 王晓江<sup>1</sup>, 石岳林<sup>2</sup>, 姚建华<sup>1\*</sup>

(1. 浙江工业大学 a. 激光先进制造研究院 b. 高端激光制造装备省部共建协同创新中心 c. 机械工程学院, 杭州 310023; 2. 舟山市鼎尊智能科技有限公司, 浙江 舟山 316031)

**摘要:** **目的** 解决大型设备激光增材修复过程中的局部升温易烧蚀零件边缘、熔化内部导线及橡胶圈、损坏原有结构的问题。**方法** 采用 Fluent 软件和 VOF 模型研究水帘下干区稳定气液两相流模型, 通过 Abaqus 软件和热传导三定律、热弹塑性理论、热变形理论建立温度场和弯曲变形的数值模型, 并通过对比光-粉同路和同步水冷 2 种方式下熔覆 316L 不锈钢的熔池形貌、晶粒尺寸、热量累积、弯曲变形差异, 验证同步水冷对熔覆过程中温度场的影响机理。**结果** 同步水冷装置内部水帘呈散射状流向四周, 能够形成稳定的干区环境, 沉积后的金相表面无明显气孔、裂纹等缺陷。在相同参数单道沉积时, 温度云图和熔池形貌表明, 水冷有效缩减了熔池的大小, 但其对熔池凝固速度的影响较小, 二者平均晶粒尺寸仅存在略微差别, 分别为 28.81  $\mu\text{m}$  和 27.55  $\mu\text{m}$ 。多道沉积时, 水帘的冷却作用拔高了熔池边缘的温度差异, 拉低了外延区域的热量累积, 在降低基板整体温度的同时, 增大了熔池边缘的温度梯度, 而温差的增大带来了更大的热应力, 导致不同沉积方式下基板的变形程度不同。在悬臂梁搭接熔覆试验中, 采用热电偶测得同步水冷能保持基板背面温度在 50  $^{\circ}\text{C}$  以下, 而光-粉同路最高能达到 500  $^{\circ}\text{C}$ 。同时, 悬臂梁厚度较薄时, 基板上下面温差产生的热应力大于基板自身约束力, 试样发生严重变形, 且含同步水冷的变形更为明显。厚度增加时, 试样自身约束力增大, 变形量差异逐渐减小。**结论** 同步水冷水路耦合限制了熔池热量的深入与扩散, 可以有效实现熔覆过程中加工区域的温度控制, 同时也会导致在工件较薄时弯曲变形程度提升, 但在板材厚度大于 3 mm 时, 变形量差别趋于相同, 且越来越小。

**关键词:** 同步水冷; 光-粉同路; 增材制造; 温度控制; 能场复合; 数值模拟

**中图分类号:** TG176 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)13-0013-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.13.002

## Influence Mechanism of Water Curtain Synchronous Water Cooling on Temperature Field of Laser-powder Co-path Laser Cladding

YANG Gaolin<sup>1</sup>, LIU Tanliang<sup>1</sup>, YONG Zhao<sup>1</sup>, ZHENG Quanhong<sup>1</sup>,  
WANG Xiaojiang<sup>1</sup>, SHI Yuelin<sup>2</sup>, YAO Jianghua<sup>1\*</sup>

(1. a. Institute of Laser Advanced Manufacturing, b. Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing

收稿日期: 2024-04-29; 修订日期: 2024-06-25

**Received:** 2024-04-29; **Revised:** 2024-06-25

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目 (52035014); 浙江省公益技术应用研究资助项目 (LGG22E050036); 舟山科技计划项目 (2023C13011)

**Fund:** The Major Program of the National Natural Science Foundation of China (52035014); The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LGG22E050036); Zhoushan Science and Technology Plan Project (2023C13011)

**引文格式:** 杨高林, 刘谭亮, 雍兆, 等. 水帘结构同步水冷装置对光-粉同路激光熔覆温度场的影响研究[J]. 表面技术, 2024, 53(13): 13-21.  
YANG Gaolin, LIU Tanliang, YONG Zhao, et al. Influence Mechanism of Water Curtain Synchronous Water Cooling on Temperature Field of Laser-powder Co-path Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2024, 53(13): 13-21.

\*通信作者 (Corresponding author)

Equipment, c. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;  
2. Zhoushan Dingzun Intelligent Technology Co., Ltd., Zhejiang Zhoushan 316031, China)

**ABSTRACT:** Considering that the local temperature rise in laser additive repair of large equipment is likely to ablate the edge of the part, melt the internal wire and rubber ring, and damage the original structure, a water curtain surface synchronous water cooling technology is proposed in this paper, and its temperature field is numerically simulated and experimentally researched.

Fluent software and VOF model were used to study the stable gas-liquid two-phase flow model in the dry zone under the curtain. Numerical models of temperature field and bending deformation were established by Abaqus software, three laws of heat conduction, thermos-elastoplastic theory and thermal deformation theory. The influence mechanism of synchronous water cooling on the temperature field of 316L stainless steel was verified by comparing the melt pool morphology, grain size, heat accumulation and bending deformation of the two methods of laser-powder co-path and synchronous water cooling.

The water curtain inside the synchronous water cooling device scattered to all sides, forming a stable dry zone environment, and there were no obvious pores, cracks and other defects on the deposited metallographic surface. For single channel deposition with the same parameters, temperature pattern and molten pool morphology showed that water cooling effectively reduces the size of the molten pool, but it had little effect on the solidification rate of the molten pool, and there was only a slight difference in average grain size between them, which was 28.81  $\mu\text{m}$  and 27.55  $\mu\text{m}$ , respectively. During multi-channel deposition, the cooling effect of the water curtain elevated the temperature difference at the edge of the molten pool, reduced the heat accumulation in the epitaxial area, and increased the temperature gradient at the edge of the molten pool while reducing the overall temperature of the substrate. However, the increase in temperature difference brought greater thermal stress, resulting in different deformation degrees of the substrate under different deposition methods. It was found that the temperature on the back of the substrate could be kept below 50  $^{\circ}\text{C}$  by synchronous water cooling using thermocouple in the cantilever beam lap cladding experiment, and the maximum temperature of the laser-powder co-path could reach 500  $^{\circ}\text{C}$ . At the same time, when the cantilever beam was thin, the thermal stress caused by the temperature difference between the top and bottom of the substrate was greater than the binding force of the substrate itself, and the deformation of the sample with synchronous water cooling was more obvious. With the increase of thickness, the binding force of the specimen increased and the difference of deformation decreased gradually.

The coupling of synchronous water cooling waterways limits the depth and diffusion of heat in the molten pool, which can effectively control the temperature of the processing area during the cladding process, and also lead to increased bending deformation degree when the workpiece is thin, but when the thickness of the plate is greater than 3 mm, the deformation difference tends to be the same and becomes smaller and smaller.

**KEY WORDS:** synchronous water cooling; laser-powder co-path; additive manufacturing; temperature control; energy field recombination; numerical simulation

在全球经济高速发展的同时,人类对自然资源的过度开发以及工业化生产所造成的资源紧缺和环境污染问题日益突出,再制造技术也应运而生。通过对产品设备进行全生命周期管理,包括性能失效分析、寿命评估等,并采用各种再制造工程技术对废旧产品进行修复及改造,延长设备的使用寿命,以最低的成本、最少的资源消耗完成产品的全生命周期<sup>[1]</sup>。

激光熔覆技术是如今主流的增材修复再制造技术之一,通过使用激光束照射熔覆材料与基体表面,使之迅速加热熔化,并在激光离开后,快速冷却形成具有优异性能的表面涂层,在恢复设备零件使用性能的同时,又节约了大量资源<sup>[2]</sup>。某些大型设备零件受损需要修复时,为避免部件更换所需成本,减少来回运输耗费生产工作时间,应对零部件无法从安装地点

拆除的问题,需要对设备进行原位修复<sup>[3]</sup>。同步送粉式激光直接能量沉积技术由于其高灵活性,能免拆装进行原位修复,在大型机械设备零件修复方面具有广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。在工业自动化设备和电力设备中,通常包含大量导线、橡胶圈等部件,激光增材修复过程引起的局部升温会烧蚀零件边缘,导致低熔点材料开裂,甚至熔化<sup>[6-8]</sup>。大型设备修复都需要耗费大量的拆装时间<sup>[9-10]</sup>,要想利用激光沉积技术实现免拆装修复,需要控制修复区域的局部升温。

周建忠等<sup>[11]</sup>通过在底部添加液氮对激光熔覆制备的35% (质量分数) WC/Ni60A 复合涂层进行强制冷却,并针对空冷和强制冷却不同条件下激光熔覆层组织和性能的变化进行了对比分析。汪贺模等<sup>[12]</sup>通过施加水幕冷却对热轧钢板进行强制冷却,将厚度为

25 mm 的 304L 不锈钢在高温电加热炉内加热, 保温至表面温度 780 ℃, 在水幕强制冷却作用下, 基材中心温度可实现 1 min 内迅速降至 200 ℃ 以下。Esmacil 等<sup>[13]</sup>通过在激光束不同距离加水强制冷却提高激光弯曲效率, 发现强制冷却可以缩短变形所需时间, 但也会增加成形后的残余应力, 提高应力腐蚀开裂的概率。现有文献研究多为激光加工后强制冷却对组织、性能及材料变形的影响<sup>[14-18]</sup>, 冷却方法多为在衬底施加强制冷却, 作用位置较为普遍, 少有针对表面冷却的环境以及沉积过程中同步进行水流冷却的研究, 无法实现激光沉积原位修复中的局部温度控制。

鉴于此, 本文根据气幕发射技术原理<sup>[19-20]</sup>, 使用压缩氩气作为高压气源, 通过喷嘴喷出的高速气体形成一层气流壁, 与外部形成隔离环境, 并在光-粉同路激光直接能量沉积技术将粉路耦合进光路的基础上, 添加外放水帘组成同步水冷熔覆头<sup>[21-22]</sup>, 研究

表面同步水冷对激光熔覆温度场的影响机理。对比分析同步水冷对熔池形貌、晶粒大小、热量积累、弯曲变形产生的影响, 为同类强制冷却激光熔覆工艺参数优化和原位修复提供参考。

1 试验

1.1 同步水冷熔覆头结构

水冷结构同步水冷装置的熔覆头原理及结构如图 1 所示。针对激光熔覆过程中连续热输入对周围其他精密零件的热影响, 将熔覆头的内部循环冷却改为外放环形水帘, 实现对熔覆头及加工位置的强制冷却。为避免外部耦合水帘会接触送出的粉末, 将光、粉和保护气耦合到一个通路内, 使粉末喷射不受影响的同时, 形成稳定的局部干腔, 为有效沉积提供保障。

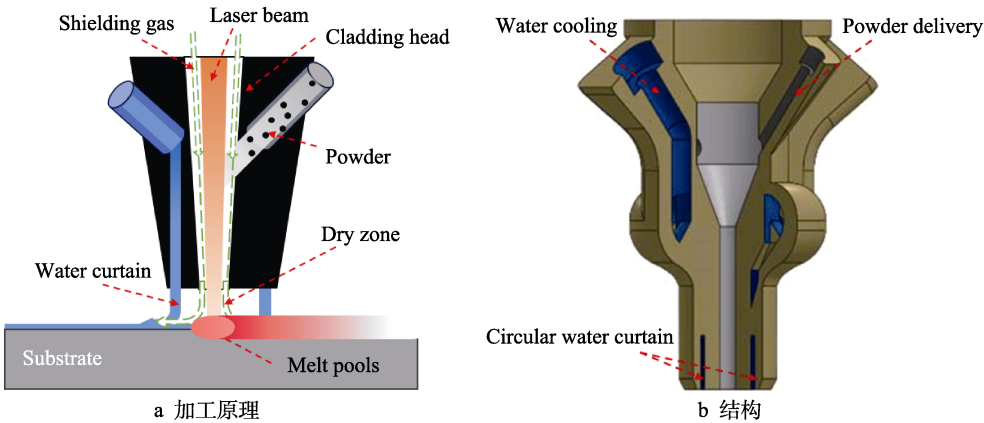


图 1 喷嘴原理及结构  
Fig.1 Schematic diagram of nozzle principle and structure: a) processing principle; b) structural diagram

1.2 方法

选择 100 mm×60 mm×15 mm 316L 不锈钢作为熔覆试验基板, 100 mm×20 mm 不同厚度 316L 不锈钢作为变形试验基板, 元素组成如表 1 所示。试验前, 使用角磨机去除试样表面氧化层、锈蚀及油污等杂质, 然后用无水乙醇清洗试样, 烘干后留置备用。选取雾化球形 316L 粉末 (粒径为 53~150 μm) 作为熔覆试验材料。试验前, 将粉末放入真空干燥箱中, 在温度 120 ℃ 下干燥 2 h。

的光纤耦合半导体激光器, 光斑直径为 1 mm。设计了光-粉同路和同步水冷熔覆对比试验, 分别比较其单道、搭接、不同基板厚度热累积及悬臂梁角变形, 试验参数采取光-粉同路激光熔覆中较好的试验参数, 功率为 1 000 W, 送粉量为 15 g/min, 扫描速度为 8 mm/s, 保护气流量为 1 200 L/min, 搭接率为 40%。采用线切割机垂直搭接方向切取试样, 经砂纸打磨和机械抛光后, 使用 AXIO Scope A1 系列光学显微镜进行金相拍摄, 使用 imagej 软件测量熔池形貌。采用 5% (体积分数) 的高氯酸在常温下对抛光后的单道试样进行电解抛光, 电压为 20 V, 时间为 20 s, 抛光后使用无水乙醇进行清洗。通过 ZEISS EVO 18 扫描电子显微镜的电子背散射衍射 (EBSD) 进行拍摄, 并使用 Channel 5 软件进行处理, 对晶粒尺寸进行表征。

温度曲线测量及悬臂梁夹持方法如图 2 所示。选用底面积为 100 mm×20 mm、不同厚度的 316L 不锈钢为基板, 在基板表面中部选择 10 道的搭接区域, 基板一端通过夹具夹持, 另一端悬空。在搭接区域底

表 1 316L 不锈钢基板和 316L 粉末的元素组成  
Tab.1 Elemental composition of 316L stainless steel and 316L powder

wt.%								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.02	0.55	1.55	<0.03	<0.03	10.0	16.5	2.08	Bal.

本研究所有熔覆试验均采用 1 kW 激光熔覆再制造系统完成, 试验设备为 RFL-A1000D/B/10/A/W 型

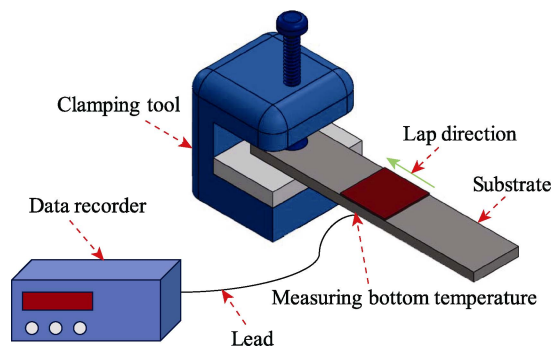


图2 测温方法

Fig.2 Temperature measurement method

面中部测温点,用铜箔粘贴热电偶导线,并与数据记录仪相连。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 局部干区模拟

同步水冷装置的工作原理实际是通过气体排水形成局部稳定干腔的过程,主要涉及气液两相流,而VOF模型常用于求解多相流相界面的变化,可用于分析干区的稳定状态<sup>[23]</sup>。采用Fluent软件建立水环境下干区稳定的气液两相流模型,模型一相设置为水,另一相设置为空气,参数设置为熔覆头喷嘴距基板工作距离5 mm,相对角度为90°,水流量为1 L/min,水帘直径为8 mm,中心通气过光孔直径为4 mm。依据不可压缩牛顿流体的连续性方程、能量方程和动量方程,通过求解多相流的体积分数连续方程来确定相与相之间的界面,湍流模型选择使用RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[24-26]</sup>。水帘干区状况的模拟结果如图3所示,工作区域内部无水流侵扰,能形成稳定的8 mm干区工作环境,水流呈散射状喷向四周。

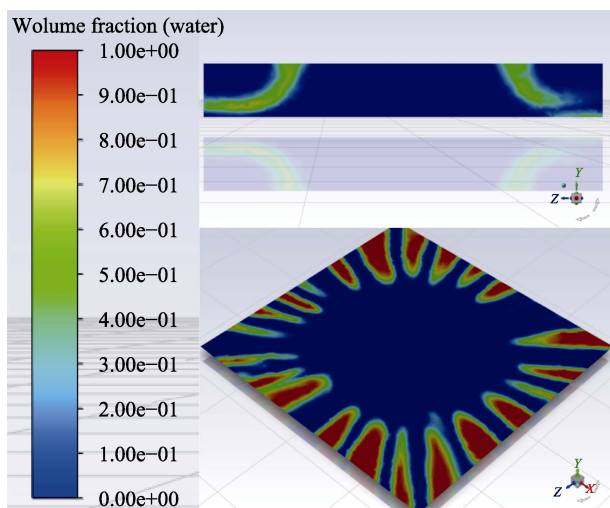


图3 干区模拟结果

Fig.3 Dry zone simulation results

### 2.2 温度场模拟

光-粉同路激光熔覆在耦合水路后,其对流换热环境发生改变,从而对其温度场产生影响,并最终影响熔池。以热传导、热对流、热辐射三定律为依据,模拟同步水冷中温度场的结构<sup>[27-29]</sup>,即:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中:  $q$  为热流密度;  $\lambda$  为导热系数;  $\frac{dT}{dx}$  为温度梯度。

$$q = \alpha(t_H - t_L) \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为对流换热系数;  $t_H$  为固体表面温度;  $t_L$  为周围环境流体温度。

$$Q = \varepsilon A \sigma (T_0^4 - T^4) \quad (3)$$

式中:  $Q$  为辐射的热流密度;  $\varepsilon$  为物体的发射率(黑度);  $A$  为辐射表面积;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,取  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_0$  为物体边界表面温度;  $T$  为周围环境介质温。

选择移动双椭球体热源作为激光热源,使用Abaqus生死单元来提高模拟的准确程度。边界条件为已知流体的初始温度和边界上的对流换热系数<sup>[30]</sup>。采用等价比热容法进行潜热处理,使用比热容来描述潜热<sup>[31]</sup>。材料属性选择20 mm×100 mm×3 mm 316L不锈钢进行建模,初始温度设定为20 °C,网格采用采用六面体的DC3D8的热传递模块,工艺参数与试验参数保持一致,激光光斑为1 mm,水帘参数与干区模拟保持一致。使用DFLUX子程序实现双椭球模型热源的移动,以每道单道熔覆层为1个生死单元。选取0.75 $t$  ( $t$ 为总扫描时间)处的瞬时状态,进行单道熔覆和多道搭接的温度场模拟。热源模拟结果与试验结果的对比较正图如图4所示。由所得到的熔池金相和模拟的温度场等温线的结果可以看出,热源数据模型和实际激光热源所得到的熔池尺寸比较相近,符合模拟试验要求。

2种熔覆方式下的单道温度云图对比如图5所示,上图为光-粉同路温度云图,下图为同步水冷温度云图。可以看出,同步水冷所形成的熔池尺寸要小于光-粉同路。激光熔覆由于热量会从熔池向四周扩散,所形成的熔池一般要大于光斑直径;而同步水冷的水帘表面强冷效应对激光能量形成的熔池必然有限制作用,约束热量在基板上的深入与扩散,进而减小熔池尺寸。熔池的尺寸是激光熔覆的基础,熔池尺寸的减小必然会影响到捕捉粉末的效率,减小沉积层的有效沉积面积。

为进一步对比2种熔覆方式在温度场上的差别,进行搭接10道的温度场模拟,每道设置1 s冷却时间,提取每道熔覆冷却完成后的温度场数据作为对比,试验结果如图6所示。统计第1、3、7、10道搭接相同时间点基板剖面图的温度数据,记录为1、2、3、4。



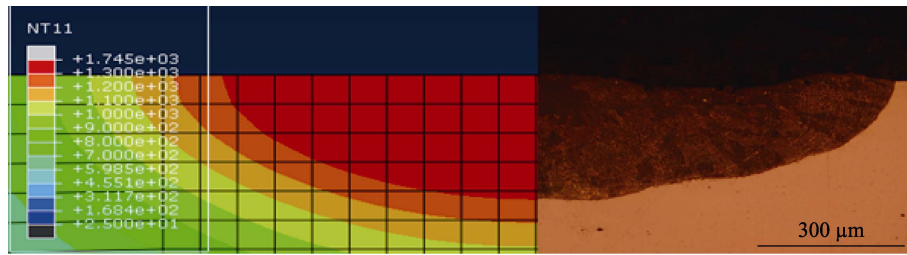


图 4 模拟与试验校正图

Fig.4 Simulation and experimental calibration charts

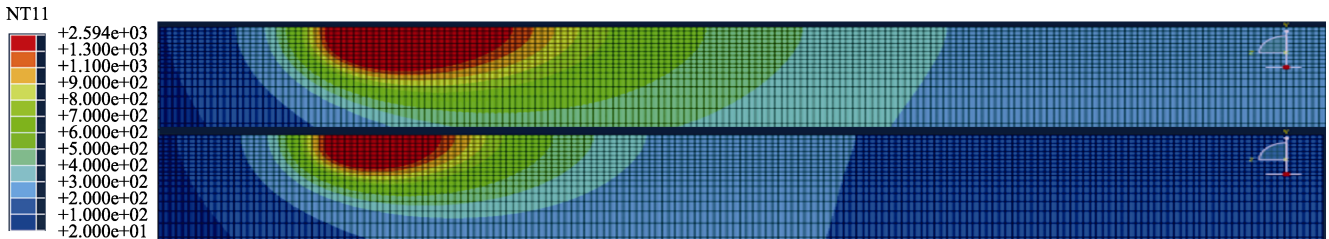


图 5 2 种熔覆方式的温度云图

Fig.5 Temperature pattern of two cladding methods

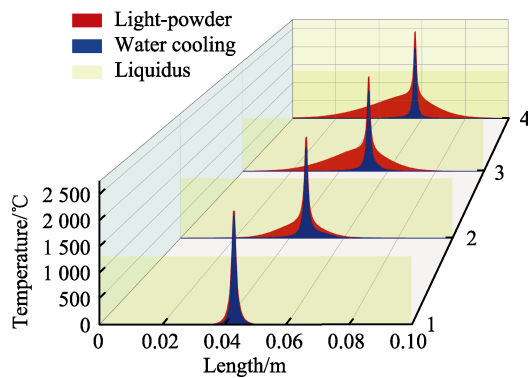


图 6 1、3、7、10 道熔覆的温度曲线

Fig.6 Temperature curves of 1, 3, 7, 10 cladding

由熔覆温度曲线可知, 2 种熔覆方式的热量累积差异随着搭接的进行逐渐扩大, 同步水冷基本摒弃了热累积的影响, 温度曲线与初始状态差别不大, 而光-粉同路温度曲线两侧明显提升。对比熔覆点的温度曲线斜率 (即温度梯度), 随着持续的热输入, 光-粉同路温度梯度逐渐减小, 二者温度梯度差异越来越大。

### 2.3 变形量及变形角度模拟

提取温度场的数据为源数据, 依据热弹塑性理论 (包括屈服准则、流动准则和强化准则) 对模型变形量进行温度-位移简化计算<sup>[32-34]</sup>。采用生死单元法, 每道设置为 1 个生死单元, 网格选用六面体的 DC3D8 的温度-位移模块, 每道熔覆后设置 1 s 冷却时间, 进行 10 道搭接试验模拟, 工艺参数设置与温度场模拟保持一致。同时, 将平板一端固定, 取另一端中点位移表示变形量。由图 7 可以看出, 同步水冷的变形增加量保持基本不变, 而光-粉同路的变形增加量在一直减小, 最终同步水冷的位移多出近 6 mm。综合前

面对于温度场的分析, 随着熔覆的进行, 2 种熔覆方式的温度梯度发生变化, 而熔池尺寸不变, 两者变形量的差别主要就是持续热输入造成后续沉积过程中温度梯度的变化导致的。

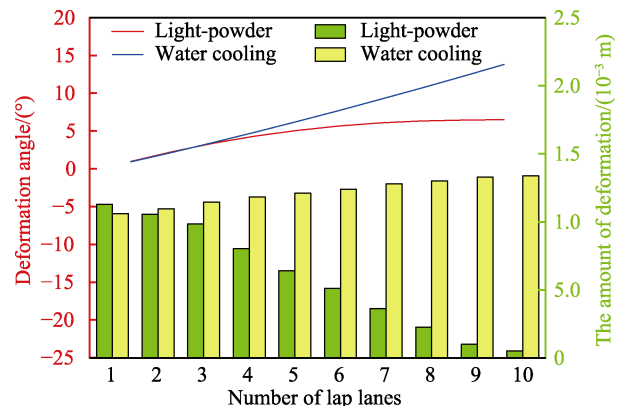


图 7 2 种不同熔覆方式的变形对比

Fig.7 Deformation comparison diagram of two cladding methods

## 3 试验结果分析

2 种不同熔覆方式下的沉积形貌对比如图 8 所示。对比单道熔覆的金相, 通过 Imagej 测得有无水冷的熔宽分别为 970 μm 和 1 229 μm, 水帘的冷却效应降低熔池宽度的同时, 限制了熔池热量扩散, 导致同步水冷的熔池要小于正常熔覆, 这与图 5 的模拟结果相同。对比搭接熔覆的金相, 同步水冷沉积层内部无气孔、裂纹缺陷, 这也说明同步水冷装置能够形成稳定的干区加工环境。

单道 EBSD 晶粒尺寸对比结果如图 9 和图 10 所示。光-粉同路和同步水冷的晶粒度分布趋势相同，晶粒尺寸主要分布在 0~20  $\mu\text{m}$ ，二者的平均晶粒尺寸分别为 28.81  $\mu\text{m}$  和 27.55  $\mu\text{m}$ ，同步水冷的晶粒度要

略小于光-粉同路的晶粒度。冷却速度会对晶粒的尺寸大小产生影响，而二者晶粒尺寸差异不大说明，2 种熔覆方式单道沉积时的冷却速度并无太大差异，水帘冷却作用对晶粒细化的影响效果并不明显。

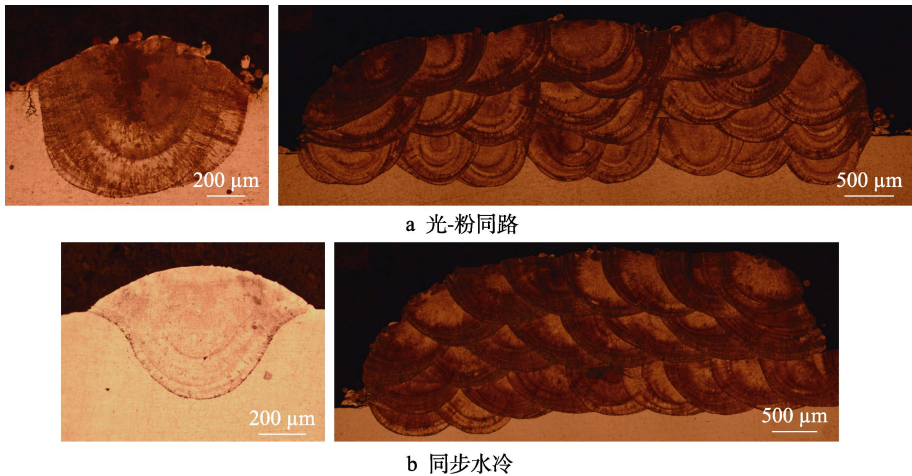


图 8 2 种熔覆方式的沉积形貌对比  
Fig.8 Comparison diagram of sedimentary morphology of two cladding methods:  
a) laser-powder; b) synchronous water cooling

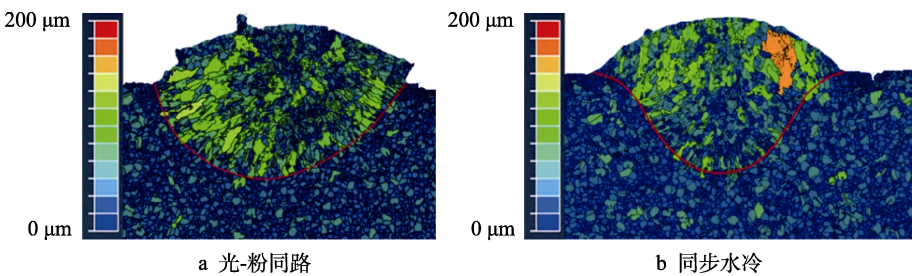


图 9 2 种熔覆方式的 EBSD 晶粒尺寸对比  
Fig.9 Comparison chart of EBSD grain size with two cladding methods:  
a) laser-powder; b) synchronous water cooling

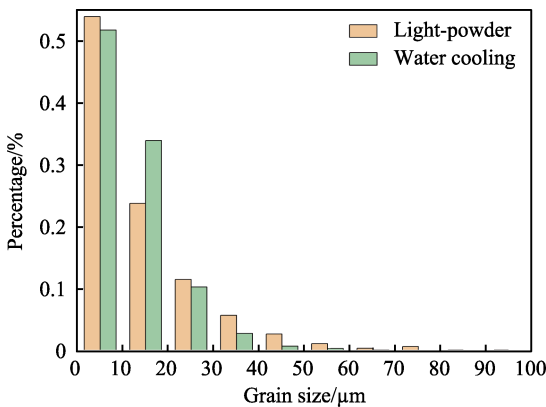


图 10 2 种熔覆方式的晶粒尺寸对比柱状图  
Fig.10 Histogram of grain size comparison between two cladding methods

2 种不同熔覆方式在不同板厚的情况下的热累积温度测量结果如图 11 所示，水冷对温度热积累产生了显著的影响。对比 3、5、6、8 mm 等 4 种厚度下 316L 板的温度曲线，同步水冷激光熔覆过程中，基

板热累积温度一直都不超过 50  $^{\circ}\text{C}$ ，而光-粉同路的热累积温度高能达到近 500  $^{\circ}\text{C}$ ，低的也达到了 200  $^{\circ}\text{C}$ 。2 种熔覆方式下，随基板厚度的降低，热累积温度差越来越大，最小温度差距也在 150  $^{\circ}\text{C}$  以上。这与图 6

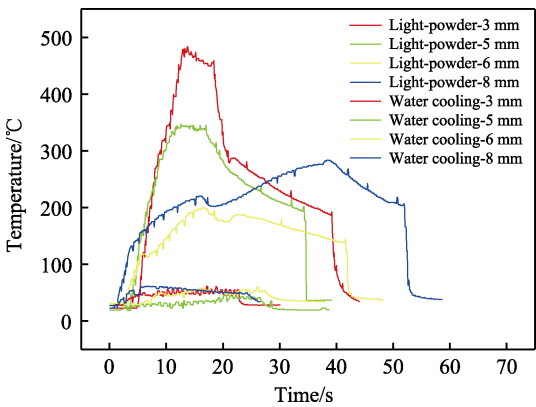


图 11 不同厚度基板的熔覆区域热累积温度曲线  
Fig.11 Temperature curve of heat accumulation in cladding area of substrate cladding of different thicknesses

多道熔覆后基板温度曲线的升温趋势相吻合。

搭接 10 道后的 0.5、1、2、3、5 mm 基板角变形角度的测量结果如图 12 所示, 2 种熔覆方式下的变形量趋势并不相同。0.5 mm 厚度下, 同步水冷能实现正常熔覆, 而光-粉同路的热量累积会将基板熔穿。厚度为 1 mm 时, 2 种熔覆方式均产生明显形变, 且同步水冷产生严重弯曲, 变形程度远大于光-粉同路。厚度为 1~2 mm 时, 基板约束力增加, 二者变形量均呈下降趋势, 且同步水冷变形量下降速度剧烈。厚度

为 2~3 mm 时, 同步水冷基板约束力的增加速度略大于热应力增加速度, 变形量继续呈下降趋势, 但速度减缓; 而光-粉同路则呈现相反的状态, 变形量出现上升的情况。厚度大于 3 mm 时, 基板约束力所带来的抑制变形效果越来越强于热应力的变形效果, 二者变形量逐渐减小, 且趋于相同。在板材厚度较薄、变形角度相差较大时, 2 种熔覆方式下的试验变形量趋势和模拟所得趋势相同, 水冷的存在加剧了基体的形变。

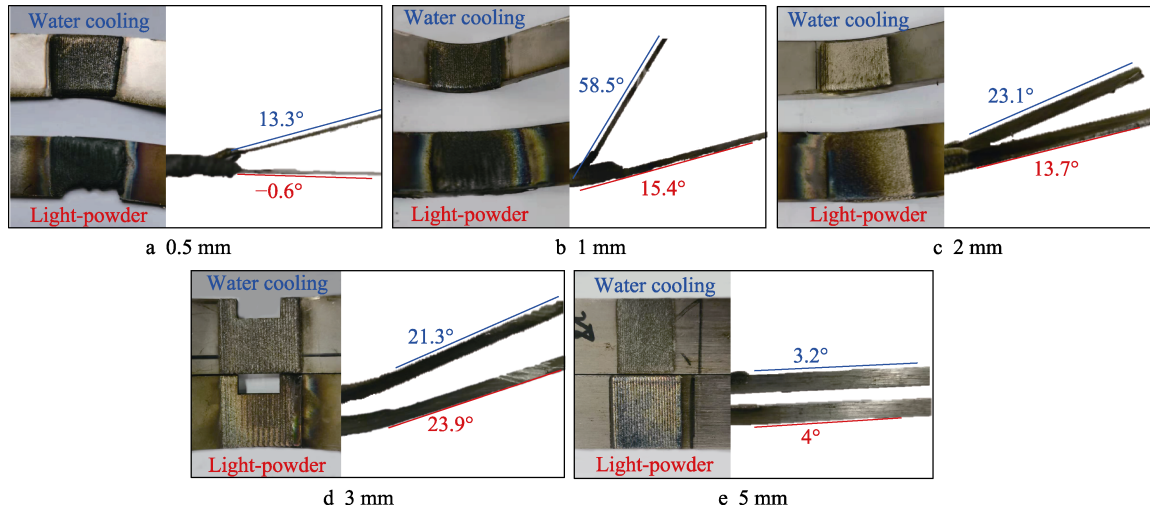


图 12 不同厚度基板的变形量对比

Fig.12 Comparison of deformation of substrate with different thickness

## 4 分析与讨论

### 4.1 干区稳定影响因素

同步水冷装置修复受损工件过程中, 外层水帘结构形成层流水冷环境, 中心过光孔通入保护气体, 通过气压冲击飞溅或流向加工区域的水流, 形成稳定的局部空腔区域, 避免水对沉积层产生不良影响的同时, 降低基板整体温度, 如图 13 所示。干区是否稳定主要由气体排水能力和水流冲击力共同决定, 涉及因素包括水流量、工作距离、水帘直径、相对角度等。水流量的增大会提升冷却水的出口速度, 喷射到基材后, 产生更强的冲击, 容易造成液滴飞溅进入熔池; 工作距离主要影响气体到达基材的速度, 也就是气体刚度, 改变气体对水流的压力; 水帘直径涉及出口水

流与工作区域的相对距离, 但直径过大会增大熔覆头尺寸, 影响加工灵活性; 相对角度发生变化则会影响水流及气流喷射至基材上的受力, 造成不同方向的喷射出现差异, 导致各区域气体排水能力不平衡。

### 4.2 温度梯度差异

同步水冷激光熔覆头在熔覆过程中, 粉末和基板的结合仍然是正常熔池受热捕捉粉末的过程, 过光通道内部的保护气流会将水帘的水流向外排开, 水帘仅提供冷却作用, 改变熔池尺寸。同时, 激光熔覆除首尾阶段外, 中间是一个稳态的固液界面推进过程, 其推进速度更多地与扫描速度有关, 而与水冷无关。因此, 在扫描速度不变的情况下, 熔池的凝固速度无明显变化, 而晶粒大小主要与熔池凝固速度及熔池温度

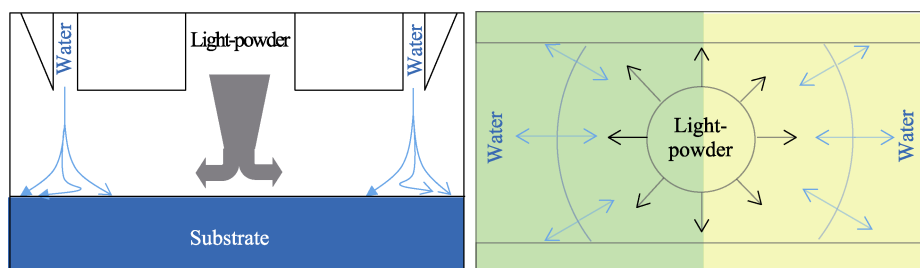


图 13 干区原理

Fig.13 Schematic diagram of dry zone



梯度有关。通过图6的温度曲线可知,在熔池边缘区域,同步水冷温度梯度大于光-粉同路温度梯度;在熔池外延区域,同步水冷温度梯度小于光-粉同路温度梯度。两者产生这种差异的主要原因就是热积累效果的不同。

对于多道搭接,持续的热输入使得基板整体温度上升,因此光-粉同路熔池附近的温度梯度逐渐减小,热影响区的温度梯度逐渐增大。同步水冷因为水帘冷却效应,限制了热量的扩散,一方面加剧了熔池边缘的温度差异,拉高了温度梯度上限;另一方面,也使得基板在连续搭接过程中不会逐渐升温,熔池外延区域温度梯度仍维持在较小的初始状态。单道熔覆由于没有沉积前热输入的影响,熔池外延区域温度梯度无太大差异。

### 4.3 基板变形差异

基板在熔覆过程中的变形主要受到热应力和基板约束力的影响,热应力驱使基板向上弯曲变形,基板约束力则会限制基板的翘曲趋势。基板约束力随厚度的增加逐渐增大,而热应力主要受基板上下面温差的影响。2种熔覆方式在基板约束力上基本相同,同步水冷装置水帘和沉积过程在同一平面内的特殊耦合方式可以更快地将周边区域的热量带走,减小基体整体热量累积和背面温度,造成热应力的差异。

对于同步水冷,厚度较薄时,水帘的冷却效应使得基板熔池区域上下面温差一直维持在较高上限,温差产生的热应力大于板厚自身的约束力,试样发生明显变形。随着厚度的增加,板材的强度增加,变形量逐渐减小。对于光-粉同路,板材较薄时,激光传递到基板上的热量主要靠热传导冷却,厚度方向上的温差较小,板材翘曲减小。厚度进一步增加,热积累效应减小,上下面的温差逐渐增加,出现变形量增加的现象。当板材较厚时,基板约束力逐渐接近热应力产生的变形效果,热积累带来的影响被基板厚度进一步削弱,二者变形量越来越小,且趋于相同。

## 5 结论

通过对比分析光-粉同路和同步水冷2种熔覆方式下的熔池形貌、晶粒尺寸、不同基板厚度下的热量积累及悬臂梁变形量、温度场及变形量模拟,得出如下结论。

1) 水帘的表面冷却效应限制了熔池热量的扩散与深入,但对熔池的冷却速度无明显影响,主要表现为同步水冷的熔池尺寸要小于光-粉同路,但二者晶粒尺寸无明显差别。

2) 水帘对熔覆过程中板材整体升温的限制作用明显,对比热电偶测得2种熔覆方式下的基板背面温度,同步水冷能保持基板温度一直在50℃以下,在薄板搭接熔覆时,同步水冷能免于基板被熔塌。

3) 板材较薄时,热应力要远大于约束力,且水冷效应拔高了上下面温差,使基板翘曲进一步增大。板材厚度增加使得热应力与基板约束力的差距逐渐减小,另一方面也稀释了热积累效应的影响,导致二者变形量逐渐减小,直至趋于相同。

### 参考文献:

- [1] KAHHAL P, JO Y K, PARK S H. Recent Progress in Remanufacturing Technologies Using Metal Additive Manufacturing Processes and Surface Treatment[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2024, 11(2): 625-658.
- [2] 惠洪帅, 刘长军. 激光熔覆设备的技术升级及应用[J]. 能源技术与管理, 2022, 47(5): 197-198.  
HUI H S, LIU C J. Technical Upgrade of Laser Cladding Equipment and the Application[J]. Energy Technology and Management, 2022, 47(5): 197-198.
- [3] ZHANG D Y, SUO X Y, LIU J Y, et al. Study on Tribological Performances of in Situ -Boriding Laser Cladding FeCoCrNiMn Layers and Its Implementation in Gear Repair[J]. Tribology International, 2024, 194: 109503.
- [4] GUO N, GAO Y, GAO Y K, et al. Microstructure and Properties of In-Situ Nickel-Aluminum Bronze Coating by Underwater Wire-Feed Laser Cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 6459-6471.
- [5] 黄进钰, 梁志刚, 师文庆, 等. 激光熔覆在农机修复强化中应用的研究进展[J]. 激光杂志, 2020, 41(8): 11-15.  
HUANG J Y, LIANG Z G, SHI W Q, et al. Research Progress of Laser Cladding Application in Agricultural Machinery Repair and Strengthening[J]. Laser Journal, 2020, 41(8): 11-15.
- [6] LI M, LI Y, HONG T, et al. High Ablation-Resistant Silicone Rubber Composites via Nanoscale Phenolic Resin Dispersion[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 472: 145132.
- [7] WANG Y, ZHANG X, FU Y C, et al. Fire Performances of Unvulcanized Rubbers and Influences of Horizontal Flowing Melts[J]. Polymer Testing, 2020, 91: 106760.
- [8] 李少龙, 李珍莲, 董红莉. 航空发动机耐高温橡胶密封圈性能试验研究[J]. 航空标准化与质量, 2019(2): 19-23.  
LI S L, LI Z L, DONG H L. Study on Performance Test of Aero-Engine High Temperature Resisting Rubber Sealing Gasket[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2019(2): 19-23.
- [9] XU H T, ZHANG Q, TIAN T T, et al. In-Situ Hot Rolling Directed Energy Deposition-Arc Repair of Shafts[J]. Additive Manufacturing, 2023, 61: 103362.
- [10] XIONG X C, HU Z Q, QIN X P, et al. In-Situ Fabrication of Repairing Layers for Large Structures Using Follow-up Hot-Hammering-Assisted Wire Arc Additive Manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94: 387-402.
- [11] 周建忠, 王松涛, 徐家乐, 等. 液氮强制冷却对Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V表面激光熔覆制备 WC/Ni60A 涂层微观组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(2): 500-508.  
ZHOU J Z, WANG S T, XU J L, et al. Microstructure and Properties of WC/Ni60A Coating on Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V by Laser Cladding under Liquid Nitrogen Cooling[J]. Rare Metal



- Materials and Engineering, 2019, 48(2): 500-508.
- [12] 汪贺模, 蔡庆伍, 余伟, 等. 水流量对热轧钢板层流冷却过程对流换热系数的影响[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(12): 1421-1425.  
WANG H M, CAI Q W, YU W, et al. Effect of Water Flow Rate on the Heat Transfer Coefficient of a Hot Steel Plate during Laminar Flow Cooling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(12): 1421-1425.
- [13] ESMAEIL KHANDANDEL S, HOSSEIN SEYEDKASHI S M, MORADI M. Numerical and Experimental Analysis of the Effect of Forced Cooling on Laser Tube Forming[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(7): 338.
- [14] YANG J Y, LI X D, LI F, et al. Effect of Cooling Method on Formability of Laser Cladding IN718 Alloy[J]. Materials, 2021, 14(13): 3734.
- [15] YANG S, DU D, CHANG B H. Studies of the Influence of Beam Profile and Cooling Conditions on the Laser Deposition of a Directionally-Solidified Superalloy[J]. Materials, 2018, 11(2): 240.
- [16] 李焱, 盈亮, 胡平, 等. 圆截面管对流换热系数的实验研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(19): 15-18.  
LI Y, YING L, HU P, et al. Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Coefficient in Circular Cross-Section Tubes[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(19): 15-18.
- [17] KUMAR S, DHAMI S S. Effects of Forced Cooling in Laser Forming[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019, 8(10): 3782-3787.
- [18] 黄本生, 陈权, 杨江, 等. Q345/316L 异种钢焊接残余应力与变形数值模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 138-144.  
HUANG B S, CHEN Q, YANG J, et al. Numerical Simulation of Welding Residual Stress and Distortion in Q345/316L Dissimilar Steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(2): 138-144.
- [19] ZHANG X W, YU Y G, ZHOU L L. Numerical Study on the Multiphase Flow Characteristics of Gas Curtain Launch for Underwater Gun[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 134: 250-261.
- [20] 周良梁, 余永刚, 刘东尧, 等. 水下火炮气幕式发射过程中燃气射流与液体工质相互作用特性研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1373-1378.  
ZHOU L L, YU Y G, LIU D Y, et al. Research on Gas-Liquid Interaction Characteristics during the Gas Curtain Launching Process of Underwater Gun[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(8): 1373-1378.
- [21] 姚建华, 杨高林, 张群莉, 等. 一种用于气氛保护的光-粉同路送粉喷嘴: CN111254431B[P]. 2022-03-18.  
YAO J H, YANG G L, ZHANG Q L, et al. A Light-powder Feeding Nozzle for for Atmosphere Protection: CN111254431B[P]. 2022-03-18.
- [22] 周智祥. 光-粉同路激光增材制造过程中的光粉耦合作用机制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2022.  
ZHOU Z X. Study on the Coupling Mechanism of Light and Powder in the Process of Laser Additive Manufacturing with Light and Powder in the Same Channel[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2022.
- [23] 孙伟伦. 润滑油系统气液两相流流动特性仿真与试验[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.  
SUN W L. Simulation and Experiment of Flow Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Lubricating Oil System[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [24] 邢炯, 杨传民, 蔚俊, 等. 基于 Fluent 的气液两相流喷嘴内部流动特性仿真[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 207-214.  
XING J, YANG C M, YU J, et al. Simulation of Internal Flow Characteristics of Gas Liquid Two Phase Flow Nozzle Based on Fluent[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 207-214.
- [25] ZHOU L L, YU Y G. Study on Interaction Characteristics between Multi Gas Jets and Water during the Underwater Launching Process[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 83: 200-206.
- [26] LI W N, ZHANG Z Y, LU J X, et al. Investigations on the Flow Characteristics and the Structural Response of the Launch Tube during the Underwater Launching Process[J]. Ocean Engineering, 2023, 279: 114603.
- [27] LIU Y, LI C X, HUANG X F, et al. Investigation on Solidification Structure and Temperature Field with Novel Processing of Synchronous Powder-Feeding Underwater Laser Cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 296: 117166.
- [28] CHAI Q, FANG C, QIU X L, et al. Modeling of Temperature Field and Profile of Ni60AA Formed on Cylindrical 316 Stainless Steel by Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 428: 127865.
- [29] 王佳琛. Inconel 718 合金选区激光熔化温度场及微熔池传热研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
WANG J C. Research on the Temperature Field and the Heat Transfer of Tiny Molten Pool during Selective Laser Melting of Inconel 718[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [30] YE W L, SUN A D, ZHAI W Z, et al. Finite Element Simulation Analysis of Flow Heat Transfer Behavior and Molten Pool Characteristics during  $0\text{Cr}_{16}\text{Ni}_5\text{Mo}_1$  Laser Cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 2186-2199.
- [31] CHAI Q, ZHANG D Y, HAN Y Z, et al. Numerical Simulation of Thermal Transfer and Flow Behavior of Ni60AA Formed by Laser Cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 5585-5594.
- [32] CANG X Y, SHU L S, LI P Y, et al. Establishment and Experimental Verification of a Three-Dimensional Finite Element Model for Residual Stress in Surface Processing of Inconel 718 Alloy by Laser Cladding[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107088.
- [33] 詹明杰. 316L 不锈钢激光增材再制造温度场及应力场的实验及数值模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
ZHAN M J. Experimental and Numerical Simulation Research of Temperature Field and Stress Field in 316L Stainless Steel by Laser Additive Remanufacturing[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [34] HEIGEL J C, MICHALERIS P, PALMER T A. In Situ Monitoring and Characterization of Distortion during Laser Cladding of Inconel® 625[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 135-145.