

激光表面改性技术

316L 水平悬垂结构初始层选区激光 熔化成形形貌研究

李梓杉, 杨高林, 董刚, 姚建华

(浙江工业大学 a.激光先进制造研究院 b.机械工程学院 c.高端激光制造装备
省部共建协同创新中心, 杭州 310023)

摘要: **目的** 针对选区激光熔化成形带较薄水平悬垂结构零件时表面形貌较差的问题, 研究支撑间隔、支撑形式以及能量输入的大小对支撑上方悬垂结构初始层形貌的影响。**方法** 利用选区熔化技术制备带支撑的 316L 水平悬垂结构初始层成形试样, 通过截面金相分析和表面形貌数据分析, 探究初始层熔融金属在冷却凝固前形貌的影响因素, 以及变化过程机制。**结果** 随着支撑间隔从 2.5 mm 减小至 0.714 mm, 激光能量输入由 0.083 W·s/mm 增加至 0.25 W·s/mm, 悬垂结构初始层的孔隙逐渐减少, 最低孔隙率为 6.549%。表面凸起球化最大高度由 523.454 μm 降低至最小 267.951 μm , 成形表面更为平整。相同排布方式下, 线形连续支撑成形试样的孔隙更少。**结论** 支撑间隔影响相邻支撑间受激光扫描熔融形成的熔融金属量, 激光能量输入的大小将影响相同散热速率下熔融金属所需的凝固时间。受到扰动而破裂的熔融金属薄膜在表面张力作用下, 将不断向与支撑结构连接处汇聚球化, 初始层形貌不断偏离初始的平整薄层状态。使用十字交叉排布方式支撑间隔在 1 mm 以下的线形连续支撑, 可以有效减少 SLM 成形水平悬垂结构初始层的孔隙数量, 并提高初始层形貌的平整程度。

关键词: 选区激光熔化; 支撑; 水平悬垂结构初始层; 连接质量; 形貌; 孔隙率

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0379-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.036

Forming Morphology of 316L Horizontal Overhanging Structure Initial Layer by Selective Laser Melting

LI Zi-shan, YANG Gao-lin, DONG Gang, YAO Jian-hua

(a. Institute of Laser Advanced Manufacturing, b. College of Mechanical Engineering, c. Collaborative Innovation Center
of High-end Laser Manufacturing Equipment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310023, China)

ABSTRACT: In view of the problems such as poor forming quality of thin horizontal overhanging structure morphology and

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-04-29

Received: 2015-03-16; **Revised:** 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金 (52035014); 浙江省基础公益研究计划 (LGG22E050036, LGG20E050019)

Fund: The National Nature Science Foundation of China (52035014); Basic Public Welfare Research Plan of Zhejiang Province (LGG22E050036, LGG20E050019)

作者简介: 李梓杉 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为选区激光熔化。

Biography: LI Zi-shan (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: laser selective melting.

通讯作者: 杨高林 (1980—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光增材制造。

Corresponding author: YANG Gao-lin (1980-), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: laser additive manufacturing.

引文格式: 李梓杉, 杨高林, 董刚, 等. 316L 水平悬垂结构初始层选区激光熔化成形形貌研究[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 379-387.

LI Zi-shan YANG Gao-lin, DONG Gang, et al. Forming Morphology of 316L Horizontal Overhanging Structure Initial Layer by Selective Laser Melting[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 379-387.

the connection quality between support structure and overhanging structure formed by selective laser melting. The horizontal overhanging structure initial layer morphology of molten metal formed by selective laser melting was studied from three factors of support spacing, support form and energy input to provide a theoretical basis for improving the quality of thin horizontal overhanging structure and the connection quality between support structure and overhanging structure. 316L parts of horizontal overhanging structure initial layer was prepared by selective laser melting technology. The influencing factors and changing process mechanism of the molten metal morphology in the initial layer before cooling and solidification were investigated by section metallographic analysis and surface topography data analysis. The spacing distances of support for the formed parts were set at 2.5, 1.67, 1.25, 1, 0.833 and 0.714 mm respectively, depending on the different amount of support structures for the uniformly divided 10 mm diameter circular model. The spacing distances of support were divided into the circular arrangement, which had fewer effects on the surface morphology, and the cross arrangement, which was more common in practice. The energy input of the initial layer increased with the decrease of the scanning speed and the increase of the laser power at constant laser power. With the decrease of the support spacing distance from 2.5 mm to 0.714 mm, the ratio of pore in overhanging structure initial layer decreased continuously and the minimum pore ratio can reach 6.549%. When the support spacing distance was 1 mm and with the increase of laser energy input from 0.083 W·s/mm to 0.25 W·s/mm, the pore ratio can reach 13.104%. The maximum spheroidizing height of initial layer decreased from 523.454 μm to 267.951 μm , and the forming surface was more smooth. For the same spacing distances of support and support arrangement modes, the porosity of normal support was larger, and the pore shape characteristics revealed that the molten metal kept spheroidizing towards the support structure before solidification. The pore shape characteristics revealed that the molten metal converged to the support structure before solidification. The pores of the formed specimens with increasing energy input by decreasing the scanning speed were generally less than those of the formed specimens with increasing laser power by keeping the scanning speed constant at the same energy input. After the molten metal layer which is formed by laser scanning, the support spacing distance will affect the amount of molten metal, and the energy input of laser will affect the solidification time of molten metal at the same heat dissipation rate. Under the influence of surface tension, the molten metal layer which is disturbed and ruptured will converge to the joint with the support structure, and the morphology constantly deviates from the initial flat thin layer state. The line support with spacing distance less than 1mm can effectively reduce the amount of pores and improve the morphology flatness of the horizontal overhanging structure initial layer formed by SLM.

KEY WORDS: selective laser melting, support, horizontal overhanging structure initial layer, connection quality, morphology, ratio of pore

选区激光熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM) 是一种以直径较细的高能激光束为热源, 通过高速扫描的方式将粒径在 5~50 μm 的金属粉末以及位于粉末下方的基体表面熔化, 共同形成熔池后, 经冷却凝固而逐层成形的激光增材制造技术^[1-3]。相较于其他增材制造技术, SLM 技术拥有成形精度好、可成形自由度高和材料可选范围广等优点^[4-6]。在成形悬垂结构时, 常通过设置支撑来约束 SLM 过程中的翘曲变形趋势, 但在设置支撑时需考虑其易去除性、自支撑性以及成本等因素。因此, 所设置支撑对悬垂面的约束能力存在一定极限, 当支撑发生断裂失效时, 零件极易出现翘曲变形情况^[7-9]。

按照断裂位置的不同, 支撑结构的约束失效形式可分为支撑与悬垂结构连接处断裂失效以及支撑结构自身断裂失效。激光扫描成形支撑上方悬垂结构初始层的形貌质量决定了最终支撑结构与悬垂结构的连接质量^[10]。Kruth 等^[11]对多层成形后的悬垂圆孔与方孔进行了研究, 发现在 SLM 成形水平或接近水平

的悬垂面时, 上层的激光能量会渗透到粉床, 进而影响悬垂底面的成形形貌质量。Calignano^[12]以铝合金和钛合金为研究对象, 通过试验研究了不同的支撑排布方式对 SLM 成形件悬垂结构下表面形貌的影响, 并探究了不同倾斜角度的悬垂结构需要添加支撑结构的界限角度。陈宾宾等^[13]研究发现, 水平悬垂面首层孔隙成因有 2 种, 一种是未熔化区域的粉末塌陷, 另一种是金属液体熔化凝固时的热膨胀和热收缩对周围产生热应力形成孔洞。段声勤等^[14]研究发现, 在 SLM 成形悬垂圆孔时, 当扫描线方向平行于悬垂面边缘线时, 悬垂面的质量较好, 但在成形圆孔顶部近水平悬垂面处, 易出现严重塌陷。

提高成形极薄水平悬垂结构质量是提高 SLM 成形精细零件质量亟待研究的一点, 且由于选区激光熔化具有逐层成形的特性, 激光扫描成形单层模型后, 除该层金属粉末外, 还将熔化 1~2 层厚度的已成形基体部分。因此, 对于支撑结构与悬垂结构的连接处, 在成形至支撑上方第 3~4 层的后续成形过程中, 将不

会再对与支撑连接处的形貌产生较大影响。现有研究中对 SLM 成形极薄水平悬垂结构形貌的影响因素尚不清晰, 因此有必要对 SLM 初始成形悬垂结构上方初始层形貌的变化规律及其影响因素进行研究。通过试验得到支撑间隔、支撑形式、能量输入以及截面形状特征对单层激光扫描形成的熔融金属在冷却凝固前变化过程及凝固所需时间的影响, 为提高极薄水平悬垂结构以及支撑与悬垂结构连接质量, 进而抑制翘曲提供理论基础。

1 试验

1.1 设备与材料

选区激光熔化成形试验设备采用由德国 SOLUTIONS 公司生产的 SLM 280 型号选区激光熔化设备, 其最大成形尺寸可达 $280\text{ mm} \times 280\text{ mm} \times 350\text{ mm}$, 最小铺粉层厚为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 最小光斑直径为 $70\text{ }\mu\text{m}$, 使用氩气为 SLM 过程的保护气体。设备内部包含铺粉系统、光学系统、气体循环系统和冷却系统等。本文所有试样的基板以及金属粉末均采用 316L 材料, 采用西安欧中公司生产的 316L 金属粉末。金属粉末呈规则球形, 粒径范围为 $15\sim 53\text{ }\mu\text{m}$, 金属粉末的扫描电镜 (SEM) 形貌如图 1 所示。

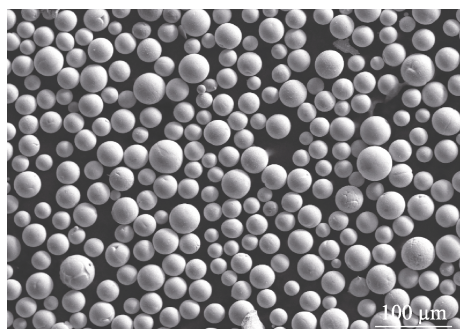
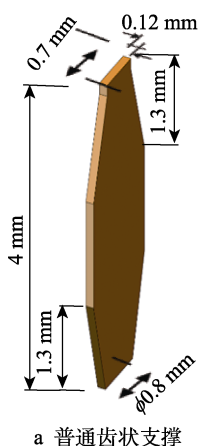
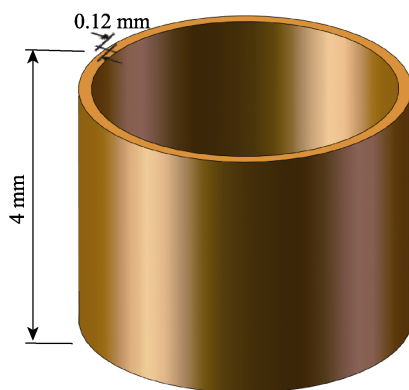


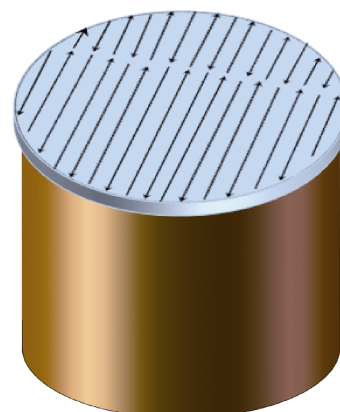
图 1 316L 粉末形态
Fig.1 Morphology of 316L powder



a 普通齿状支撑



b 线性连续支撑结构



c 水平悬垂结构初始层扫描策略

图 3 支撑形式

Fig.3 Type of support: a) normal support; b) linear continuous support; c) scanning strategy of horizontal overhanging structure initial layer

1.2 方法

以直径为 10 mm 的带支撑圆形悬垂机构为研究对象, 通过施加不同的支撑排布以及支撑类型后, 仅对支撑上方的悬垂结构初始层进行扫描成形。所设置的支撑排布形式主要分为环形排布 (如图 2a 所示) 和十字交叉排布 (如图 2b 所示) 方式。其中环形排布方式为等间隔排布, 圆心处设置 $\phi 0.2\text{ mm}$ 的柱状支撑。图 2a 中, 当 $\phi 10\text{ mm}$ 的圆形模型下方环状支撑数量为 4 时, 支撑将圆的直径均匀地分为了 8 份, 则沿直径方向支撑间隔为 1.25 mm 。当使用环形支撑排布方式成形试样时, 沿竖至虚线切割制备金相图后, 可沿箭头方向对无交叉支撑位置影响的初始层形貌进行观察。在实际 SLM 成形悬垂结构中, 常用的十字交叉支撑排布方式下, 分为等间隔的横向支撑结构与纵向支撑结构, 将模型划分为一个个等面积的小方格, 单个小方格内的支撑间隔可以理解为从无支撑间隔逐渐变化到对角线长度。如图 2b 中, 在 $\phi 10\text{ mm}$ 的圆形模型下, 将横向或纵向均匀划分为 8 等分时, 则支撑间隔为 1.25 mm 。根据等分 $\phi 10\text{ mm}$ 圆形模型的支撑数量不同, 本文使用的支撑间隔分别为 2.5 、 1.67 、 1.25 、 1 、 0.833 、 0.714 mm 。

本文使用的支撑类型为普通齿状支撑 (如图 3a 所示) 和线性连续支撑 (如图 3b 所示), 支撑的成形工

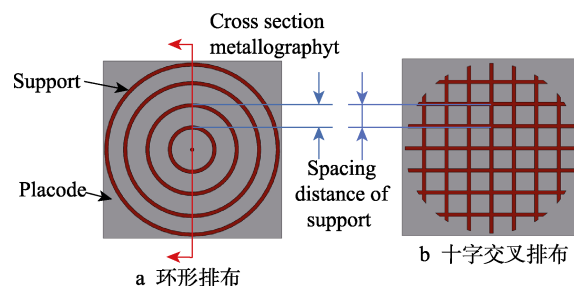


图 2 支撑排布方式

Fig.2 Support arrangement modes: a) circular arrangement; b) cross arrangement

艺参数:激光功率为 150 W,激光扫描速度为 700 mm/s。悬垂结构初始层的扫描策略如图 3c 所示。支撑结构的厚度为激光单道扫描,支撑的成形高度为 4 mm,铺粉厚度为 50 μm 。支撑成形结束后,50 μm 初始层在成形时所使用的激光功率为 235 W,激光扫描速度为 700 mm/s,光斑直径为 70 μm 。

在探究激光功率对 SLM 成形悬垂结构初始层形貌的影响时,分别保持激光功率与激光扫描速度不变,通过调节单一参数来改变能量输入分别成形试样,对成形试样表面的孔隙率以及形貌进行分析,分别探究改变激光功率和激光扫描速度对成形表面形貌的影响,得到较优的工艺参数。能量输入的大小及其对应的激光工艺参数见表 1。支撑间隔为 1 mm,使用环形排布方式普通齿状支撑成形直径 10 mm 的带支撑圆形悬垂结构,对支撑上方初始层分别使用表 1 中的对应激光工艺进行单层扫描,成形所使用的模型、扫描策略和铺粉厚度等 SLM 工艺参数均相同。

表 1 不同能量输入下 SLM 成形支撑上方悬垂结构初始层激光工艺

Tab.1 Laser parameter of overhanging structure initial layer in SLM by different energy input

Value of energy input W ($W \cdot s \cdot \text{mm}^{-1}$)	The scanning speed are the same		The power are the same	
	Scanning speed $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Power P/W	Scanning speed $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Power P/W
0.083	1 200	100	1 200	100
0.104	1 200	125	960	100
0.125	1 200	150	800	100
0.146	1 200	175	686	100
0.167	1 200	200	600	100
0.188	1 200	225	533	100
0.208	1 200	250	480	100
0.229	1 200	275	436	100
0.25	1 200	300	400	100

1.3 SLM 成形表面孔隙率分析方法

为表征支撑上方初始成形层的成形质量,首先观察分析成形试样,并标示出红色线条所指的未正常成形区域,以及蓝线线条所指的熔融金属严重下沉所出现的孔隙区域,所标示绿圈内部为目标成形表面的范围。支撑间隔为 2.5 mm 的初始层成形试样如图 4 所示。

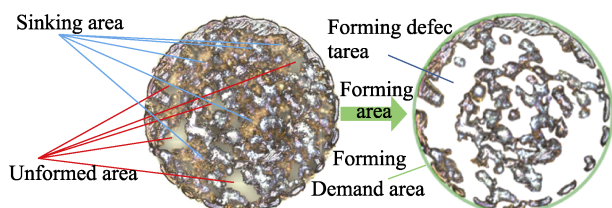


图 4 孔隙率定义方法示意图

Fig.4 Definition method of the ratio of pore

通过 Image pro 软件计算得到成形表面下沉区域面积及未正常成形区域面积占据理想成形表面面积的比值,将比值作为该试样成形表面的孔隙率。孔隙率越低,说明成形表面的成形缺陷越少,表面成形质量越好。

2 结果与讨论

全部试验试样如图 5 所示,左上角的 6 试样为使用环形排布的线形连续支撑初始层成形试样;右上角 6 试样为使用环形排布的普通齿状支撑初始层成形试样;左下角 6 试样为使用十字交叉排布的线形连续支撑初始层成形试样;右下角 6 试样为使用十字交叉排布的普通齿状支撑初始层成形试样。每一分组内的 6 个试样分别自左至右、自上至下支撑间隔逐渐减小。

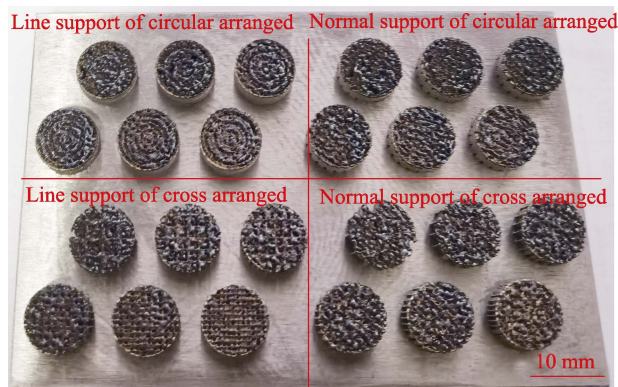


图 5 SLM 成形支撑上方水平悬垂结构初始层试验试样

Fig.5 Samples of horizontal overhanging structure initial layer formed by SLM

2.1 支撑间隔对初始成形悬垂结构形貌的影响研究

在 SLM 成形相同成形模型过程中,支撑间隔的大小将直接影响模型下方总的支撑数量,以及相邻间隔间初始成形层的熔融金属量,并对熔融金属的散热速率产生影响。结合表面轮廓和金相图,对环形排布连续性线性支撑成形初始层的孔隙率情况进行分析,可整理得出激光单层扫描支撑上方熔化金属粉末形成一层完整且均匀的熔融金属后,在冷却凝固前的形貌变化过程。成形表面轮廓形貌如图 6 所示。蓝色部分主要为成形表面的孔隙和下沉结构,可明显看出各试样中正常成形的凸起部分集中在支撑所在位置附近,且支撑间隔较大的试样支撑上方正常成形部分的球化现象更严重,最大高度更高。随着支撑间隔的减小,试样成形表面更为平整,最大高度较低。

对成形试样的截面进行金相处理,将所成形表面截面形貌金相图进行归纳总结,可以得到 SLM 过程中,激光扫描成形支撑上方初始层后,所成形熔融金属在凝固前的形貌变化过程,变化过程及试样截面金相对照如图 7 所示。激光完成对单层粉末的扫描后,

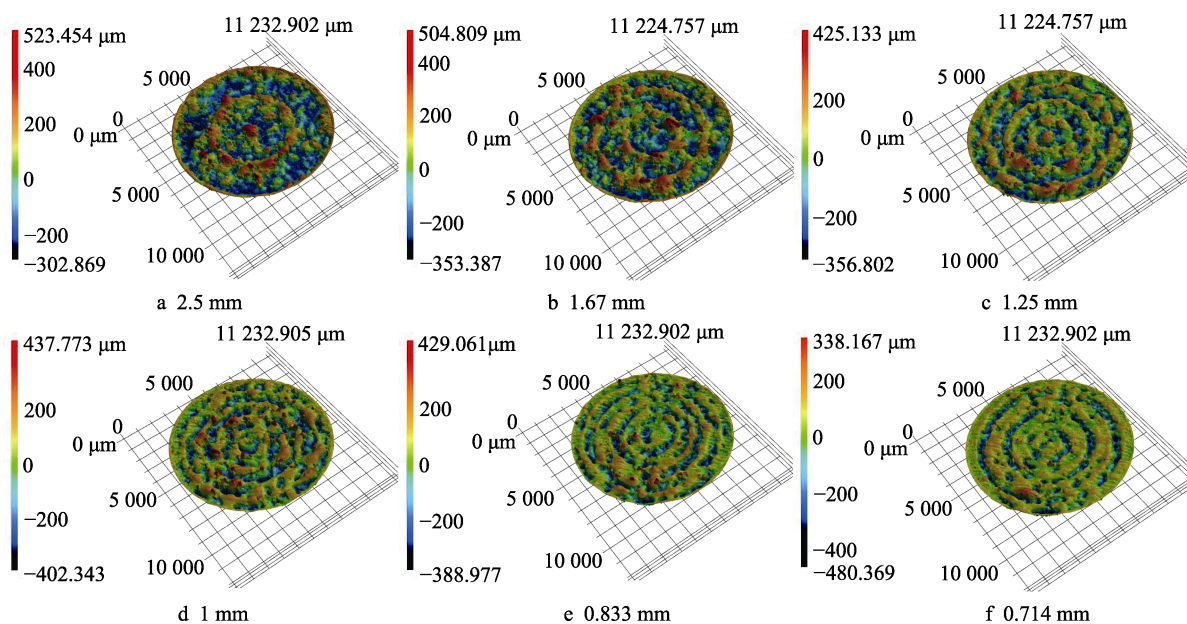


图 6 不同支撑间隔环形排布方式的线性连续支撑上方悬垂结构初始层成形表面形貌

Fig.6 Morphology of horizontal overhanging structure initial layer formed by different support spacing distances in circular arrangement modes of linear continuous support

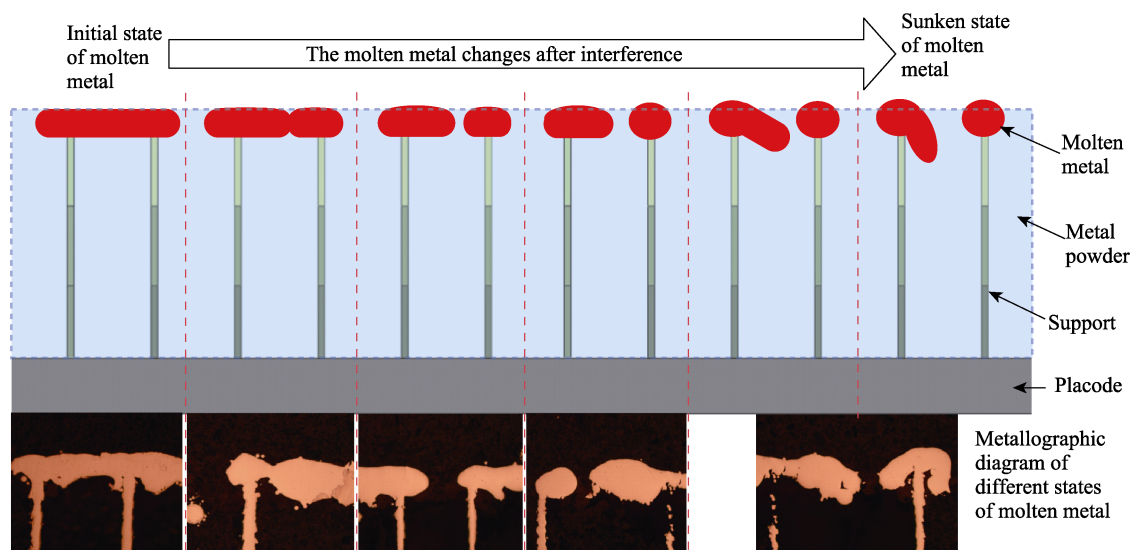


图 7 SLM 成形支撑上方悬垂结构初始层的形貌演化过程及对照的试样金相

Fig.7 Morphologic evolution and phase diagram of the overhanging structure initial layer formed by SLM

可理解为所熔化的金属在支撑与粉末床上方形成了一层厚度约为 1~2 倍铺粉厚度、面积为成形件截面、由熔融金属构成的液膜。熔融金属的主要散热方式为支撑导热、粉末床导热和空气对流方式散热。由于金属粉末间存在一定缝隙, 所以其导热系数较低, 散热速率低于支撑。熔融金属在凝固前, 状态会保持在液态一定时间, 这段时间的长短主要受熔融金属的温度以及散热速率的影响。面积较大但厚度极薄的液膜在受到外部或内部的扰动后, 在重力和表面张力的作用下, 会出现球化趋势。当球化汇聚现象较多, 且熔融金属温度较高时, 熔融金属将不断熔化下方的粉末床, 增大体积, 并在重力作用下出现下垂现象直至凝固, 支撑结构与其两侧下沉后的熔融金属将形成图 7

中所的缝隙结构。

支撑与悬垂结构连接处所形成的缝隙结构特征将会直接影响后续 SLM 过程中支撑的约束翘曲能力。由于选区激光熔化的逐层成形特性, 在 SLM 成形至模型支撑上方第 3~4 层及更高层时, SLM 成形过程将不会对支撑连接处的形貌产生明显影响, 初始层成形时所出现的形貌缺陷也难以在后续的成形过程中得到修复。在成形悬垂结构初始 1~2 层时, 悬垂结构底部形貌会受到激光扫描的影响^[15-16]。当继续进行更高层悬垂结构的 SLM 成形时, 在残余应力的不断累积下, 悬垂结构将逐渐出现翘曲变形趋势, 在微观上则表现为翘曲区域的支撑不断受到竖直向上或斜向上方向的拉力^[17-19]。若在上拉趋势中支撑间结构

与悬垂结构连接处存在缝隙特征结构,则缝隙更容易出现应力集中,造成缝隙缺陷扩大,从而造成支撑的断裂失效。当成形表面的孔隙率较高时,说明表面未正常成形部分较多,熔融金属的生成量较小,或出现下沉现象的熔融金属更多,更易出现连接质量较差以及出现上述缝隙特征结构。这意味着支撑与悬垂结构的连接质量相对更差,以及当成形极薄水平悬垂结构时的成形质量较差。为探究不同支撑排布方式下的支撑间隔对初始成形悬垂结构形貌的影响,分别对比环形排布方式与十字交叉排布方式线性连续支撑的成形试样。对成形试样的形貌分别进行提取与整理,得到了不同成形表面对应的孔隙率数据,如图8所示。

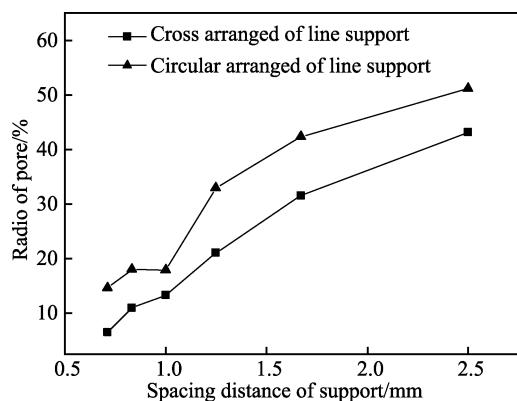


图8 支撑间隔变化下的支撑上方悬垂结构初始层孔隙率

Fig.8 Pore ratio of the overhanging structure initial layer by different spacing distances

观察图8可以发现,十字交叉排布方式成形试样的孔隙率均低于相同支撑间隔下的环形支撑排布方式试样。十字交叉排布方式较环形支撑排布方式的支撑连接面积更大,熔融金属的散热速率更快,在形貌尚未出现较大变化时就已经凝固,不易出现孔隙缺陷。不同排布方式成形试样的孔隙率均随着支撑间隔的减小而不断降低,且降低趋势接近线性关系。随着支撑间隔加密,未正常成形区域与下沉区域逐渐减少,成形层上表面更为平整,成形表面孔隙逐渐减少。当支撑间隔较小时,相同成形面积下的支撑密度增大,散热效果将更好,因此熔融金属凝固速度更快,令熔融金属在更接近初始状态时凝固^[20]。通过共聚焦显微镜得到的各成形试样初始层表面轮廓的最高值如图9所示。可以发现,随着支撑间隔的增大,试样轮廓的最大高度值均不断增长。说明当支撑间隔较大时,初始层金属的球化情况更严重;当支撑间隔更小时,初始层表面更平整,球化情况更弱。

当支撑间隔缩小到常规SLM成形中不会使用的间隔时,仍存在一定比例的明显孔隙。试验中所使用的最小支撑间隔达到了0.714 mm。在如此小的支撑间隔下,支撑结构较难去除,且不利于金属粉末流出回收,在对常规模型进行支撑设置时通常不会使用。

因此,在常规SLM成形带支撑悬垂结构的支撑上方初始成形层时,表面上的孔隙量无法仅靠调节支撑间隔进行改善。

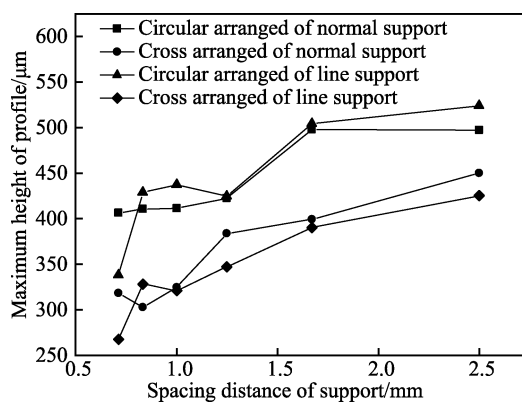


图9 不同排布形式以及不同支撑类型下成形悬垂结构初始层轮廓的最大高度

Fig.9 Maximum height of the overhanging structure initial layer profile with different support arrangement modes and support types

2.2 支撑形式对初始成形悬垂结构形貌的影响

常用的支撑形式主要有线性连续支撑以及齿状普通支撑,因线性连续支撑易存粉以及去除难度较大的缺陷,目前在实际进行SLM成形零件过程中,主要使用齿状普通支撑来对目标零件的成形进行辅助。由于支撑结构与悬垂结构初始成形面的连接特征存在着较大差异,将造成成形表面孔隙率以及孔隙的形状特征存在较大差异。可通过对比不同支撑形式表面形貌特征,对激光单次扫描支撑上方初始层后的熔融金属形貌的变化规律进行总结与研究。分别对比线性连续支撑以及普通齿状支撑进行初始成形悬垂结构试验的结果,如图10所示。通过对比可以发现,使用线性连续支撑的成形表面,正常成形部分主要在支撑结构附近,孔隙为沿着环形支撑间隔的蠕虫状孔隙;使用普通齿状支撑的成形表面,孔隙主要为网状的孔隙。线状支撑成形表面正常成形部分更连续,齿状支撑成形表面撑场部分更分散。线性连续支撑与普通齿状支撑的区别主要在于支撑与初始成形面的连接形式不同,相邻连接的齿状支撑与悬垂结构的连接位置是存在间断的位置,这种相邻支撑的间断处可理解为2个相邻的支撑间存在着支撑间隔,因此出现了孔隙缺陷。普通齿状支撑成形表面出现了蠕虫状的孔隙,说明了熔融金属在凝固前的形貌变化过程主要为向成形表面与支撑连接位置进行汇聚与球化。

不同支撑类型下成形试样表面的孔隙率如图11所示。在2种支撑类型下,随着支撑间隔的逐渐降低,相同排布方式与支撑类型成形试样表面的孔隙率均呈现出了逐渐下降的趋势。其中,十字交叉排布线性

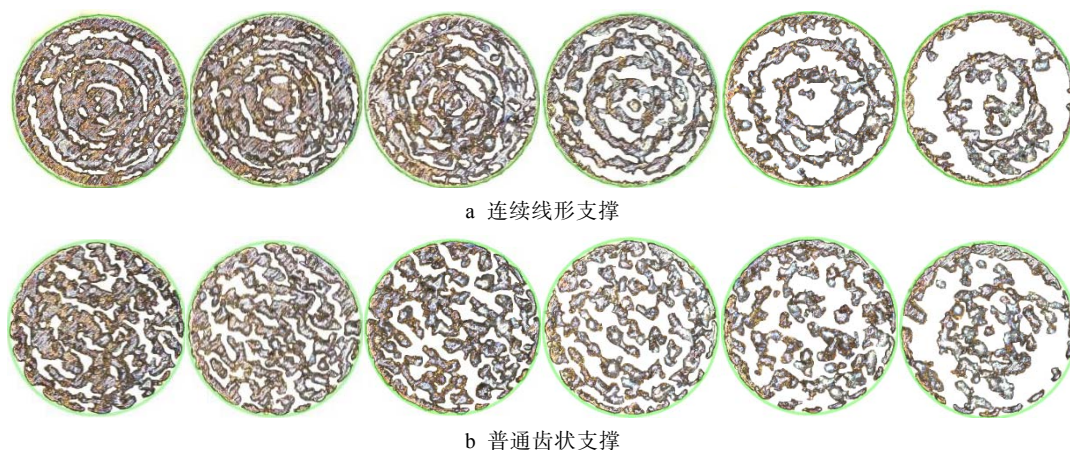


图 10 SLM 成形支撑上方悬垂结构初始层表面形貌

Fig.10 Morphology of the overhanging structure initial layer formed by SLM:

a) linear continuous support; b) normal support

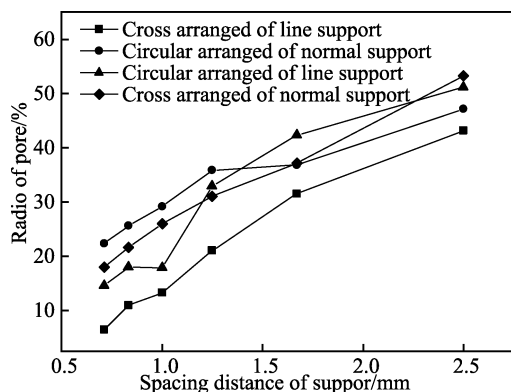


图 11 不同支撑类型下随支撑间隔变化成形表面孔隙率

Fig.11 Pore ratio of the overhanging structure initial layer by different spacing distances and support types

支撑成形试样在所有的支撑间隔下成形表面的孔隙率均最小, 其成形表面的形貌质量最好。观察 2 种排布方式下的普通齿状支撑成形试样孔隙率发现, 当支撑间隔为 1.67 mm 时, 2 种排布方式的成形表面孔隙率基本相同。当支撑间隔更小时, 使用十字交叉排布方式的孔隙率更低, 成形效果更好。当支撑间隔更大时, 环形排布方式成形试样的孔隙率反而更低。在支撑间隔为 1.5 mm 及以下时, 连续线形支撑环形排布成形试样表面的孔隙率低于普通齿状支撑的成形试样表面。但当支撑间隔达到 1.5 mm 以上时, 连续线形支撑成形试样表面的孔隙率反而会高于普通齿状支撑成形试样表面, 表面孔隙以及下沉等缺陷的面积占比更大。支撑间隔较大时, 连续线性支撑成形试样与水平悬垂结构初始层的连接面积较普通齿状支撑更大, 但孔隙占比反而更多。

2.3 能量输入对初始成形悬垂结构形貌的影响

能量输入的大小决定了激光扫过支撑上方初始层所生成熔融金属的量及其温度, 也决定了其在相同

散热速率下凝固前的保持时间。对所有变能量输入下的成形试样表面孔隙率进行提取与整理, 分别得到了变扫描速度与变激光功率情况下的不同能量输入成形试样表面的孔隙率, 如图 12 所示。当激光能量输入为 0.083 W·s/mm 左右时, 成形表面的正常成形部分较少。综合来看, 激光能量输入越大, 成形表面的孔隙率均不断降低。但当能量输入较高时, 孔隙率的降低趋势逐渐减慢, 且孔隙率难以降低至 0。在更高的能量输入下, 激光扫描过后所能熔化的粉末床将更厚, 因此形成的熔融金属量将更多, 熔融金属的温度也将更高^[21]。当激光能量输入较小时, 输入的热量难以将金属粉末熔化或熔化的粉末极少, 面积较大而厚度过薄的熔融金属层更易出现球化, 因此将难以形成与支撑连接效果较好的成形层, 造成孔隙率较大^[22]。在实际的应用中, 对支撑上方初始层并不会使用过高的能量输入量。虽然使用更高的能量输入会降低孔隙率, 但因金属粉末导热效果较差, 若能量输入过高, 则金属液滴温度更高, 并在液体状态保持更久, 极易出现严重的氧化、球化、飞溅增加以及会不断向粉末床方向熔化金属粉末, 造成悬垂结构下表面质量下降等问题。

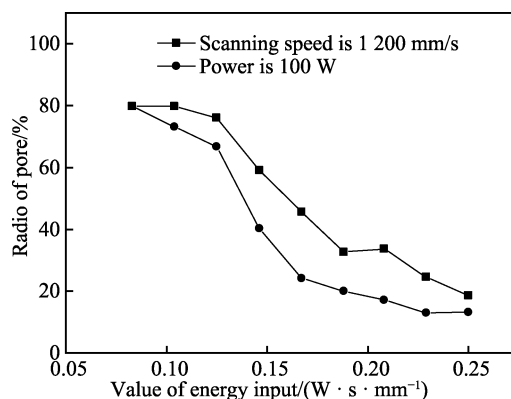


图 12 不同能量输入下的成形支撑上方悬垂结构初始层表面孔隙率

Fig.12 Pore ratio of the overhanging structure initial layer by different energy input

在能量输入的大小相同时,激光扫描速度更低的成形试样,表面的孔隙率明显更低。因金属粉末的导热速度较慢,当激光扫描速度较快时,相同面积下,单位时间内能量的输入较多^[23-25],而热量的传递过程也受时间作用,因此热量在短时间内将难以快速扩散至更大范围的粉末床中,造成激光扫描完成后熔融金属的量将相对较少,但熔融金属温度较高。厚度薄而截面积较大的熔融金属更易出现球化现象,且温度较高的熔融金属在相同的冷却速率下保持液态的时间更长,金属液膜失稳后的形貌球化汇聚过程保持的时间更长,形貌将偏离初始的平整薄层状态更多^[26]。

基于上述研究,分析得到了 SLM 过程中激光扫描成形支撑上方初始成形层后所形成金属液膜的形貌变化机制,如图 13 所示。在 SLM 过程中,激光扫过支撑上方初始层的金属粉末后,将其融化在相邻的支撑结构间,形成了一层液态金属液膜薄层。当支撑间隔过大、熔池的剧烈运动或受到飞溅等扰动后,将使液膜失稳,令液膜破裂。工艺参数中,激光扫描时的能量输入将影响熔融金属的多少,以及熔融金属所能达到的温度,其中相同能量输入下,激光扫描速度与激光功率的选择将影响熔融金属的总量、温度以及其内部的运动情况。破裂的液膜将增加新的表面积,液膜在表面张力作用下,不断向支撑结构汇聚球化,直至稳定或凝固。不同的支撑结构类型,令支撑与悬垂结构部分的连接区域和面积不同,连接区域决定了熔融金属汇聚的位置,进而对孔隙的形貌特征产生了影响。支撑间隔与支撑排布形式决定了熔融金属的散

热速率,当散热条件较好时,熔融金属液膜的形貌在变化初始较为平整的阶段就发生凝固。当熔融金属过多,且温度较高时,在重力作用下,球化的金属液滴不断将粉末床中的粉末融化与熔合,直至其冷却凝固形成下沉状结构。下沉的液滴在凝固后,会与支撑结构形成有夹角的缝隙结构特征,在后续的 SLM 过程中,易因出现应力集中而引发支撑断裂失效。

3 结论

本文通过试验分别分析了支撑间隔、支撑形式以及激光能量输入大小对成形带支撑悬垂结构初始成形层表面孔隙率以及表面形貌的变化机制,得到如下结论:

1) 激光扫描支撑上方悬垂结构初始层后,将在相邻支撑间形成一层厚度薄而面积大的熔融金属液膜,该液膜受熔池内部运动等扰动作用下,极易失稳破裂,造成熔融金属在表面张力作用下将不断向与支撑连接处汇聚球化,形貌将不断偏离初始的平整薄层初始状态。

2) 支撑结构的间隔和形式主要通过影响散热速度决定成形悬垂结构初始层时金属处于熔融金属状态的时间。能量输入将影响初始成形层熔融金属的量及其温度,熔融金属在更短的时间冷却凝固,将有效减少液滴的球化下垂现象,防止在后续的 SLM 过程中因应力集中而造成支撑断裂。

3) 当激光扫描速度较快时,相同面积下,单位时间内能量输入更多,热量在短时间内将难以快速扩散至导热较差的粉末床中,激光扫描完成后,熔融金属的量将相对较少,但熔融金属温度较高,在相同的能量输入下,激光扫描速度更低的成形试样表面的孔隙率明显更低。

参考文献:

- [1] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(9): 1111-1126.
LIN Xin, HUANG Wei-dong. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Metal Components[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2015, 45(9): 1111-1126.
- [2] 杨永强, 吴伟辉, 来克炯, 等. 金属零件选区激光熔化直接快速成形工艺及最新进展[J]. 航空制造技术, 2006, 49(2): 73-76.
YANG Yong-qiang, WU Wei-hui, LAI Ke-xian, et al. Newest Progress of Direct Rapid Prototyping of Metal Part by Selective Laser Melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(2): 73-76.
- [3] 王志强, 王学德, 谢瑞鹏, 等. 选区激光熔化成形 Inconel 718 合金孔隙缺陷的研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 378-385.

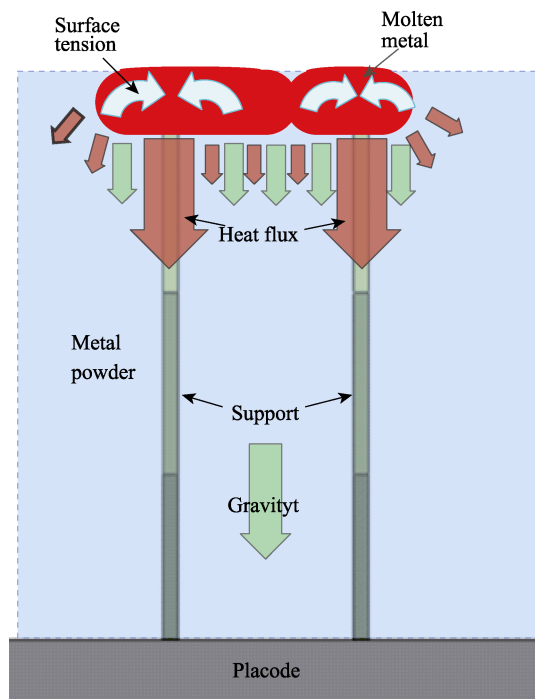


图 13 SLM 成形支撑上方悬垂结构初始层后熔融金属形貌的变化过程

Fig.13 Schematic diagram of morphologic evolution process of the overhanging structure initial layer formed by SLM

- WANG Zhi-qiang, WANG Xue-de, XIE Rui-kun, et al. Pore Defects of Inconel 718 Alloy Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 378-385.
- [4] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 32-55.
- GU Dong-dong, ZHANG Hong-mei, CHEN Hong-yu, et al. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Metallic Aerospace Components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 32-55.
- [5] YAN Hui, SHEN Li-da, WANG Xiao, et al. Stress and Deformation Evaluation of the Subarea Scanning Effect in Direct Laser-Deposited Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1): 915-926.
- [6] PENG Shi-tong, LI Tao, WANG Xin-lin, et al. Toward a Sustainable Impeller Production: Environmental Impact Comparison of Different Impeller Manufacturing Methods[J]. Journal of Industrial Ecology, 2017, 21(S1): S216-S229.
- [7] 张国庆, 杨永强, 张自勉, 等. 激光选区熔化成型零件支撑结构优化设计[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 59-66.
- ZHANG Guo-qing, YANG Yong-qiang, ZHANG Zi-mian, et al. Optimal Design of Support Structures in Selective Laser Melting of Parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 59-66.
- [8] LI C, FU C H, GUO Y B, et al. A Multiscale Modeling Approach for Fast Prediction of Part Distortion in Selective Laser Melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 703-712.
- [9] 张小川, 康进武, 段国庆, 等. SLM 增材制造工件的正态分布支撑设计[J]. 热加工工艺, 2019, 48(15): 136-139.
- ZHANG Xiao-chuan, KANG Jin-wu, DUAN Guo-qing, et al. Normal Distribution Support Design for SLM Additive Manufacturing Parts[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(15): 136-139.
- [10] 石文天, 王朋, 刘玉德, 等. 选区激光熔化成形 316L 表面质量及工艺试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 257-267.
- SHI Wen-tian, WANG Peng, LIU Yu-de, et al. Experimental Study on Surface Quality and Process of Selective Laser Melting Forming 316L[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 257-267.
- [11] KRUTH J P, VANDENBROUCKE B, VAERENBERGH V J, et al. Benchmarking of Different SLS/SLM Processes as Rapid Manufacturing Techniques[J]. Polymers & Moulds Innovations (PMI), 2005, 525: 1-7.
- [12] CALIGNANO F. Design Optimization of Supports for Overhanging Structures in Aluminum and Titanium Alloys by Selective Laser Melting[J]. Materials & Design, 2014, 64: 203-213.
- [13] 陈宾宾, 姜献峰, 董星涛, 等. 选区激光熔化水平悬垂面成形质量影响因素分析[J]. 应用激光, 2021, 41(4): 738-744.
- CHEN Bin-bin, JIANG Xian-feng, DONG Xing-tao, et al. Analysis of Affecting Factors of Horizontal Overhanging Surface Forming Quality by Selective Laser Melting[J]. Applied Laser, 2021, 41(4): 738-744.
- [14] 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): 190-198.
- DUAN Sheng-qin, LIU Ting-ting, LIAO Wen-he, et al. Research on Forming Quality of Overhanging round Hole by Selective Laser Melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 190-198.
- [15] 杨永强, 卢建斌, 王迪, 等. 316L 不锈钢选区激光熔化成型非水平悬垂面研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(6): 94-99.
- YANG Yong-qiang, LU Jian-bin, WANG Di, et al. A Study of 316L Stainless Steel Non-Horizontal Overhanging Surface in Selective Laser Melting[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(6): 94-99.
- [16] 卢建斌, 杨永强, 王迪, 等. 选区激光熔化成型悬垂面质量的影响因素分析[J]. 激光技术, 2011, 35(2): 148-151.
- LU Jian-bin, YANG Yong-qiang, WANG Di, et al. Analysis of Affecting Factors of Overhanging Surface Quality by Selective Laser Melting[J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 148-151.
- [17] WANG Di, WU Shi-biao, YANG Yong-qiang, et al. The Effect of a Scanning Strategy on the Residual Stress of 316L Steel Parts Fabricated by Selective Laser Melting (SLM)[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2018, 11(10): 1821.
- [18] SHIOMI M, OSAKADA K, NAKAMURA K, et al. Residual Stress within Metallic Model Made by Selective Laser Melting Process[J]. CIRP Annals, 2004, 53(1): 195-198.
- [19] 张凯, 刘婷婷, 张长东, 等. 基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 135-141.
- ZHANG Kai, LIU Ting-ting, ZHANG Chang-dong, et al. Study on Deformation Behavior in Selective Laser Melting Based on the Analysis of the Melt Pool Data[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 135-141.
- [20] 黄仁凯, 戴宁, 程筱胜. 基于选区激光熔化温度场数值模拟的支撑结构优化[J]. 中国机械工程, 2020, 31(19): 2346-2354.
- HUANG Ren-kai, DAI Ning, CHENG Xiao-sheng. Optimization of Support Structures Based on Numerical Simulation of SLM Temperature Field[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(19): 2346-2354.
- [21] 林会杰, 沈理达, 姜金辉, 等. 选区激光熔化成型悬垂结构特征模拟分析[J]. 航空学报, 2018, 39(7): 421897.
- LIN Hui-jie, SHEN Li-da, JIANG Jin-hui, et al. Simulation Analysis of Features of Overhanging Structure Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(7): 421897.