

# 激光成形修复 Inconel 625 合金的 工艺特性和组织研究

徐庆东, 王述钢, 乐国敏, 杨磊, 莫文林, 蒋驰, 魏怡芸, 张鹏程

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621908)

**摘要:** 对激光成形修复 Inconel 625 合金的工艺特性以及不同区域的组织进行了研究。结果表明: 激光成形修复 Inconel625 合金的工艺范围较宽; 激光功率主要影响单道修复层的宽度; 扫描速度对单道修复层的尺寸影响较为显著, 而送粉率的影响较小。基材的相组成包括  $\gamma$ (Ni-Cr)基体相、大尺寸(约 10  $\mu\text{m}$ )块状 MC 型碳化物 (M 为 Nb 和 Ti)、沿晶界析出的小尺寸(约 0.5  $\mu\text{m}$ )块状 MC 型碳化物以及不规则形状的 Laves 相。修复区组织为呈外延生长的柱状枝晶, 相组成为  $\gamma$  基体相、沿枝晶界析出的 Laves 相以及少量 MC 型碳化物。层与层界面处 Laves 相析出急剧增加形成层间过渡区。

**关键词:** 激光成形修复; Inconel 625 合金; 工艺特性; 显微组织

**中图分类号:** TG146.1<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)05-1598-07

Inconel 625 合金是一种 Ni-Cr 固溶强化的镍基高温合金, 具有较高的高温强度、良好的抗疲劳和耐腐蚀性, 主要用于制造航空航天发动机热端零件、汽轮机叶片等部件<sup>[1-3]</sup>。然而, 这些部件由于服役环境恶劣, 受到磨损、冲刷烧蚀等作用易损伤失效; 此外, 在加工过程中可能由于误刀而导致零件报废<sup>[4,5]</sup>。如果对零件整体进行更换, 不仅生产和更新周期较长, 且成本较高。若能采用适当的修复技术快速经济地恢复受损零件的使用性能, 对于保障装备的正常运行, 降低生产成本具有重要意义。

激光成形修复技术(laser forming repairing, LFR)<sup>[6-8]</sup>以损伤零件为基体, 在待修复区域逐层堆积熔融粉末, 在不破坏零件本体性能的前提下, 可以实现具有三维形状缺陷的修复, 恢复零件的几何尺寸和力学性能, 使其再次达到使用要求。与传统修复技术(TIG 焊、热喷涂等)<sup>[9-11]</sup>相比, 激光成形修复技术具有自动化程度高、热输入小、修复区性能优异等优点<sup>[12]</sup>, 可能是解决 Inconel 625 合金受损零部件快速修复问题的有效手段。

目前激光成形修复技术已经在钛合金、不锈钢等材料零件的修复工作中获得了实际应用<sup>[13-16]</sup>。此外, 由于 Inconel 625 合金的 Al、Ti 含量较低, 表明该材料在沉积过程中开裂倾向低, 修复的可行性较高<sup>[17]</sup>。本研究首先考察激光功率、扫描速度和送粉率等关键工艺参数

对单道修复试样形貌尺寸的影响规律; 其次, 针对预制缺陷试样开展激光成形修复实验, 分析不同区域的组织特征及相组成, 明晰强韧化机理, 为实现 Inconel 625 合金高质量、高性能修复奠定实验与理论基础。

## 1 实验

激光成形修复实验是在所搭建的 LDM60-5N 激光增材制造系统上完成的。该系统由 IPG 公司 12 kW 光纤激光器、五轴四联动数控平台、GTV PF2/2 型高精度送粉系统、Precitec YW52 型激光熔覆头、惰性气体手套箱体等部件组成, 修复过程中, 手套箱内水氧含量控制在 10  $\mu\text{L/L}$  以下。

修复材料为等离子旋转电极雾化法制备的 Inconel 625 合金粉末, 粉末的形貌如图 1 所示, 可以看出, Inconel 625 合金粉末球形度优异, 粉末粒径范围为 75~135  $\mu\text{m}$ 。粉末化学成分(质量分数, %)为 21.92Cr, 9.09Mo, 3.62Nb, 3.71Fe, 0.20Ti, 0.17Al, 0.06Si, 0.015Mn, 0.01Cu, 0.009Co, 0.036C, 0.004O, 0.0045N, 余量为 Ni。实验前将粉末在 120  $^{\circ}\text{C}$  真空条件下烘干 2 h, 以去除粉末中吸附的水分, 减少吸潮对激光成形修复层质量的影响。

激光成形修复单道工艺实验采用的基板为 10 mm 厚的 Inconel 625 锻件板材。工艺实验所采用的实验参数如表 1 所示。根据单道工艺实验结果, 采用优化的

收稿日期: 2018-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51401189); 中国工程物理研究院材料研究所所长基金资助(SJYB201513)

作者简介: 徐庆东, 男, 1988 年生, 博士生, 中国工程物理研究院材料研究所, 四川 绵阳 621908, 电话: 0816-3626746, E-mail: xuqingdong104@caep.cn

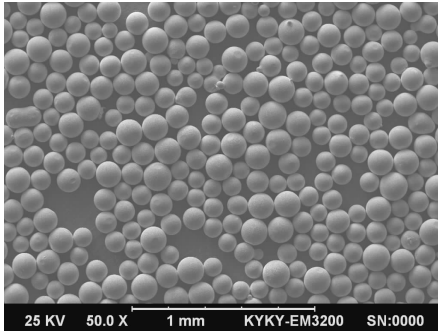


图 1 Inconel 625 合金粉末形貌

Fig.1 Morphology of Inconel 625 powder

工艺开展 Inconel 625 合金的修复实验。在尺寸为 80 mm × 30 mm × 20 mm 的 Inconel 625 基板上采用线切割预制待修复的缺陷槽，并进行激光成形修复实验，修复示意图如图 2 所示。修复实验采用工艺参数为激光功率 1400 W，扫描速度 400 mm/min，光斑直径 3 mm，送粉量 5 g/min，搭接率 45%，Z 轴抬升量 0.5 mm。

表 1 激光成形修复 Inconel 625 合金工艺实验参数

Table 1 Experimental parameters of LFR Inconel 625 alloy

Number	Laser powder/W	Scanning velocity/mm·min <sup>-1</sup>	Powder feeding rate/g·min <sup>-1</sup>	Laser spot diameter/mm
1	1000	500	5	3
2	1200	500	5	3
3	1400	500	5	3
4	1600	500	5	3
5	1800	500	5	3
6	1400	300	5	3
7	1400	400	5	3
8	1400	500	5	3
9	1400	600	5	3
10	1400	700	5	3
11	1400	500	3	3
12	1400	500	4	3
13	1400	500	5	3
14	1400	500	6	3
15	1400	500	7	3

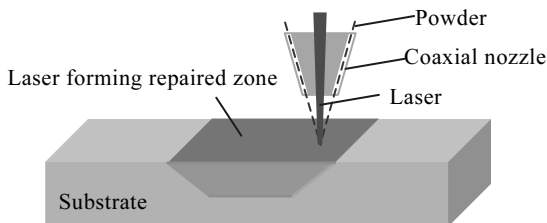


图 2 激光成形修复预制缺陷槽示意图

Fig.2 Schematic drawing of laser forming repairing the sample with a premade defect

实验前为了去除基材线切割带来的油污和氧化膜，用角磨机和粗砂纸打磨基材表面，再用无水乙醇和丙酮依次清洗干净，以减少表面污染物和基材表面光整度对实验的影响。采用线切割沿沉积方向截取金相试样和显微组织观察试样。工艺实验金相试样采用的腐蚀剂为王水（腐蚀时间约 20 s），显微组织观察试样采用电解腐蚀，腐蚀剂为饱和草酸溶液，电压 8 V，腐蚀时间 10 s。采用 X 射线衍射仪(XRD, Cu 靶)对基材和修复区的物相进行分析。采用 OLYMPUS-GX71 型光学显微镜(OM)、Helios Nanolab 600i 扫描电子显微镜(SEM) 以及 TecnaiF20 透射电子显微镜 (TEM) 对修复试样的组织进行观察。

## 2 结果与分析

### 2.1 激光成形修复工艺特性

激光成形修复过程中关键工艺参数对裂纹、气孔等各种缺陷的形成起决定性作用；此外，为了快速经济地修复受损零件，需要针对不同尺寸待修复区，在保证修复质量的前提下，以较高的修复效率完成修复过程。因此，需要考察关键工艺参数对单道修复试样内部缺陷、横截面尺寸形貌的影响规律，进而获得优化的修复工艺。本研究分别定义了单道沉积高度 (height, H)、单道沉积宽度 (width, W)、单道熔深 (depth, D) 3 个特征量来表征单道修复试样横截面形貌，如图 3 所示。

针对激光功率、扫描速度、送粉率 3 个关键工艺参数，采用表 1 所示的实验参数，以其中一个工艺参数为变量，分别考察不同工艺参数下激光成形修复单道试样的横截面形貌，如图 4 所示。在不同工艺参数下，单道修复试样内部没有出现裂纹等明显缺陷，均呈现致密的冶金结合。表明在当前的工艺参数范围内，修复质量良好，均可以满足激光成形修复的基本要求，即 Inconel 625 合金在本实验条件下的修复缺陷形成几率较低，有较宽的修复工艺范围。

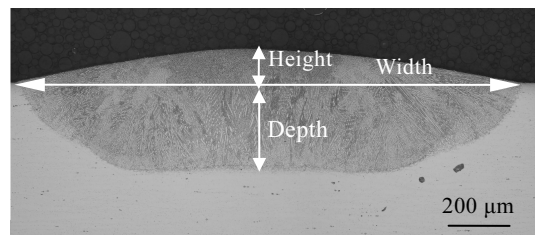


图 3 激光成形修复单道试样横截面形貌

Fig.3 Micrograph of the cross section of a single track

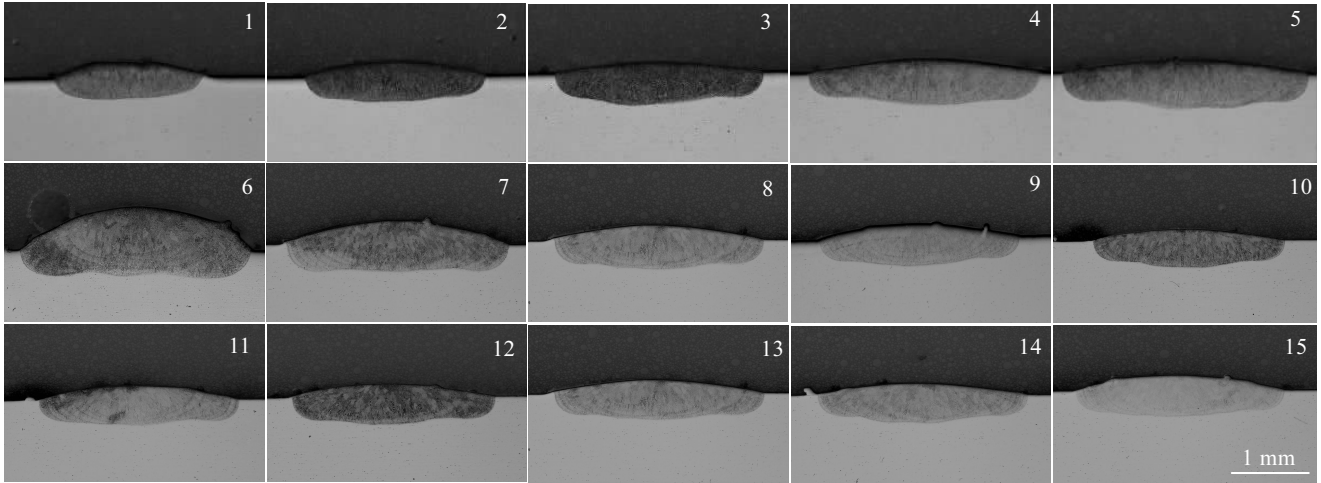


图 4 不同工艺参数下单道试样横截面形貌

Fig.4 Micrographs of single channel samples with different experimental parameters (number 1~15)

根据单道修复样件的横截面形貌，测量了不同工艺参数下单道沉积高度、单道沉积宽度和单道熔深的变化规律，结果如图 5 所示。可知，随着激光功率的增加，单道沉积宽度显著增加，熔深缓慢增加，而沉积高度无明显变化；表明激光功率主要影响单道修复层的宽度。随着扫描速度的增加，单道沉积宽度、熔深和沉积高度均呈下降趋势，并且在较低的扫描速度下，这种下降幅度越明显；表明较低的扫描速度对单道修复层整体尺寸影响较为显著。随着送粉率的增加，单道沉积宽度、熔深和沉积高度呈现极缓慢增加趋势；表明在满足稳定送粉和成形的基础上，在一定的激光功率和扫描速度下，所形成的熔池大小一定，可以熔化的粉末能力有限，因此在所选择的送粉率范围内，单道修复尺寸变化较小。

因此，综合考虑，对于修复 Inconel625 合金，在激光功率方面，针对不同宽度的线缺陷，可以选择不同的激光功率进而获得不同单道修复宽度；而针对较深的线缺陷或大体积修复，在扫描速度方面，可以选择相对低一些的扫描速度进而获得较大的沉积体积；而对于送粉率，在保证稳定送粉和成形的情况下，尽可能选择较小的送粉率进而节省原材料。

### 2.2 修复试样宏观组织特征

图 6 是激光成形修复 Inconel 625 合金预制缺陷槽试样横截面的宏观组织形貌。可以看出，修复界面和修复层内部无裂纹、气孔等明显缺陷，呈现致密的冶金结合，表明针对块状大体积缺陷的修复，所采用的激光成形修复工艺满足修复基本要求。修复区与锻件基材的组织存在明显差异，基材主要为等轴晶组织，而修复区呈现外延生长的枝晶组织，宏观上热影响区

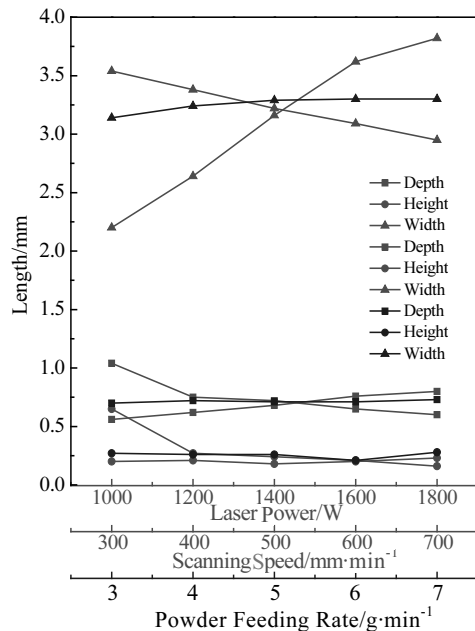


图 5 工艺参数对单道修复宽度、高度和深度的影响

Fig.5 Effects of process parameters on height, width and depth of laser forming repaired samples

组织与基材组织无显著差异。Dinda 等<sup>[18]</sup>发现激光直接沉积 Inconel 625 合金沉积态试样组织在 1200 °C 下仍然具有高温稳定性。因此，在修复过程中，虽然在激光束多次热循环和热积累的作用下，但是由于基材组织具有一定高温稳定性，导致热影响区的组织变化较小，宏观上难以分辨基材与热影响区的范围。此外，修复区层与层、道与道之间均存在明显的边界，即层间过渡区，如图 6 所示。后文将对层间过渡区的形成进行进一步分析。

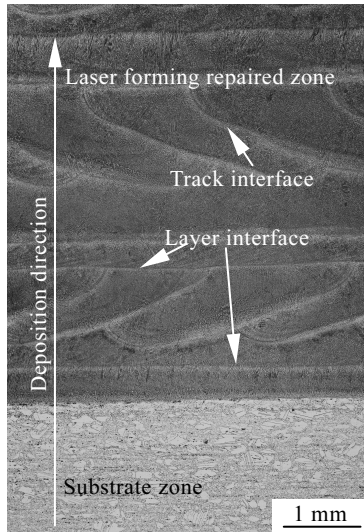


图 6 激光成形修复预制缺陷试样宏观组织形貌

Fig.6 Macrostructure of repaired sample with premade defect

### 2.3 显微组织分析

图 7 是激光成形修复预制缺陷槽试样基材和修复区的 XRD 图谱，分析可知基材主要由  $\gamma$  基体相和少量 NbC 碳化物组成。而修复区域主要由  $\gamma$  基体相组成，其它析出相可能不存在或者含量很少，或者尺寸较小。因此有必要做进一步的测试，分析析出相的种类、形态及分布。

图 8 是锻件基材的显微组织 OM 和 SEM 照片，可知基材组织主要为等轴晶，部分晶粒内部存在变形孪晶。此外，在晶粒内部有白色块状相（尺寸约  $10\ \mu\text{m}$ ）和点状析出，沿着晶界也存在大量白色析出相。对大尺寸块状析出相和基体相进行能谱分析，结果如图 9 所示。其中，对块状析出相取了 3 个点，对基体相

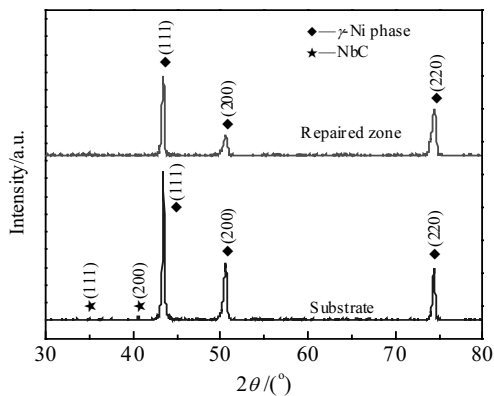


图 7 激光成形修复试样基材和修复区的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of substrate and repaired zone of LFR samples

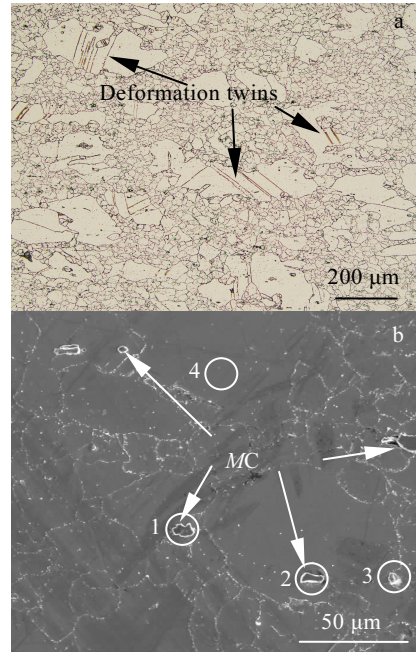


图 8 Inconel 625 合金锻件基材组织

Fig.8 OM (a) and SEM (b) images of Inconel 625 wrought substrate

取 1 个点进行能谱点扫描，具体位置对应于图 8b 中标示。块状析出相主要富含 Nb 和 Ti 两种元素，而基体相主要由 Ni、Cr、Fe、Mo 组成。说明基材中 Nb 和 Ti 两种元素偏析形成块状析出相，结合 XRD 分析结果，可知这些块状析出相为 MC 型碳化物（M 为 Nb 和 Ti），而基体相主要为  $\gamma$ (Ni-Cr) 固溶体。

图 10 是激光成形修复试样的显微组织，发现沿激光沉积方向，从基材到修复区，不同区域组织存在较大差异，因此可以将修复界面区域分为 4 个区域：基材区（SZ）、热影响区（HAZ）、修复熔合区（RFZ），修复区（RZ）。如图 10a 所示。其中，修复熔合区和修复区呈现外延生长的柱状枝晶组织，且枝晶生长具有很强的连续性，如图 10b 和 10c 所示。此外，分别对不同区域进行了细致分析，如图 11a~11f 所示。

在基材内部、热影响区、熔合区和修复区都发现了大量的白色析出相。这些析出相主要为 2 种：块状的颗粒相以及不规则形状的絮状相。对修复区内颗粒相进行 TEM 观察和能谱分析，结果如图 12 所示，可知颗粒相主要含有 Nb，应为 NbC，属于 MC 型碳化物，这与前文对块状相的 EDS 分析结果一致。对修复熔合区的絮状析出相和基体相进行 EDS 分析，结果如图 13 所示，可知白色析出相富含 Nb、Mo，应为 Laves 相，其成分为  $(\text{Ni, Fe, Cr})_2(\text{Nb, Mo, Ti})$ <sup>[19]</sup>。Laves 相作

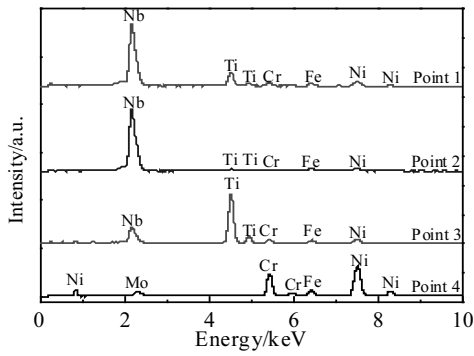


图 9 图 8b 中锻件基材块状析出相和基体相能谱分析结果

Fig.9 EDS results of precipitates and matrix of wrought substrate in Fig.8b

为一种脆性的有害相，消耗了大量 Nb、Mo 等合金元素，使得基体中出现贫 Nb、Mo 区域。

对比不同区域的析出相行为与微观组织，发现基材区内部除了析出较多的大尺寸块状 MC 型碳化物，并且还沿晶界析出较多小尺寸块状 MC 型碳化物颗粒相和不规则形状的 Laves 相，沉淀相的尺寸约为 0.5 μm，如图 11a 和 11d。进入热影响区后，仍然存在较多的块状大尺寸的 MC 型碳化物，但原始晶界部分白色沉淀相发生溶解，如图 11b 所示。对于修复熔合区和修复区，结合图 10b 和 10c，可知组织均呈现外延生长的柱状枝晶组织，此外，沿枝晶界均析出较多絮状析出相和少量颗粒相；相比修复区，修复熔合区的白色析出相量更多，如图 11c, 11e 和 11f 所示。

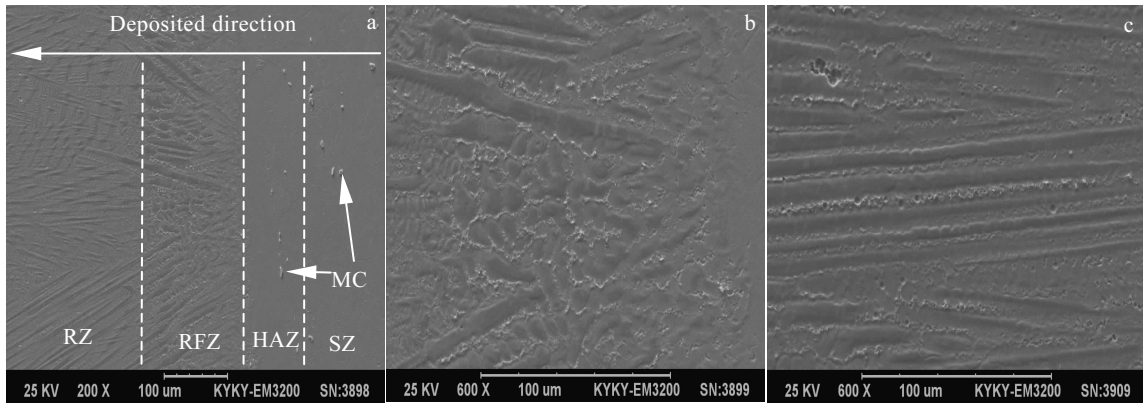


图 10 激光成形修复试样显微组织形貌

Fig.10 Microstructures of laser forming repaired samples: (a) SZ+HAZ+RFZ+RZ, (b) RFZ, and (c) RZ

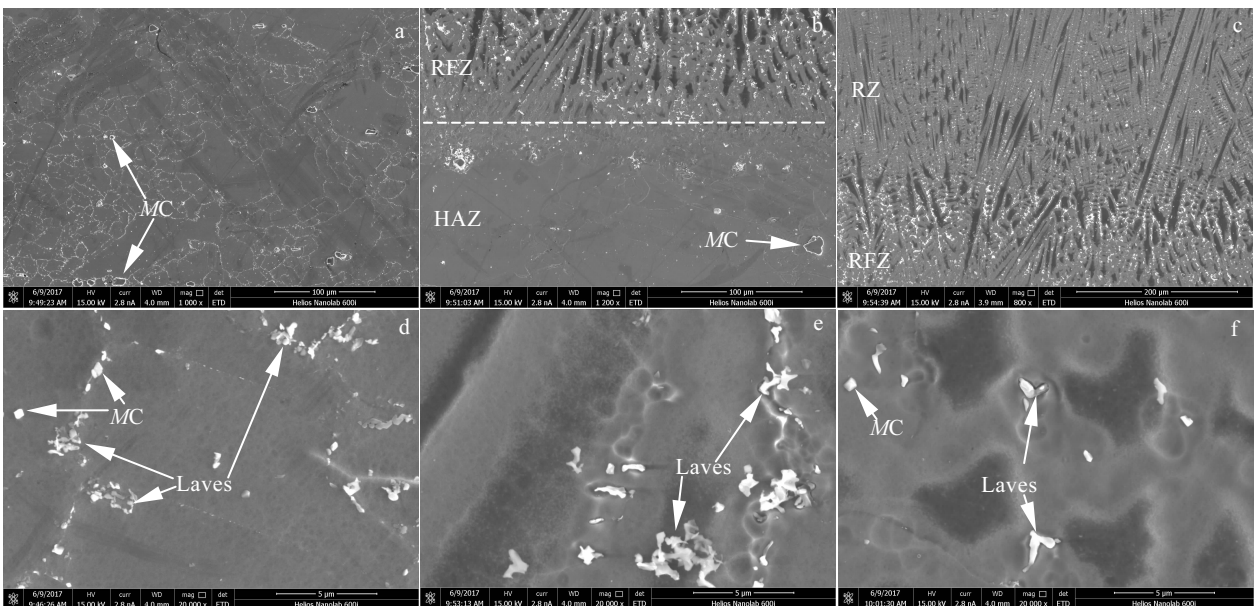


图 11 修复试样不同区域的显微组织形貌

Fig.11 Microstructures of different zones in repaired samples: (a) SZ, (b) HAZ+RFZ, (c) RFZ+RZ, (d) SZ, (e) RFZ, and (f) RZ

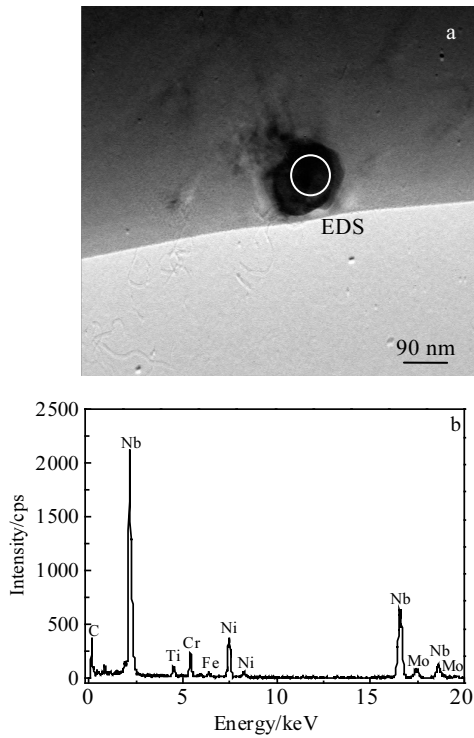


图 12 修复区颗粒相的 TEM 明场像和 EDS 能谱结果

Fig.12 TEM image (a) and EDS result (b) of a precipitate in the RZ

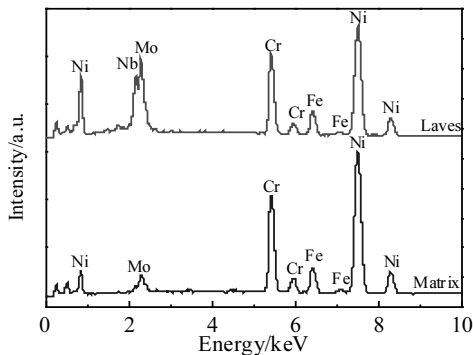


图 13 修复熔合区 Laves 相和基体相能谱分析结果

Fig.13 EDS results of Laves phase and matrix of RFZ

Inconel 625 合金在凝固过程中<sup>[20,21]</sup>，通常发生的反应  $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + MC \rightarrow \gamma + MC + Laves$ ，即在凝固开始阶段，首先发生  $L \rightarrow L + \gamma$  反应，含溶质元素较少的  $\gamma$  (Ni-Cr 固溶体) 先结晶；随着凝固反应的进行，Mo、Nb、Ti、C 等合金元素在枝晶间隙处聚集，使  $L \rightarrow L + \gamma + MC$  发生，大量碳化物析出；随着反应的继续，合金元素在枝晶间隙进一步聚集，当温度降至反应  $L \rightarrow \gamma + Laves$ ，合金元素被完全消耗，从而 Inconel625 合金的凝固过程完成。而激光修复过程中，熔池的凝固速度较快，因此 MC 型碳化物和 Laves 相

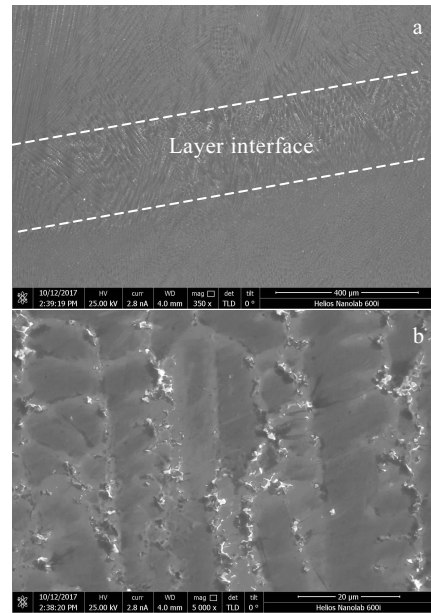


图 14 修复区层间过渡区显微组织形貌

Fig.14 Microstructures of layer interface of repaired samples: (a) RZ and (b) layer interface

析出后来不及长大，因此析出相尺寸偏小。对于靠近基材的修复熔合区，为激光束熔化表层基材后形成熔池的底部，高度约 0.15 mm (单层高度约 0.5 mm)，由于 Nb、Mo 等元素比重较大易在熔池底部富集，且基材提供了大量形核点，因此，熔合区的析出相形核驱动力大，因此导致该区域 Laves 相析出相较多。这种现象在层与层界面处也存在，即形成图 6 和图 14 所示的层间过渡区。

### 3 结论

1) 适合激光成形修复 Inconel625 合金的工艺范围较宽，均可获得较高的修复层冶金质量；激光功率主要影响单道修复层的宽度，较低的扫描速度对单道修复层的整体尺寸影响较为显著，而在一定的激光功率和扫描速度下，送粉率对单道修复尺寸无明显影响。

2) 修复区与锻件基材的组织存在明显差异：基材主要由等轴晶组成，部分等轴晶内部存在变形孪晶，而修复区由呈外延生长的枝晶组成；由于 Inconel625 合金具有一定高温稳定性，导致热影响区的范围较小。

3) 基材的相组成包括  $\gamma$ (Ni-Cr)基体相、大尺寸(约 10  $\mu\text{m}$ )块状 MC 型碳化物 (M 为 Nb 和 Ti)、沿晶界析出的小尺寸(约 0.5  $\mu\text{m}$ )块状 MC 型碳化物以及不规则形状的 Laves 相。修复区相组成为  $\gamma$ 基体相、沿枝晶界析出的 Laves 相以及少量 MC 型碳化物。层与层界面处 Laves 相析出急剧增加形成层间过渡区。

## 参考文献 References

- [1] Yu Qiuqing(俞秋景), Liu Junhe(刘军和), Zhang Weihong(张伟红) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(8): 1679
- [2] Kreitzberg A, Brailovski V, Turenne S *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 689: 1
- [3] Mostafaei A, Behnamian Y, Krimer Y L *et al. Materials & Design*[J], 2016, 111: 482
- [4] Guo Longlong(郭龙龙), Zheng Hualin(郑华林), Liu Shaohu(刘少胡) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2016, 45(9): 2219
- [5] Wang P, Zhang B C, Tan C C *et al. Materials & Design*[J], 2016, 112: 290
- [6] Xue Lei(薛蕾), Chen Jing(陈静), Lin Xin(林鑫) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(7): 1225
- [7] Lin X, Cao Y Q, Wu X Y *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 553: 80
- [8] Sui S, Chen J, Fang E X *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 588: 480
- [9] Xue Lei(薛蕾), Chen Jing(陈静), Zhang Fengyin(张凤英) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(11): 1817
- [10] Jiang Chengyu(蒋成禹), Wu Mingfang(吴铭方), Yu Chun(余春) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(4): 295
- [11] Yu Zhishui(于治水), Qi Kai(祁凯), Li Ruifeng(李瑞峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(12): 1049
- [12] Liu Fenggang(刘丰刚), Lin Xin(林鑫), Song Kan(宋衍) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2017, 53(3): 325
- [13] Lin Xin(林鑫), Xue Lei(薛蕾), Chen Jing(陈静) *et al. China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2009, 22(1): 19
- [14] Liu Q, Wang Y D, Zheng H *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2016, 82: 1
- [15] Wang L, Wang N. *Acta Materialia*[J], 2016, 104: 250
- [16] Xu Qingdong(徐庆东), Lin Xin(林鑫), Song Menghua(宋梦华) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2013, 49(5): 605
- [17] Henderson M B, Arrell D, Larsson R *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2004, 9(1): 13
- [18] Dinda G P, Dasgupta A K, Mazumder J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 509: 98
- [19] Li C, White R, Fang X Y *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 705: 20
- [20] Xu F J, Lv Y H, Xu B S *et al. Materials & Design*[J], 2013, 45: 446
- [21] Guo Jianting(郭建亭), Zhou Lanzhang(周兰章), Qin Xuezhi(秦学智). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报)[J], 2011, 21(3): 476

## Process Parameters and Microstructure of Laser Forming Repaired Inconel 625 Alloy

Xu Qingdong, Wang Shugang, Le Guomin, Yang Lei, Mo Wenlin, Jiang Chi, Wei Yiyun, Zhang Pengcheng  
(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621908, China)

**Abstract:** The process parameters and microstructure of the laser forming repaired (LFR) samples of Inconel 625 alloy were investigated. The results show that a wide range of process parameters are suitable for the laser forming repairing of Inconel 625 alloy. The laser power mainly affects the width of single track LFR samples. The scanning velocity has significant effect on the size of single track LFR samples. The powder feeding rate has less effect on the size of single track LFR samples. The interface between the substrate and laser repaired zone (LRZ) shows a metallurgical bonding. The phases in the substrate mainly include the  $\gamma$ (Ni-Cr) matrix, MC (NbC, TiC) carbides with bimodal sizes of about 10  $\mu\text{m}$  and 0.5  $\mu\text{m}$ , and Laves phase. In the LRZ, columnar dendrites grow epitaxially from the substrate, approx following the deposition direction. The phases in LRZ mainly consist of  $\gamma$  matrix, Laves phase and a small amount of MC carbides. Due to the increase of nucleation sites, a large amount of Laves phase are precipitated in the layer interface and track interface.

**Key words:** laser forming repairing; Inconel 625; process parameters; microstructure

Corresponding author: Zhang Pengcheng, Ph. D., Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621908, P. R. China, Tel: 0086-816-3625939, E-mail: zpc113@sohu.com