

单晶高温合金 V 槽的激光修复工艺研究

罗 登¹ 路媛媛² 郭溪溪¹ 杜锦铮¹ 刘德健¹

¹华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

²湖北工业大学工程技术学院, 湖北 武汉 430064

摘要 研究了单晶高温合金的修复工艺对枝晶生长的影响,分析了不同底角 V 形槽对激光修复枝晶生长的影响。通过在 DD5 试样上进行激光熔覆来确定合适的工艺参数,发现减小热输入有利于扩大定向枝晶区域。DD5 的搭接实验结果表明 30% 的搭接率有利于减小搭接区域的杂晶。选用合适的工艺参数对 DD6 试样的不同底角 V 槽进行修复。结果表明,V 形槽底角在 60°~120° 的范围内变化时,底部枝晶生长方向变化不大,但侧壁附近杂晶会随着熔池温度的梯度方向与最优生长方向夹角的增大而减小。当 V 槽底角为 120° 时,侧壁区域不产生杂晶。

关键词 激光技术;单晶高温合金;激光修复;最优生长方向;枝晶生长;V 槽

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0503001

Laser Repairing Process of V-Groove in Single-Crystal Superalloy

Luo Deng¹ Lu Yuanyuan² Guo Xixi¹ Du Jinzheng¹ Liu Dejian¹

¹School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²College of Engineering and Technology, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430064, China

Abstract The effect of laser repairing process of single-crystal superalloy on the dendrites growth, and the effect of bottom angle of V-groove on the dendrites growth are analyzed. The proper process is determined through laser cladding on the DD5 sample, and it is revealed that the decrease of heat input is beneficial to broaden the zone of directional dendrites. By overlapping experiment on the DD5 sample, it is found that the overlapping rate of 30% benefits the consistency of the dendrites growth in cladding region. With appropriate process parameters, V-grooves of different bottom angles in the DD6 sample are repaired. The results show that changes in the bottom angle of the V-groove from 60° to 120° have little effect on the dendrites growth direction at the bottom. The number of stray grains near the side wall decreases as the angle between the direction of molten pool temperature gradient and the optimal growth direction increases. The stray grains are eliminated in the region of side wall when the bottom angle is 120°.

Key words laser technique; single-crystal superalloy; laser repairing; optimal growth direction; dendrites growth; V-groove

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 140.3390; 160.3900

1 引 言

先进航空发动机涡轮叶片以镍基单晶高温合金为材料,由于叶片结构尺寸复杂,铸造过程中易产生杂晶和裂纹等缺陷,使得我国单晶叶片的铸造成品率低,生产成本低^[1-3]。激光熔覆技术具有局部可加热、热影响区域小等特点,通过调整工艺参数可以控制激光熔池的温度梯度和冷却速度,从而控制枝晶的生长,因此可利用激光熔覆技术对叶片铸造过程中产生的局部缺陷进行修复。

20 世纪 90 年代,Gäumann 等^[4-5]针对激光熔池枝晶生长机理进行了深入研究,提出了单晶高温合金柱

收稿日期: 2015-11-04; 收到修改稿日期: 2016-01-08

作者简介: 罗 登(1991—),男,硕士研究生,主要从事单晶高温合金激光增材制造方面的研究。

E-mail: maple_night@163.com

导师简介: 刘德健(1978—),男,博士,副教授,主要从事钛合金激光焊接、镍基超合金激光焊接及修复及金属材料激光表面强化等方面的研究。E-mail: djliu@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

状晶-等轴晶转变模型(CET)来描述激光焊接及熔覆过程中晶体的生长及分布。在此基础上,国内外学者相继对激光熔覆单晶的机理与工艺进行了研究,取得了巨大突破。陈永城等^[6]认为激光熔池顶部等轴晶的形成有两方面原因:一是温度梯度和凝固速度的变化导致成分的过冷程度增加,二是顶部多向散热。针对多层熔覆工艺参数,戴德平等^[7]通过计算机模拟研究了 Inconel718 激光熔覆过程中的温度场和应力场,刘朝阳等^[8-9]利用计算机模拟研究了双层熔覆的温度梯度和熔池形状,模拟结果与实验结果吻合较好。Qi 等^[10]利用数值模拟与实验相结合的方法,建立了搭接率与熔覆区域枝晶取向的关系,有效减小了杂晶的形成倾向。国内外学者也对修复区域的性能进行了研究^[11-13],齐宝路等^[14]证明了 DZ125L 熔覆件的常温力学性能满足国家标准。

出现在单晶叶片榫板较浅部位的杂晶与裂纹,在机械打磨后可通过激光在平缓的表面进行修复,而出现在叶片深处的缺陷,需要进行开槽修复,国内外尚未有这方面的研究。在榫板上开 V 形槽,槽壁法向与 [001] 方向成一定角度, V 槽侧壁相当于取向偏离 [001] 方向的母材。在 V 槽修复时,槽壁以及底面会影响熔池的散热从而影响激光熔池的温度梯度分布,因此有必要对单晶开槽修复这一情况进行研究。

本文以我国自主研制的第二代镍基单晶高温合金 DD5 和 DD6 为材料,研究单晶高温合金 V 形槽修复工艺。通过单层单道实验确定了单晶激光熔覆合适的工艺参数,并通过单晶熔覆搭接实验确定了修复工艺的合适搭接率。最后对不同底角 V 形槽进行了修复实验,研究了不同角度底角对修复效果的影响,分析了不同角度的侧壁对熔池的影响,为后续改进单晶填槽修复工艺提供了一定参考。

2 实验方案

实验设备由 IPG YLS-6000 光纤激光器, KUKA 机器人以及送粉系统(送粉器 DPSF-2 和四通路送粉机)组成,基板材料是单晶高温合金 DD5 和 DD6,熔覆粉末为 GH738,粒径为 45~105 μm,通过同步送粉方式进行实验,粉末与基板的化学成分如表 1 所示。

表 1 基材和粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Material compositions of the substrates and powder (mass fraction, %)

Material	Ni	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Re	C
DD5	Bal.	7.0	7.5	5.0	6.2	—	1.5	3.0	0.072
DD6	Bal.	4.3	9.0	8.0	5.6	—	2.0	2.0	0.006
GH738	Bal.	18.0~21.0	12.0~15.0	—	1.2~1.6	2.75~3.25	3.5~5.0	—	0.03~0.1

实验内容包括单层单道熔覆实验、单层两道熔覆搭接实验和 V 形槽填槽修复实验,如图 1 所示。单层单道熔覆实验、熔覆搭接实验的基体为尺寸 $\Phi 16 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 DD5 和 DD6 圆柱块。V 形槽填槽修复实验在尺寸 $\Phi 16 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 DD6 圆柱块上进行, V 槽深度为 1.5 mm,底角 α 分别为 60° 、 90° 和 120° 。实验前用砂纸对基材表面进行打磨,再用丙酮清洗以保证基材表面清洁。实验后将线切割的试样镶嵌成金相试样,在粗磨、精磨和抛光后,用甘油、盐酸和硝酸配成的腐蚀剂进行腐蚀,使用金相显微镜 200MAT 观察试样的金相组织。为判断熔覆层的取向,用质量分数为 10% 的高氯酸酒精溶液对试样电解抛光后,利用场发射扫描电子显微镜 Sirion 200 对试样进行电子背向散射衍射(EBSD)分析。

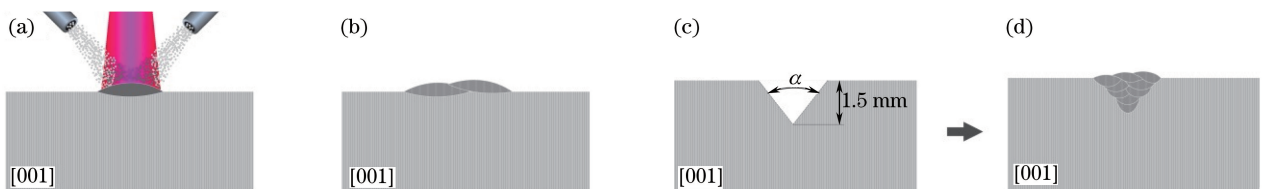


图 1 实验示意图。(a) 单道单层熔覆; (b) 单层两道熔覆; (c) V 形槽填槽修复实验

Fig. 1 Sketch maps of experiments. (a) Single-track single-layer cladding; (b) double-track single-layer cladding; (c) V-groove repairing experiment

3 实验结果与分析

3.1 单道工艺参数分析

在单晶基材上进行激光熔覆时,为得到单晶组织,必须保证熔池中枝晶的外延生长以及熔池组织生长满足枝晶定向生长的条件。Kurz 等^[15]研究发现,当满足公式 $G^n/V > K$ 时,熔覆层可以形成完全的柱状晶组织,式中 G 为温度梯度, V 为凝固速率, n 和 K 为与合金有关的常数。通过调整工艺参数可以控制熔池中的温度梯度和凝固速率,从而形成凝固组织。

激光熔覆涉及到的工艺参数为平均激光功率密度 I 、扫描速率 v 和送粉量 m_f 。 I 的计算公式为

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi(D/2)^2} = \frac{4P}{\pi D^2}, \quad (1)$$

式中 P 为激光功率,单位为 W; S 为光斑面积,单位为 mm^2 ; D 为光斑直径,单位为 mm。

用不同的工艺参数进行 DD5 单层单道激光熔覆实验,图 2 为 $v=0.6 \text{ m/min}$ 和 $m_f=8.6 \text{ g/min}$, I 值不同时单晶 DD5 母材熔覆层的金相图,图中蓝线是定向枝晶与杂晶的分界线,蓝线以下是定向枝晶区,蓝线以上是顶端杂晶区。随着激光的平均功率密度由 111 W/mm^2 增加到 177 W/mm^2 时,熔池熔覆层中定向枝晶区域缩小,顶端杂晶区域的厚度增大,继续增加平均功率密度至 243 W/mm^2 会导致熔化的粉末量增多,熔覆层厚度增加,同时熔池过热,影响熔池顶端最后凝固区域的温度梯度,导致杂晶倾向增大。从图 2 中可以明显看出随着激光功率密度的增加,熔覆层的杂晶厚度占整个熔覆层厚度的比值增大。

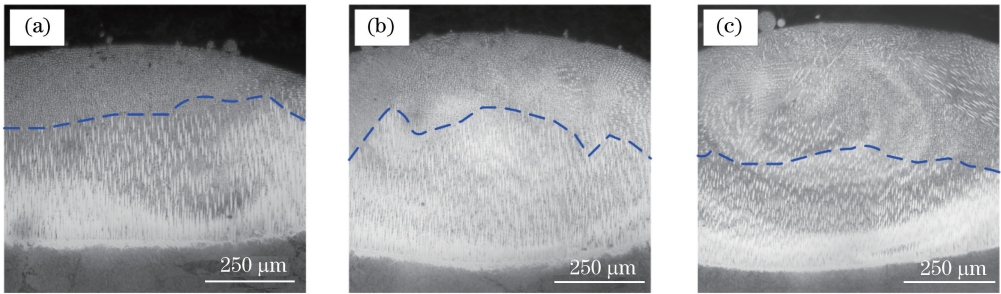


图 2 不同激光功率的局部熔覆层金相图。(a) $I=111 \text{ W/mm}^2$; (b) $I=177 \text{ W/mm}^2$; (c) $I=243 \text{ W/mm}^2$

Fig. 2 Metallography images of local parts of cladding cross sections with different average laser power densities.

(a) $I=111 \text{ W/mm}^2$; (b) $I=177 \text{ W/mm}^2$; (c) $I=243 \text{ W/mm}^2$

图 3 是当 $I=133 \text{ W/mm}^2$ (即 $P=600 \text{ W}$) 时,相同送粉量不同扫描速率下的熔覆层。扫描速率为 0.4 m/min 时,熔覆层大部分区域为杂晶,蓝线以下的定向枝晶区减小。主要是由于速率减小,单位长度的热输入量增大,熔池中心处于过热的区域增大,导致杂晶增多。扫描速率增大至 0.6 m/min 时,熔池中定向枝晶区域占整个熔覆层的比例增大。扫描速率提高到 0.8 m/min 时,熔覆层厚度减小,这是因为提高扫描速率,熔池单位长度吸收的热量减小,粉末和基体熔化量减小,从而导致熔覆层厚度减小。图 3(c) 中的定向枝晶区域比图 3(b) 中的小,这是由于扫描速率提高,熔池的凝固速率增大,导致了部分区域的 G^n/V 值减小,从而产生杂晶。

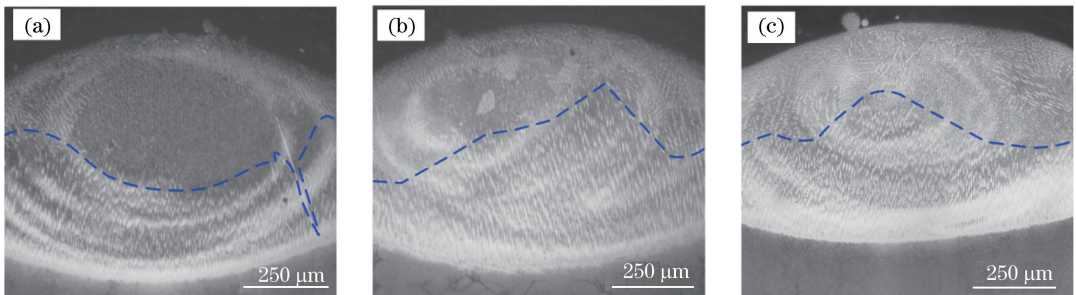


图 3 不同扫描速率的局部熔覆层金相图。(a) $v=0.4 \text{ m/min}$; (b) $v=0.6 \text{ m/min}$; (c) $v=0.8 \text{ m/min}$

Fig. 3 Metallography images of local parts of cladding cross sections with different scanning speeds.

(a) $v=0.4 \text{ m/min}$; (b) $v=0.6 \text{ m/min}$; (c) $v=0.8 \text{ m/min}$

采用优化工艺进行 DD6 母材单层单道熔覆实验得到的电子背散射衍射结果如图 4 所示,使用的激光平均功率密度为 77 W/mm^2 。测得熔覆层熔宽为 1.71 mm ,余高为 0.31 mm ,熔深为 0.19 mm ,母材熔化区域边缘处切线与水平方向的夹角最大为 32.4° ,小于 45° ,熔深与熔宽的比值为 0.11 ,满足 Liu 等^[16]研究发现的熔池内枝晶竖直向上的生长条件。基体与熔覆层结合良好,熔覆层内的大部分区域为定向枝晶,一次枝晶间距为 $9\sim 15 \mu\text{m}$ 。单道熔覆区域周围的母材没有明显的组织变化,表明对母材的热影响区域小。从图 4 可以看出熔覆层大部分区域取向与母材一致,顶端有一层杂晶。顶端杂晶层可以在下一层熔覆时重熔,形成外延枝晶。因此,选择合适的工艺参数可以实现单晶的修复。

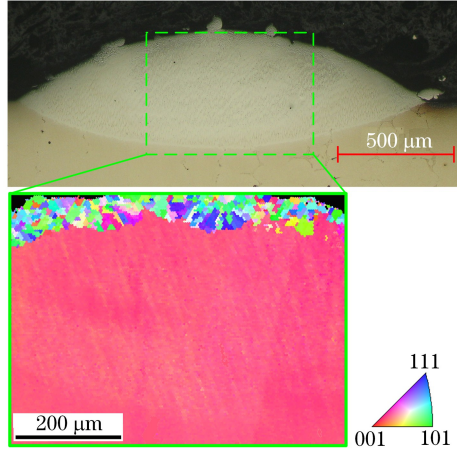


图 4 单道熔覆的取向成像图

Fig. 4 Orientation image of single-track cladding

3.2 搭接区域枝晶生长研究

进行 V 形槽单晶修复时,由于单道不能将槽坑完全填满,需要在 V 槽中进行多层多道熔覆,两道熔覆层的搭接率会影响搭接区域枝晶生长,因此对单晶修复搭接率的研究是十分必要的。

采用优化的工艺参数进行单层两道搭接实验,图 5 是不同搭接率 η 的 DD5 熔覆搭接横截面。从图中可以看出,在其他工艺参数相同的情况下,随着搭接率在 $30\% \sim 50\%$ 内变化,搭接区域的枝晶均外延生长,取向变化不大,但在搭接区域边缘容易产生杂晶。搭接率为 30% 时,边缘与上一道熔覆层顶端接触较少,搭接区域边缘无杂晶,整个搭接区域内枝晶取向保持一致,如图 5(a) 所示;当搭接率提高到 40% 时,从图 5(b) 中可以看出在搭接区域大部分区域枝晶取向一致,在搭接区域边缘产生取向混乱的杂晶;当搭接率进一步提高到 50% 时,处于搭接区域边缘的杂晶面积进一步扩大,如图 5(c) 所示。据此可得出单晶高温合金填槽修复较合适的搭接率为 30% 。

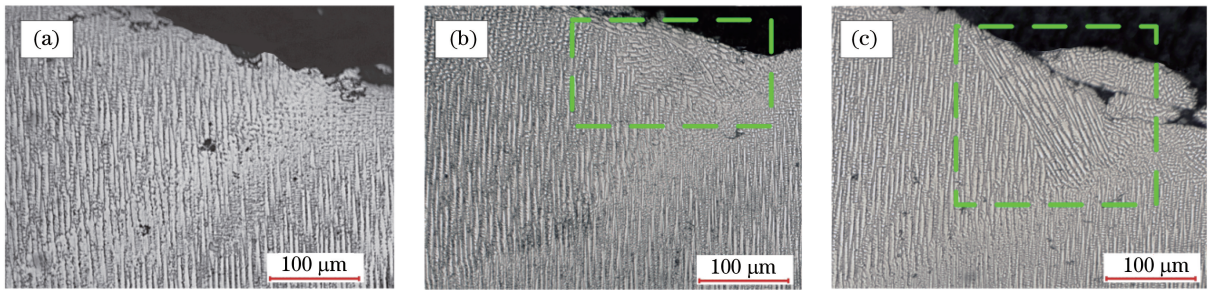


图 5 不同搭接率的激光熔覆横截面。(a) $\eta=30\%$; (b) $\eta=40\%$; (c) $\eta=50\%$

Fig. 5 Laser cladding cross sections with different overlapping rates. (a) $\eta=30\%$; (b) $\eta=40\%$; (c) $\eta=50\%$

3.3 V 形槽修复

对 DD6 单晶块上的 V 形槽进行激光修复,采用的激光功率为 $400\sim 800 \text{ W}$,扫描速率为 $0.4\sim 1 \text{ m/min}$,送粉量为 $7.4\sim 8 \text{ g/min}$,搭接率为 30% ,如图 6 所示。为避免多层熔覆层过程中的上一层热量对下一层影响^[17-19],本实验每道熔覆间隔 2 min 的冷却时间。从图 6 中可以看出三个不同底角的 V 槽区域被填满,

但在底角为 60° 的 V 形槽修复结果中可以看到填充区域中部的明显裂纹, 裂纹较长, 贯穿了四层熔覆层。这是由于底角较小时, 两侧的拘束度较大, 而单晶高温合金的热裂纹倾向大^[20-21], 这就造成了较大裂纹的出现。填充区域周围的母材与其他区域母材颜色有差异, 深度为 $30\sim 58\ \mu\text{m}$, 这是热影响区。它比单道熔覆的热影响区更加明显, 这是填充区域多次熔覆导致的多次热循环过程造成的, 这部分区域的形成不涉及熔化或塑性变形, 没有导致热影响区的取向发生变化。

不同底角的槽侧壁相当于取向偏离 $[001]$ 方向的基材, 熔池的温度梯度方向与熔池法线方向一致, 择优生长方向与熔池温度梯度方向之间偏差的角度决定了熔池枝晶的生长情况。

β 为母材取向偏离 $[001]$ 方向的角度, V 槽底角 α 分别为 60° 、 90° 和 120° 的侧壁 β 值分别为 60° 、 45° 和 30° 。对 V 槽进行修复时, V 槽底角不同导致侧壁对激光能量的吸收有差异。假设单位面积的激光能量密度为 I , 侧壁与水平方向所成的角度为 β , 则单位面积侧壁吸收的能量为 $I \cdot \cos \beta$, 因此 V 槽 β 值越小, 单位面积侧壁吸收的激光能量就越大, 进而侧壁熔化量增大, 稀释率变大, 从而影响熔池底面形态。激光熔池底面平缓的形态有利于单晶的生长。

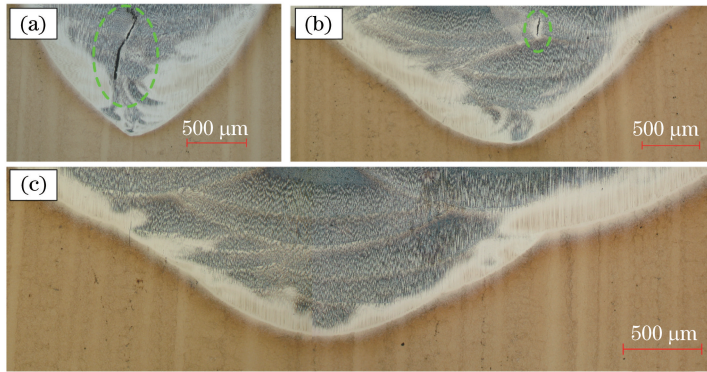


图 6 不同 α 值的 V 形槽修复的横截面。(a) $\alpha=60^\circ$; (b) $\alpha=90^\circ$; (c) $\alpha=120^\circ$

Fig. 6 Cross sections of V-shape grooves repairing with different values of α . (a) $\alpha=60^\circ$; (b) $\alpha=90^\circ$; (c) $\alpha=120^\circ$

选取 V 槽底部进行分析, 图 7 是不同底角 V 形槽的底面金相图。从图中可以看出, 虽然底角 α 不同, 但底面枝晶均保持竖直向上的生长。图 7(a) 中虽然枝晶取向一致, 但中心线处枝晶形态差异较大。图 7(b) 中右侧出现了与竖直方向夹角为 8.7° 的枝晶, 而其余枝晶取向一致, 这是由偶然因素引起的, 并未影响其他枝晶的生长。图 7(c) 中 120° V 槽底面尖角处熔合线接近弧形, 底部平缓, 促进了枝晶的定向生长。

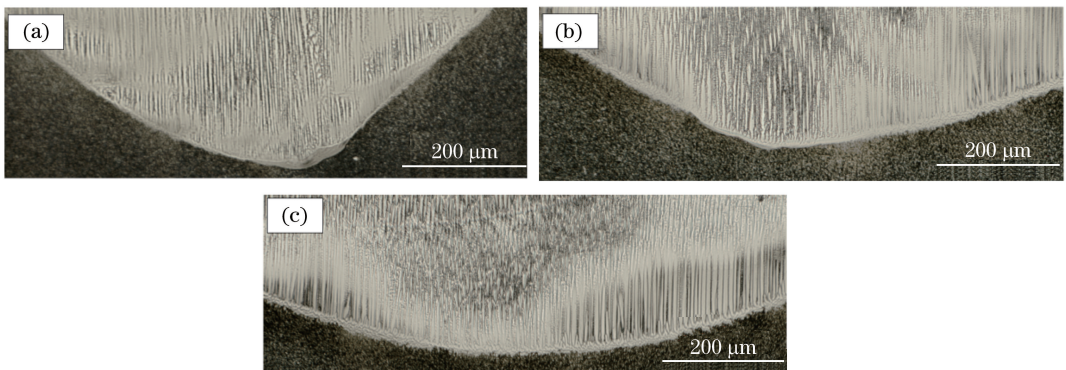


图 7 不同底角 V 槽底部金相图。(a) $\alpha=60^\circ$; (b) $\alpha=90^\circ$; (c) $\alpha=120^\circ$

Fig. 7 Metallography images of the V-groove bottom with different angles. (a) $\alpha=60^\circ$; (b) $\alpha=90^\circ$; (c) $\alpha=120^\circ$

在 V 形槽底端, 尖角两侧受到激光热作用被熔化, 熔化后 V 槽底部两侧熔合线的夹角大于 V 槽底角。经过测量, 60° 和 90° 的 V 槽底面熔合线所成的角度分别约为 130° 和 148° , 而底角 120° 的 V 槽底面形状近似于弧形。这是由于随着底角的减小, 侧壁单位面积的激光能量增大, 从而导致母材熔化量增大, 稀释率变大, 底面变得平缓, 这有利于温度梯度与择优生长方向保持一致。因此虽然底角不同, 但在相同的工艺参数下, 激光能量均可作用于母材使得熔池底面平缓, 有利于枝晶的外延生长。

修复区域靠近侧壁时,会影响熔池的温度梯度分布,枝晶最优生长方向偏离熔池温度梯度的夹角越小,枝晶生长方向越倾向于外延[001]方向生长。当偏离角度超过一定值时,容易产生杂晶。图8是不同底角V槽侧壁区域的金相图。母材熔化导致熔池中温度梯度方向与侧壁法线方向不一致,当底角 α 是 60° 时,杂晶区域处熔池法线方向与[001]方向夹角为 51.34° ,侧壁出现了取向不一致的枝晶,如图8(a)所示,这是由于熔池温度梯度方向与最优生长方向夹角大,导致了杂晶产生。随着底角 α 增大到 90° 时,如图8(b)所示,底部大部分枝晶取向保持一致,但在侧壁部位仍有部分枝晶取向发生偏差,且杂晶区域面积小于 $\alpha=60^\circ$ 时的杂晶区域面积。该区域熔池法线方向与[001]方向的最大偏差为 43.19° 。当底角 α 为 120° 时,修复区域内的枝晶取向保持一致,如图8(c)所示,经过测量,熔池法线方向与最优生长方向夹角最大为 29.96° ,侧壁区域熔覆层枝晶生长保持竖直向上,促进了枝晶定向生长。因此V槽底角的增大有利于杂晶倾向的减小。

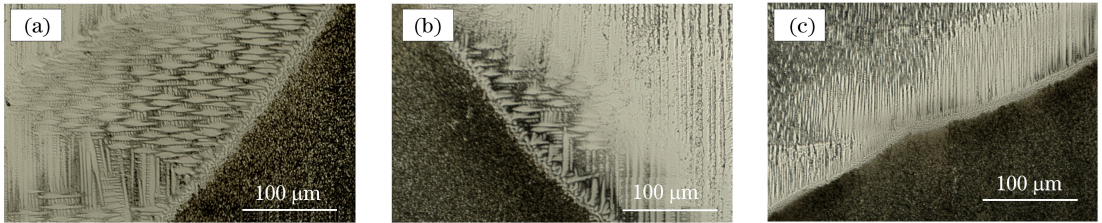


图8 不同底角V槽侧壁区域金相图。(a) $\alpha=60^\circ$; (b) $\alpha=90^\circ$; (c) $\alpha=120^\circ$

Fig. 8 Metallography images of the V-groove side wall with different angles. (a) $\alpha=60^\circ$; (b) $\alpha=90^\circ$; (c) $\alpha=120^\circ$

4 结 论

1) 通过在DD5上进行单层两道搭接熔覆实验,发现了在30%~50%的搭接率范围内,较小的搭接率有利于减小搭接区域杂晶生长。在30%的搭接率下,搭接区域枝晶取向一致;

2) 当激光平均功率密度为 $77\sim 111\text{ W/mm}^2$,扫描速率为 $0.4\sim 1\text{ m/min}$,送粉量为 $7.4\sim 8\text{ g/min}$ 时,将底部区域熔化造成了V形槽底面的熔池底部平缓,这有利于枝晶生长取向一致。因此在 $60^\circ\sim 120^\circ$ 范围内,V形槽底角大小对底部尖角处枝晶生长取向的影响小;

3) 在 $60^\circ\sim 120^\circ$ 范围内,V形槽底角越大,侧壁区域杂晶倾向越小。底角为 120° 时,修复区域的枝晶取向一致。

参 考 文 献

- Sun Li. Engine MROs gearing up for new model[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2014, (6): 34-36.
孙立. 发动机维修市场前景广阔[J]. 航空维修工程, 2014, (6): 34-36.
- Bai Ruijin, Zhang Ligu. Turbine blade repairing and its market analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, 12(7): 37-40.
白瑞金, 张利国. 涡轮叶片修复及其市场分析[J]. 航空制造技术, 2002, 12(7): 37-40.
- Sato A, Harada H, Yeh A C, *et al.*. A 5th generation SC superalloy with balanced high temperature properties and process ability[C]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2008: 131-138.
- Gäumann M, Bezençon C, Canalis B, *et al.*. Single-crystal laser deposition of superalloys: Processing-microstructure maps[J]. Acta Materialia, 2001, 49(6): 1051-1062.
- Gäumann M, Henry S, Cleton F, *et al.*. Epitaxial laser metal forming: Analysis of microstructure formation [J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 271(1): 232-241.
- Chen Yongcheng, Zhang Shuquan, Tian Xiangjun, *et al.*. Microstructure and microhardness of 4045 aluminum alloy fabricated by laser melting deposition[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303008.
陈永城, 张述泉, 田象军, 等. 激光熔化沉积4045铝合金显微组织及显微硬度[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303008.
- Dai Deping, Jiang Xiaohua, Cai Jianpeng, *et al.*. Simulation of temperature field and stress distribution in Inconel718 Ni base alloy induced by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903005.
戴德平, 蒋小华, 蔡建鹏, 等. 激光熔覆Inconel718镍基合金温度场与应力场模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903005.

- 8 Liu Zhaoyang, Qi Huan. Study of crystal growth and microstructure formation in multi-track laser powder deposition of nickel-base single crystal superalloy[J]. *Electromachining and Mould*, 2004, (1): 41-46.
刘朝阳, 齐 欢. 镍基单晶高温合金激光多道搭接熔覆过程晶体生长行为和微观组织分布的研究[J]. *电加工与模具*, 2004, (1): 41-46.
- 9 Liu Z Y, Qi H. Mathematical modeling of crystal growth and microstructure formation in multi-layer and multi-track laser powder deposition of single-crystal superalloy[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 411-420.
- 10 Qi H, Liu Z Y. Modeling of crystal orientations in laser powder deposition of single crystal material[J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 903-912.
- 11 Vilar R, Santos E C, Ferreira P N, *et al.*. Structure of NiCrAlY coatings deposited on single-crystal alloy turbine blade material by laser cladding[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(18): 5292-5302.
- 12 Hoebel M, Fehrmann B, Schnell A. Robot guided laser repair of single crystal turbine blades[C]. *Manuscript for Power-Gen Europe*, 2003: 6-8.
- 13 Liu W P, DuPont J N. Direct laser deposition of a single-crystal Ni3Al-based IC221W alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36(12): 3397-3406.
- 14 Qi Baolu, Zhang Anfeng, Zhang Wenlong, *et al.*. Research on mechanical properties of DZ125L columnar crystal blade directionally repaired by laser direct forming[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0603002.
齐宝路, 张安峰, 张文龙, 等. 激光定向生长修复 DZ125L 柱状晶叶片力学性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0603002.
- 15 Kurz W, Benzencon C, Gäumann M. Columnar to equiaxed transition in solidification processing [J]. *Science and Technology of Advanced Material*, 2001, 2(1): 185-191.
- 16 Liu W P, DuPont J N. Effects of melt-pool geometry on crystal growth and microstructure development in laser surface-melted superalloy single crystals: Mathematical modeling of single-crystal growth in a melt pool (part I) [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(16): 4833-4847.
- 17 Li L J, Andrew Deceuster, Zhang C B. Effect of process parameters on pulsed-laser repair of a directionally solidified superalloy[J]. *Metallography Microstructure Analysis*, 2012, 1(2): 92-98.
- 18 Do Xuantuoi, Li Dichen, Zhang Anfeng, *et al.*. Numerical experimental investigation on the epitaxial growth of columnar crystal in laser metal direct forming of DZ125L super-alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0603008.
Do Duantuoi, 李涤尘, 张安峰, 等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金柱状晶连续生长的数值模拟与实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0603008.
- 19 Feng Liping, Huang Weidong, Lin Xin, *et al.*. FGH95 superalloy laser metal forming directional solidification[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(1): 181-187.
冯莉萍, 黄卫东, 林 鑫, 等. FGH95 合金激光成形定向凝固显微组织与性能[J]. *国有色金属学报*, 2001, 13(1): 181-187.
- 20 Rottwinkel B, Schweitzer L, Noelke C, *et al.*. Challenges for single-crystal (SX) crack cladding[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 301-308.
- 21 DAnderson T, Dupont J N. Stray grain formation and solidification cracking susceptibility of single crystal Ni-based superalloy CMSX-4[J]. *Welding Journal*, 2011, 90: 27-31.