

# 电磁搅拌对 BT20 钛合金激光沉积修复件组织和硬度的影响

王 维, 刘 奇, 杨 光, 钦兰云, 任宇航, 齐 鹏

(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)

**摘 要:** 为了改善 BT20 钛合金激光沉积修复质量, 引进电磁搅拌装置辅助激光沉积修复, 通过改变磁场强度和搅拌速率的方法研究旋转磁场对激光修复件宏观形貌, 微观组织和显微硬度的影响。结果表明, 在电磁场的辅助作用下, 修复件表面平整;  $\alpha/\beta$  片层组织被机械折断, 晶内  $\alpha$  片层长度减小, 但  $\alpha$  片层厚度几乎不变, 为 0.4~0.5  $\mu\text{m}$ , 晶粒被细化, 显微硬度提高; 随着磁场强度和搅拌速度的增加, 修复件的显微硬度增加, 在一定磁场强度和搅拌速率下修复区显微硬度趋于均匀。

**关键词:** 钛合金; 电磁搅拌; 激光沉积修复; 微观组织; 显微硬度

中图分类号: TG146.2\*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)01-0194-05

钛合金具有比强度高、耐热性和耐腐蚀性好等特点, 在航空、航天、船舶、生物医学和交通等工业中应用前景广阔。采用传统工艺制备钛合金零件具有工艺复杂、材料利用率低、成本高和周期长等缺点, 限制了钛合金的广泛应用。激光沉积制造技术是一种兴起于20世纪80年代新型的先进制造技术<sup>[1]</sup>。该技术将激光熔覆技术和快速原型制造技术相结合, 通过钛合金粉末快速凝固, 激光逐层熔化沉积制造复杂钛合金零件, 具有成本低、加工周期短和材料利用率高等优点, 广泛应用于复杂零件的直接制造和修复, 具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。但激光沉积制造件的力学性能不高。贺瑞军<sup>[3]</sup>的研究表明, 钛合金的组织对其性能影响很大, 其特征组织(晶粒、片层集束、片层等)尺寸越小, 材料的力学性能越优。研究学者一般通过后热处理、添加变质相、对激光熔池施加外场等方法来改善组织<sup>[4-9]</sup>。

电磁搅拌是靠电磁力对金属溶液进行非接触搅拌, 通过改变感生的空间磁场的强度来调整搅拌力, 通过改变磁场方向来控制搅拌方向, 通过改变磁场变化频率来改善搅拌效果。目前, 电磁搅拌技术在铸造, 焊接与熔覆中有较多的研究与应用<sup>[10-17]</sup>。余圣甫等人<sup>[18]</sup>将旋转磁场应用于激光焊接304不锈钢、Al-12Si合金中, 对焊缝的研究结果表明, 旋转磁场能有效地对激光熔池中液态304不锈钢、Al-12Si合金进行搅拌, 抑制柱状晶的产生, 细化焊缝晶粒。刘洪喜等人<sup>[19]</sup>对旋转磁场辅助激光熔覆技术的研究表明, 在磁场作用下,

熔覆涂层晶粒组织被细化且分布均匀、致密。电磁搅拌技术中交变磁场常通过交变电流法和旋转永磁体法实现, 相对而言, 后者设备投资小, 并可通过改变永磁体的排列来控制搅拌熔体的流动形态。对旋转永磁体情况下电磁搅拌的研究尚少<sup>[20]</sup>。虽然国内余本海等人<sup>[21]</sup>针对电磁搅拌对激光熔覆WC-Co基金属涂层的组织和硬度的影响及机理进行过研究, 但旋转永磁体电磁搅拌对BT20钛合金激光修复层内部质量的影响尚未有人进行过探讨。因此本实验采用自行研制的永磁式电磁搅拌器通过改变旋转永磁体转速和磁场强度研究其对修复件宏观形貌、组织结构及硬度的影响规律, 验证旋转永磁体辅助激光修复的可行性, 达到细化组织, 提高力学性能的目的。

## 1 实 验

实验基板为 110 mm×60 mm×10 mm 的 BT20 钛合金板状锻材, 基板使用前经砂纸打磨处理, 去除氧化层。修复层材料为 BT20 钛合金粉末, 粉末粒度为 44~149  $\mu\text{m}$ 。修复前用硝酸清洗基材表面后, 用乙醇擦拭表面, 和粉末一起放入烘干器中除水烘干。

实验在 DL-HL-T5000B 型 5 kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器装置上进行。为了比较搅拌速率和搅拌磁场强度对激光沉积修复的作用效果, 实验中采用固定的激光工艺参数: 激光功率 1.2 kW, 扫描速度 3 mm/s, 扫描间距 3 mm。辅加不同磁场强度和搅拌速率的电磁搅拌和未

收稿日期: 2014-01-23

基金项目: 辽宁省高校创新团队科研基金 (LT2011004); 辽宁省自然科学基金 (201202173); 中航工业产学研创新工程 (CXY2011SH16); 辽宁省教育厅科学技术研究基金 (L2011026)

作者简介: 王 维, 男, 1957 年生, 博士, 教授, 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110136, 电话: 024-89723852, E-mail: Wangw1116@sau.edu.cn

加电磁搅拌进行对比实验。电磁搅拌装置如图 1 所示。采用两对永磁铁磁极，每对磁极间径向距离可调，由步进电机带动转盘旋转以实现磁场的旋转，被修复试样放在固定在磁极中间的工作台上。电磁搅拌加工工艺参数如表 1 所示。通过调节磁极对之间的距离使电磁搅拌强度达到 30、45、50、80 mT，调节电机的旋转频率使磁场旋转速度达到 120、180、240、300 rad/s，以满足实验要求。实验前需要抽真空，充氩气，实验过程中保证氧气的含量在 0.01% 以下。

激光沉积修复后，采用电火花线切割沿垂直于激光扫描方向切取金相试样，每组试样表面均经研磨抛光后用腐蚀液 (HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=2:6:100) 腐蚀 30~45 s。采用 OLYMPUS 光学显微镜观察激光沉积修复件组织结构及形貌。借助 FM-700 显微硬度计测定修复件显微硬度，施加载荷 0.98 N，加载时间 15 s。实验选用的修复件取自表 1 所示参数对应的 17 组试件。对钛合金粉末的激光沉积修复做多次研究，每次实验后均对辅加不同磁场强度和不同搅拌速度的电磁搅拌和未加电磁搅拌的激光修复试样进行微观组织和显微硬度观测。

## 2 结果与分析

### 2.1 修复件宏观形貌

图 2 所示是磁场强度为 50 mT，不同搅拌速率下修复件表面。图 3 所示是搅拌速率为 240 rad/s，不同

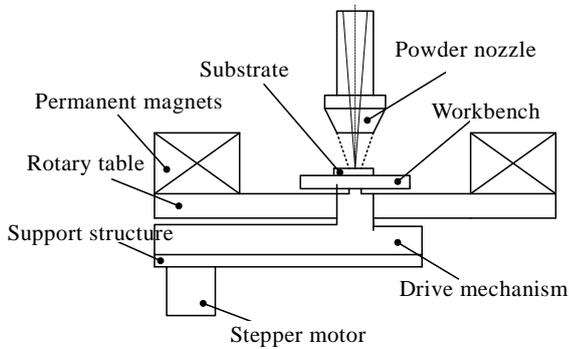


图 1 磁场辅助激光沉积修复装置示意图

Fig.1 Schematic of laser deposition repair auxiliary magnetic fields

表 1 电磁搅拌加工工艺参数

Table 1 Processing parameters of the electromagnetic stirring

Magnetic field intensity/ mT	Magnetic stirring speed/rad s <sup>-1</sup>				
	I	II	III	IV	V
30	—	120	180	240	300
45	—	120	180	240	300
50	—	120	180	240	300
80	60	120	180	240	300

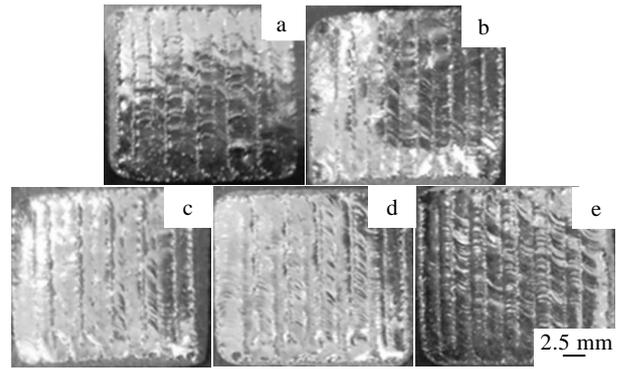


图 2 不同搅拌速率下修复件表面

Fig.2 Surface of repair parts under 50 mT and different magnetic stirring speeds: (a) without electromagnetic stirring, (b) 120 rad/s, (c) 180 rad/s, (d) 240 rad/s, and (e) 300 rad/s

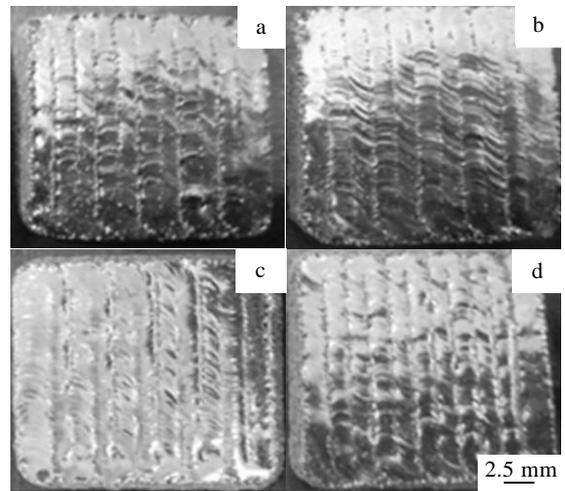


图 3 不同磁场强度下修复件表面

Fig.3 Surface of repair parts under 240 rad/s and different magnetic field intensities: (a) without electromagnetic field, (b) 30 mT, (c) 50 mT, and (d) 80 mT

磁场强度下修复件表面。修复范围均为 20 mm×20 mm。从图中可以看出，未加磁场时修复件表面道间分界明显，表面凸起（图 2a，图 3a），随着外加磁场的加入和搅拌速率和磁场强度的提高，修复件表面趋于平整，略带光滑，道间分界明显减小，粘黏粉末颗粒减少，激光沉积修复件表面质量有所提高。

图 4 为未施加电磁搅拌和施加磁场强度为 80 mT 旋转速率为 120 rad/s 的旋转磁场的修复件宏观形貌。未施加电磁搅拌的修复件基材与修复区结合界线明显（图 4a），施加电磁搅拌后，促使熔池内物质的对流加剧，纵向热传导程度增强，熔池温度场和溶质场趋于均匀化，实现基材和修复区的溶质相互扩散，有助于提高结合部位的性能。

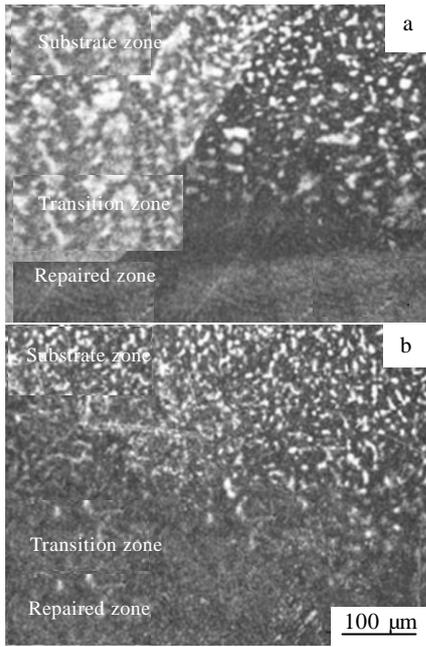


图 4 施加电磁搅拌前后的修复件宏观形貌

Fig.4 Macro morphologies of repair parts: (a) without electromagnetic stirring and (b) 80 mT/120 rad s<sup>-1</sup>

## 2.2 修复区显微组织

### 2.2.1 搅拌速率对修复件显微组织的影响

图 5 所示是磁场强度为 50 mT 不同搅拌速率下垂直于激光扫描方向的修复层截面显微组织。由图 5a 可见，激光沉积修复 BT20 钛合金修复区具有典型的片状  $\beta$  转变近  $\alpha$  钛合金组织；图 5b 中片状  $\alpha$  组织变得细小，晶界模糊；图 5c 中  $\beta$  晶界破碎形成网篮组织和初生  $\alpha$  相；图 5d 为细密、均布的片层  $\alpha$  组织、片层  $\beta$  组织和少许的初生  $\alpha$  组织；图 5e 为大量片层  $\alpha$  组织、片层  $\beta$  组织和初生  $\alpha$  相。片层组织中  $\alpha$  片层长度与片层厚度如表 2 所示。由图 5b~5e 可以发现，在磁场强度为 50 mT 不变时，随着搅拌速率的提高，熔池温度场和溶质分布趋向均匀，修复区组织由粗大片层组织向细小片层组织转变， $\alpha$  片层长度减小，厚度变化不大，因此  $\alpha$  片层长/径比明显减小，微观组织变得细密均匀。电磁力破坏亚晶界，片层晶结合形成块状初生  $\alpha$  相。对比图 5b~5e 可知，电磁搅拌磁场强度和搅拌速率的提高对修复件作用效果不是成线性增强，图 5d 的组织较均匀，综合性能较好。

### 2.2.2 磁场强度对修复件显微组织的影响

图 6 是搅拌速率为 240 rad/s 不同磁场强度下垂直于激光扫描方向的修复层截面显微组织。图 6b 中片状

$\alpha/\beta$  组织被打断，晶粒排列紧密，片层组织中的  $\alpha$  片层长度为 5.5~9.2  $\mu\text{m}$ ， $\alpha$  片层厚度为 0.4~0.5  $\mu\text{m}$ ；

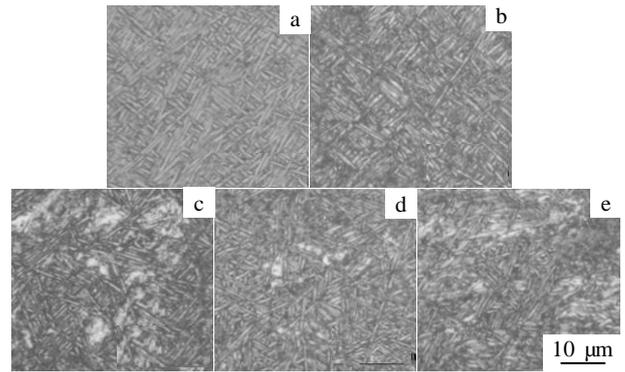


图 5 不同搅拌速率下的修复层显微组织

Fig.5 Microstructures of laser deposition repair under 50 mT and different magnetic stirring speeds: (a) without electromagnetic stirring, (b) 120 rad/s, (c) 180 rad/s, (d) 240 rad/s, and (e) 300 rad/s

图 6d 中片层  $\alpha$  组织明显减小， $\alpha$  片层长度为 3.1~4.8  $\mu\text{m}$ ， $\alpha$  片层厚度为 0.4~0.5  $\mu\text{m}$ 。随着磁场强度的逐渐提高， $\alpha$  片层厚度变化不大，均在 0.4~0.5  $\mu\text{m}$  范围内， $\alpha$  片层长度变小，因此  $\alpha$  片层长/径比减小。这是因为搅拌速率固定为 240 rad/s 时，随着磁场强度的提高，液态金属运动加剧，加速了熔池内部的热交换，熔体温度分布趋于均匀，同时熔池内部产生的电磁力驱动熔体流动， $\alpha/\beta$  片层组织被机械折断，晶粒排列紧密， $\alpha$  片层长/径比减小，组织趋于均匀。旋转磁场搅拌速率一定时，磁场强度由 50 mT 增强到 80 mT， $\alpha$  片层厚度几乎不变，片层长度减小 8% 左右，变化不如前几组数据明显。由此推测，并不是旋转磁场的磁场强度越高，作用效果越明显。

### 2.3 电磁搅拌对修复件显微硬度的影响

图 7 所示是磁场强度为 50 mT 不同搅拌速率下不同区域的显微硬度值变化曲线。图 8 所示是磁场搅拌速率为 240 rad/s 不同磁场强度下不同区域的显微硬度值变化曲线。基材的微观组织为双态组织，其平均显微硬度  $\text{HV}_{0.1}$  达到 3.25 GPa。未加搅拌的修复件的过渡区，基材与修复区接合由双态组织过渡到片层组织，显微硬度值有所提高。辅加电磁搅拌的修复区内原始  $\beta$  晶粒边界不同程度地被破碎，晶内片层  $\alpha$  相变短、变粗，显微硬度值提高；随着搅拌速率和磁场强度的

表 2 不同磁场搅拌速率下修复区微观组织中  $\alpha$  片层组织参数

Table 2 Parameters of the $\alpha$ lamellar under different magnetic stirring speeds	
$\alpha$ lamellar size	Electromagnetic stirring speed /rad s <sup>-1</sup>

	0	120	180	240	300
Length/ $\mu\text{m}$	6.2~9.8	4.1~6.8	3.6~5.8	3.4~4.8	2.9~4.6
Thickness/ $\mu\text{m}$	About 0.5	0.4~0.5	0.4~0.5	0.4~0.5	0.4~0.5

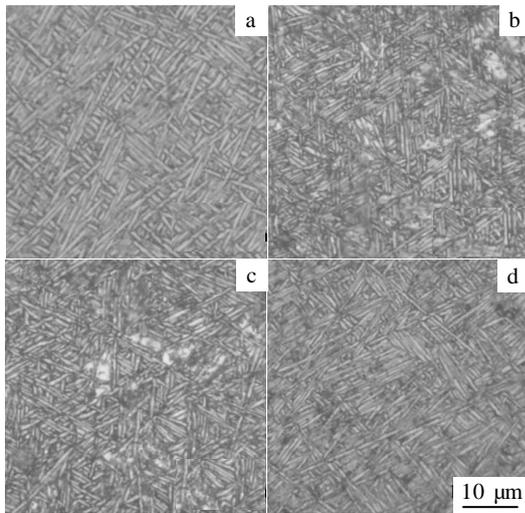


图 6 不同磁场强度下修复层显微组织

Fig.6 Microstructures of laser deposition repair under 240 rad/s and different magnetic field intensities: (a) without electromagnetic field, (b) 30 mT, (c) 50 mT, and (d) 80 mT

提高，晶内片层  $\alpha$  组织被机械折断，长/径比减小，晶粒排列紧密，组织得到细化，显微硬度提高，硬度值波动较小。但并不是旋转速率和磁场强度越高，电磁搅拌作用效果越好。由图 7 的显微硬度曲线可知，当磁场强度为 50 mT，搅拌速率为 240 rad/s 时，修复区显微硬度曲线相对于其他参数曲线波动较小，趋于平缓，其平均显微硬度  $HV_{0.1}$  约为 4.40 GPa。这是因为磁场强度为 50 mT，搅拌速率为 240 rad/s 时对修复区作用效果较好，晶粒细化，组织趋于均匀化。对比图 7 与图 8 可知，增加磁场的强度比提高磁场的旋转速率对激光沉积修复件显微硬度的作用效果更明显。

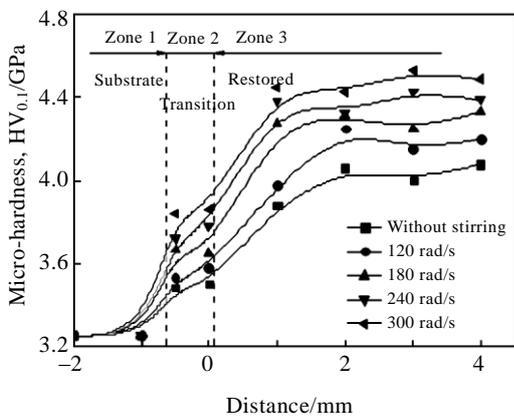


图 7 不同搅拌速率下显微硬度值的变化

Fig.7 Micro-hardness distribution of different zones under 50 mT and different magnetic stirring speeds

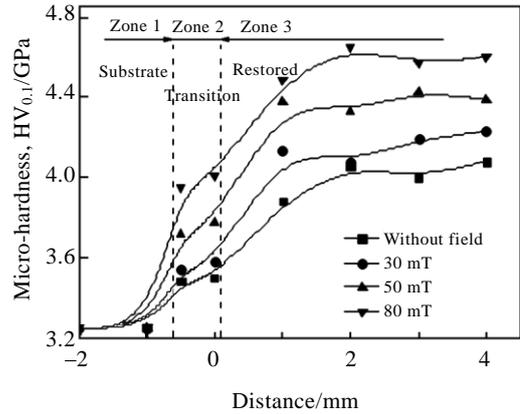


图 8 不同磁场强度下显微硬度值的变化

Fig.8 Micro-hardness distribution of different zones under 240 rad/s and different magnetic field intensities

### 2.4 电磁搅拌对修复件影响机理的讨论

通过以上分析可知，辅加电磁搅拌的激光修复层组织晶粒尺寸减小，晶粒细化，显微硬度提高。这是因为电磁搅拌对激光熔池产生如下作用：

#### 1) 电磁搅拌的机械作用

电磁搅拌引起的熔池内液态金属的旋转运动会对激光熔池液/固界面前沿处产生较强的机械冲击作用，冲击力会打断片层组织。同时强烈的液体对流促使组织均匀化，致使显微硬度提高。

#### 2) 电磁搅拌使熔池内温度和成分趋向均匀

旋转磁场产生的电磁搅拌使激光沉积修复熔池产生强烈的混合对流，从而加速了熔池内物质的温度场和溶质分布均匀。同时磁场对金属熔体的搅拌作用，加快散热，使熔池的过冷度加大，进而使修复层凝固时的晶粒尺寸减小，细化了晶粒。晶粒的细化致使显微硬度提高。

施加的磁场强度和旋转速率并不是越高越好，一方面因为电磁搅拌产生的最大磁感应强度越大和搅拌速率越大，作用力越大，机械细化晶粒效果越好，但是增加到一定值后，细化趋势的效果变缓。另一方面在增加磁场强度时，会产生涡流效应，感应电流会成比例地增加，凝固体系内增大热效应，从而过冷度减小。根据该实验，采用磁场强度为 50 mT，搅拌速率为 240 rad/s 较适宜。

## 3 结 论

1) 随着电磁搅拌磁场强度的增强和搅拌速率的提高，修复件表面趋于光滑，道间分界明显减小，粘黏粉末颗粒减少，激光沉积修复件表面质量得到提高。

2) 磁场强度的增强和搅拌速率的提高,促使 BT20 钛合金激光沉积修复层微观组织  $\alpha$  片层长/径比减小,晶粒得到细化,排列紧密,显微硬度提高。

3) 当磁场强度为 50 mT,搅拌速率为 240 rad/s 时,修复区显微硬度曲线相对于其他参数曲线波动较小、趋于平缓,组织趋于均匀化,其平均显微硬度  $HV_{0.1}$  约为 4.40 GPa。

#### 参考文献 References

- [1] Nobuki M, Hashimoto K, Tsujimoto K *et al.* *J Jpn Inst Met*[J], 1986, 50(9): 840
- [2] Liu Zhijian(刘志坚), Qu Xuanhui(曲选辉), Huang Boyun(黄伯云). *Materials Review*(材料导报)[J], 1995(2): 23
- [3] He Ruijun(贺瑞军), Wang Huaming(王华明). *Journal of Aeronautical Materials* (航空材料学报)[J], 2009, 29(6): 18
- [4] Sha Aixue(沙爱学), Li Xingwu(李兴无), Chu Junpeng(储俊鹏) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2003, 27(1): 213
- [5] Cao Jingxia(曹京霞), Fang Bo(方波), Huang Xu(黄旭) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2004, 28(2): 362
- [6] Sha Aixue(沙爱学), Li Xingwu(李兴无), Chu Junpeng(储俊鹏) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2006, 30(1): 26
- [7] Zhang Wangfeng(张旺峰), Cao Chunxiao(曹春晓), Li Xingwu(李兴无) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(7): 768
- [8] Shang Lijuan(尚丽娟), Cai Qingkui(才庆魁), Liu Changsheng(刘常升) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2002, 26(3): 173
- [9] Chen C Y, Deng Q L, Song J L. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*[J], 2005, 37(S1): 44
- [10] Kore S D, Date P P, Kulkarni S V. *Matr Process Technol*[J], 2008, 208(1-3): 486
- [11] Gatzert M, Tang Z, Vollertsen F. *Physics Procedia*[J], 2011, 12: 56
- [12] Bai Fudong, Sha Minghong, Li Tingju *et al.* *Alloys & Compounds*[J], 2011, 509(14): 4835
- [13] Barman N, Kumar P, Dutta P. *Mater Process Technol*[J], 2009, 209(18-19): 5912
- [14] Tennyson P G, Kumar P, Lakshmi H *et al.* *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(S3): 774
- [15] Luo Jian(罗键), Ma Jie(马杰), Wang Xiangjie(王向杰) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(S3): 215
- [16] Lee D Y, Kim K B, Kim D H. *Materials Science Forum*[J], 2005, 486-487: 550
- [17] Liu Zhengjun(刘政军), Su Yunhai(苏云海), Lu Hailong(鲁海龙). *Welding*(焊接学报)[J], 2008, 29(2): 53
- [18] Yu Shengpu(余圣甫), Zhang Youshou(张友寿), Xie Zhiqiang(谢志强) *et al.* *Journal of Huazhong University of Science and Technology* (华中科技大学学报)[J], 2005, 33(12): 24
- [19] Liu Hongxi(刘洪喜), Ji Shengwei(纪升伟), Jiang Yehua(蒋业华) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2013, 40(1): 1
- [20] Zhang Xigang(张习刚). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2010, 37(7): 932
- [21] Yu Benhai(余本海), Hu Xuehui(胡雪惠), Wu Yu'e(吴玉娥) *et al.* *Chinese Journal of Lasers* (中国激光)[J], 2010, 37(10): 2672

## Effect of Electromagnetic Stirring on Microstructure and Hardness of BT20 Titanium Alloy Laser Deposition Repair Parts

Wang Wei, Liu Qi, Yang Guang, Qin Lanyun, Ren Yuhang, Qi Peng

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In order to improve the laser deposition repair quality of BT20 titanium alloy, an electromagnetic stirring device was introduced to assist laser deposition repair, and the effects of rotating magnetic field on the macromorphologies, microstructures and micro-hardness of the laser repair layer were studied by changing the magnetic field intensity and magnetic stirring speed. The results show that under the effect of the electromagnetic field, the surface is flat. Meanwhile, the lamellar  $\alpha/\beta$  in laser repaired zone is mechanically broken, the length of intra-crystalline  $\alpha$  layers is reduced, but the thickness of  $\alpha$  lamellar is almost the same, 0.4~0.5  $\mu\text{m}$ , so the grains are refined and the microhardness increases. As the field intensity and the stirring speed increase, the micro-hardness of repaired parts also increases, while the micro-hardness of the repaired zone tends to be homogenization with certain parameters.

**Key words:** titanium alloy; electromagnetic stirring; laser deposition repair; microstructure; micro-hardness

Corresponding author: Liu Qi, Master, Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, Tel: 0086-24-89723852, E-mail:

773509255@qq.com