

## GH738 合金激光沉积修复试验研究

卞宏友<sup>1</sup>, 翟泉星<sup>1</sup>, 曲伸<sup>2</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 王维<sup>1</sup>

- (1. 沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136;
2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司焊接研究所, 辽宁 沈阳 110043)

**摘要:** 通过正交试验研究了激光功率、扫描速度、送粉速度对 GH738 合金激光沉积修复单道熔高、熔宽、熔深等特征尺寸的影响规律, 优化了工艺参数, 获得无缺陷显微组织; 分析了多道多层沉积试样熔合不良、裂纹等缺陷产生的原因及组织、硬度分布特点。结果表明: 沉积区呈典型的外延生长柱状枝晶, 枝晶间析出少量碳化物; 相对于基体, 热影响区碳化物明显减少, 同时热影响区  $\gamma'$  相尺寸明显增大; 沉积区硬度为 350~470 HV0.3, 热影响区硬度为 450~480 HV0.3, 均明显低于基体硬度 480~510 HV0.3; 且沿沉积高度方向硬度逐渐降低。

**关键词:** 激光沉积修复; 工艺参数; 特征尺寸; 缺陷; 硬度

**中图分类号:** TH164 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0706002

## Experimental study on laser deposition repair GH738 alloy

Bian Hongyou<sup>1</sup>, Zhai Quanxing<sup>1</sup>, Qu Shen<sup>2</sup>, Yang Guang<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Welding Research Institute, Shenyang Liming Aero-Engine Corporation LTD, AECC, Shenyang 110043, China)

**Abstract:** The effect of laser power, scanning speed and powder feeding rate on feature sizes of weld height, weld width, weld depth during laser deposition repair single track GH738 alloy were investigated by orthogonal test; the parameters were optimized and defect-free microstructure was obtained; the reason of defects such as ill bonding & cracks in deposition zone and the characters of microstructure & microhardness were analyzed. The results indicate that the microstructure of GH738 deposition zone is made of columnar dendrites which grow epitaxially from the substrate. Few carbides are precipitated in the interdendrite. Compared with the substrate, the carbide in the heat affected zone is obviously reduced; meanwhile the size of  $\gamma'$  phase in heat affected zone increases obviously. The microhardness of deposition zone(350–470 HV0.3) and heat-affected zone(450–480 HV0.3) is lower than substrate(480–510 HV0.3), and microhardness decrease gradually along the deposition height direction.

**Key words:** laser deposition repair; process parameters; feature size; defects; microhardness

收稿日期: 2018-02-10; 修订日期: 2018-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(51375316); 航空科学基金(2014ZE54028); 辽宁省自然科学基金(20170540690)

作者简介: 卞宏友(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光沉积成形、修复技术方面的研究。Email: bianhongyou@sau.edu.cn

## 0 引言

GH738 合金属于  $\gamma'$  相沉淀强化型高温合金, 广泛应用于航空、航天、化工等领域, 适用于制作航空发动机涡轮盘、高温紧固件、封严圈等零件<sup>[1]</sup>。GH738 合金零部件在恶劣服役环境下易出现裂纹、磨损等失效情况, 激光沉积修复技术能够满足高温合金零部件快速、高质量的修复需求<sup>[2]</sup>。

郑丽娟<sup>[3]</sup>, 王志坚<sup>[4]</sup>等的研究表明: 沉积区组织致密, 与基体为冶金结合。熔宽是激光光斑直径、激光功率、扫描速度和送粉量的函数; 卞宏友<sup>[5]</sup>等进行了激光沉积修复 GH4169 试验研究, 结果表明: 优化工艺参数后得到的修复区和基体形成了致密的冶金结合。Dae-Young Kim<sup>[6]</sup>等人对比研究了激光熔覆、激光焊接、钨极氩弧焊等三种 IN738 合金的修复工艺, 指出由于激光熔覆的快速冷却速率可增大热输入的范围, 将成为替代钨极氩弧焊的修复工艺。张冬云等<sup>[7]</sup>的研究表明工艺参数对 Rene80 激光定向凝固组织的枝晶间距等有明显影响。

文中进行了激光沉积修复 GH738 合金试验研究。通过正交试验研究了激光功率、扫描速度、送粉速度对沉积道特征尺寸的影响; 分析了裂纹等缺陷形成的原因, 优化了修复工艺参数, 获得无缺陷的修复试样, 并分析了组织和硬度分布特点。

## 1 试验设备与条件

试验所用的设备为 LDM800 激光沉积制造系统; 所用基板材料为经过标准热处理(1 080 °C, 4 h, 空冷+840 °C, 24 h, 空冷+760 °C, 16 h, 空冷)的 GH738 锻件板材; 沉积粉末材料为 GH738 球形粉末, 粒径为 53~150  $\mu\text{m}$ , 其化学成分如表 1 所示。

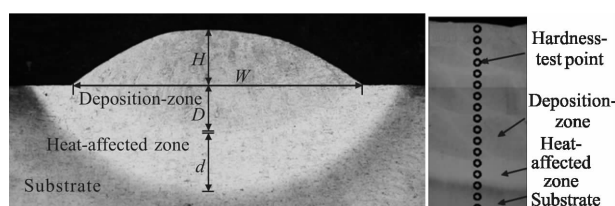
单道沉积试验的激光工艺参数组合采用正交法设计, 激光功率  $P$  为 800~1 200 W, 扫描速度  $V_s$  为 4~7 m/s, 送粉速度  $V_f$  为 5~8 g/min, 测量沉积道的熔宽  $W$ 、熔高  $H$ 、熔深  $D$ 、热影响区宽度  $d$  等特征尺寸如图 1(a)所示, 并计算不同工艺参数下沉积道对应的宽高比  $Ar$ (熔宽和熔高之比)。采用优化后的参数进行 10 道 3 层沉积修复试验。利用线切割沿垂直于激光扫描方向截取试样, 经打磨、抛光和硝酸、氢氟酸混合液( $V_{\text{HNO}_3}: V_{\text{HF}}=4:1$ )化学腐蚀后制成金相样品, 并

采用 OLYMPUS-GX51 型光学显微镜和 S3400 型扫描电镜对金相试样进行显微组织观察分析, 并用扫描电镜附带的能谱仪(EDS)对物相的成分进行分析; 采用 HVS-1000A 显微硬度计沿沉积高度方向进行硬度测试, 如图 1(b)所示; 加载载荷为 300 N, 保荷时间 15 s。

表 1 GH738 合金粉末的化学成分(单位: wt%)

Tab.1 Chemical composition of GH738 powders (Unit: wt%)

Element	Content
C	0.06
P	0.015
Co	13.00
Al	1.40
Fe	2.00
Mn	0.01
S	0.015
Mo	4.50
B	0.005
Cu	0.10
Si	0.15
Cr	20.00
Ti	23.00
Zr	0.10
Ni	Base



(a) 沉积道特征尺寸 (b) 显微硬度测试

(a) Feature size of deposition track (b) Microhardness test

图 1 沉积道特征尺寸及显微硬度测试示意图

Fig.1 Schematic of feature size of deposition track and microhardness test

## 2 结果与分析

### 2.1 工艺参数对沉积道特征尺寸的影响

表 2 为正交参数组合下沉积道的特征尺寸及其极差( $R_w$ 、 $R_H$ 、 $R_D$ 、 $R_d$  分别为熔宽、熔高、熔深、热影响区宽度的极差)。对不同因素下各水平对应的特征尺

寸取平均值,图 2 为不同的激光功率、扫描速度和送粉速度下沉积道特征尺寸曲线图。

表 2 正交试验参数组合及沉积道特征尺寸

Tab.2 Orthogonal test parameter combination and deposition track feature sizes

Sample	Experimental parameter			Feature size				Ar
	P/W	$V_s/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_f/\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	W/mm	H/mm	D/mm	d/mm	
1#	800	4	5	2.37	0.52	0.41	0.41	4.56
2#	800	5	6	2.13	0.49	0.39	0.37	4.34
3#	800	6	7	2.06	0.46	0.31	0.32	4.47
4#	800	7	8	1.96	0.47	0.25	0.29	4.17
5#	1 000	4	8	2.71	0.85	0.42	0.30	3.18
6#	1 000	5	5	2.87	0.56	0.48	0.50	5.15
7#	1 000	6	6	2.60	0.35	0.24	0.30	7.43
8#	1 000	7	7	2.51	0.55	0.39	0.35	4.56
9#	1 200	4	7	2.65	0.52	0.43	0.36	5.09
10#	1 200	5	8	2.45	0.62	0.37	0.34	3.95
11#	1 200	6	5	3.07	0.76	0.53	0.31	4.04
12#	1 200	7	6	2.89	0.66	0.39	0.45	3.80
13#	1 400	4	6	3.39	0.48	0.51	0.37	5.17
14#	1 400	5	7	3.42	0.66	0.51	0.43	4.5
15#	1 400	6	8	3.37	0.52	0.50	0.50	4.68
16#	1 400	7	5	3.45	0.16	0.43	0.52	4.54
$R_w$	1.28	0.08	0.24					
$R_H$	0.31	0.12	0.32					
$R_D$	0.15	0.08	0.08					
$R_d$	0.11	0.05	0.08					

对比不同因素下特征尺寸的极差可看出:激光功率对应的各特征尺寸极差均较大,其中激光功率对熔宽的影响尤为显著;由图 2(a)也可看出随着激光功率增加,熔宽不断增大。而熔高出现先增大后减小的现象;这是因为随着激光功率增加,单位时间内熔化的粉末量增多,由于送粉速度不变,沉积道横截面积存在一个极限;当激光功率未超过完全熔化粉

末所需值时,熔宽和熔高随着激光功率增加而增大,而当激光功率超过完全熔化粉末的所需值时,由于熔宽继续增大,因此熔高有降低的趋势。

扫描速度和送粉速度对应的特征尺寸极差中熔高极差最大,分别为 0.12 和 0.32。由图 2(b)、(c)可看出:相对于熔宽等而言,熔高变化较大。熔高随着扫描速度增加逐渐减小,随送粉速度增大而增大;这是

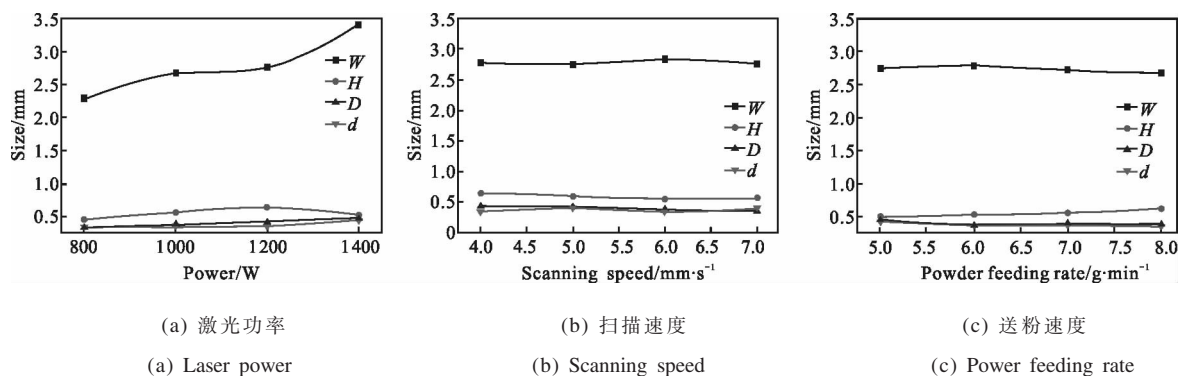


图 2 工艺参数对沉积道特征尺寸的影响

Fig.2 Effect of process parameter on deposition track feature size

由于随着扫描速度增加,单位时间内进入熔池的粉末量减少;而熔宽主要由激光功率决定,相同激光功率下熔宽无明显变化,因此熔高减小。另外随着送粉速度增大,单位时间内进入熔池的粉末量增多,会使得熔高增大。

### 2.2 多道多层沉积试验及显微组织

由于 GH738 合金的合金 Al、Ti 含量较多,裂纹敏感度较高,过窄的熔池容易在热影响区液化裂纹<sup>[8]</sup>,因此选取不同功率下熔池宽高比( $A_r$ )最大的工艺参数组合(1#、6#、9#、13#);并经搭接率与层高优化试验,多道搭接率  $R=45%$ ,层高  $Z=0.5$  mm。

多道多层(10 道 3 层)沉积试验发现,9#、13# 两组参数下沉积过程试样出现裂纹,如图 3(b)、(c)分别为出现的层间和枝晶间裂纹;沉积过程中在往复扫描热循环作用下,已经凝固的枝晶间低熔点共晶物再次熔化,在热应力作用下形成液化裂纹。因此在保证熔合良好的情况下,应降低能量输入,减少和消除裂纹。

图 3(a)为第 6# 组参数下出现的熔合不良现象,这主要是因为光斑能量服从高斯分布,边缘处温度较低,导致边缘处粉末未能完全熔化,因此熔合不良现象容易出现在道间;同时,若扫描速度过快,重熔深度不足,将会导致层与层之间不能充分熔合,出现熔合不良现象。通过工艺参数合理匹配,保证粉末能充分熔化可防止熔合不良现象发生。

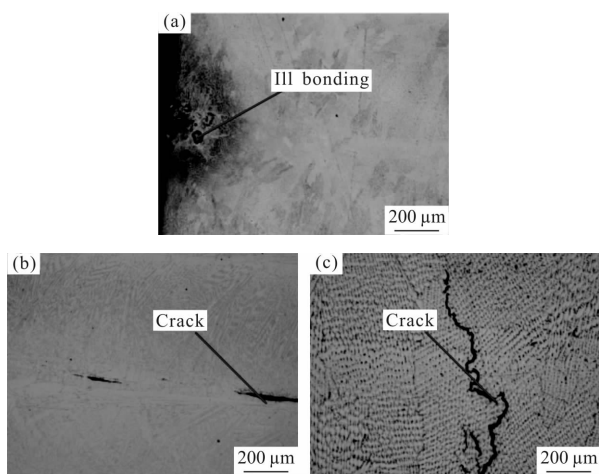


图 3 沉积区缺陷。(a)熔合不良;(b)、(c)裂纹

Fig.3 Defects in deposition zone.(a) Ill bonding; (b), (c) Cracks

经过多道多层参数优化,工艺参数确定为  $P=800$  W、 $V_s=4$  mm/s、 $V_f=5$  g/min、 $R=45%$ 、 $Z=0.5$  mm。

图 4 为沉积层截面显微组织,组织内部无裂纹、熔合不良等缺陷。修复区为典型的外延生长柱状枝晶的组织特点,柱状枝晶呈垂直于基体并趋向激光沉积高度方向生长,枝晶间距约为  $10 \mu\text{m}$ ;层间出现部分等轴晶组织;由于热量累积导致熔池顶部冷却速度降低,有助于柱状晶向等轴晶转变;同时,后一层造成的重熔未能使等轴晶全部重熔<sup>[9]</sup>。热影响区晶粒相对于基体有长大趋势,且越靠近沉积区晶粒长大现象越明显。

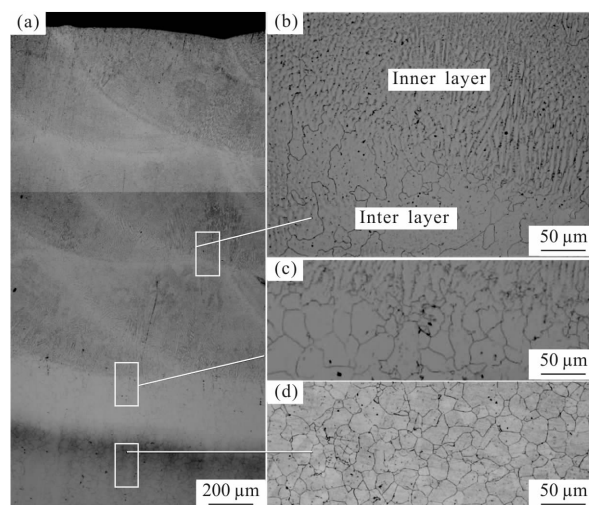


图 4 优化工艺下沉积层显微组织。(a)沉积层显微组织;

(b)层间和层内;(c)热影响区;(d)基体

Fig.4 Deposition zone microstructure under optimized parameter.

(a) Microstructure; (b) inter layer & inner layer;

(c) heat-affected zone; (d) substrate

### 2.3 不同区域碳化物及 $\gamma'$ 相分布

图 5 为修复试样不同区域的 SEM 图。由图 5(a)可知:基体中晶界和晶内均存在碳化物,且主要分布于晶界;相对于基体,热影响区碳化物明显减少;修复区枝晶间析出碳化物,但数量较少;图 6 为枝晶间碳化物 EDS 分析结果,其 Ti 含量较高,可知为  $\text{TiC}$ <sup>[10]</sup>,其中部分 Ti 原子被 Mo、Cr 取代。

激光沉积修复冷却速度较高,导致碳化物形成元素过饱和固溶于基体,来不及析出,因此修复区碳化物数量较少。同时,修复区枝晶间距较小,凝固过程中碳化物的生长空间非常小,因而最终修复区内碳化物尺寸较小。在修复过程中由于热影响区温度较高,大颗粒的碳化物在高温下不稳定,会发生分解<sup>[11]</sup>。因此,相对于基体热影响区碳化物含量减少。

扫描电镜下未观察到修复区  $\gamma'$  相, 这是由于沉积过程中冷却速度极高, 导致修复区  $\gamma'$  相来不及析出; 对比图 5(c)、(d) 可知, 相对于基体, 热影响区  $\gamma'$  相尺寸明显增大, 且数量相对减少。这是因为修复过程中热影响区温度较高, 导致细小的强化相分解, 释放出强化相形成元素, 同时未分解的  $\gamma'$  相不断长大。

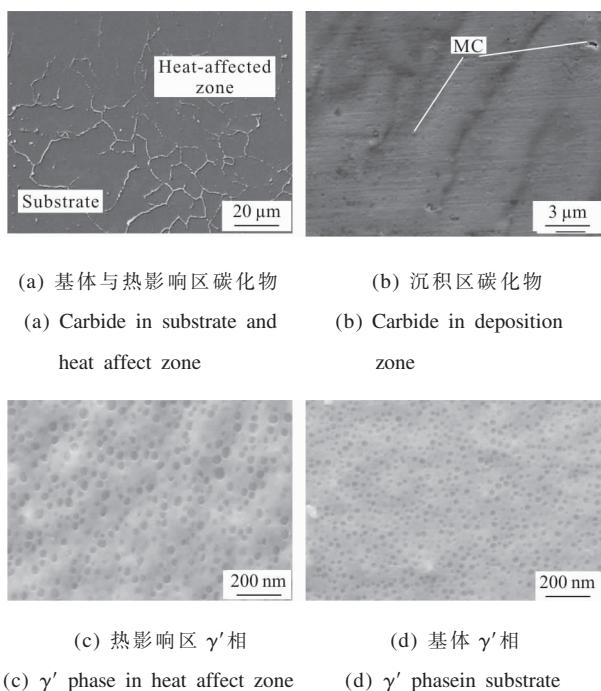


图 5 不同区域 ESM 图

Fig.5 ESM in different zone

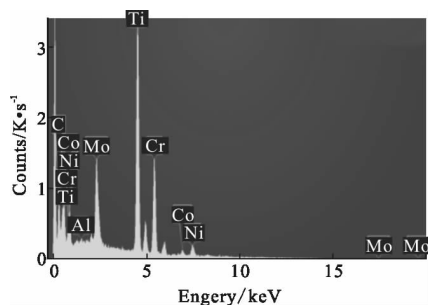


图 6 枝晶间碳化物 EDS 图

Fig.6 EDS of carbide at interdendritic

## 2.4 不同区域显微硬度分布

沿沉积高度方向硬度分布规律如图 7 所示。可以看出沉积修复区硬度为 350~470 HV0.3, 热影响区硬度为 450~480 HV0.3, 均明显低于基体硬度 480~510 HV0.3; 同时, 可以明显观察到, 沿沉积高度方向硬度逐渐降低。

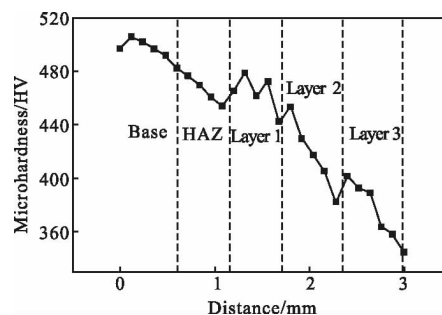


图 7 显微硬度分布曲线

Fig.7 Distribution curve of microhardness

$\gamma'$  相是 GH738 等高温合金中最主要的强化相, 且尺寸越小其强化效果越好<sup>[12]</sup>; 由于沉积过程中冷却速度快, 修复区未发现  $\gamma'$  相, 因此相对于基体和热影响区, 修复区的硬度最低。

激光沉积修复过程中的热输入使热影响区部分等轴晶粒长大, 并且相对于基体, 热影响区的  $\gamma'$  相尺寸明显增大, 因此, 热影响区硬度会有所降低<sup>[13]</sup>; 另外, 碳化物属于脆性相, 能够提高材料的硬度, 热影响区碳化物数量减少也会导致硬度降低。

因为靠近基体的修复区冷却速率最大, 原子扩散受到抑制, 合金的固溶度增加, 溶质原子造成晶格畸变, 增大了位错运动的阻力, 使滑移难以进行, 从而使合金的硬度相对较高; 而随着沉积的进行, 由于热累积作用, 熔池冷却速度逐渐降低, 枝晶间偏析严重, 因此沿沉积高度方向硬度逐渐降低。

## 3 结论

(1) 工艺参数正交试验表明: 激光功率对特征尺寸影响最大, 扫描速度和送粉速度对熔高影响较大;

(2) GH738 激光沉积修复层内呈典型的外延生长柱状枝晶, 一次枝晶间距约为 10  $\mu\text{m}$ , 枝晶间析出少量碳化物。相对于基体, 热影响区碳化物明显减少,  $\gamma'$  相尺寸明显增大;

(3) 沉积区和热影响区硬度均明显低于基体; 且沿沉积高度方向硬度逐渐降低。

## 参考文献:

[1] Dong Jianxin. High Temperature Alloy GH4738 and its Application [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014: 1-5. (in Chinese)

董建新. 高温合金 GH4738 及应用[M]. 北京: 冶金工业出

- 出版社, 2014: 1-5.
- [2] Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing, et al. Application of laser forming repair technology on the aerial castings [J]. *Foundry Technology*, 2008, 29(3): 391-393. (in Chinese)  
薛蕾, 黄卫东, 陈静, 等. 激光成形修复技术在航空铸件修复中的应用[J]. 铸造技术, 2008, 29(3): 391-393.
- [3] Zheng Lijuan, Li Yan, He Dachuan, et al. Analysis on temperature field of multi-path laser cladded and microstructure of coatings layer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 52-57. (in Chinese)  
郑丽娟, 李燕, 何大川, 等. 激光多道熔覆温度场及熔覆层组织分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 52-57.
- [4] Wang Zhijian, Dong Shiyun, Xu Binshi, et al. Effect of laser cladding processing parameters on metal forming efficiency and geometry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 315-319. (in Chinese)  
王志坚, 董世运, 徐滨士, 等. 激光熔覆工艺参数对金属成形效率和形状的影响 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 315-319.
- [5] Bian Hongyou, Zhao Xiangpeng, Li Ying, et al. Experimental study on laser deposition repair GH4169 alloy component[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0206006. (in Chinese)  
卞宏友, 赵翔鹏, 李英, 等. 激光沉积修复 GH4169 合金试验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0206006.
- [6] Kim Daeyoung, Hwang Jonghyun, Kim Kwangsool Youn Joonggeun. A study on fusion repair process for a precipitation hardened IN738 Ni -based superalloy [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, 122(7): 457-461.
- [7] Zhang Dongyun, Li Zhibo, Zhao Heng, et al. Research of the influence of processing parameter on laser directional solidification structure[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(2): 113-118. (in Chinese)  
张冬云, 李志波, 赵恒, 等. 工艺参数对 Rene80 激光定向凝固组织影响研究[J]. 应用激光, 2013, 33(2): 113-118.
- [8] Li Zhuoxin, Wang Heng, Li Yang, et al. Progress on effect of processes and microelements on liquation cracking of weld heat-affected zone of nickel-based alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 42(6): 37-43. (in Chinese)  
栗卓新, 王恒, 李杨, 等. 工艺与微量元素对镍基合金焊接热影响区液化裂纹影响的研究进展 [J]. 机械工程学报, 2016, 42(6): 37-43.
- [9] Wang Jiajin. *Laser Processing Technologies* [M]. Beijing: China Metric Press, 1992: 10-15. (in Chinese)
- [10] Hussein N I S, Segal J, McCartney D G, et al. Microstructure formation in Waspaloy multilayer builds following direct metal deposition with laser and wire [J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, 497: 260-269.
- [11] Wu Baoping, Li Linhan, Wu Jiantao, et al. Effect of solution temperature on microstructure of as-cast waspaloy alloy [J]. *Transaction of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35: 146-153. (in Chinese)  
吴保平, 李林翰, 吴剑涛, 等. 固溶温度对铸造 waspaloy 合金组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35: 146-153.
- [12] Yao Zhihao, Dong Jianxin, Zhang Maicang, et al. Relationships between microstructures and properties for GH864 superalloy [J]. *Rare Metal Materials And Engineering*, 2010, 39(9): 1565-1570. (in Chinese)  
姚志浩, 董建新, 张麦仓, 等. GH864 合金显微组织与力学性能的相关性 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1565-1570.
- [13] Kumar S, Shahi A S. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI304 stainless steel joints [J]. *Mater Des*, 2011, 32: 3617-3623.