

扫描策略对激光立体成形 GH3536 合金温度场和组织性能的影响

王树森¹, 张雪^{2, 3, 4}, 穆亚航^{2, 3}, 马良⁴, 梁静静², 刘常升³, 王道红⁵, 张鹏⁵

(1. 中国人民解放军海军装备部驻沈阳地区军事代表局驻鞍山地区军事代表室, 辽宁鞍山 114001;
2. 中国科学院金属研究所 师昌绪材料创新中心, 辽宁沈阳 110016; 3. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110016; 4. 东北大学, 辽宁沈阳 110819; 5. 江苏飞跃机泵集团有限公司, 江苏靖江 214537)

摘要: 利用ABAQUS有限元分析软件对两种扫描策略激光立体成形GH3536高温合金进行了温度场模拟, 结果表明, 往复交叉光栅扫描策略的能量累积高于交叉光栅式扫描策略的路径。利用金相、扫描、拉伸等检测手段研究了两种扫描策略对合金组织性能的影响。结果表明, 在其他工艺参数合适的前提下, 两种扫描策略对合金显微组织和性能影响不大。显微组织均以柱状晶为主, 断裂方式均为韧性断裂, 断口形貌为等轴韧窝。

关键词: 激光立体成形; 扫描策略; GH3536高温合金

GH3536合金是一种固溶强化型镍基高温合金, 主要应用于航空发动机中燃烧室部件^[1-2]。燃烧室部件通常具有复杂的结构, 尤其是燃油喷嘴。对于这些复杂的零部件, 传统的制造工艺加工难度大, 有时无法满足一些具有优异结构的零部件的制造生产。激光立体成形技术结合激光技术、数控技术、计算机技术和材料技术为一体, 在成形过程中逐层累积, 无需模具。增材制造技术不仅能实现高性能、复杂金属结构件的高效、近净成形, 还可以用于一些结构件的修复^[3-5]。

激光立体成形过程中工艺参数对成形后的零部件组织和力学性能有着重要的影响。通过设计优化扫描策略可以有效降低残余应力值, 从而也可以降低成形材料的裂纹敏感性和变形量。目前通过优化扫描策略来减小增材制造过程中残余应力以及变形量的研究较多: 傅蔡安^[6]等研究发现一种光栅式扫描策略能够有效降低激光选区熔化过程中的翘曲变形, 提高成形件的精度。鹿旭飞^[7]等通过有限元模型探究了扫描策略对TC4再成形过程中的影响, 得出采用长边单向扫描方式基板变形量最大, 采用短边往复扫描方式残余应力以及变形量最小, 采用棋盘格的扫描方式等有效减少变形量, 但是不能降低残余应力的值。Bo Q^[8]等设计了螺旋形的扫描路径应用于激光选区熔化技术, 结果表明, 采用螺旋扫描策略可以有效减小熔化层的变形。同时他也指出螺旋扫描策略适用于复杂模型, 不适用于环形模型。但是对于激光立体成形技术, 有关扫描策略对GH3536合金温度场和组织性能的研究较少。

基于以上的研究发现, 本研究主要设计了两种扫描策略, 分别为往复交叉光栅式和交叉光栅式扫描策略。探究这两种扫描策略对激光立体成形GH3536合金温度场和组织性能的影响。

1 试验设备与方法

本试验用于制备样品的激光器是CO₂激光器, 最大功率可达到4 000 W。光斑直径为2 mm, 送粉量为11 g/min, Z轴的提升量0.167 mm, 离焦量为-10 mm, 搭接率为45%, 作为保护气的氩气纯度为99.99%, 保护气的气流量为0.3 g/min。扫描速率为1 200 mm/min, 激光功率为1 200 W。先制备16 mm × 16 mm × 8 mm的块体用于组

作者简介:

王树森(1982-), 男, 硕士, 主要从事舰船材料研究工作。E-mail: 446757808@qq.com

通讯作者:

梁静静, 女, 研究员, 博士, 硕士生导师。E-mail: jiliang@imr.ac.cn

中图分类号: TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

11-1358-06

基金项目:

国家科技重大专项(Y2019-VII-0011-0151); 基础加强计划技术领域基金(2021-JCJQ-JJ-0092)。

收稿日期:

2022-03-14 收到初稿,

2022-03-29 收到修订稿。

织观察，利用光学显微镜和扫描电镜对显微组织进行观察。制备16 mm × 16 mm × 50 mm的块体用于室温和500 °C力学性能测试，拉伸试样尺寸如图1所示。断口也通过扫描电镜进行显微组织观察。本次试验所用的GH3536合金粉末粒径在50~150 μm之间，合金成分如表1所示，粉末形貌如图2所示，两种扫描策略的示意图如图3所示。

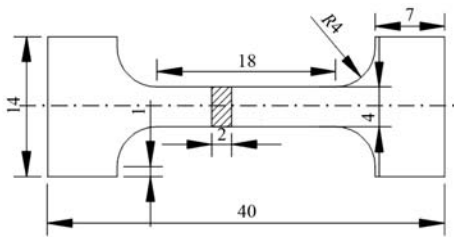


图1 拉伸尺寸图

Fig. 1 Size of tensile test sample

表1 镍基高温合金粉末化学成分
Table 1 Chemical composition of Ni-base superalloy powder

										$w_B / \%$
Si	Mn	B	Cr	C	Mo	Co	Fe	W	Ni	
0.02	0.02	0.003	21.87	0.056	9.12	1.23	18.2	0.49	余量	

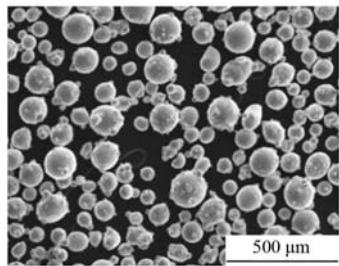
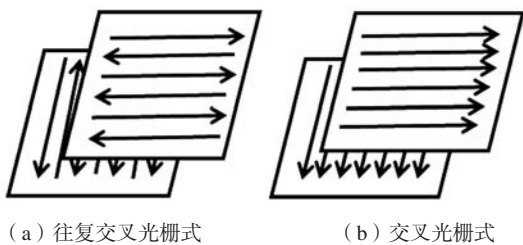


图2 GH3536合金粉末形貌图

Fig. 2 SEM morphology of GH3536 alloy powder



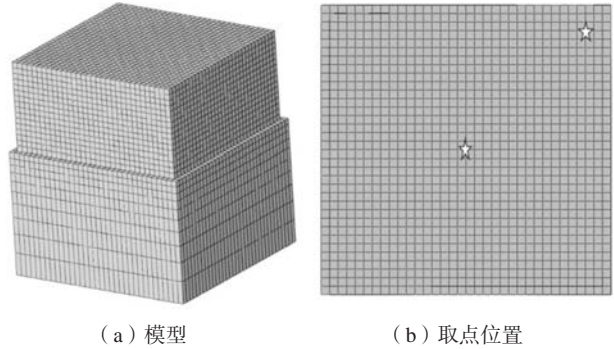
(a) 往复交叉光栅式 (b) 交叉光栅式

图3 扫描策略示意图

Fig. 3 Schematic diagram of scanning strategy

利用ABAQUS有限元分析软件对两种扫描策略进行温度场模拟，建立的有限元模型如图4a所示，成形层的尺寸为16 mm × 16 mm × 8 mm，基板的尺寸为17 mm × 17 mm × 11 mm。采用8节点六面体分析单元(DC3D8)划分网格，成形层共有27 944个元素，30 899个节点。光斑直径为2 mm的圆。在基板上取角

点和中心点两个位置观察成形过程中温度的变化，取点位置如图4b所示。



(a) 模型

(b) 取点位置

图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element modeling

激光立体成形过程属于经典的非线性瞬态热传导问题，满足能量守恒和傅里叶定理。热传导方程见公式(1)。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

式中： ρ 为材料密度， kg/m^3 ； c 为材料的比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； T 为温度场函数， K ； t 为激光束作用的时间， s ； k_x 、 k_y 、 k_z 分别为材料在 x 、 y 、 z 三个方向的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

假设材料具有各向同性，使得 $k_x=k_y=k_z=k$ ； Q 为热源；其中 ρ 、 c 、 k 随温度的变化而变化。激光加热前假设基板的温度为室温293 K。温度场的初始条件见式(2)。

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = 293 \text{ K} \quad (2)$$

激光立体成形过程中，模型的上表面与周围环境存在着热对流与热辐射，因此温度场的边界条件可表示为式(3)。

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_f) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_f^4) \quad (3)$$

式中： α 为表面对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； T_f 为换热介质温度， K ； n 为模型表面外法向方向； σ 为斯忒藩-玻尔兹曼(Stefan-Boltzman)常量，约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； ε 为实际物体的有效辐射率，取为0.8。

由于激光功率对激光立体成形件有着重要的影响，所以模拟过程中热源选择是否得当对温度场模拟的精度有很大影响。在激光立体成形过程，高斯热源模型应用得最为广泛。其表达式见公式(4)。

$$q = \frac{2Ap}{\pi \omega^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (4)$$

式中： A 为材料的吸光率，取0.2； p 为激光功率， W ； ω 为激光光斑半径， mm ； r 为成形层到光斑中心的距离， mm 。

材料的物理特性区分为场特性和非场特性，热传

导率是具有场特性的参数，不仅取决于材料本身的性质，更取决于粉末材料的孔隙率。比热、焓变、密度等是非场特性参数，主要由材料的组分决定。粉末层的导热系数与孔隙率的函数可以用式(5)与式(6)来表示。

$$k_{\text{powder}} = k_{\text{solid}} (1 - \varphi) \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{solid}} - \rho_{\text{powder}}}{\rho_{\text{solid}}} \quad (6)$$

式中： k_{powder} 表示粉末层的热传导系数，W/(m·K)； k_{solid} 表示固体金属的热传导系数，W/(m·K)； φ 表示为孔隙率； ρ_{solid} 表示固体金属的密度，kg/m³； ρ_{powder} 表示合金粉末的密度，kg/m³。

本研究将粉末层看作是金属粉末和气体的混合物，比热容可以表示为公式(7)。

$$\rho_{\text{powder}} c_{\text{powder}} = (1 - \varphi) \rho_{\text{solid}} c_{\text{solid}} + \varphi \rho_{\text{gas}} c_{\text{gas}} \quad (7)$$

式中： c_{powder} 为合金粉末的比热容，J/(kg·K)； c_{solid} 为金属固体的比热容，J/(kg·K)； ρ_{gas} 为粉末层中气体的密度，kg/m³； c_{gas} 为粉末层中气体的比热容，J/(kg·K)。其中气体的密度 ρ_{gas} 与固体金属的密度 ρ_{solid} 相差较大，可以认为粉末层的比热容为金属固体的比热容。

GH3536合金粉末在激光立体成形过程中是一种熔化-凝固的过程，对于金属而言其中的相变是不可忽略

的。通过定义温度变化中的焓值来考虑相变的影响。焓是密度与比热容的乘积对温度的积分。可以用式(8)来表示。

$$H = \int \rho c dT \quad (8)$$

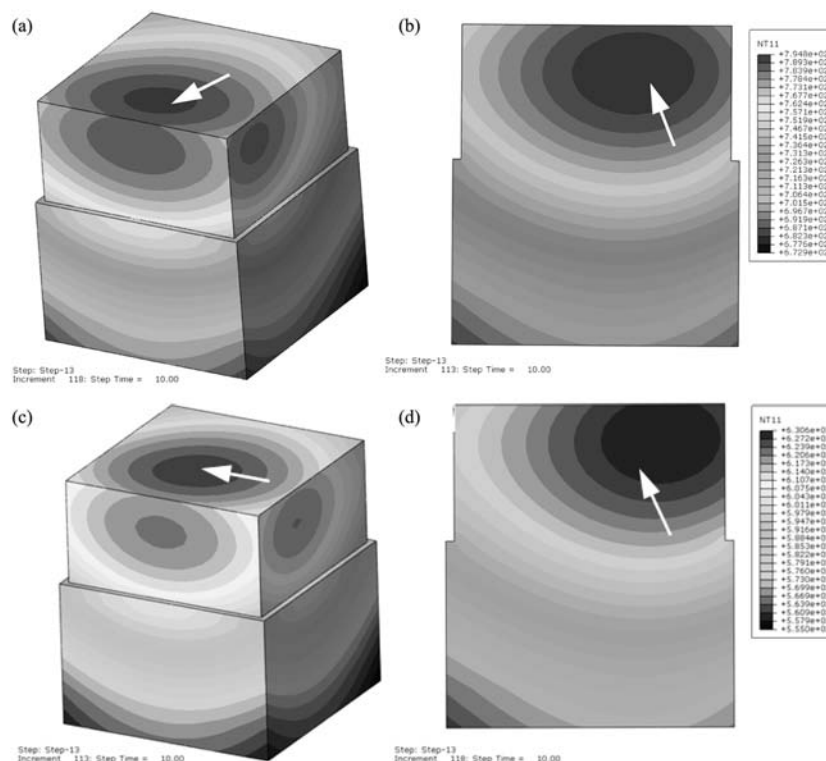
式中： H 为焓值，J/m³； ρ 为随温度变化的材料密度，kg/m³； c 为材料随温度变化的比热容，J/(kg·K)。

2 试验结果与分析

2.1 温度场模拟

图5为采用两种扫描策略模拟增材制造试样在冷却10 s后的温度场云图。其中a、b为往复交叉光栅式，c、d为交叉光栅式，随着激光立体成形层数的增加，温度越来越高，箭头所指的区域表示最高温度。往复交叉光栅式的试样在冷却10 s后的最高温度为794 °C，最低温度为672 °C。往复交叉光栅式的试样在冷却10 s后的最高温度为630 °C，最低温度为555 °C。往复交叉光栅式扫描策略的温度要远高于交叉光栅的扫描策略。往复交叉光栅式扫描策略的热量累积要高于交叉光栅式的扫描策略。

在基板上取角点和中心点，观察其温度在成形过程中的变化，其温度变化曲线如图6所示。从图中可以看出，交叉光栅式曲线较长，成形相同预设高度的



(a)、(b) 往复交叉光栅式；(c)、(d) 交叉光栅式

图5 冷却10 s后不同扫描策略的温度场云图

Fig. 5 Simulated temperature fields of the samples paths after cooling for 10 s

试样,其用时最多。同时也导致在成形过程中热量流失最多,所以其温度较低。无论是角点图还是中心点图,都可以清晰地看出曲线在每出现12个峰值后,温度会明显下降一点。主要是因为每成形12层,激光头上移2 mm,处于关闭的状态,试样没有能量的补充,会散失一部分热量导致温度下降。出现峰值的温

度为在每层中激光经过检测点时的温度。角点和中心点相比,曲线的波动幅度较大,说明在角点位置的温度变化较中心点位置更快。随着激光立体成形层数的增加,无论是角点还是中心点,曲线都趋于平缓,波动幅度降低,但是温度都在逐渐下降,这是因为随着层数的增加,测试点的位置越来越远离热源。

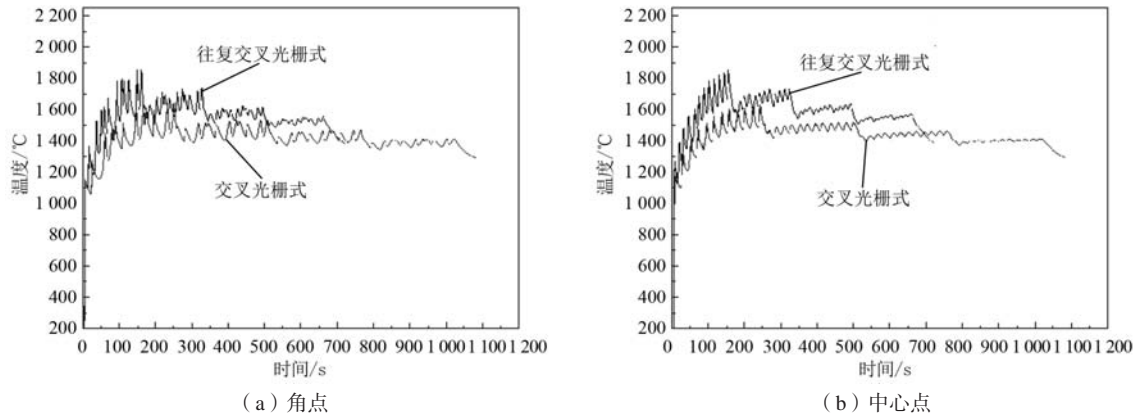


图6 测试点在成形过程中温度变化曲线

Fig. 6 Temperature change curves of the samples during the forming process

2.2 显微组织

图7是采用两种扫描策略激光立体成形8 mm高度样品的实物图,按照从左到右的顺序依次为功率为1 200 W往复交叉光栅式扫描策略成形的试样、1 200 W交叉光栅式扫描策略成形的试样、1 600 W交叉光栅式扫描策略成形的试样。可以看出,1 200 W交叉光栅式扫描策略成形的试样出现中间凹陷、四角凸起的形状,主要是由于激光能量不足引起的,其成形高度也较低。

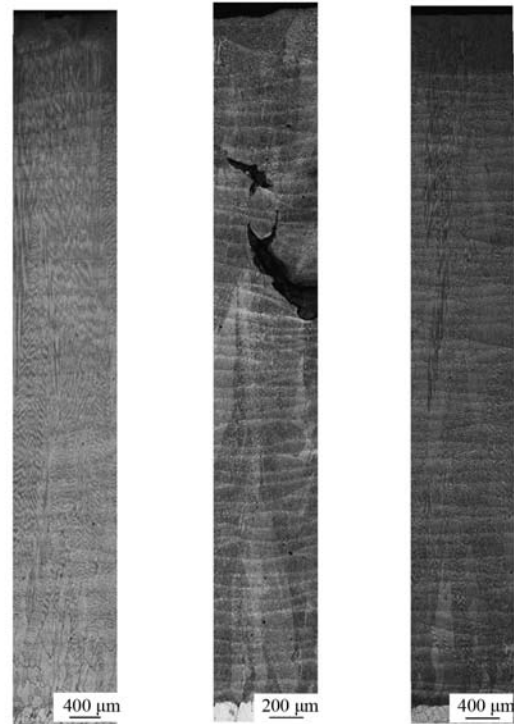


图7 采用两种扫描策略激光立体成形8 mm高度GH3536合金的实物图

Fig. 7 GH3536 alloy with 8 mm height formed by two scanning strategies

图8是不同扫描策略试样的纵截面全图,其中a、b分别为激光功率1 200 W、扫描速率1 200 mm/min的往复交叉光栅式和交叉光栅式。不同扫描策略的熔覆层均有层状结构。成形高度经测量分别为8.0 mm、6.6 mm,其中交叉光栅式的成形高度与预设程序8 mm相差较大,并且内部出现融合不良的严重缺陷,成形效果较差。主要是由于交叉光栅式的热量累积较低,合金粉末不能充分熔化,这与温度场模拟结果相同。

为解决交叉光栅式热量积累不足的问题,将激光



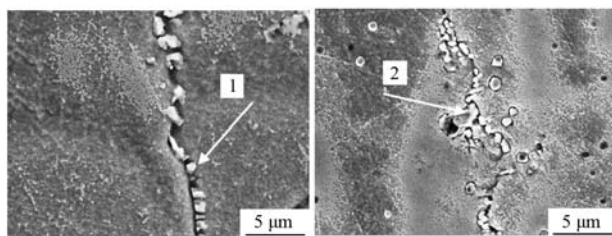
(a) 往复交叉光栅式 (b) 交叉光栅式 (c) 提高功率后交叉光栅式

图8 两种扫描策试样的纵截面全图

Fig. 8 Full view of longitudinal section of samples

功率提升至1 600 W,增加热量的输入。最终交叉光栅式纵截面全图如图8c所示,成形高度达到预设的8 mm,内部没有融合不良的缺陷。总体来看往复交叉

光栅式的成形效率较高。在保证成形高度的前提下,所需成形的激光功率相对较低并且内部没有出现熔合不良等严重缺陷。激光立体成形GH3536合金的显微组织主要以平行于沉积方向的柱状晶为主,顶部相对较少的等轴晶。由于激光立体成形过程高温梯度、快凝固的特性,柱状晶大多组织细密均匀。根据晶粒生长的理论,枝晶的生长方向主要由最大温度梯度方向决定,因此取向与沉积方向相近的柱状晶优先生长^[9-10]。柱状晶向等轴晶转变的原因是熔池底部到顶部温度梯度逐渐降低,凝固速率加快,温度梯度的方向由底部的垂直于扫描方向到顶部的平行于扫描方向,柱状晶因此向等轴晶转变^[11](Columnar to Equiaxed, CTE)。图9为两种扫描策略成形试样的晶界处的扫描形貌图,通过能谱打点测量为富含Mo元素和Cr元素的两种碳化物,两种碳化物经能谱测量后的含量如表2所示。



(a) 往复交叉光栅式 (b) 交叉光栅式

图9 两种扫描策略成形试样晶界处的碳化物

Fig. 9 Carbides at grain boundaries of samples formed by two scanning strategies

表2 不同位置能谱分析元素的含量
Table 2 Elements concentration of different points $w_B/\%$

位置	C	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	W	Co
1	12.16	0.91	16.02	9.28	25.08	32.18	4.36	-
2	9.48	-	36.87	11.28	27.47	12.76	2.15	-

2.3 拉伸性能

两种扫描策略激光立体成形GH3536合金在室温和500 °C的拉伸性能见表3。其中交叉光栅式扫描策略所用的激光功率调整后的值为1 600 W,而往复交叉光栅式所用的激光功率为1 200 W。从表3中可以看出,当激光功率等参数合适时,扫描策略对激光立体成形

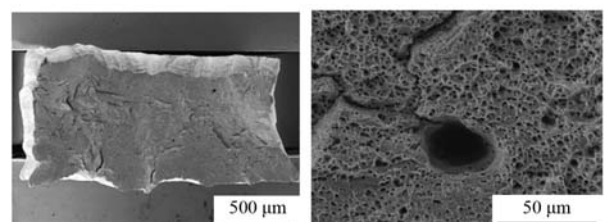
表3 两种扫描策略成形GH3536合金在不同温度下的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of samples formed by two scanning strategies at different temperatures

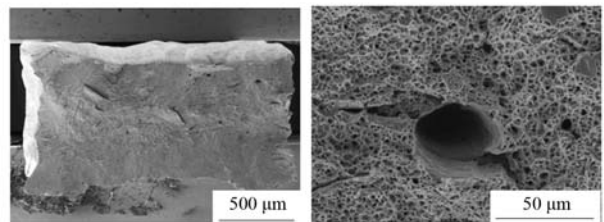
温度/°C	扫描策略	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
室温	往复交叉光栅式	288.3	606.3	45.3
	交叉光栅式	295.7	611.5	47
500	往复交叉光栅式	195.3	434.3	49.2
	交叉光栅式	201.3	414.7	42.3

GH3536合金在室温和500 °C下的拉伸性能影响不大。

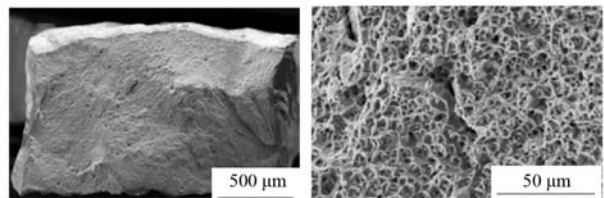
图10是两种扫描策略激光立体成形GH3536合金在室温和500 °C断口形貌。从图中可以看出在室温和500 °C的拉伸下两种扫描策略成形的镍基高温合金断口形貌均为等轴韧窝,有裂纹和孔洞的存在。断口由纤维区、放射区和剪切唇三部分组成。纤维区中的裂纹扩展速率很小,当达到临界尺寸后快速扩展而形成放射区,放射区是裂纹作快速低能量撕裂而形成的。断裂的最后阶段形成杯状或锥状的剪切唇,剪切唇表面光滑,与拉伸轴呈45°角^[12]。



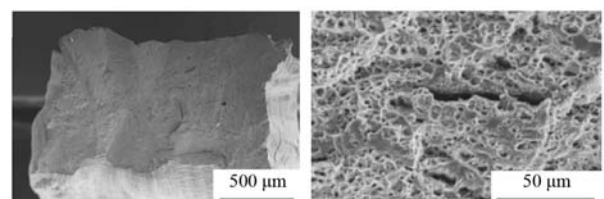
(a)、(b) 室温往复交叉光栅式



(c)、(d) 室温交叉光栅式



(e)、(f) 500 °C往复交叉光栅式



(g)、(h) 500 °C交叉光栅式

图10 两种扫描策略成形的试样不同温度下断口形貌图

Fig. 10 Fracture morphology of samples formed by two scanning paths strategies at different temperatures

3 结论

(1) 不同扫描策略对激光立体成形GH3536合金的温度场有明显影响。往复交叉光栅式扫描策略在成形过程中热量累积较多,温度高。

(2) 在激光立体成形过程中,当激光功率为1 200 W时,使用交叉光栅式扫描策略成形的试样存在严重的熔合不良的缺陷,而往复交叉光栅式扫描策略

成形的试样内部不存在熔合不良的缺陷。将交叉光栅式扫描策略的激光功率提高至1 600 W, 内部熔合不良的缺陷消失。

(3) 激光功率为1 600 W, 使用交叉光栅式扫描策略成形的试样与激光功率为1 200 W使用往复交叉光栅式扫描策略成形的试样显微组织差别不大。均以柱状晶为主, 顶部存在少量的等轴晶, 且存在富Cr与富

Mo的两种类型的碳化物。

(4) 在激光立体成形过程中, 使用激光功率为1 600 W的交叉光栅式扫描策略与使用激光功率为1 200 W的往复交叉光栅式扫描策略成形的试样在室温和500 °C下的拉伸性能相差不大。均为韧性断裂, 断口形貌均为等轴韧窝。

参考文献:

- [1] HAO Z P, HAN X, FAN Y H, et al. Microscopic study on the mechanism of tool bond wear in cutting Ni-Fe-Cr-Co-Cu series nickel-base superalloy [J]. Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22: 621-634.
- [2] 徐超. 镍基高温合金服役温度范围高温区裂纹急速扩展的现象和本质研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [3] 梁静静, 杨彦红, 周亦胄, 等. 激光立体成形镍基单晶高温合金显微组织研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46 (12): 3753.
- [4] 解瑞东, 鲁中良, 弋英民. 激光金属成形缺陷在线检测与控制技术综述 [J]. 铸造, 2017, 66: 33-37.
- [5] 薛松海, 李重阳, 李雪辰, 等. 热处理工艺对铸造/激光增材制造复合制备Ti-6Al-4V合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 536 (7): 800-805.
- [6] 傅蔡安, 陈佩胡. 选择性激光烧结的翘曲变形与扫描方式的研究 [J]. 铸造, 2008, 385 (12): 1237-1240.
- [7] 鹿旭飞, 马良, 黄卫东, 等. 扫描路径对激光立体成形TC4构件热-力场的影响 [J]. 材料工程, 2019, 47 (12): 55-62.
- [8] BO Q, SHI Y S, WEI Q S, et al. The helix scan strategy applied to the selective laser melting [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63: 631-640.
- [9] 刘帅, 张雪, 于海鑫, 等. FGH96激光熔化沉积成形过程对组织与性能的影响 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (1): 72-79.
- [10] LIU F, XIN L, HUANG C, et al. The effect of laser scanning path on microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickel-base superalloy Inconel 718 [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2011, 509 (13): 4505-4509.
- [11] 黄卫东. 激光立体成形 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [12] 王磊. 材料的力学性能 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2014.

Effect of Scanning Strategy on Temperature Field and Microstructure and Tensile Property of GH3536 Alloy Fabricated by Laser Solid Forming

WANG Shu-sen¹, ZHANG Xue^{2,3,4}, MU Ya-hang^{2,3}, Ma Liang⁴, LIANG Jing-jing², LIU Chang-sheng³, WANG Dao-hong⁵, ZHANG Peng⁵

(1. Anshan Military Representative Office of Shenyang Military Representative Bureau, Naval Equipment Department of the Chinese People's Liberation Army, Anshan 114001, Liaoning, China; 2. Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 3. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, Liaoning, China; 4. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 5. Jiangsu Feiyue Machine and Pumps Group, Jingjiang 214537, Jiangsu, China)

Abstract:

In this study, ABAQUS software was used to simulate the temperature field of GH3536 superalloy produced by laser solid forming with two scanning strategies. The results showed that the energy accumulation of reciprocating-cross-grating-scanning strategy was higher than that of cross-grating-scanning strategy. The effects of the two scanning strategies on the microstructure and tensile properties of the alloy were studied by means of OM and SEM. The results showed that the two scanning strategies had limited effect on the microstructure and the properties of the alloy on the premise of appropriate process parameters. The two samples both showed columnar microstructure, and fractured on a ductile mode with dimples on the fractured surface during tensile test.

Key words: laser solid forming; scanning strategies; GH3536 superalloy