

Ti6Al4V 激光熔化沉积熔池温度场与微观组织特性

李俐群¹, 王建东^{1*}, 吴潮潮¹, 章 敏¹, 赵维刚²

¹哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²上海航天设备制造总厂, 上海 200245

摘要 采用激光熔化沉积方法制备了 Ti6Al4V 合金单墙体, 研究了工艺参数对熔池尺寸稳定性、沉积层微观组织生长特性的影响。基于有限元模拟方法, 计算了不同工艺条件下熔池的温度场及熔体的冷却速率。结果表明, 在前几层的熔化沉积过程中, 熔池尺寸会随基体散热条件的改变发生明显变化。对每层热量输入进行优化, 可以准确控制熔池尺寸的稳定性。相比激光功率, 扫描速度对沉积层定向生长特性及晶粒尺寸的影响更为显著, 随着扫描速度的改变, 沉积层组织很容易实现从柱状晶到等轴晶的改变。在本试验条件下, 当熔池冷却速率高于 135.3 °C/s 时, 方可形成定向生长的柱状晶。

关键词 激光技术; 激光熔化沉积; 钛合金; 熔池稳定性; 微观组织; 冷却速率

中图分类号 TN249; TG113

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0302009

Temperature Field of Molten Pool and Microstructure Property in Laser Melting Depositions of Ti6Al4V

Li Liqun¹, Wang Jiandong¹, Wu Chaochao¹, Zhang Min¹, Zhao Weigang²

¹State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin,

Heilongjiang 150001, China;

²Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing General Factory, Shanghai 200245, China

Abstract Ti6Al4V alloy thin wall is prepared by using laser melting deposition, and the influences of process parameters on the size stability of molten pool and microstructure growth characteristics of deposited layers are studied. The temperature field of molten pool and cooling rate of melt under different process conditions are calculated based on finite element simulation method. The results show that the molten pool size varies significantly with the change of heat dissipation condition of substrate in the process of melting deposition of the first few layers. The heat input of each layer is optimized, which can realize the accurate control of stability of molten pool size. Compared with laser power, the influence of scanning speed on directional growth characteristic and grain size of deposited layer is more remarkable. With the change of scanning speed, the microstructure of deposited layer can easily transform from columnar crystal to equiaxial crystal. Under these experimental conditions, the directional growth columnar crystal can not be formed unless the cooling rate of molten pool is higher than 135.3 °C/s.

Key words laser technology; laser melting deposition; titanium alloy; stability of molten pool; microstructure; cooling rate

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

1 引言

Ti6Al4V(6%, 4% 分别指对应组分所占的质量分数)具有优异的综合性能、较宽的温度适用范围和稳定

收稿日期: 2016-10-27; 收到修改稿日期: 2016-11-29

基金项目: 上海市重大技术装备研制专项(ZB-ZBYZ-01-14-1369)

作者简介: 李俐群(1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事金属材料激光焊接、激光熔化沉积技术的工艺与基础理论等方面的研究。E-mail: liliquan@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangjd251@126.com

的组织,广泛应用于航空、航天、船舶等领域,是制造飞机机身、机翼零件和发动机叶片的重要材料^[1-2]。激光熔化沉积技术近年来在钛合金制造领域中得到了快速发展和广泛应用^[3-4]。与传统的制造技术相比,利用激光熔化沉积技术制备 Ti6Al4V 钛合金可以实现近净成形,缩短从设计到制造的时间,并获得较好的力学性能^[5]。

激光熔化沉积过程中产生的热积累会对成形零件的尺寸稳定性、组织、性能等产生较大影响^[6]。数值模拟技术是定量分析激光沉积过程中钛合金熔池的变化规律和熔池冷却速率对微观组织结构的影响规律的重要手段之一。

目前,在激光熔化沉积中运用最多的数值模拟方法是有限元法^[7]。Qi 等^[8-9]建立了研究镍基高温合金单晶生长的激光粉末沉积三维瞬时模型,模拟所得熔覆层尺寸变化数据与试验数据高度吻合。Liu 等^[10-11]又在 2015 年研究了柱状晶等轴晶转变问题,通过准确计算温度场得到熔池温度梯度与凝固速度等参数,开发出可以准确预测沉积层组织的模型。Manvatkar 等^[12]研究了不锈钢粉末的激光增材制造的数值模拟,随着层数的增加,每一层的尺寸逐渐增大,而冷却速度逐渐减小。Zhang 等^[13-14]采用生死单元法对激光熔化沉积温度场演变进行了数值模拟,利用温度场对 SS410 不锈钢粉末成形后的组织和硬度进行了定性分析。张霜银等^[15]研究了激光增材制造过程中不同工艺参数对 Ti6Al4V 合金组织及成形的影响规律,随着激光功率的增加,柱状晶的长度变短并逐渐转变为类似等轴晶的不规则晶粒。国内外对激光熔化沉积温度场的数值模拟研究,主要是通过全面考虑沉积过程中的物理现象来提高模型的准确性,利用温度场模拟结果得到温度梯度、凝固速度等参数,进一步分析温度场与组织的相关性,但关于通过数值模拟调控激光熔化沉积过程中的热输入以保证沉积过程稳定性的研究较少。

本文重点研究了 Ti6Al4V 单墙体的激光熔化沉积过程中激光功率、扫描速度等对熔池尺寸、微观组织定向生长特性的影响规律,结合有限元数值模拟方法,计算分析了不同沉积层的温度分布特征与冷却速率,实现了对熔池尺寸稳定性、微观组织形态的调控,并基于计算结果,确定了熔池冷却速率对晶粒生长趋势及尺寸的影响规律与影响程度。

2 研究方法

2.1 试验方法

本试验采用的激光熔化沉积设备主要由 10000 W 德国 IPG 公司 YLS-10000 光纤激光器、德国 KUKA 公司 KR16-2 机器人、德国 GTV 公司 PF2/2 送粉器及德国 Precitec 公司 YC52 同轴送粉头组成。由于钛合金在高温时容易氧化,因此整个激光熔化沉积过程在充氩仓中进行,采用纯度为 99.99% (体积分数) 的氩气作为稀有保护气体。测温设备包括热电偶测温仪、电热偶焊接机、数据采集专用计算机。基体材料为热轧制态的 Ti6Al4V 钛合金板材,尺寸为 145 mm × 66 mm × 8 mm,粉末材料为 Ti6Al4V 球形粉末,粒度为 45~100 μm,如图 1 所示。主要工艺参数:激光功率为 300~800 W;扫描速度为 0.24~0.60 m/min。

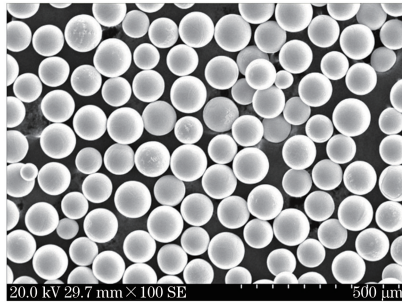


图 1 Ti6Al4V 粉末形貌

Fig. 1 Morphologies of Ti6Al4V powder

2.2 有限元模型

激光熔化沉积过程涉及传热学、冶金学和力学^[16],十分复杂。进行激光熔化沉积数值模拟时,存在一些难点。首先,模型中需考虑激光、粉末与基底两两之间的交互作用,包括粉末对激光能量的遮蔽与吸收、激光直接加热基底的能量分配以及粉末对基底的冲击所带来的热量与质量的输入等;其次,针对熔池的流动行为

与沉积层的尺寸问题,建立模型时需要适当简化或提出一些假设。本文建立的传热模型基于以下假设:1)沉积材料和基体材料均为各向同性;2)忽略熔池内部的化学反应和液体流动,但增大熔池区域内材料的导热系数,以补偿液体对流换热的影响;3)假设待加工工件的初始温度为室温;4)工件表面只有熔化没有气化。采用高级非线性有限元软件计算钛合金激光熔化沉积过程的温度场,网格的划分如图2所示,沉积层处的网格较密,远离热源位置的网格相对稀疏。沉积过程采用生死单元的处理方法。

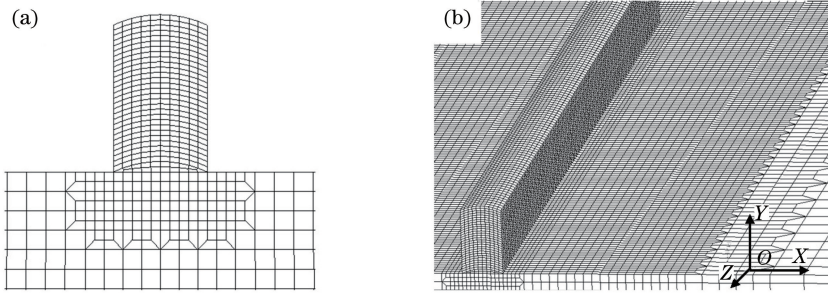


图2 Ti6Al4V沉积层有限元网格。(a)二维网格;(b)三维网格

Fig. 2 Finite element meshes of Ti6Al4V deposited layer. (a) Two-dimensional mesh; (b) three-dimensional mesh

模型中Ti6Al4V合金的热物性参数随温度变化。激光熔化沉积过程的激光功率较小,相当于激光热导焊,因此热源模型采用双椭球热源模型^[17]。

图3为计算获得的熔池内部的温度场分布与试验获得的熔池轮廓对比图,采用的激光功率为500 W,扫描速度为0.36 m/min,其中温度场云图仅对熔点以上温度进行色带标定。从图3可以看出,沉积层的宽度为3074 μm ,高度为425 μm ,基体材料的熔深为780 μm ,计算结果与熔池形貌基本相符,说明所建立的有限元模型基本可以准确预测沉积层的几何结构。

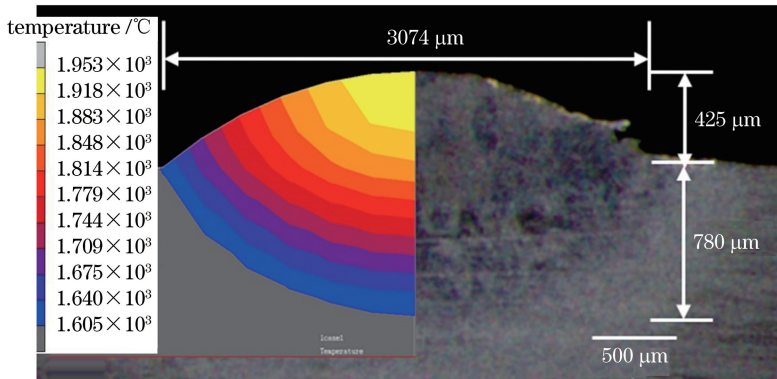


图3 单层沉积温度场计算结果与试验结果对比

Fig. 3 Comparison of calculated and experimental results of temperature field of single layer deposition

为验证模型的计算精度,在基板上表面距离沉积层中心线8 mm位置安装热电偶测量温度,与模拟计算结果进行比较,结果如图4所示。可以看出,模拟所得热循环曲线的温度变化趋势与热电偶测量结果一致,但在峰值温度上有所差异。造成差异的主要原因为:1)数值模型采用的能量分布假设与实际的激光能量分布可能稍有不同;2)模型中没有考虑当改变不同沉积层间的激光扫描轨迹时,激光的加速与减速以及停歇时间;3)模型中用到的材料物理性能参数与实际的材料参数有所不同。经过对拟合曲线的分析,得出模拟结果相对测量结果的平均偏差约为11.9%,计算结果准确性较好。

3 结果与讨论

3.1 Ti6Al4V单墙体激光熔化沉积过程熔池尺寸的控制

钛合金单墙体的激光逐层沉积过程,开始时在基体散热、热积累的共同作用下,熔池的温度、尺寸都不稳定,随着层数堆积到一定高度时方可基本达到稳定。因此,在前几层的沉积过程中,必须通过调节激光热输

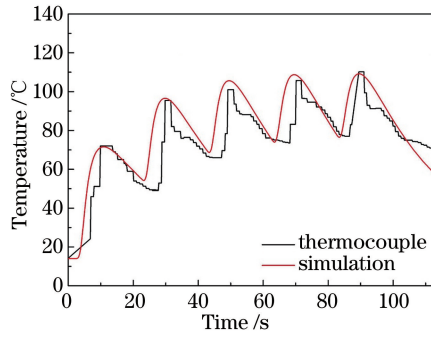


图 4 激光熔化沉积温度计算值与测量值比较

Fig. 4 Comparison of calculated and experimental results of temperature in laser melting deposition

来控制熔池尺寸的稳定性。

图 5 为 Ti6Al4V 合金沉积第 1 层与第 9 层时的熔池温度场分布特性,沉积过程激光功率(500 W)与扫描速度(0.36 m/min)保持不变。可以看出,在多层激光熔化沉积过程中,激光会对前一沉积层产生重熔作用,而且熔池的尺寸会随着沉积层的增加而有所增大。

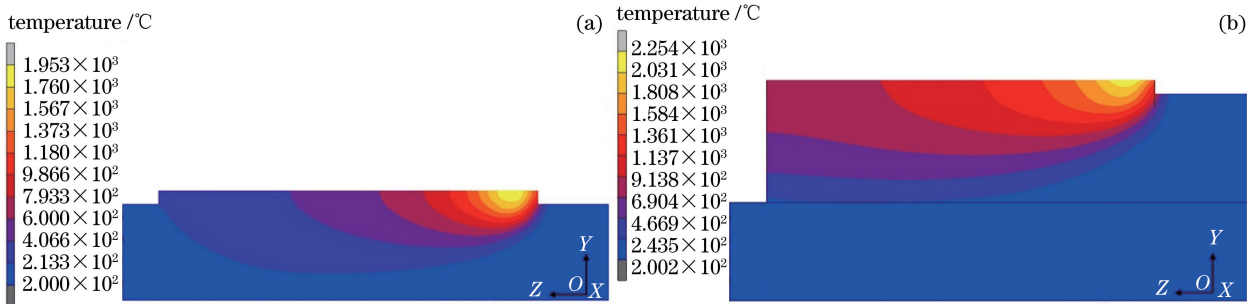


图 5 激光沉积过程中温度云图。(a)第一层温度云图;(b)第九层温度云图

Fig. 5 Temperature cloud pictures in the process of laser deposition. (a) 1st layer; (b) 9th layer

基于有限元模拟计算结果,获得了各层的峰值温度,如图 6 所示。结果表明,随着沉积层的增高,峰值温度逐渐升高,在第 5 层后达到稳定,基本保持在 2230 °C 左右,第一层的峰值温度与达到稳定后的熔池峰值温度相差 300 °C 左右。

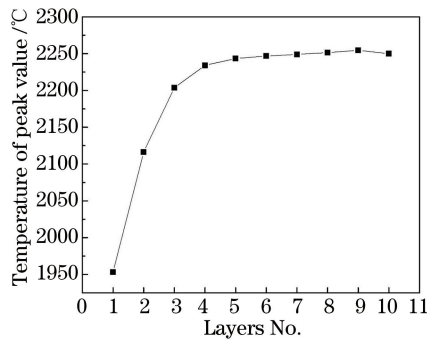


图 6 激光沉积过程各层的峰值温度

Fig. 6 Peak temperature of each layer in the process of laser deposition

基于有限元模拟计算结果,在前 5 层可通过逐层减少激光功率来控制熔池尺寸的稳定性。图 7 为激光功率调控前后获得的各沉积层的熔池长度和深度。可以看出,当激光功率维持不变时,熔池长度由第 1 层的 3.6 mm 逐渐增大到第 5 层的 6.0 mm,增大约 67%;熔池深度由第 1 层的 0.78 mm 逐渐增大到第 5 层的 1.25 mm,增大约 60%。之后两者都趋于稳定,这个趋势与沉积层峰值温度变化趋势一致。在对激光功率进行调控后,熔池长度和深度均仅在 10% 以内波动,保证了钛合金单墙体形状尺寸的一致性,也显示了模拟计算的准确性。

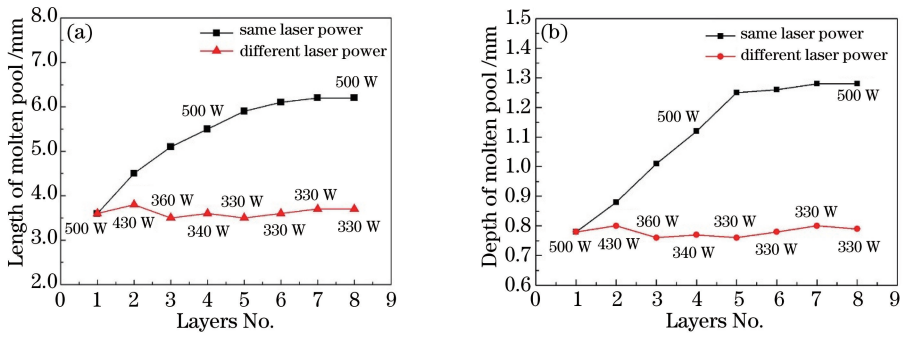


图 7 激光熔化沉积过程中每层的熔池尺寸。(a)长度;(b)深度

Fig. 7 Molten pool size of each layer in the process of laser melting deposition. (a) Length; (b) depth

3.2 Ti6Al4V 沉积层微观组织生长规律

激光熔化沉积 Ti6Al4V 沉积层的微观组织结构与定向生长特性对熔体的冷却速度非常敏感,本试验研究了不同工艺条件下获得的沉积层微观组织形貌,并基于有限元方法计算了不同工艺条件下熔池的冷却速度,旨在对工艺条件、冷却速度、组织结构之间的相关性进行定量描述。

3.2.1 激光功率对 Ti6Al4V 沉积层组织形态的影响

采用激光熔化沉积方法制备了典型的 Ti6Al4V 单墙体样件,并分析了其微观组织结构,如图 8 所示。可以看出,激光功率的变化对沉积层中 Ti6Al4V 组织定向生长的基本特性影响不大,但形成的柱状晶尺寸与尺度均匀性有较大的差异。随着激光功率的增加,平均晶粒宽度增大,从 300 W 时的 330 μm 左右增加到 800 W 时 870 μm 左右。

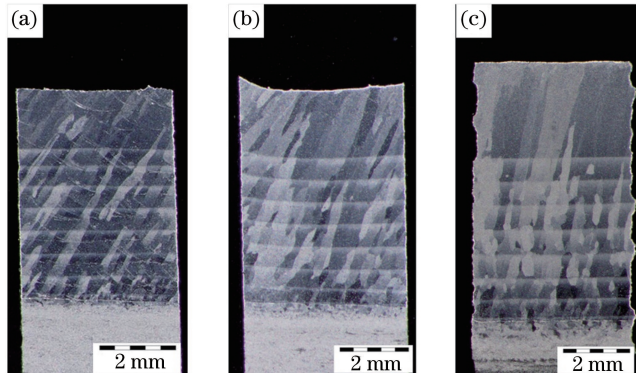


图 8 激光功率对 Ti6Al4V 沉积层微观组织结构的影响。(a) 300 W; (b) 500 W; (c) 800 W

Fig. 8 Influence of laser power on microstructure of Ti6Al4V deposited layer. (a) 300 W; (b) 500 W; (c) 800 W

计算了各沉积层相同位置处从熔点温度冷却到 500 $^{\circ}\text{C}$ 的冷却速度,如图 9 所示。从图 9 可知,沉积层越高,沉积层的冷却速度下降越快,直到第 9 层以上才基本趋于稳定。第 1 层的散热条件好,可以直接向整个

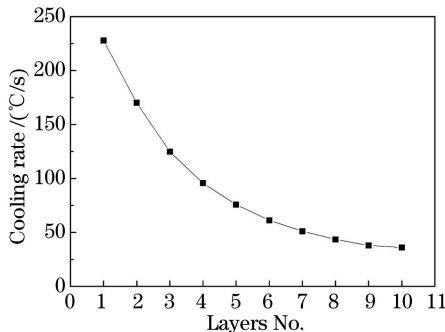


图 9 Ti6Al4V 沉积层各层的冷却速度

Fig. 9 Cooling rate of each layer of Ti6Al4V deposited layer

基板各个方向传热,散热速度较快,熔池冷却速度达 229 °C/s,到第 9 层以上,散热条件基本稳定,冷却速度不足 50 °C/s。

为了研究激光功率对 Ti6Al4V 沉积层微观组织结构影响的内在规律,以不同激光功率下沉积层第 5 层中心处为对象,计算其冷却速度,结果如表 1 所示。

表 1 不同激光功率下第 5 层沉积层的冷却速度

Table 1 Cooling rate of 5th deposited layer under different laser powers

Laser power /W	Scanning speed /(m/min)	Cooling rate /(°C/s)
300	0.36	291.5
400	0.36	245.2
500	0.36	195.7
800	0.36	160.5

由表 1 可知,随着激光功率的增加,冷却速度降低,热积累增大,此时温度梯度 G 必然较小,晶粒宽度 λ 与扫描速度 V 和温度梯度 G 存在近似关系^[18],即

$$\lambda \propto G^{-n} V^{-m}, \quad (1)$$

式中 m, n 为与材料有关的系数,即当温度梯度 G 降低而扫描速度不变时,晶粒宽度 λ 增大。因此,随着激光功率的增加,晶粒宽度增大。

3.2.2 扫描速度对 Ti6Al4V 沉积层组织形态的影响

与激光功率相比,扫描速度对沉积层微观组织结构的影响要明显得多,如图 10 所示,随着激光扫描速度的降低,柱状晶的宽度也逐渐增加。当扫描速度降低到 0.24 m/min 时,柱状晶已经难以形成,微观组织主要为细小的等轴晶。

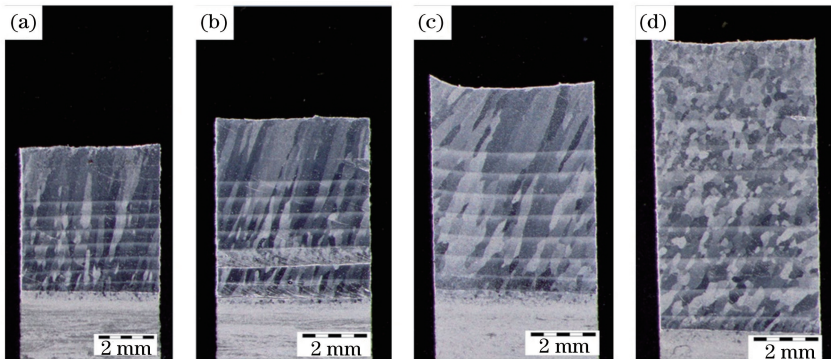


图 10 扫描速度对沉积层微观组织结构的影响。(a) 0.6 m/min; (b) 0.48 m/min; (c) 0.36 m/min; (d) 0.24 m/min

Fig. 10 Influence of scanning speed on microstructure of deposited layer. (a) 0.6 m/min; (b) 0.48 m/min;

(c) 0.36 m/min; (d) 0.24 m/min

此现象也可以用冷却速度的变化来解释,不同扫描速度下的冷却速度如表 2 所示。由(1)式可知,随着激光扫描速度的降低,热积累增大,温度梯度与冷却速度降低,从而柱状晶的宽度也逐渐增大。而当扫描速度进一步降低时,柱状晶消失,形成细小的等轴晶,这是由于此时熔池附近整体冷却速度和温度梯度很小,熔池各处的形核条件接近一致,在固-液界面和熔池内部同步形核并长大,形成了形状几乎对称的等轴晶^[19]。因此,激光熔化沉积若需要得到外延生长的柱状晶,则不能使用太小的扫描速度,当冷却速度低于 135.3 °C/s时,容易形成等轴晶。

表 2 不同扫描速度下的冷却速度

Table 2 Cooling rate under different scanning speeds

Scanning speed /(m/min)	Laser power /W	Cooling rate /(°C/s)
0.24	500	135.3
0.36	500	195.7
0.48	500	267.6
0.60	500	403.1

4 结 论

采用激光熔化沉积技术制备了 Ti6Al4V 合金单墙体,研究发现受基体散热条件与热积累对沉积层初始 5 层的影响明显,熔池长度、深度与温度逐层增大,与第 1 层相比,达到稳定后的熔池长度增幅约为 67%,熔池深度增幅约为 60%,熔池峰值温度增幅约为 300 °C。基于有限元模拟方法对熔池温度场的预测,优化了各层激光功率,使得每层熔池尺寸波动不高于 10%,实现了对熔池尺寸稳定性的有效控制。激光熔化沉积获得的 Ti6Al4V 沉积层微观组织结构多为外延生长的柱状晶,与激光功率相比,扫描速度对晶粒结构与尺寸的影响更为明显。当沉积层冷却速度过低时,容易形成等轴晶,因此,如需得到外延生长柱状晶,必须控制冷却速度不低于 135.3 °C/s。

参 考 文 献

- [1] Xue Lei, Chen Jing, Lin Xin, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser rapid repaired Ti-6Al-4V alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(6): 989-993.
薛蕾, 陈静, 林鑫, 等. 激光快速修复 Ti-6Al-4V 合金的显微组织与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(6): 989-993.
- [2] Ruan Xueqian, Lin Xin, Huang Chunping, *et al.* Ultrasonic nondestructive testing of hole type defects in laser solid forming TC4 alloy [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1203001.
阮雪茜, 林鑫, 黄春平, 等. TC4 合金激光立体成形孔洞类缺陷的超声检测[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203001.
- [3] Chen Yiqiang, Liu Yantao, Tang Yangjie, *et al.* Microscopic structure and tensile property of laser melting deposited TA15/Ti2AlNb dual alloy [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(8): 0802010.
陈以强, 刘彦涛, 唐杨杰, 等. 激光熔化沉积 TA15/Ti2AlNb 双合金显微组织及拉伸性能[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802010.
- [4] Li Deying, Zhang Jian, Zhao Longzhi, *et al.* Study on the residual stress of SiC_p/Cu gradient coating by laser deposited [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1206002.
李德英, 张坚, 赵龙志, 等. 激光沉积制备 SiC_p/Cu 梯度涂层残余应力分析[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1206002.
- [5] Huang Weidong. Laser solid forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 2-4.
黄卫东. 激光立体成形 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 2-4.
- [6] Qian L, Mei J, Liang J, *et al.* Influence of position and laser power on thermal history and microstructure of direct laser fabricated Ti-6Al-4V samples [J]. Materials Science & Technology, 2005, 21(5): 597-605.
- [7] Wang Xucheng, Shao min. The basic principle of the finite element method and numerical method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 5-8.
王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 5-8.
- [8] Qi H, Mazumder J, Ki H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(2): 024903.
- [9] Liu Z Y, Qi H. Numerical simulation of transport phenomena for a double-layer laser powder deposition of single-crystal superalloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(4): 1903-1915.
- [10] Liu Z Y, Qi H. Effects of processing parameters on crystal growth and microstructure formation in laser powder deposition of single-crystal superalloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 19-27.
- [11] Liu Z Y, Qi H. Effects of substrate crystallographic orientations on crystal growth and microstructure formation in laser powder deposition of nickel-based superalloy [J]. Acta Materialia, 2015, 87: 248-258.
- [12] Manvatkar V, De A, Debroy T. Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(12): 124905.
- [13] Zhang Y J, Yu G, He X L, *et al.* Numerical and experimental investigation of multilayer SS410 thin wall built by laser direct metal deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 106-112.
- [14] Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.* Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203007.
刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟 [J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203007.

- [15] Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, *et al.* Influence of process parameters on structure and forming quality of laser rapid forming TC4 titanium alloy after laser rapid forming processing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(10): 1839-1843.
张霜银, 林 鑫, 陈 静, 等. 工艺参数对激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(10): 1839-1843.
- [16] Fu Yao. The numerical simulation of the temperature field and stress field of the laser powder deposition[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007: 18-22.
付 焱. 激光粉末沉积温度场和应力场的数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2007: 18-22.
- [17] Yang Jianguo. Finite element analysis foundation of welding structure and realization by MSC. Marc[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2012: 18-20.
杨建国. 焊接结构有限元分析基础及 MSC. Marc 实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 18-20.
- [18] Hunt J D. Solidification and casting of metals[M]. London: The Metal Society Press, 1979: 18-30.
- [19] Zhang Min. Research on laser additive manufacturing characteristics of titanium alloy with powder and wire[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 20-22.
章 敏. 送粉式和送丝式的钛合金激光增材制造特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 20-22.