

磁场辅助激光沉积修复钛合金的组织 and 性能

钦兰云, 杨光, 卞宏友, 王维, 任宇航, 刘奇

(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: 为了调控激光沉积修复 BT20 钛合金的组织, 提高其力学性能, 将旋转磁场引入到激光修复系统中, 考察了不同磁场强度下修复试样的组织和力学性能。结果显示, 修复区和基体形成了致密冶金结合, 修复区为 α/β 片层组织, 硬度分布从基材到修复区依次提高; 在一定范围内, 磁场强度越强, α 片层长/径比越小, 片层组织越细密, 修复区硬度越大, HV_{0.1} 可达 4.4 GPa。表明磁场搅拌减轻了 β 晶溶质富集, 使 α 片层析出的驱动力减小, 需要在更大过冷度下析出, 而过冷度的增加, 导致形核率的增大, 最终导致 α 层片细化, 从而提高沉积层的力学性能。

关键词: 钛合金; 磁场; 激光沉积修复; 微观组织

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)05-1277-04

BT20 (Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V) 合金属于高铝当量的近 α 型钛合金^[1,2], 作为一种优良的结构材料, 在飞机上的用量越来越大。传统加工制造工艺复杂、工序多、材料利用率低、生产周期很长^[3], 因各种原因加工超差不可避免。对于超差或服役损伤的零件进行修复, 不仅可以挽回经济损失, 节约时间, 还可以避免资源的浪费。目前国内外对于激光修复方法已经进行了一些研究, 激光沉积修复 (laser deposition repair, LDR) 技术可以克服传统修复技术结合力弱、修复位置难以控制等缺陷^[4-6], 很好地恢复修复件的几何尺寸和力学性能。对钛合金激光沉积修复的研究发现, 沉积层组织为以修复件为基底的具有外延生成特征的粗大的柱状晶组织^[5-7]。目前常用的调控组织的方法主要有: 改变沉积工艺^[8]、对激光熔池施加外场^[9,10]、热处理^[2]等。由于修复件不能同新制造件一样自由确定热处理工艺来调节其性能, 因此作者提出采用磁场辅助激光沉积修复钛合金组织的方法来提高修复质量, 探索外加磁场对激光熔池搅拌作用下钛合金凝固组织的变化规律。电磁搅拌在焊接、激光熔覆等领域已成功应用^[11,12]。Vollertsen 等^[13]采用交变电磁场辅助 CO₂ 激光焊接铝合金, 研究了磁场对熔池电磁搅拌作用的机理, 结果表明, 磁场强度大小对磁搅拌作用的影响明显。余本海等^[14]就电磁搅拌对激光熔覆 WC-Co 基合金涂层的组织结构和硬度的影响及机理进行过研究。余圣甫等人^[15,16]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焊熔池中液态 304 不锈钢、Al-12Si 合金进行搅拌, 抑制柱状晶的产生, 细化焊缝金属晶粒。刘洪喜等人^[17]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。但是, 钛合金激光熔池内“磁-电-力”的电磁现象与熔池内流体相互作用机制更为复杂, 旋转磁场作用下的钛合金组织性能变化均未见相关报道。

因此本实验将自行设计的电磁搅拌装置引入到 BT20 钛合金激光沉积修复过程中, 即在激光沉积过程中同步施加旋转磁场, 通过调控外加磁场强度研究激光沉积层组织的变化, 为精确控制钛合金零件组织和综合力学性能提供一种新的研究思路。

1 实验

实验采用的磁场辅助激光沉积修复系统示意图如图 1 所示。由激光器及光路传输系统、数控工作台、惰性气氛加工室、粉末输送系统、电磁搅拌装置 5 部分组成。CO₂ 激光器最大输出功率可达 5 kW, 保护气体与载粉气体均使用高纯氩气。实验前对加工室抽真空, 充氩气, 控制氧含量在 0.01% 以下。实验采用的激光工艺参数: 激光功率 1.2 kW, 扫描速度 3 mm/s, 扫描间距 1.3 mm, 层厚为 0.2 mm。电磁搅拌装置采

收稿日期: 2014-05-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51305280, 51375316); 国防基础科研项目 (A3520133001); 中航工业产学研创新工程 (CX Y2011SH16); 辽宁省教育厅科学技术研究基金 (L2013077)

作者简介: 钦兰云, 女, 1977 年生, 博士生, 讲师, 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, 电话: 024-89723852, E-mail: qinly@sau.edu.cn

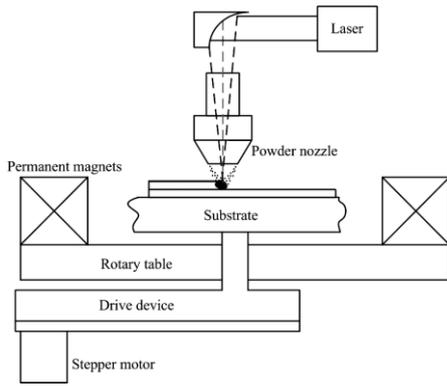


图 1 磁场辅助激光沉积修复装置示意图

Fig.1 Schematic of LDR auxiliary magnetic fields

用 2 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。待修复试样固定在磁极中间的工作台上。调节步进电机的转速，使磁场旋转速度为 0 rad/s 到 240 rad/s，通过调节磁极对之间的距离，使电磁搅拌强度为 30 和 50 mT。

实验前用砂纸打磨掉待修件表面的氧化皮，用丙酮擦拭干净，修复尺寸为 20 mm×20 mm。选用粒度分布为 44~149 μm 的真空等离子旋转电极 BT20 球形粉末作为沉积材料。粉末化学成分（质量分数，%）为 6.53 Al, 1.53 Mo, 1.47 V, 1.78 Zr, 0.13 Fe, 0.033 Si, 0.012 C, 0.014 N, 0.005 H, 0.11 O, 余量为 Ti。粉末经真空烘干处理后备用。采用 OLYMPUS 光学显微镜观测激光沉积修复区组织结构及形貌。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，加载保持时间 15 s。

依据永磁魔环原理^[18]，自行设计的磁场搅拌装置的磁体分布见图 2a，通过有限元分析得到其磁感应强度矢量图如图 2b 所示。可见选定的磁体分布在圆形的中心区域感应的是一个近似均匀场，磁体随着转盘转动时，感应磁场也会随着磁体的转动而旋转，这样在空间就产生一个旋转磁场。

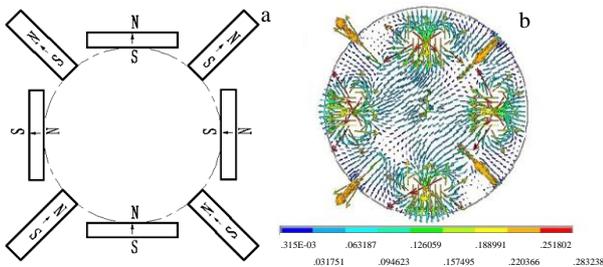


图 2 磁体分布及磁场强度矢量图

Fig.2 Distribution of magnet (a) and vector diagram of magnetic induction (b)

2 结果与分析

2.1 激光沉积修复试样的宏观形貌

图 3 是施加磁场前后激光沉积修复试样的表面形貌。施加磁场的搅拌速率为 240 rad/s，磁场强度是 50 mT。可见未加磁场时修复件表面道间分界明显，留有大量的未熔粉末（如图 3a 所示）。而施加磁场作用后，修复件表面趋于平整，道间分界明显减小，粘黏粉末颗粒减少。所以外加辅助磁场可使激光修复件表面质量有所提高（如图 3b 所示）。

图 4 和图 5 分别是施加磁场搅拌前后激光沉积修复试样的低倍光学照片。整体均由修复基体组织经热影响区向修复区连续变化，底部为 BT20 锻件基体区，中部为热影响区（宽度为 0.4~0.7 mm），顶部为激光修复区，修复区与锻件基体呈现致密的冶金结合。可明显观察到施加磁场前，宏观柱状晶组织呈现明暗分界的现象，这是由于组织内晶粒不同的晶体学取向所致。而施加磁场作用后这种明暗交替并不明显，和施加磁场作用前相比，粗大的 β 柱状晶粒之间的晶粒取向分界不太明显，表明磁场搅拌可能会使各晶粒取向趋于一致。

2.2 激光修复试样的微观组织

图 6 是搅拌速率为 240 rad/s，不同磁场强度下激光沉积修复样件修复区的显微组织。可见施加磁场作

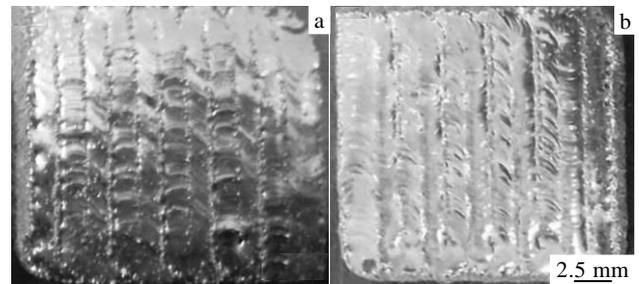


图 3 施加磁场前后修复试样的形貌

Fig.3 Surface of repair parts: (a) without magnetic field and (b) with magnetic field of 50 mT, 240 rad/s

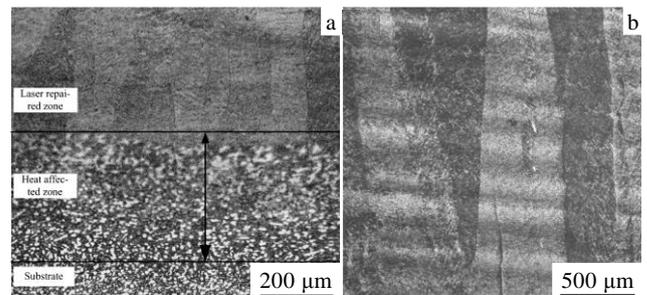


图 4 激光沉积修复试样的宏观组织

Fig.4 Macrostructure of LDR sample: (a) bonding zone and (b) prior β grain of repaired zone

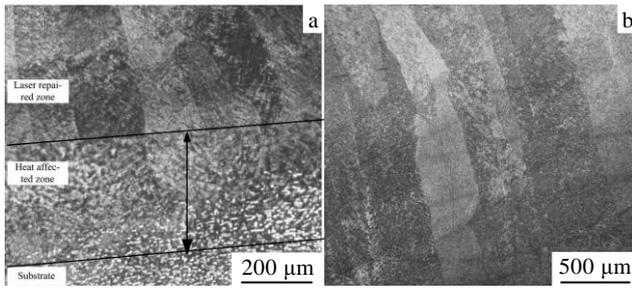


图 5 磁场作用下修复件的宏观组织

Fig.5 Macrostructure of LDR sample with magnetic field:

(a) bonding zone and (b) prior β grain of repaired zone

用前后，激光沉积修复 BT20 钛合金修复区具有典型的片状 β 转变近 α 钛合金组织。图 6a 为典型网篮组织， α 片层的厚度约 0.5 μm ，长度 6.2~9.8 μm 。而施加磁场作用后，明显可见片层组织更加细密。图 6b 片层组织中的 α 片层长度为 5.5~9.2 μm ， α 片层厚度为 0.4~0.5 μm ；图 6c 和 6b 片层 α 组织尺寸相近， α 片层长度和厚度分别为 3.1~4.8 μm 和 0.4~0.5 μm 。随着磁场强度的逐渐提高， α 片层厚度基本保持不变，但片层长度变小，因此 α 片层长/径比减小。

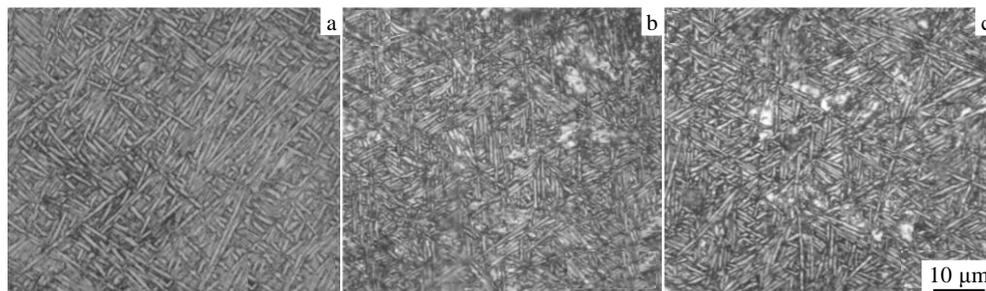


图 6 不同磁场强度下修复区的显微组织

Fig.6 Microstructures of laser deposition repair layers under different magnetic field intensities: (a) 0 mT, (b) 30 mT, and (c) 50 mT

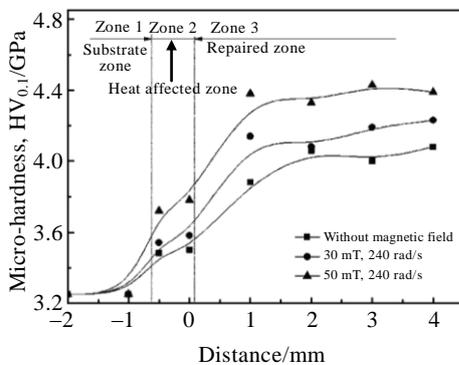


图 7 不同磁场强度下显微硬度值变化

Fig.7 Micro-hardness distribution of different zones under different magnetic field intensities

2.3 修复试样的显微硬度

图 7 为不同磁场参数条件下激光修复试样不同区域的显微硬度曲线。可见施加磁场搅拌作用前后，修复试样的硬度从基材到修复区均依次提高，这与修复试样的微观组织相对应。基材为锻造退火态双态组织，修复区为网篮状组织，而热影响区为由双态组织过渡到细密网篮组织。基材的平均显微硬度 $HV_{0.1}$ 约为 3.2 GPa，热影响区因等轴 α 的体积分数减少而硬度增大。且随着磁场强度的增大，片层 α 组织长/径比减小， α/β 片层排列紧密，使沉积层显微硬度提高。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 4.4 GPa。

2.4 磁场对激光沉积组织影响机理探讨

磁场对激光沉积修复试样的组织和力学性能的影响，主要是通过磁场的电磁搅拌对激光熔池的作用而产生的^[19,20]。旋转磁场产生的电磁搅拌使初生 β 晶的溶质富集减轻， α 层片析出的驱动力减小，进而使得初生 β 相需要在更大的过冷度下才会发生 α 层片的析出，而过冷度的增大将导致形核率的增大，最终使析出的 α 层片细化，沉积层显微硬度提高。

3 结 论

- 1) 采用磁场辅助激光沉积修复技术对 BT20 进行激光修复，修复区和基体形成了冶金结合，磁场搅拌作用使修复表面粘黏粉末颗粒减少，表面趋于光滑。
- 2) 磁场搅拌速率固定，在一定范围内提高磁场的强度，可促使激光沉积修复层微观组织 α 片层长/径比减小。
- 3) 随着磁场强度的增强，片层组织得到细化，排列紧密，显微硬度提高。

参考文献 References

[1] Борисова Е. А. Translated by Chen Shiqing(陈石卿).

- Металлография Митановых Сплавов*(钛合金金相学)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986: 292
- [2] Zhang Xiaohong(张小红), Lin Xin(林鑫), Chen Jing(陈静) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(1): 142
- [3] Wang Xiangming(王向明), Liu Wenting(刘文廷). *Design and Application of Aircraft Structure of Titanium Alloy*(飞机钛合金结构设计与应用)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 14
- [4] Michael Wilson J, Cecil Piya, Yung C Shin *et al. Journal of Cleaner Production*[J], 2014, 80: 170
- [5] Lin Xin(林鑫), Xue Lei(薛蕾), Chen Jing(陈静) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2010(8): 55
- [6] Xue Lei(薛蕾), Chen Jing(陈静), Zhang Fengying(张凤英) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(11): 1817
- [7] 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
- [8] Wang Huaming(王华明), Zhang Shuquan(张述泉), Wang Xiangming(王向明). *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2009, 36(12): 3204
- [9] Chen Changyuan(陈畅源), Deng Qilin(邓琦林), Song Jianli(宋建丽). *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*(南京航空航天大学学报)[J], 2005, 37(11): 44
- [10] Qin Lanyun(钦兰云), Wang Wei(王维), Yang Guang(杨光). *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2013, 40(1): 0103 001
- [11] Ambrosy G, Berger P, Huegel H *et al. SPIE*[J], 2003, 5120: 596
- [12] Gatzert M, Tang Z, Vollertsen F *et al. Physics Procedia*[J], 2011, 12: 56
- [13] Vollertsen F, Thomy C. *Laser Appl*[J], 2005, 18(1): 28
- [14] 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
- [15] Yu Shengpu(余圣甫), Zhang Youshou(张友寿), Lei Yi(雷毅) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2006, 27(3): 109
- [16] 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
- [17] 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): 0103 007
- [18] Vives C H. *Metall Trans B*[J], 1992, 23: 189
- [19] Zhang Zhu(张翥), Wang Qunjiao(王群骄), Mo Wei(莫畏). *Titanium Metallography and Heat Treatment*(钛的金属学和热处理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 56
- [20] Zhang Xinge(张新戈), Wang Qun(王群), Li Liqun(李俐群) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2009, 23(5): 39

Microstructure and Properties of Magnetic Field Assisted Laser Deposition Repaired BT20 Alloy

Qin Lanyun, Yang Guang, Bian Hongyou, Wang Wei, Ren Yuhang, Liu Qi

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

Abstract: To improve the laser deposition repair quality of BT20 titanium alloy, a magnetic field device was designed and introduced to the laser repair system. The effects of magnetic field intensity on the macro morphologies, microstructures and micro-hardness of the laser repaired zone were studied. The results show that there is a dense metallurgical bond between the repaired zone and the substrate under the magnetic field, and flat surface can be gained with few powders. And also, the repaired zone is composed of prior β grain with α/β lamellae in it. With the increasing of magnetic field, the α lamellae length declines and its thickness is 0.4~0.5 μm . The micro-hardness of the repaired zone improves with the increasing of magnetic field intensity, but it tends to be homogenization in certain parameters. It indicates that rotating magnetic field reduces enrichment of solute, and then decreases $\beta \rightarrow \alpha$ phase transformation driving force. Hence, α lamellae precipitation needs high degree of supercooling, which lead to a higher nucleation rate, resulting in finer microstructures and improved mechanical property.

Key words: titanium alloy; magnetic field; laser deposition repair; microstructure

Corresponding author: Qin Lanyun, Candidate for Ph. D., Lecturer, 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: qinly@sau.edu.com