

电磁辅助激光成形修复 GH4169 合金 Laves 相分析

刘奋成¹, 王晓光¹, 程洪茂¹, 林鑫²

(1. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063)

(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 利用电磁搅拌辅助激光成形修复技术修复了带有 V 形槽缺陷的 GH4169 高温合金, 通过改变磁场电流强度比较了修复区 Laves 相形貌与体积分数, 并测量了枝晶间、枝晶干 Nb 元素含量, 研究了磁场电流大小与元素偏析和材料硬度之间的关系。结果表明: 电磁搅拌作用下 Laves 相的形貌发生了明显改变, 由连续网状分布逐渐变为短蠕虫状和颗粒状, Laves 相的体积分数有所减小; 枝晶干 γ 基体 Nb 元素的含量随着搅拌磁场的增大而增加, 当磁场电流为 60 A 时, Nb 元素的平均含量达到 3.72%(质量分数), 较未施加电磁搅拌的试样增加了 0.33%。硬度测试显示, 电磁搅拌作用显著提高了修复试样的显微硬度, 这与 Nb 等合金元素在枝晶干基体 γ 相中固溶度的提高有关。分析认为, 电磁搅拌促进了垂直于枝晶生长方向熔池液态金属的流动, 促进了溶质元素的均匀分布, 使枝晶臂的生长更发达, 共晶组织分布更均匀。

关键词: GH4169; 激光修复; 电磁搅拌; Laves 相

中图分类号: TG665

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)11-3593-07

Inconel 718 镍基高温合金零部件在制造和服役过程中不可避免地出现机加超差、磨损和服役过程中的疲劳裂纹等损伤失效情况^[1,2]。激光成形修复(Laser Forming Repair, LFR)是以激光沉积制造技术与激光熔敷技术为基础的一种新型修复技术, 利用激光热源熔敷填充材料与待修复基体, 修复零件几何尺寸以及优化组织性能, 在 Inconel 718 合金等贵重金属零件的激光成形修复方面具有明显的技术优势和巨大的应用前景^[3-6]。

针对高成本、大周期的传统加工制造镍基高温合金零件的激光成形修复可以极大节约成本和时间, 但由于修复件的修复层普遍经历了非平衡凝固过程, 得到的修复区组织为铸态组织, 其间存在着枝晶间的微观偏析, 其中以 Nb 元素最为重要。Nb 元素为 Inconel 718 合金中主要的强化相形成元素, Nb 的减少不仅减少强化相 γ'' 量, 富集的 Nb 元素还会导致大体积 Laves 相的形成, 降低了修复件的力学性能。西北工业大学的陈静等^[7]研究了激光成形修复 GH4169 合金的组织 and 力学性能, 发现组织为沿沉积方向外延生长的柱状枝晶, 枝晶间仍然存在块状 Laves 相, 而 Laves 相作为一个脆性相, 为裂纹的起源和扩展提供了有利的位置和通道。同样地, 明宪良等^[8]使用激光成形修复技术修复了 GH4169 合金锻件, 在修复件的显微组织中

也观察到大量的脆性 Laves 相, 发现该脆性相是在拉伸测试中是引起裂纹等缺陷的主要原因。南京航空航天的赵剑峰等^[9]研究了 GH4169 合金激光修复试样的高温拉伸性能, 并对其断裂机理进行分析, 研究发现修复试样的热影响区在高温拉伸时首先发生断裂, 原因也与合金元素 Nb 的偏析有关。

从热处理角度来说, 要实现 Laves 相消除, 必须采用温度高于 1100 °C 的高温固溶处理, 此温度大大高于合金晶粒快速粗化温度 1020 °C, 会导致合金晶粒粗化。而在焊接中普遍采用增加熔池冷却速率的方法改善焊缝凝固组织。Jennifer 等^[10]比较了冷却速率对 Inconel718 合金堆焊显微组织的影响, 发现高的冷却速率可以明显细化晶粒, 从而得到细小且分散的 Laves 相。Manikandan 等^[11]考察了冷却速率对 Inconel718 合金 GTA 焊缝金属枝晶间 Laves 相和合金元素微观偏析, 采用液氮冷却的方法获得了较快的冷却速率, 使得合金元素微观偏析和 Laves 相体积分数得到减小, 同时 Laves 相形貌也变得细小分散。但是, 快冷的方法也会造成较大应力, 并可能导致焊缝裂纹及变形的发生。因此, 目前对于 Laves 相形貌控制的研究尚不够深入, 仍不能有效控制 Laves 相在合金中的形成。

电磁搅拌技术(Electromagnetic stirring, EMS)在

收稿日期: 2018-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(51565041, 51865036); 江西省自然科学基金(20171BAB206004); 江西省教育厅基金(GJJ170581)

作者简介: 刘奋成, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83863028, E-mail: fencheng999@163.com

铸造和焊接领域被证明可以有效地细化凝固组织,改善夹杂物的均匀分布,提高材料的综合力学性能^[12-14]。而激光修复中熔池的凝固与焊接类似,因此电磁搅拌对激光修复熔池液态金属的凝固过程也会产生影响。基于此,杨光等^[15]将自行研制的电磁搅拌设备运用于钛合金的激光沉积成形中,发现加快磁场搅拌速率可以细化沉积层 α 片层组织,提高沉积层的力学性能。余小斌等^[16]则将电磁场引入到 GH4169 镍基高温合金中,通过施加电磁搅拌的方式来加速熔池中液态金属的对流,进而影响凝固组织,但本研究中并未给出直接证据解释磁场如何影响熔池液态金属的凝固行为。

本研究将电磁搅拌技术与激光修复技术结合,实现了 GH4169 镍基高温合金的电磁搅拌辅助激光成形修复,比较了磁场强度对激光成形修复 GH4169 合金中 Laves 脆性相析出、合金元素分布和显微硬度的影响规律,所得结果可为电磁搅拌技术在镍基高温合金激光成形修复中的应用提供实验和理论基础。

1 实验

实验使用的激光成形修复设备是沈阳航空航天大学设计建造的 LDF-6000-60 型激光成形系统。该系统

主要由额定功率为 6550 W 的光纤激光发生器、光路传输系统、惰性气体加工室、粉末传输系统、电磁搅拌系统及数控工作台等 5 部分组成。自行研制的电磁搅拌器型号为 350 型,旋转磁场频率为 15 Hz,实验中磁场电流分别设定为 0、20、40 和 60 A。

修复实验所用的基体材料为固溶态 GH4169 镍基合金锻件,选用的填充材料是用等离子旋转电极法制备的 GH4169 合金粉末,颗粒尺寸为 175 μm 左右。其化学成分如表 1。试验模拟 V 型槽缺陷的激光成形修复,在基体材料上采用电火花线切割加工成贯通式 V 型槽作为待修复试样,试样修复前进行砂纸打磨,并用丙酮清洗油污和氧化物,修复件基体尺寸为 60 mm \times 30 mm \times 10 mm, V 型槽的展开角度为 50°,如图 1a 所示。

激光成形修复前对 GH4169 合金粉末进行真空烘干处理,温度为 150 $^{\circ}\text{C}$,烘干时间大于 4 h,随后在真空炉中冷却至室温。修复时所设定的磁场电流强度分别为 0、20、40 和 60 A。激光成形修复后的 GH4169 合金试样如图 1b 所示,修复过程中所选用的其他工艺参数包括:激光功率 1400 W,扫描速率 6 mm/s,送粉率 4 g/min,保护气体 6 L/min,光斑直径 3 mm,搭接率 25%,单层 Z 向升高 0.3 mm。

表 1 GH4169 合金粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of GH4169 superalloy powder ($\omega/\%$)

C	Nb	Cr	Ni	Al	Ti	Mo	Mn	Si	S	P	Fe
0.034	4.91	19.68	51.75	0.63	0.97	3.18	0.11	0.23	0.001	0.004	Bal.

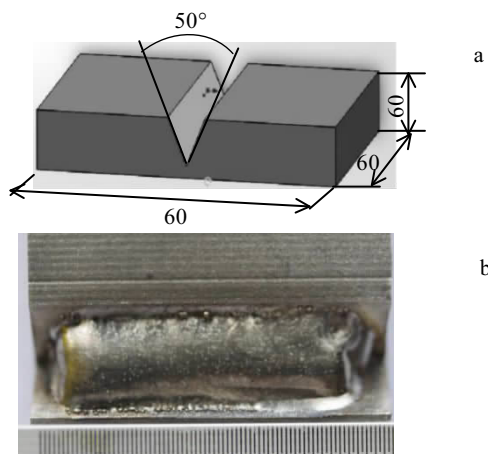


图 1 GH4169 合金修复试样示意图和修复后实物图

Fig.1 Sketch map (a) and repaired sample (b) of GH4169 superalloy

激光修复后的 GH4169 合金试样利用线切割沿垂直于激光扫描方向截取金相试样,利用 MR-5000 型倒置式金相显微镜、Tescan VEGA II-LMH 型扫描电子显微镜及其自带的 OXFORD INCA 型能谱仪对修复件显微组织和合金元素分布进行观察和分析。金相腐蚀剂为 100 mL $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ +20 mL HCl +5 g FeCl_3 ,扫描电子显微观察所用的的腐蚀剂为 8 mL H_2O + 4 mL HCl +2 mL H_2O_2 + 1 mL HNO_3 。在 401MVD 数字显微硬度计上对修复后的试样进行维氏硬度测量,载荷为 200 g,加载时间 20 s。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 2 为激光修复 GH4169 合金试样修复区金相显微组织,枝晶干主要为 γ 相基体,枝晶间主要为共晶(γ +Laves)相。在实验所用修复参数下,各试样修复区组织致密,无气孔、夹杂等冶金缺陷。图 2a 和 2b 为未

加磁场搅拌修复试样修复区的显微组织, 枝晶的定向生长特征比较明显, 二次枝晶臂较小, 在枝晶间存在大量条状且呈连续分布的共晶(γ +Laves)相。随着磁场电流的增加即电磁搅拌作用的增强, 如图 2c~2h, 枝晶干 γ 相仍保持着一定的取向, 二次枝晶臂的发达程度增加, 枝晶间连续的 Laves 相逐渐变成不连续的蠕虫状和细小颗粒状组织。当电流强度为 20 A 时, 枝晶的生长较为发达, 取向性有所减弱, Laves 相形貌为短小的蠕虫状, 当电流强度为 60 A 时, 枝晶具有方向性特征, 二次枝晶臂更发达, 且 Laves 相形貌主要为颗粒状。这说明在本实验条件下, 枝晶的生长方向性未发生明显改变, 枝晶的生长方向仍保持定向特征, 磁场对枝晶的形态和 Laves 相形貌有较大影响。

2.2 Laves 相形貌

图 3 显示了不同磁场电流条件下激光成形修复 GH4169 合金修复态试样中枝晶间 Laves 相形貌。由图可知, 未添加电磁搅拌时, 修复区脆性 Laves 相以

长条状为主, 同时可见少量颗粒状 Laves 相存在于共晶 γ 相组织中, 如图 3a 所示。随着磁场电流的增大, Laves 相由原来的连续长条状分布变为不连续的细小颗粒状分布, 同时脆性 Laves 相的体积分数相应减少, 在整个视野中的分布显得更加均匀, 如图 3b、3c 和 3d 所示。

使用 Image pro plus 软件对图 3 中的 Laves 相进行定量统计分析, 各试样修复区 Laves 相的体积分数随磁场电流的变化趋势如图 4 所示。由图可知, 随着磁场电流的增大, Laves 相的体积分数显著减少。磁场电流为 0 A 时, Laves 相的体积分数测量值为 11.6%; 当磁场强度为 20 和 40 A 时, Laves 相体积分数分别为 4.9%和 4.6%, 数值较未加电磁搅拌试样明显减少。当磁场电流为 60 A 时, 此时 Laves 相面积分数达到最少, 为 3.9%。统计结果说明, 在一定磁场电流范围内, 随着磁场强度增加, 修复区内 Laves 相的体积分数得到控制, 而 Laves 相的减少可以释放出更多的 Nb 等

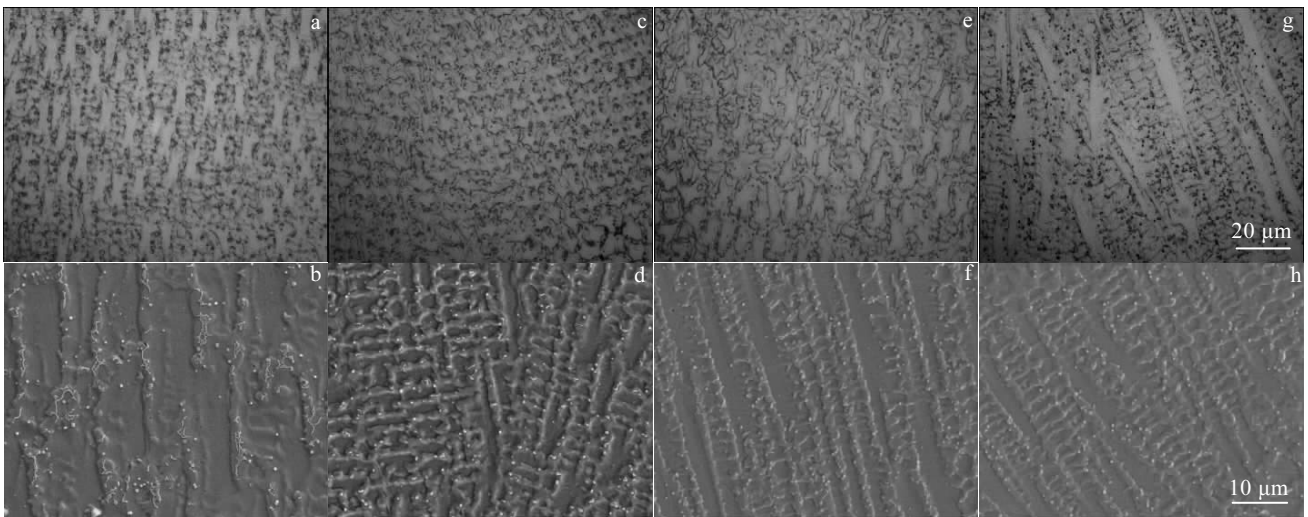


图 2 不同磁场电流条件下激光修复 GH4169 合金试样修复区显微组织

Fig.2 Microstructures of laser repaired GH4169 superalloy samples with different magnetic field current intensities: (a, b) 0 A, (c, d) 20 A, (e, f) 40 A, and (g, h) 60 A

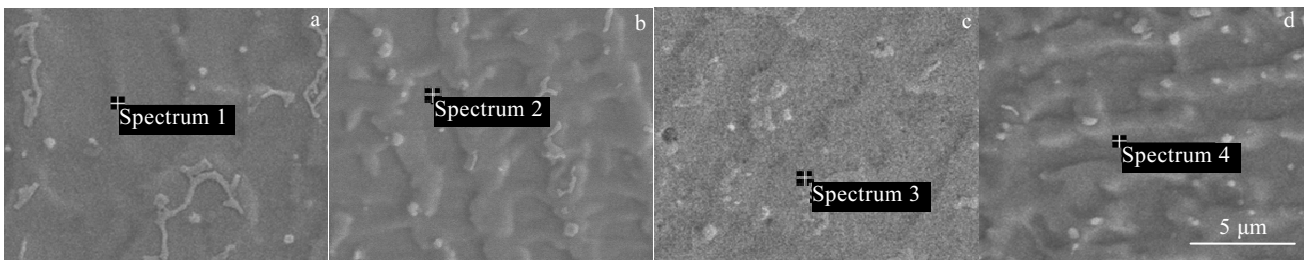


图 3 施加电磁搅拌前后修复前后激光成形修复 GH4169 合金修复区 Laves 相形貌

Fig.3 Morphologies of Laves phase in repaired zones of laser forming repaired GH4169 superalloy samples with different magnetic field currents: (a) 0 A, (b) 20 A, (c) 40 A, and (d) 60 A

合金元素，减缓了枝晶间元素的偏析，促进了成分的均匀化分布。分析认为，此作用得益于电磁场对熔体的强烈搅拌作用。

需要指出的是，限于本实验装置条件限制，不能继续增大磁场电流以获得更大磁场。虽然以上实验结果显示随磁场电流的增加，Laves 相的体积分数呈单调下降趋势，这有利于减少 Laves 相，但是考虑到增大磁场后可能过强的旋转运动在金属熔体中心区域会形成很深的液穴，容易卷入气体和夹杂物，造成气孔和夹杂等冶金缺陷^[17]，因此磁场电流不宜太大。

2.3 合金元素分布

以上分析表明，电磁搅拌条件下枝晶间 Laves 的体积分数和形貌均发生了变化，Laves 相的形成需要消耗较多的 Nb、Mo 等元素，枝晶间 Laves 相体积分数的减少会使 Nb、Mo 等元素在枝晶干的分布增加，使元素的分布更均匀，有利于促进后续热处理中 γ'' 相的均匀析出。对不同磁场电流条件下激光成形修复 GH4169 合金沉积试样枝晶干处合金元素进行测试，测试的位置如图 3 所示，EDS 分析结果如表 2 所示。分析结果显示，随磁场电流的增大，枝晶干处 Nb 和 Ti 元素含量逐渐增多，变化规律与前述的 Laves 相体积分数随着磁场电流增大而减少的规律相吻合。由各处 Nb 元素测量结果来看，枝晶干中 Nb 元素从

2.9%(质量分数)提高到 3.72%，含量提高了 28%，但是仍明显低于合金总 Nb 元素平均含量 4.91%。同样，Ti 元素含量也由原来的 0.54%提高到 0.7%，提高了约 30%。即磁场作用下 Nb 和 Ti 元素在枝晶间区域的微观偏析程度得到减缓。测试结果也显示，电磁搅拌对与 Mo 等合金元素影响作用较弱，枝晶干处含量在不同磁场电流条件下无明显变化。

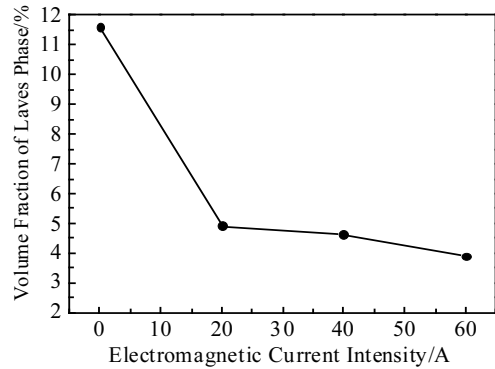


图 4 不同磁场电流条件下激光成形修复 GH4169 合金修复 Laves 相的体积分数

Fig.4 Volume fraction of Laves in laser repaired GH4169 superalloy samples with different electromagnetic field currents

表 2 图 3 中不同磁场电流条件下 GH4169 合金激光修复试样枝晶干合金元素含量

Table 2 Chemical composition distribution of alloying elements in laser repaired GH4169 super alloy samples in Fig.3

Current/A	Element content	Nb	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo
0	$\omega/\%$	2.9	0.54	19.83	19.58	53.79	3.36
	at%	1.8	0.65	22.01	20.23	53.29	2.02
20	$\omega/\%$	3.28	0.64	20.43	19.41	53.03	3.21
	at%	2.04	0.78	22.67	20.05	52.53	1.93
40	$\omega/\%$	3.37	0.59	20.28	19.65	52.94	3.17
	at%	1.84	0.7	22.45	20.26	52.85	1.9
60	$\omega/\%$	3.72	0.7	20.32	18.54	53.33	3.39
	at%	2.31	0.85	22.56	19.16	53.08	2.04

2.4 磁场作用下熔池液态金属的流动行为

当旋转磁场与熔池液态金属相互作用时，在熔池内引起的感应电动势形成回路，便产生了感应涡电流。导电液体做切割磁力线运动时，旋转磁场与感应电流的相互作用会产生洛伦兹力，促使整个熔体和磁场一起发生旋转运动，达到搅拌效果。

在电磁辅助激光修复过程中，由于激光热源熔化的特性，在熔池界面处存在较高的温度梯度， γ 枝晶最先沿着温度梯度的方向生长，图 5a、5b 显示了熔池液态金属热溶质对流、熔池 Marigoni 对流以及电磁搅拌作用示意图。相对液态金属内的对流来讲，电磁搅拌

作用力的方向在整个熔池内基本垂直于枝晶的生长方向，电磁搅拌对枝晶凝固前端的搅拌作用较强，固液界面熔体的对流带走了 γ 枝晶干排出的溶质，由于液相对流所导致的流体压强降低，也使得在枝晶间存在向界面前沿的液相对流。枝晶间的液相对流将枝晶两侧的溶质带到枝晶尖端前沿，此外，在旋转磁场-热电磁力的耦合作用下，二次枝晶臂周围区域的液相对流加剧，枝晶间溶质富集的程度进一步降低，枝晶二次臂的生长速度得到了加快^[18]，枝晶间的共晶区域分布更加均匀。在 GH4169 合金的激光继续熔敷快速凝固过程中，枝晶干 Nb 元素的含量较低，枝晶间 Nb 元素

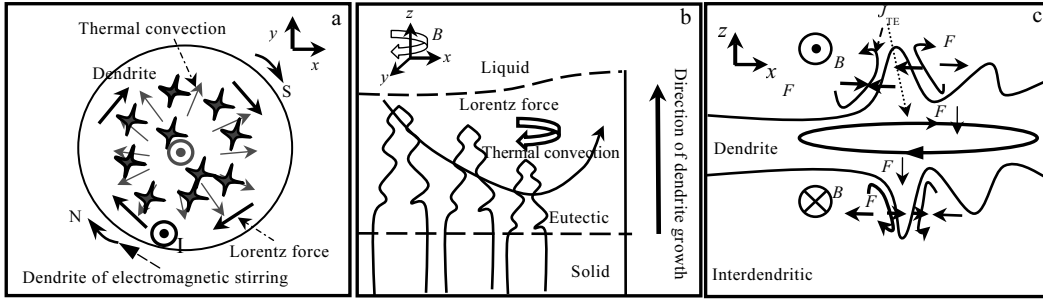


图 5 旋转磁场下熔池中电磁作用力对枝晶影响示意图

Fig.5 Schematic diagram of influence of electromagnetic force on dendrite in molten pool under rotating magnetic field: (a) vertical view; (b) main view; (c) thermo electromagnetic effect (B -magnetic field intensity, F -thermo electric magnetic force, J_{ET} -thermo electric current intensity)

的含量较高；而在电磁搅拌的作用下，元素的分布更加均匀，枝晶干元素 Nb 含量升高，枝晶间 Nb 元素含量变小。因此，在最后的共晶反应阶段，元素的富集程度较低，Laves 相的形貌主要为短蠕虫状和颗粒状。

图 5c 为热电磁作用下枝晶干、二次枝晶臂的受力示意图，在激光快速凝固的特征下，固液界面处的枝晶尖端会产生由温度差引起的热电势，把固/液界面前沿的局部区域看成是闭合回路，会在枝晶上下端产生热电势差，从而形成热电流 J_{ET} 回路，在旋转磁场作用下产生的热电磁力可以表示为^[19]：

$$F = J_{ET} \times B = \frac{\sigma_s \sigma_L^2}{(\sigma_s - \sigma_L)^2} \cdot f_s (\zeta_s - \zeta_L) \nabla T \times B \quad (1)$$

式中， σ_s 为固相导电率； σ_L 为液相导电率； ζ_s 为固相的热电势， ζ_L 为液相的热电势； f_s 为固相分数； T 为温度。

当磁场足够强时，热电磁力会促使部分枝晶或枝晶臂发生断裂，导致 CET 转变现象^[20]。而在试验的条件下，并未观察到枝晶的断裂，这说明在试验条件下的热电磁力较小或者要使 γ 枝晶断裂力的阈值太大。当磁场电流强度较弱时，较弱的对流会促使局部枝晶沿搅拌的方向稳定生长，从而使枝晶较为发达，如图 2b。对比图 2f~2h，增大旋转磁场后，枝晶仍沿温度梯度的方向生长，在搅拌方向的枝晶生长较弱，这说明磁场强度增大后界面的不稳定性更大。此外，热电磁力在枝晶附近局部固液区域会对枝晶周围区域的搅拌作用继续增强，促进了局部固液界面溶质的均匀性分布以及二次枝晶臂的生长。

2.5 硬度

图 6 为不同磁场电流条件下激光成形修 GH4169

合金沉积试样硬度测量结果，测量位置位于修复区高度方向中间位置，从左侧基材区至右侧基材。硬度测试结果显示，热影响区的硬度最高，基材硬度次之，而修复区的硬度最低，并且硬度最小值分布在修复区正中间附近区域。同时可见，加入磁场后修复区的硬度明显增大。

从测试结果可以看出，激光成形修复试样各区域硬度存在明显差异，这与各处不同的显微组织对应。试样修复前为锻后固溶态组织，因此可以忽略组织中沉淀强化相的析出。在修复热作用下，热影响区组织发生变化，其中靠近修复区区域在激光热作用下局部晶界发生熔化，特别是三角晶界处，冷却后此区域得到重熔凝固组织，局部可见小尺寸的共晶 Laves 相，如图 7 所示。由于晶界处 Laves 相的产生，导致此区域硬度有所提高。逐渐远离修复区后热影响区晶粒组织变得粗大，即此区域温度超过晶粒生长的静态再结

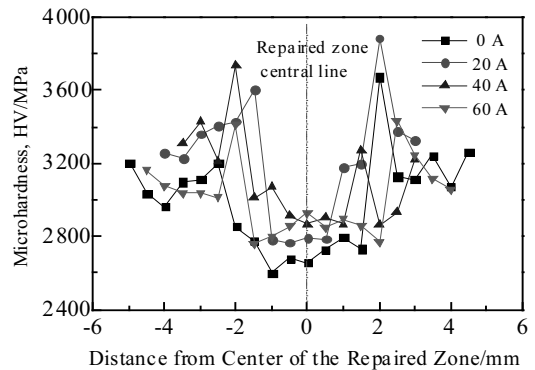


图 6 电磁搅拌激光成形修复 GH4169 合金试样显微硬度分布 Fig.6 Microhardness variation of laser repaired GH4169 superalloy samples

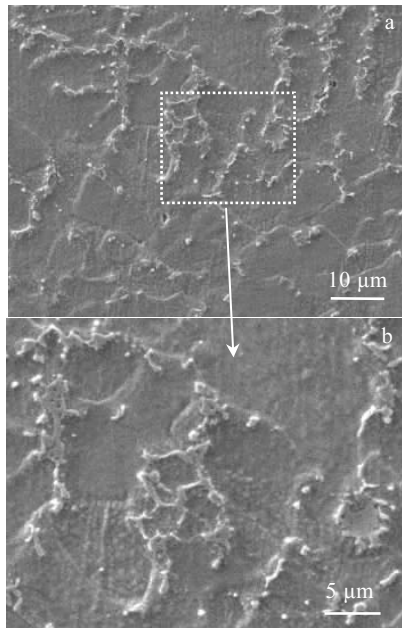


图 7 激光修复试样热影响区部分熔化区组织

Fig.7 Microstructures of partial melting zone in heat affected zone (a); local magnification of marked area in Fig.7a (b)

晶温度，从硬度变化来看此区域硬度值有所降低。而对于修复区中心部位，因为激光修复后得到较为粗大的柱状晶组织，晶粒粗大，硬度值最低。

比较磁场电流对修复区显微硬度的影响，发现修复区硬度值大体上呈现出随磁场电流强度的增加而增加的趋势。当电流强度为 20 A 时，枝晶较为发达，Laves 相为短蠕虫状，枝晶干 Nb 元素等较少，固溶强化效果较弱；当电流强度增加，枝晶取向性增加，Laves 相变的更为细小，更多的 Nb 元素等分布在枝晶干区域，固溶强化效果明显，因此硬度值得到提高。这也说明，在修复状态下，修复区显微硬度也受到枝晶的形态和 Laves 相的形貌影响，且受电磁搅拌的作用发生变化。

3 结 论

1) 激光成形修复 GH4169 合金的修复区修复态组织 Laves 相呈连续的长条状，随着磁场电流强度的增大，修复区 Laves 相变成颗粒状，体积分数也得到减少，由无磁场时的 11.6% 减少到 3.9% (体积分数)。

2) 搅拌磁场产生的洛伦兹力和热电磁力共同促进了枝晶前端溶质元素的均匀分布，促进了二次枝晶臂的生长，使枝晶间共晶 Laves 相的分布更均匀，枝晶干 Nb 元素含量增加，Nb 元素的微观偏析有所减弱。当磁场电流为 60 A 时，枝晶干 Nb 元素的平均含量达

到 3.72% (质量分数)。

3) 激光成形修复后，热影响区硬度最高，修复区最低。加入磁场搅拌后，修复区的硬度值有明显的增大，这与磁场搅拌作用造成的枝晶间 Laves 相体积分数的减少以及 Nb 元素对枝晶干的固溶强化作用有关。

参考文献 References

- [1] Yoo J T, Yoon J H, Lee H S *et al.* *Journal of Mechanical Science & Technology*[J], 2012, 26(26): 2101
- [2] Huang Weidong(黄卫东), Lin Xin(林 鑫). *Materials China* (中国材料进展) [J], 2010, 29(6): 12
- [3] Qin Lanyun(钦兰云). *Research on Key Technique of Laser Deposition Repair Titanium Alloy*(钛合金激光沉积修复关键技术研究)[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014
- [4] Huang Weidong(黄卫东), Lin Xin(林 鑫), Chen Jing(陈 静) *et al.* *Laser Solid Forming*(激光立体成形)[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 1
- [5] Qi Yongai, Zhao Jianfeng, Xie Deqiao *et al.* *Chinese Journal of Lasers*[J], 2013, 40(11): 134
- [6] Pan Hu, Zhao Jianfeng, Liu Yunlei *et al.* *Chinese Journal of Lasers*[J], 2013, 40(4): 109
- [7] Zhang Shaoping(张少平), Sui Shang(隋 尚), Ming Xianliang(明宪亮) *et al.* *Applied Laser*(应用激光)[J], 2015, 35(3): 277
- [8] Ming Xianliang, Chen Jing, Tan Hua *et al.* *Chinese Journal of Lasers*[J], 2015, 42(4):71
- [9] Zhao Jianfeng, Cheng Cheng, Xie Deqiao *et al.* *Chinese Journal of Lasers*[J], 2016, 43(8): 167
- [10] Bennett J L, Kafa O L, Liao H G *et al.* *Procedia Manufacturing*[J], 2018, 26: 912
- [11] Manikandan S G K, Sivakumar D, Prasad R K *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214 : 358
- [12] Raihle C M, Sivesson P, Tuk iainen M *et al.* *Ironmaking and Steelmaking*[J], 1994, 21(6): 487
- [13] Jia Guanglin(贾光霖), Zhang Guozhi(张国志), Li Xiongjie(李雄杰) *et al.* *Journal of Northeastern University* (东北大学学报)[J], 1994, 15(3): 290
- [14] Sui Xiangrong(眭向荣), Shen Fenggang(沈凤刚), Liu Jingfeng(刘景凤) *et al.* *Welding Technology*(焊接技术)[J], 2003, 32(6): 16
- [15] Qin Lanyun, Yang Guang, Bian Hongyou *et al.* *Chinese Journal of Lasers*[J], 2014, 41(3): 76
- [16] Yu Xiaobin(余小斌), Liu Fencheng(刘奋成), Lin Xin(林 鑫)

- et al. Applied Laser*(应用激光)[J], 2014, 34(6): 513 450
- [17] Chen Xingrun(陈兴润), Zhang Zhifeng(张志峰), Xu Jun(徐骏) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(5): 937
- [18] Wang Xianbin(王贤斌), Lin Xin(林鑫), Wang Lilin(王理林) *et al. Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2013, 62(7):
- [19] Wang Ling(王玲), Dong Meng(董蒙), Sun Jinmei(孙金妹) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2018, 54(5): 743
- [20] Li X, Fautrelle Y, Zaidat K *et al. J Cryst Growth*[J], 2010, 313(2): 267

Laves Phase Precipitation of Laser Repaired GH4169 Superalloy Assisted by Electromagnetic Stirring

Liu Fencheng¹, Wang Xiaoguang¹, Cheng Hongmao¹, Lin Xin²

(1. National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: GH4169 alloy samples with V-grooves were experimentally repaired by electromagnetic stirring assisted laser repairing under different magnetic field currents. The morphologies and volume fraction of Laves in the repaired zone were compared, and the contents of Nb element in the matrix γ and the hardness of the repaired sample were measured by changing the magnetic field currents to explain the relationship between the magnetic field currents and the element segregation as well as mechanical properties. The results show that with the assistance of electromagnetic field, the morphology of Laves is obviously changed from reticulate to rod-like and granular shape and its volume fraction is decreased. The content of Nb element in the matrix γ is increased with the increase of the magnetic field current. When the magnetic stirring current is 60 A, the content of Nb element is 3.72 wt%, and it is increased by 0.33% compared to that without electromagnetic stirring. The hardness test shows that the electromagnetic stirring greatly increases the hardness of the repaired sample, which is related to the increase in the solid solubility of alloy elements such as Nb in the γ phase of dendrite core. The electromagnetic stirring improves both the flow of liquid metal in the melting pool vertical to the dendrite growth direction and the homogeneous distribution of solute element; as a result, the dendrite arm is more developed and the eutectic structure is more homogeneous.

Key words: GH4169; laser repairing; electromagnetic stirring; Laves phase

Corresponding author: Liu Fencheng, Ph. D., Associate Professor, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863023, E-mail: fencheng999@163.com