

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

Do Xuantuoi 李涤尘 张安峰 贺斌

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要 采用“生死单元”技术模拟了激光金属直接成形 DZ125L 单层单道和单层两道试样时扫描单元内部温度场的分布情况, 分析了熔池温度梯度的分布与试样内部金相组织演变的关系并进行了实验验证。结果表明, 成形单层单道试样时, 柱状晶能够从基材连续向上生长, 熔池中间部位柱状晶连续生长得最高, 并且熔池顶部容易形成等轴晶; 成形单层两道试样时, 扫描方式与搭接率对温度场分布及金相组织的转变影响较大, 往复扫描方式下搭接区容易产生转向枝晶, 搭接率过小会严重影响两道搭接处柱状晶的连续生长。模拟结果和实验结果吻合得较好。

关键词 激光技术; 激光金属直接成形; DZ125L 高温合金; 温度场; 柱状晶

中图分类号 TG111; TG24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0603008

Numerical Experimental Investigation on the Epitaxial Growth of Columnar Crystal in Laser Metal Direct Forming of DZ125L Super-Alloy

Do Xuantuoi Li Dichen Zhang Anfeng He Bin

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract The effect of scanning methods and overlap rate on the temperature field and microstructure evolution of DZ125L super-alloy elementary unit in laser metal direct forming is investigated numerically and experimentally. The results show that temperature field in the molten pool leads to the epitaxial growth of columnar crystal from the substrate; the columnar crystal grows highest at the center position; it is multi-directional crystal at the high part. For double-track forming, the temperature field and the change of microstructure in the overlap zone are strongly influenced by the scanning method and the overlap rate; the back-and-forth scanning method easily leads to the change of the solidified direction; the epitaxial growth of columnar crystal between cladding tracks is obtained when the overlap rate is big enough. The results of calculation agree well with that of experiment.

Key words laser technique; laser metal direct forming; DZ125L Ni-based super alloy; temperature field; columnar crystal

OCIS codes 350.3390; 160.3900; 140.3390

1 引言

激光金属直接成形(LMDF)过程中试样内部的温度场和组织形成有密切关系, 但是实际成形过程中熔池温度较高且凝固速率较快, 所以温度场的精确测量难度较大。数值模拟加实验验证方法能较为

精确地描述温度场的分布与组织的关系, 受到国内外学者的广泛关注和应用。

Kurz 等^[1~4]对 LMDF 组织生长进行了深入研究, 以超耐热合金 CMSX-4 为研究材料, 得出局部凝固组织与凝固条件的关系, 研究结果指出温度梯

收稿日期: 2013-01-09; **收到修改稿日期**: 2013-02-28

基金项目: 国家 973 计划(2007CB707704)和国家自然科学基金(51005177, 51275392)资助课题。

作者简介: Do Xuantuoi(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事激光金属直接成形方面的研究。

E-mail: dxtuoi76@gmail.com

导师简介: 李涤尘(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事快速成形制造、生物制造和复合材料成形等方面的研究。

E-mail: dcli@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

度和凝固速度是决定柱状晶形成的条件。黄卫东课题组^[5~10]结合 Gaumann 模型进行了研究,发现在相同的工艺条件下,镍基高温合金比不锈钢更易于生成等轴晶组织,还提出了一个适用于多元合金凝固柱状晶/等轴晶转变的理论模型。Zhang 等^[11]建立了三维动态数值模型,结合实际的金相组织以及温度测量,将温度和应力综合考虑,很好地解释了晶粒的生长以及裂纹产生。Ghosh 等^[12]建立了简单的三维热力耦合有限元模型,结合实际材料研究了组织的变化过程以及应力的变化,能够合理地解释裂纹和断裂情况。Zhao 等^[13]建立了多道搭接模型,对成形过程温度场及应力场进行了深入分析,结合实验合理解释了裂纹的产生规律。马琳等^[14]进行了多道熔覆的模拟,得出不同道熔覆层中心点温度的变化规律。Tatkhoa 等^[15]结合数据模拟和实验研究了激光扫描方式对薄壁件熔覆层应力分布和开裂的影响。

然而目前关于成形过程温度场对组织的影响规

律的研究较少。本文以 DZ125L^[16,17]为研究材料,DZ125L 是中国采用低偏析技术自主研发的第一代高性能定向凝固镍基高温合金,主要应用于涡扇发动机一级涡轮叶片,工作温度 1000 ℃ 以上。通过初步研究结果提取模型,采用 ANSYS 软件模拟扫描成形单元过程中的温度场分布,讨论温度场和组织形成之间的联系。

2 建立数值模型和实验方案

2.1 建立数值模型

通过有限元分析软件 ANSYS 的“生死单元”技术建立模型并模拟 LMDF 扫描成形单元的温度场。熔覆粉末和基板材料都为 DZ125L 高温合金。粉末与基板材料成分如表 1 所示,DZ125L 的热物理参数如表 2 所示^[18]。模型和激光扫描方式如图 1 所示,熔覆层截面的形貌和尺寸选择参考了实际初步实验结果,金相图形尺寸截面为圆弧。模型尺寸与所用的工艺参数如表 3 所示。

表 1 粉末和基板材料成分(质量分数,%)

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

Material	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	B	Ni
Substrate	0.07	9.09	10.00	2.09	7.17	4.48	3.05	3.64	0.011	Balance
Powder	0.09	9.70	9.64	2.18	7.14	4.90	3.12	3.78	0.015	Balance

表 2 DZ125L 高温合金的热物理参数

Table 2 Material parameters of DZ125L super alloy

Temperature / ℃	Thermal capacity / [J/(kg·℃)]	Thermal conductivity / [W/(m·℃)]	Density / (kg/m ³)
20	350	8.00	8230
200	385	9.67	8230
400	456	13.44	8230
600	498	16.79	8230
800	506	19.63	8230
1000	473	19.43	8230
1100	443	19.00	8230

表 3 基本工艺参数

Table 3 Basic technology parameters

Technology parameter	Value
Laser power P /W	230
Scanning speed V /(mm/s)	10
Powder feeding rate M_p /(g/min)	4.9
Scanning method	Z character parallel
Substrate dimension length×width×height	30 mm×6 mm×5 mm
Cladding track length L /mm	20
Cladding track width W /mm	0.5
Cladding track height H /mm	0.08
Tracks offset ΔX /mm	0.40; 0.34; 0.30
Overlap rate η	$\eta = (W - \Delta X) / W$

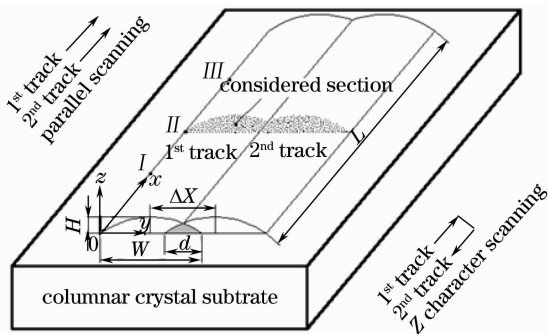


图 1 数值模型与扫描方式

Fig. 1 Model of LMDF of elemental cladding

模型使用 UniGraphics 软件建立,导入 ANSYS 中进行网格划分,采用八节点 solid70 三维实体单元,渐变网格靠近熔覆层网格较密,如图 2 所示。基板与周围环境的初始温度相同(25 ℃),边界条件为对流与辐射传热,采用热焓法处理相变问题通过定义不同温度下的焓值来实现,焓可以描述为材料的密度与比热容的乘积对时间的积分,忽略熔池中的对流传热,热源模型为高斯分布。扫描成形单元温

度场模拟包括单道和两道搭接区的温度场分布。在搭接区模型考虑不同的扫描方式和不同的搭接率。计算后,根据具体需要得出温度场分布云图、提取节

点温度以及沿着某一方向的温度梯度等数据,最后采用 Origin 绘图软件进行绘图分析。

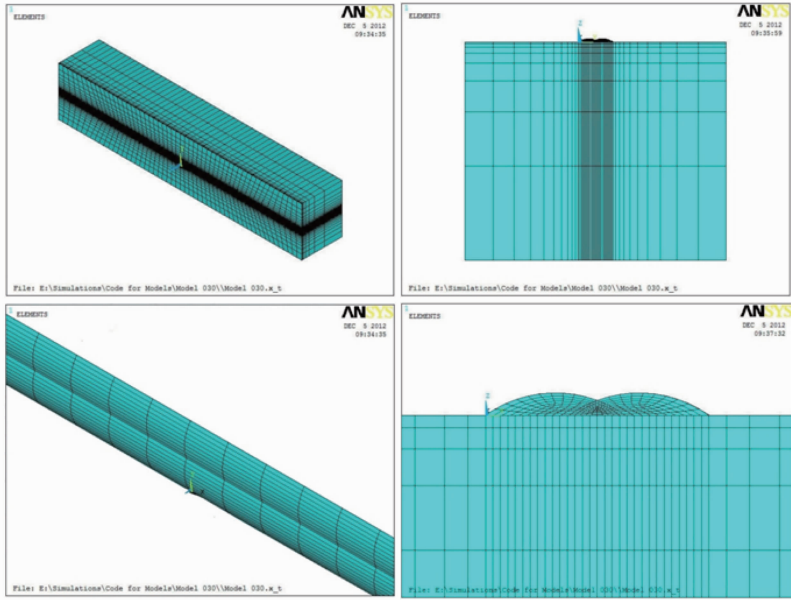


图2 有限元网格划分模型

Fig. 2 Meshed model of finite element

2.2 实验方案

图3所示为西安交通大学开发的LMDF系统,主要包括Nd:YAG固体激光器(最大功率为1 kW,激光波长为1063 nm,光斑直径为0.5 mm)、送粉系统(送粉器与四管道送粉机构)、运动系统(三轴数控联动工作台和控制计算机)和气氛保护箱。

实验所用DZ125L高温合金粉末,粒度为30~60 μm 。基板为铸造定向凝固DZ125L高温合金圆片,尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。粉末与基板的化学成分和热物理参数如1和表2所示。实验前将粉末置于真空干燥箱中加热200 $^{\circ}\text{C}$,保温4 h以去除水分,将基板用砂纸打磨,并用丙酮和酒精清洗,去除油渍和

氧化膜。实验与模拟采用的主要工艺参数是统一的(激光功率 P 、送粉量 M_p 、扫描速度 V 、单元长度 L 和两道搭接率 η ,如表3和图1所示)。实验内容包括单层单道和单层两道,其中单层两道实验包括两种不同的扫描方式与三个不同的搭接率 η 。实验后采用数字光学显微镜与扫描电子显微镜观察试样的组织(所考虑的截面位于成形单元的中间,如图1所示,跟模拟所考虑的截面统一),提取图形及数据加以分析。

3 结果与分析

3.1 单层单道温度场模拟结果与实验组织生长结果分析

第一道中间载荷步温度场分布云图如图4(a)所示,可以看出此载荷步最高温度达到2593 $^{\circ}\text{C}$,高温区域偏向扫描速度方向,呈不对称分布。在熔池前端,粉末不断被熔化形成高温区域,尾部随着对流、传导发生冷却凝固,同时由于热量的不断积累、冷却速度比升温速度小,因此形成如图4(e)中所示的后椭圆形温度场。图5为固液界面熔合线上点I, II, III(如图1所示)随时间的温度变化图,可以看出这与实际DZ125L高温合金熔点1250 $^{\circ}\text{C}$ 十分接近,由此可以证实模拟形成温度场与实际相吻合。温度场呈现此分布主要由于激光热源呈高斯分布,而且金属之间的热传导散热较快。

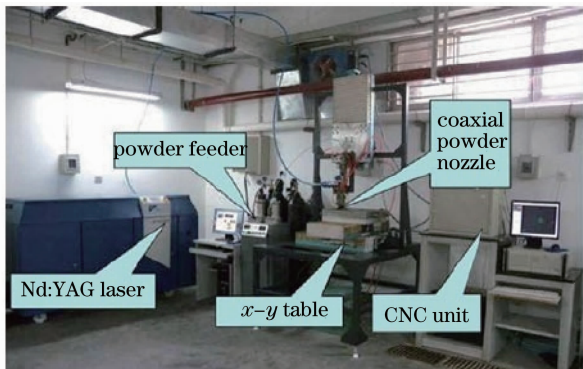


图3 激光金属直接成形系统

Fig. 3 LMDF system

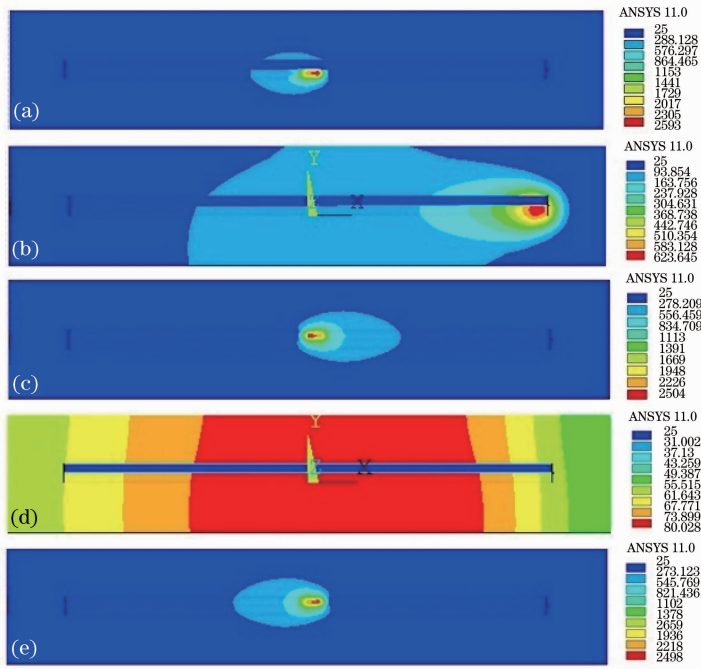


图 4 不同载荷步的温度场分布

Fig. 4 Temperature distribution at different load steps

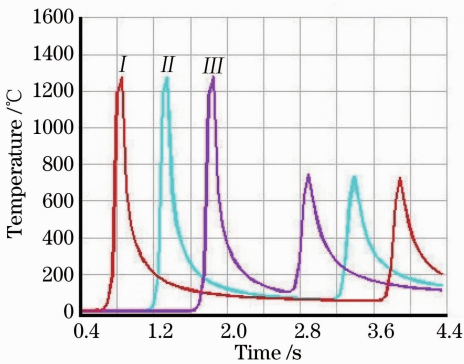


图 5 点 I, II, III 随时间的温度变化曲线

Fig. 5 Temperature curves of points I, II, III versus time

第一道中间载荷步熔池在中心直线上的温度梯度模拟结果如图 6 所示。可以看出从熔池底部到顶部, z 轴方向的温度梯度 G_z 先缓慢升高后迅速降低。由于模拟过程不考虑熔池内部对流的影响, 基板上熔深处没有施加热载荷, 热传导起主要作用, 因此熔池底部温度梯度相对较小, 并逐渐上升。到一定位置之后 G_z 急剧下降, 主要由于热传导减少, 与空气的对流与辐射过程缓慢, 但温度较高。参考 Gäumann 已被修正的 CET 模型^[19], 用 DZ125L 的物理性质参数进行计算可知, 激光金属直接成形 DZ125L 温度梯度低于 $3.5 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ 时发生柱状晶/等轴晶转变。从图 6 可以看出, 沿中心线方向, 熔池顶部会出现等轴晶转变, 而底部包括基板的一

部分因为温度梯度高, 柱状晶都能沿基板连续与延长生长。熔池内部 x 轴和 y 轴方向的温度梯度 G_x 和 G_y 基本上都很小, 对组织生长影响不大。

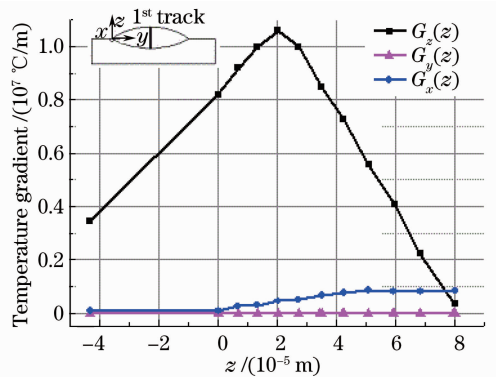


图 6 熔池内部沿中心线的温度梯度变化曲线
Fig. 6 Diagrams of temperature gradients along the center line of molten pool

进一步考虑熔池截面沿 z 方向的温度梯度 G_z 的变化。因为熔池截面的形貌沿扫描方向是对称的, 所以只要考虑半截面, 计算结果如图 7 所示。可以看出, G_z 从中心到边缘逐渐降低, 而且沿 z 方向的变化趋势基本相同。因为 G_z 降低, 柱状晶生长的高度也逐渐降低。在离熔池中心 0.2 mm 的位置 ($y = 0.45 \text{ mm}$), 柱状晶生长的高度只能达到 0.007 mm 左右, 而在熔池中心位置 ($y = 0.25 \text{ mm}$) 柱状晶生长的高度可以超过 0.06 mm。计算结果符合实际熔池形貌情况, 即熔池高度靠边降低。实验结果如图

8 所示,基本和模拟结果相吻合。

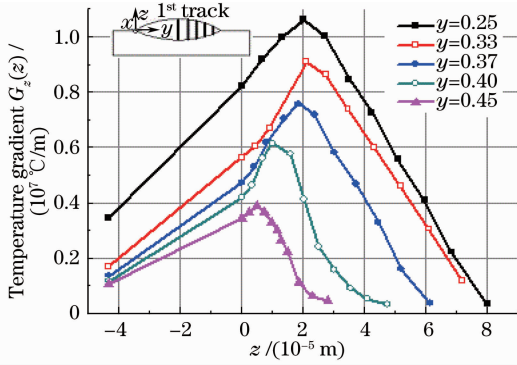


图 7 熔池截面沿 z 轴方向的温度梯度变化曲线
Fig. 7 Curves of temperature gradient along z axis in the cross section of molten pool

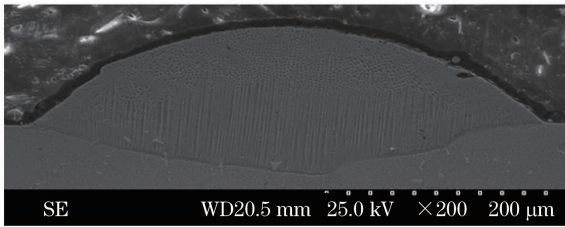


图 8 单道组织生长的实验结果

Fig. 8 Experimental result of the single track microstructure

3.2 两道搭接区温度场模拟结果与实验结果分析

扫描方式对两道搭接区的温度场有着重要影响。平行扫描时考虑了换向到起点时间段内的空冷, Z 字形扫描也考虑了微小偏移时间段空冷, 空冷

时间为距离与扫描速度的比值。对比两种扫描方式空冷载荷步温度场分布可以看出, 平行扫描方式温度分布更均匀, 最高温度仅为 $80.028\text{ }^{\circ}\text{C}$ [图 4(d)], 而 Z 字形扫描方式温度偏向刚成形熔覆层部分, 最高温度达到 $623.645\text{ }^{\circ}\text{C}$ [图 4(b)]. 这对后续熔覆层温度场分布产生重要影响。第二道熔覆时, 因为第一道完成熔覆的时候基板与第一道的温度相比初始温度已经增高, 另外已熔覆的第一道也参加传热, 因此温度影响范围比第一道更大 [图 4(c), (e) 与图 4(a) 相比]。

为了比较两种不同扫描方式与不同两道搭接率下的温度场对组织带来的影响, 研究了搭接区截面沿中心直线上的温度梯度变化, 计算结果在图 9 中展示。可以看出平行扫描方式下 x 方向上的温度梯度 $G_x(z)$ 基本保持不变, 数量级为 10^5 ; Z 字形扫描方式下 x 方向上的 $G_x(z)$ 从基板向上迅速下降然后稳定, 比平行扫描方式更小。因为数值小, 故 $G_x(z)$ 对组织生长影响不大。图 9 也指出 y 方向的温度梯度 $G_y(z)$ 从底部到顶部一直上升, 而 z 方向的温度梯度 $G_z(z)$ 在基板下面呈上升趋势, 基板上逐渐降低。 $G_y(z)$ 一直上升, 数量级为 10^6 , 始终大于 $G_x(z)$ 。 两道搭接率 $\eta = 0.20$ 时 ($\Delta X = 0.40\text{ mm}$), $G_y(z)$ 超过 $G_z(z)$, 这主要是因为已成形的第一道熔覆层参与传热, 另外由于熔池表面沿 y 轴方向上部温差比底部大, 因此 $G_y(z)$ 随着 z 轴正方向不断上升。

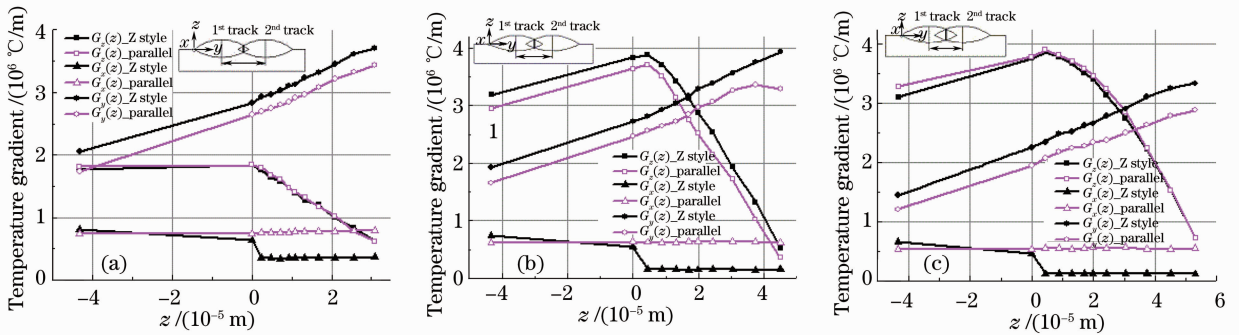


图 9 搭接区沿中心线的温度梯度变化曲线。(a) $\Delta X=0.40\text{ mm}$; (b) $\Delta X=0.34\text{ mm}$; (c) $\Delta X=0.30\text{ mm}$

Fig. 9 Diagrams of temperature gradients along the center line of the overlap zone.

(a) $\Delta X=0.40\text{ mm}$; (b) $\Delta X=0.34\text{ mm}$; (c) $\Delta X=0.30\text{ mm}$

考虑两道搭接率对组织生长的影响, 可以看出 y 和 z 方向的温度梯度 $G_y(z)$ 和 $G_z(z)$ 大, 数量级为 10^6 , 能影响到组织构成的特点。 $\eta=0.20$ 时, 图 9(a) 指出 $G_y(z)$ 和 $G_z(z)$ 两者沿 z 轴坐标高度基本都没有超过 $3.5 \times 10^6\text{ }^{\circ}\text{C/m}$, 只在 Z 字形扫描方式时搭接区的顶部 $G_y(z)$ 超过这个数值, 因此基本上没有出现两

道之间的柱状晶连续生长的情况, 而且搭接区上部会产生沿 y 轴方向的转向枝晶。实验结果如图 10(a) 和 (b) 所示, 跟上面的描述十分吻合。

图 9(b) ($\eta=0.32$; $\Delta X=0.34$) 显示 $G_z(z)$ 都超过 $3.5 \times 10^6\text{ }^{\circ}\text{C/m}$, 这能带来柱状晶的生长, 但只在 z 低于 0.01 mm 的范围内。另外因为 $G_y(z)$ 在搭接

区顶部也已经超过 $3.5 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C/m}$, 因此能产生沿 y 轴方向的转向枝晶。可以看出图 10(c) 和 (d) 的实验结果跟模拟结果一致。图 9(c) ($\eta=0.40$; $\Delta X=0.30$) 与图 9(b) 对比可得, $G_z(z)$ 在更大的高度范围内超过 $3.5 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C/m}$, 而且前者 $G_y(z)$ 比后者小,

因此在搭接区柱状晶一方面会连续生长, 另一方面会长得更高, 图 10(e) 和 (f) 的实验结果也证实了这个结论。另外 Z 字形扫描时因为 $G_y(z)$ 在搭接区上部较高, 所以组织也出现了产生转向枝晶的趋势[见图 10(e)]。

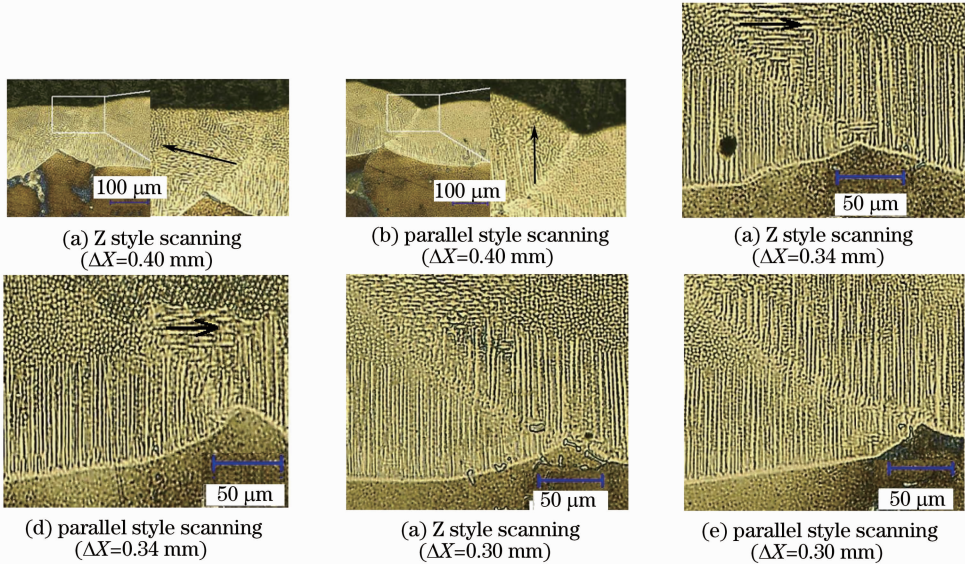


图 10 两道搭接区组织的实验结果

Fig. 10 Experimental results of the overlap zone

4 结 论

本文模拟了 LMDF 过程中试样内部的温度场, 结合实验结果分析了温度场变化对柱状晶组织生长的影响规律并得出如下结论:

1) 成形过程的温度场变化决定了金相组织的生长; 单层两道搭接成形时, 扫描方式与搭接率对温度场分布及金相组织的转变影响较大。

2) 单层单道成形时, 柱状晶能够从基材连续向上生长, 熔池中间部位柱状晶连续生长地最高, 并且熔池顶部容易形成等轴晶; 熔池从中心到两边柱状晶生长的高度逐渐降低。

3) 单层两道成形时, 如果采用 Z 字形扫描方式, 在搭接区上部容易产生转向枝晶, 搭接率过小会严重影响两道搭接处柱状晶的连续生长。

参 考 文 献

- 1 W. Kurz, C. Bezencon, M. Gaumann. Columnar to equiaxed transition in solidification processing[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2001, **2**(1): 185~191
- 2 M. Gäumann, S. Henry, F. Cléton *et al.*. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, **271**(1-2): 232~241
- 3 M. Gäumann, C. Bezencon, P. Canalis *et al.*. Single-crystal laser deposition of superalloys: processing-microstructure maps

- [J]. *Acta Materialia*, 2001, **49**(6): 1051~1062
- 4 M. Gäumann, R. Trivedi, W. Kurz. Nucleation ahead of the advancing interface in directional solidification [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 1997, **226-228**(15): 763~769
- 5 X. Lin, Y. Li, M. Wang *et al.*. Columnar to equiaxed transition during alloy solidification [J]. *Science in China, Series E: Technological Sciences*, 2003, **46**(5): 475~489
- 6 Feng Liping, Lin Xin, Chen Darong *et al.*. Influence of the materials on the solidification microstructure of laser multi-layer cladding [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2004, **24**(1): 7~11
- 冯莉萍, 林 鑫, 陈大融 等. 材料对激光多层涂覆定向凝固显微组织的影响 [J]. *航空材料学报*, 2004, **24**(1): 7~11
- 7 Lin Xin, Li Yanmin, Wang Meng *et al.*. Columnar to equiaxed transition during alloy solidification [J]. *Science in China, Series E*, 2003, **33**(7): 577~588
- 林 鑫, 李延民, 王 猛 等. 合金凝固列状晶/等轴晶转变 [J]. *中国科学: E 辑*, 2003, **33**(7): 577~588
- 8 Lin Xin, Yang Haiou, Chen Jing *et al.*. Microstructure evolution of 316L stainless steel during laser rapid forming [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, **42**(4): 361~368
- 林 鑫, 杨海欧, 陈 静 等. 激光快速成形过程中 316L 不锈钢显微组织的演变 [J]. *金属学报*, 2006, **42**(4): 361~368
- 9 Yang Sen, Huang Weidong, Liu Wenjin *et al.*. Research on laser rapid directional solidification with ultra-high temperature gradient [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(5): 475~479
- 杨 森, 黄卫东, 刘文今 等. 激光超高温梯度快速定向凝固研究 [J]. *中国激光*, 2002, **29**(5): 475~479
- 10 Wang Kai, Yang Haiou, Liu Fencheng *et al.*. Stress and deformation finite element method simulation of thin wall part with pre-deformation substrate during laser solid forming [J]. *Chinese J. Laser*, 2012, **39**(6): 0603002

- 王 凯, 杨海欧, 刘奋成 等. 基板预变形下激光立体成形直薄壁件应力和变形的有限元模拟[J]. 中国激光, 2012, **39**(6): 0603002
- 11 C. Zhang, L. Li, A. Deceuster. Thermomechanical analysis of multi-bead pulsed laser powder deposition of a nickel-based superalloy [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2011, **211**(9): 1478~1487
- 12 S. Ghosh, J. Choi. Modeling and experimental verification of transient/residual stresses and microstructure formation in multi-layer laser aided DMD process [J]. *J. Heat Transfer*, 2006, **128**(7): 662~679
- 13 H. Zhao, H. Zhang, C. Xu *et al.*. Temperature and stress fields of multi-track laser cladding [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, **19**(2): 495~501
- 14 Ma Lin, Yuan Jinping, Zhang Ping *et al.*. Finite numerical simulation of temperature field in multi-pass laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(7): 109~112
- 马 琳, 原津萍, 张 平等. 多道激光熔覆温度场的有限元数值模拟[J]. 焊接学报, 2007, **28**(7): 109~112
- 15 Doan Tatkhua, Li Dichen, Lu Bingheng *et al.*. Effect of scanning methods on the cracking of the DZ125L superalloy in laser direct metal forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1003002
- Doan Tatkhua, 李涤尘, 卢秉恒 等. 扫描方式对激光金属直接成形 DZ125L 高温合金薄壁件开裂的影响 [J]. 中国激光, 2012, **39**(10): 1003002
- 16 Chen Rongzhang, She Li, Zhang Hongwei *et al.*. Investigation on directionally solidified Alloy DZ125 [J]. *Jarurnal of Aeronautical Materials*, 2000, **20**(4): 14~19
- 陈荣章, 余 力, 张宏伟 等. DZ125 定向凝固高温合金的研究 [J]. 航空材料学报, 2000, **20**(4): 14~19
- 17 Min Zhixian, Shen Jun, Wang Lingshui *et al.*. Microstructural evolution of directionally solidified Ni-based superalloy DZ125 under planar growth [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, **46**(9): 1075~1080
- 闵志先, 沈 军, 王灵水 等. 定向凝固镍基高温合金 DZ125 平界面生长的微观组织演化 [J]. 金属学报, 2010, **46**(9): 1075~1080
- 18 C. Zhou, N. Wang, H. Xu. Comparison of thermal cycling behavior of plasma-sprayed nanostructured and traditional thermal barrier coatings [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, **452-453**: 569~574
- 19 Feng Liping. Investigation on laser multi-layer cladding directional solidification [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002
- 冯莉萍. 激光多层涂覆定向凝固研究 [D]. 陕西: 西北工业大学, 2002

栏目编辑: 宋梅梅