

激光沉积修复 BT20 合金试验研究

钦兰云^{1,2}, 王 婷², 杨 光², 王 维^{1,2}, 卞宏友², 任宇航²

(1. 沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 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: 采用激光沉积技术对 BT20 钛合金锻件加工超差及服役损伤进行修复, 对修复过程中气孔和熔合不良等缺陷的形成进行了原因分析, 并采用了优化工艺参数, 对激光熔池施加超声外场等手段, 获得无缺陷的修复试样。考察了试样的微观组织和主要合金元素的分布, 测量了激光沉积层的显微硬度。结果表明: 优化工艺参数后得到的修复组织和基体形成致密的冶金结合, 而施加超声外场使修复区的气孔率明显下降; 修复试样整体无合金元素的偏析, 显微硬度分布从基材到修复区呈递增趋势。

关键词: 激光沉积修复; BT20 钛合金; 缺陷; 力学性能; 超声振动

中图分类号: TG166.5; TG113 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)02-0404-07

Experimental study on laser deposition repair BT20 alloy component

Qin Lanyun^{1,2}, Wang Ting², Yang Guang², Wang Wei^{1,2}, Bian Hongyou², Ren Yuhang²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Researches on the laser deposition repair of BT20 alloy forgings having defects mis-machined or damage were investigated, the reasons of occurring defects such as gas porosities and ill bonding in the repaired zone were analyzed. And flawless samples were obtained through optimizing laser process parameters and introducing the ultrasonic vibration into laser deposition repair system. The microstructure characteristic of laser deposition repair component and distribution of main alloy elements were investigated, and the microhardness of the laser deposition layer was tested. The results indicate that there is a dense metallurgical bond between the repaired zone and the substrate with the optimized process parameters. While the gas porosities ratio of the laser deposition layer is decrease obviously through introducing the ultrasonic vibration to the repaired system. The component elements are unifomly distributed without fluctuation and segregation in the whole repaired sample. Distribution of microhardness from the substrate to the repaired zone showes an increasing trend.

Key words: laser deposition repair; BT20 titanium alloy; defect; mechanical properties; ultrasonic vibration

收稿日期: 2013-06-17; 修订日期: 2013-07-19

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(CXY2011SH16); 辽宁省教育厅科学技术研究资助项目(L2013077)

作者简介: 钦兰云(1977-), 女, 讲师, 博士生, 主要从事激光沉积成形、修复方面的研究工作。Email: qinly@sau.edu.cn

导师简介: 王维(1957-), 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光沉积制造方面的研究工作。Email: wangw1116@sau.edu.cn

0 引言

BT20(Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V)合金属于高铝当量的近 α 型钛合金^[1],作为一种优良的结构材料,在飞机上的用量越来越大。但BT20钛合金是一种难加工材料,传统采用“锻造+机械加工”的方法,存在工艺复杂、材料利用率低、生产周期长等缺点^[2],且在制造过程中经常会出现大量的加工超差,或在服役使用中经常会出现裂纹、腐蚀、磨损等失效。因此,高效、高性能的修复技术是亟待的关键问题。而激光沉积修复就是以激光熔覆和快速成形技术为基础,以修复损伤零件为目的,利用激光使熔覆材料与待修复的基体形成冶金结合,恢复零件几何尺寸和力学性能^[3]的一种技术。相比传统的电刷镀、钎焊、TIG焊、热喷涂等技术^[4-5]有许多优点:修复区和基体可形成冶金结合,修复层对基体的稀释度小等。但激光沉积过程中存在着气孔、熔合不良、夹杂等缺陷,这些缺陷降低了修复件动载荷下的力学性能。近年来,一些学者对钛合金激光沉积成形/修复进行研究,并采用不同的退火温度对沉积件进行热处理,通过改变沉积态组织来改善沉积件的力学性能^[6-8]。P.A.Kobryn、Xinhua Wu 和 J.Dutta Majundar 等人分别在 TC4 及 316L 不锈钢激光快速成形件内部观察到了气孔及熔合不良缺陷^[9-11];黄卫东等^[12-13]对 TC4 钛合金立体沉积成形过程中缺陷形成机理进行了研究;宫新勇^[14]等采用激光沉积方法修复受损 TC11 钛合金叶轮,并通过超转试验得以应用;王凯^[15]等通过有限元分析论证采用激光快速成型修复 TC4 钛合金薄壁盘环零件的可行性;于新年^[16]等通过激光熔覆方法修复钛合金表面缺陷,并与氩弧焊对比试验,充分体现激光加工工艺的优越性;笔者等^[17]为了减少激光沉积试样的残余应力,将超声振动引入到 TC4 激光沉积梯度材料实验过程中。

目前针对 BT20 合金激光沉积修复的研究较少,且沉积修复组织中常会出现气孔、熔合不良等缺陷,因此,文中采用激光沉积手段针对 BT20 合金锻件在加工和服役过程中产生的面损伤进行了修复,分析了缺陷的形成原因,并采用优化激光工艺参数和对激光熔池施加外场的方式,以期减少或者消除缺陷,提高修复件综合力学性能。

1 实验

实验采用的激光沉积修复装备由激光器及光路传输系统、数控工作台、惰性气氛加工室、粉末输送系统四部分组成,修复系统原理图如图 1 所示。激光器为最大输出功率可达 5 kW 的 CO₂ 激光器,保护气体与载粉气体均使用高纯氩气。实验中采用多层多道沉积方式修复试样,基材为锻造退火态 BT20 钛合

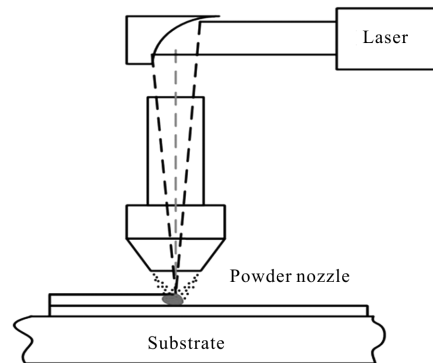


图 1 激光沉积修复过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the laser deposition repair process

金板,尺寸为 80 mm×40 mm×20 mm。实验前用砂纸打磨掉待修复表面的氧化皮,用丙酮擦拭干净,修复区尺寸为 50 mm×30 mm×10 mm。选用粒度分布为 44~149 μm (-100~325 目)真空等离子旋转电极球形粉末 BT20 作为沉积材料,粉末成分见表 1,粉末经真空烘干处理后干燥备用。实验采用的激光工艺参数为:激光功率 2 100 W,焦距 300 mm,扫描速度 2~7 mm/s,送粉速度 3 g/min,搭接率 20%~45%,载气压力 0.2 MPa,载气流量 3 L/min。金相试样腐蚀采用 Kroll 腐蚀剂及体积比为 1:6:7 的 HF-HNO₃-H₂O 溶液。样件检测采用 OLYMPUS-DP71 型光学显微镜(OM)。利用 MVK-300 型显微硬度计检测试样硬度,加载载荷为 0.98 N,加载保持时间 20 s。采用定量金相分析方法测定 β 柱状晶粒的平均直径和 α 片层的厚度。

表 1 BT20 钛合金粉末成分(wt%)

Tab.1 Composition of BT20 titanium alloy powder(wt%)

Elements	H	O	N	C	Si	Fe	Al	Zr	Mo	V	Ti
Per-cent	0.005	0.11	0.014	0.012	0.033	0.13	6.53	1.78	1.53	1.47	Bal.

2 结果与分析

2.1 激光沉积修复 BT20 合金的显微组织

激光沉积修复 BT20 沉积态试样的组织形态如图 2 所示。整体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(宽度约为 0.7~1 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。基材(图 3(a))是典型双态组织,在 α/β 片层组织上均匀分布等轴状的初生 α 组织,而修复区(图 3(b))是典型的网篮组织。由图 2 可见,修复区的宏观组织为贯穿多个沉积层呈外延生长的粗大原始 β 柱状晶,晶粒较为粗大,宽 0.5~1.5 mm,高 1~5 mm,柱状晶的生长有一种约束近似定向生长的特征^[10]。激光沉积修复过程

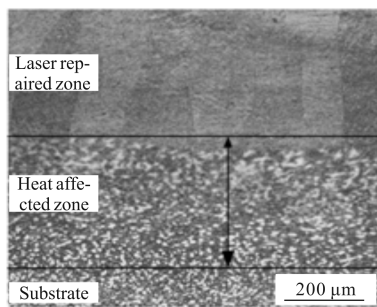


图 2 激光沉积修复试样的显微组织照片
Fig.2 Micrograph of laser repaired sample

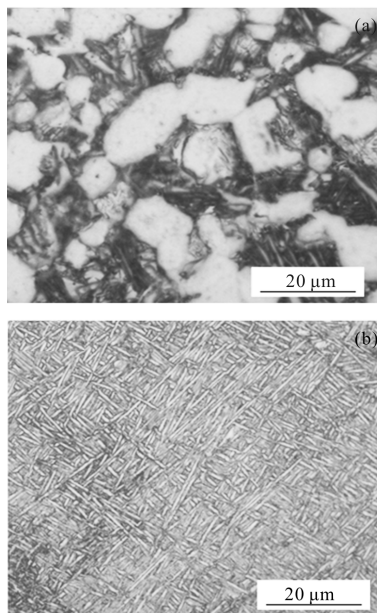


图 3 锻件基体区和激光沉积修复区的光学组织
Fig.3 Micrograph of forgings substrate zone and laser repaired zone

是一个快速冷却的非平衡过程。当熔池快速凝固时,初始形成的沉积层组织为马氏体。由于激光沉积成形是逐层堆积的过程,导致已经凝固的各层均要经受部分重熔、反复加热/冷却的再热循环过程。可以明显地观察到沿沉积高度方向的柱状晶和平行于激光扫描方向的沉积层间层带。在熔池凝固过程中,熔池中绝大部分热量以热传导的方式通过基材沿垂直向下的方向散失,熔池小熔体将在熔池底部同质材料上逆着热流方向向外延生长^[19]。另外,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。

图 4 是在扫描电镜下(SEM)修复区的显微组织,观察显示激光修复区具有十分细小的 α/β 片层组织,且片层集束取向随机。如图 4(a)所示, α 片层宽度约 0.4~0.5 μm ,长约 6.2~9.8 μm ;从图 4(b)中可以清晰地看到初生 β 柱状晶的晶界,由于凝固偏析,通常晶界处具有更高溶质饱和度,导致在冷却过程中, α 相通常在初生 β 晶界首先析出,进而有部分 α 相团束沿着初生 β 晶界析出向晶内生长。

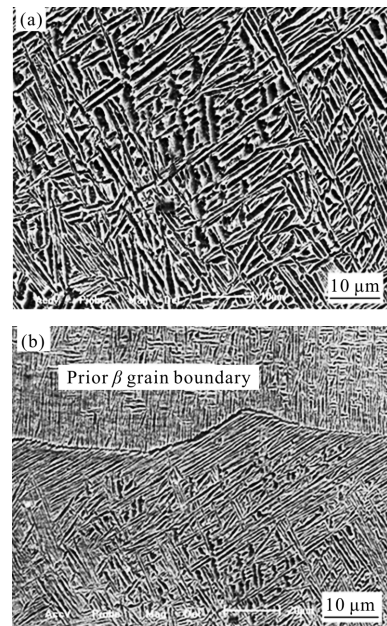


图 4 激光沉积修复 BT20 合金 SEM 照片
Fig.4 SEM micrograph of laser repaired zone

图 5 为热影响区各个不同部位的显微组织,可见热影响区组织由等轴初生 α 相、片层状 α 集束(域)组成,还夹杂着一些针状马氏体 α 相。随着逐渐接近修复区,等轴状的初生 α 相的体积分数和尺度

逐渐减少,直至到修复区完全消失。图 6 给出了沉积修复的首层对基材的热处理效应的示意图。激光熔池内加热过程迅速,且熔池内的热量会快速向下传递到基材,导致熔池底部基材的温度迅速升高,可以达到邻近重熔区的 BT20 的熔点温度,远高于 β 转变温度,使得热影响区的等轴 α 在快速加热过程中发生了向 β 相的固溶扩散转变,温度越高, $\alpha \rightarrow \beta$ 的

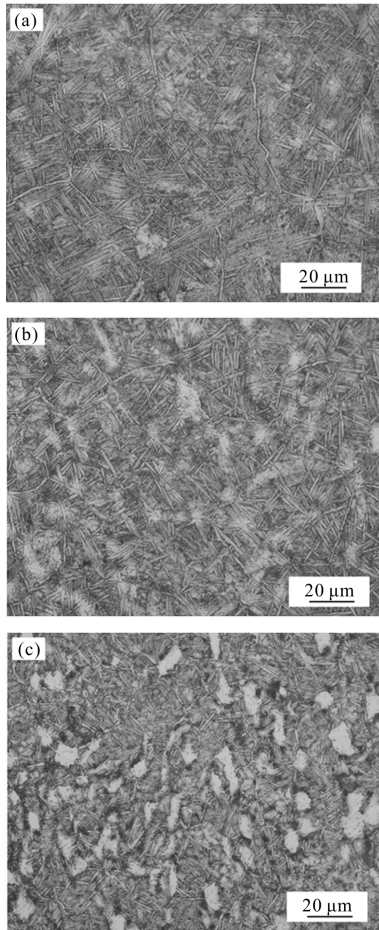


图 5 热影响区不同部位的显微组织
Fig.5 Micrographs of heat affect zone

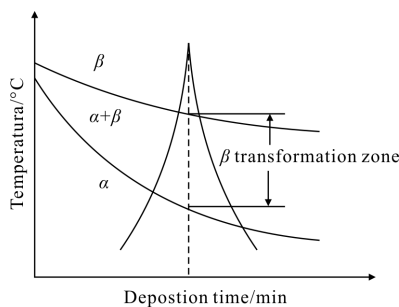


图 6 激光沉积修复沉积层向基材原位热处理示意图^[18]

Fig.6 Schematic showing the downward heat treatment for substrate from the deposited layer

扩散转变就越完全,因此导致越接近修复沉积区,等轴 α 相的体积分数和尺度越小。而细针状马氏体的产生则是由于激光的快冷特点决定的,当快速冷却时,由 β 相的析出来不及进行,但是 β 相的晶格结构不易被冷却速度所抑制^[20],仍然发生了转变,从而产生了过饱和固溶体-马氏体。

2.2 修复过程中形成的缺陷及避免措施

2.2.1 修复区常见缺陷的形成原因

由于激光沉积修复是个多因素影响的过程,所以在修复过程中由于激光加工参数选择不当,从而导致无法形成有效的熔池或者形成的熔池“捕获”粉末的能力有限,以及同步送粉器粉末的汇聚性不良等都会导致修复件出现气孔、熔合不良、变形开裂等缺陷。陈静^[21]等在做 TC4 零件激光快速修复过程中发现,当采用未经干燥处理的 TC4 粉末进行激光修复时,发现修复区存在许多气孔,而用经过真空干燥后的粉末修复时,组织中则不会存在气孔,而笔者在激光沉积修复过程中发现,即使修复用的 BT20 粉末经过真空干燥处理,可以降低修复区的气孔率,但仍不可避免气孔的存在。另外,在沉积修复过程中,当激光加工参数匹配不当时容易导致各种类型的熔合不良:沉积层之间的熔合不良,沉积道之间局部的熔合不良,以及更为严重的修复区和基材之间的熔合不良。

图 7 为激光修复过程中出现的常见缺陷。其中修复区和基材之间的熔合不良也是修复过程中最易

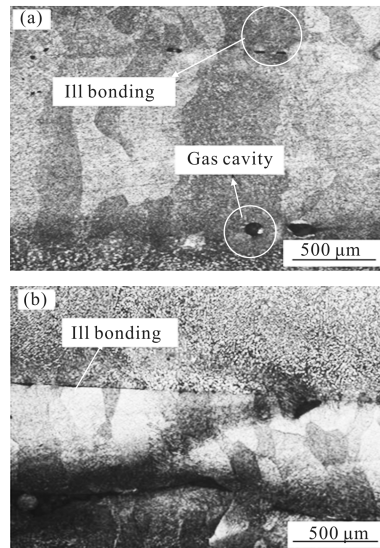


图 7 激光修复试样中的缺陷照片

Fig.7 Defects in the laser repaired sample

于出现的熔合不良现象。分析原因,可能是修复基体比较大,而激光熔池比较小,在基体没有预热的情况下,热量容易传导到基体中。另外,CO₂激光器模式的限制(光斑能量中心高,边缘低)导致实际在修复表面上没有足够的能量形成有效的熔池。其他层与层之间的熔合不良多是由于激光能量密度不足或者道间搭接率选取不当造成。

2.2.2 工艺参数对缺陷产生的影响

激光工艺参数选择不当极易造成缺陷的产生,当固定了激光光斑和离焦量后,影响激光沉积的因素主要有激光功率、扫描速度、搭接率等。通常要首先确定合理的激光功率,使激光辐照在修复件表面上瞬时使粉末及少量基体形成熔池。若激光功率较小,热量易散失,不能充分形成熔池,不利于熔池排杂,导致熔合不良或较多气孔出现;但激光功率过高易造成修复件变形。选定激光功率后,要匹配合理的扫描速度,如果扫描速度过快,不能充分形成熔池,出现较多缺陷;扫描速度过慢,易造成积热现象,影响修复尺寸且热影响区过大。

此外,选取适当的搭接率也很重要,通常选定在30%~40%左右,这样所得沉积层表面平整,并且在进行下一层熔覆时不易导致在两层之间形成气孔缺陷,搭接率过大,通常沉积层组织比较致密,但是试样表面不够平整;而搭接率过小,在相邻熔覆道之间易形成空洞等缺陷,并造成熔覆开裂。因此,通过工艺试验可得到优化的工艺参数,以保证修复件的内部质量和表面精度,并获得图2所示的无缺陷的试样组织。

2.2.3 超声作用抑制修复缺陷产生

借鉴超声振动在铸造焊接领域中的应用,在激光沉积修复钛合金件过程中施加了超声振动,超声功率为2.2 W,频率为18.3 kHz。图8为施加超声作用前后含气孔缺陷的修复区组织对比图。测得未施加超声时的气孔率为2.4%,而施加超声后的气孔率

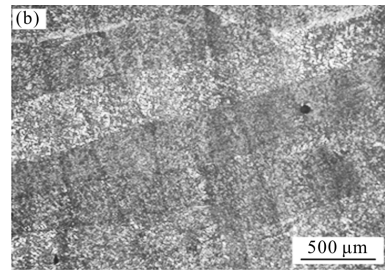
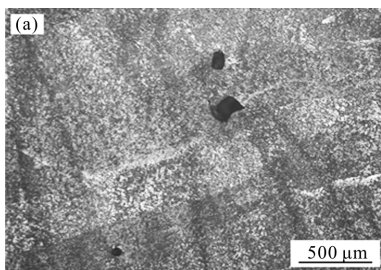


图8 施加超声前后样品修复区气孔对比

Fig.8 Micrograph of porosity in laser repaired zone with and without ultrasound

为0.75%,由此可以看出超声振动能有效抑制气孔。超声振动使得熔融金属中溶解的气体进入低气压区的空化泡内形成大气泡而自然上浮,从而抑制凝固时气孔的产生。

2.3 修复试样合金元素分布及硬度分布

对沉积修复样品进行元素线扫描分析,由图9可见,从基材到修复区,元素Al、Zr、Mo、V分布均匀,无宏观偏析现象。这是由激光沉积制造熔池的快速熔凝特性决定的。

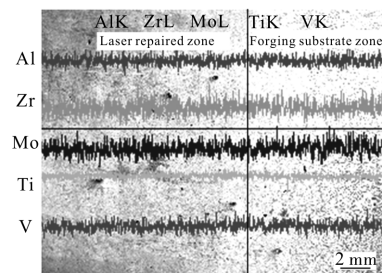


图9 激光修复试样能谱线扫描结果

Fig.9 EDS result of laser repaired sample

图10是激光修复试样的硬度分布图,可见修复区的硬度比锻件基材(约320~330 HV0.1)高23%,热

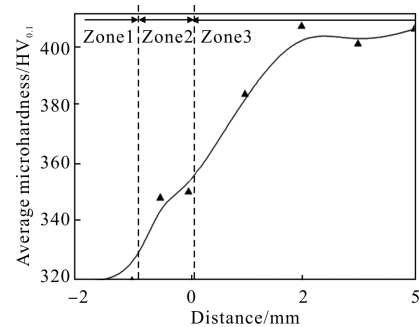


图10 激光沉积修复件的硬度分布

(1区-基材,2区-热影响区,3区-激光修复区)

Fig.10 Microhardness distribution of laser deposition repaired sample (Zone1-substrate, Zone2-heat affected zone, Zone3-laser repaired zone)

影响区的硬度居于二者之间,约为 350 HV0.1。激光修复区的硬度较基材显著提高,这是由修复区细密 α/β 板条组织决定的。

3 结论

通过上述分析,可以得出以下结论:

(1) BT20 合金激光修复区与锻件基材之间呈现致密冶金结合,基体区组织为均匀的双态组织,修复区组织为典型的网篮组织,原始的 β 柱状晶粒内的 α/β 片层组织极为细密,热影响区完成了从双态组织向网篮组织的过渡。

(2) 修复过程中由于工艺参数不匹配等原因会造成修复组织中出现气孔,熔合不良(层间或道间)等缺陷,但通过优化工艺参数或者施加超声场作用可获得缺陷较少的修复件。

(3) 激光修复区内各合金元素与锻件基体的元素分布一致,不存在宏观偏析;修复试样的硬度分布由基材至热影响区,直到修复区,硬度依次提高,这与观察到的修复件组织结构一致。

参考文献:

- [1] Борисова Е. А. Металлография титановых сплавов [M]. Chen Shiqing, translated. Beijing: National Defence Industry Press, 1986: 292-304. (in Chinese)
鲍里索娃. 钛合金金相学[M]. 陈石卿, 译. 北京: 国防工业出版社, 1986: 292-304.
- [2] Wang Xiangming, Liu Wenting. Design and Application of Aircraft Structure of Titanium Alloy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 14. (in Chinese)
王向明, 刘文廷. 飞机钛合金结构设计与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 14.
- [3] Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing, et al. Laser forming repair of titanium alloy parts [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, (8): 55-58. (in Chinese)
林鑫, 薛蕾, 陈静, 等. 钛合金零件的激光成形修复 [J]. 航空制造技术, 2010, (8): 55-58.
- [4] Zhu S, Guo Y C, Yan G P. Remanufacturing system based on totally automatic MIG surfacing via robot [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2005(2): 129-132.
- [5] Tan J C, Looney L, Hashmi M S J. Component repair using HVOF thermal spraying [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 92-93: 203-208.
- [6] Xie Xuxia, Zhang Shuquan, Tang Haibo, et al. Effect of annealing temperatures on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TA15 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(9): 1510-1515. (in Chinese)
谢旭霞, 张述泉, 汤海波, 等. 退火温度对激光熔化沉积 TA15 钛合金组织和性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 1510-1515.
- [7] Yuan Hong, Fang Yanli, Wang Huaming. Influence of heat treatment on microstructure and compressive property of laser melting deposited TA15 titanium alloy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 746-750. (in Chinese)
袁红, 方艳丽, 王华明. 热处理对激光熔化沉积 TA15 钛合金组织及压缩性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 746-750.
- [8] Zhang Xiaohong, Lin Xin, Chen Jing, et al. Effects of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloys by laser solid forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(1): 142-147. (in Chinese)
张小红, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光立体成形 TA15 钛合金组织及力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(1): 142-147.
- [9] Kobryn P A, Moore E H, Semiatin S L. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43(4): 299-305.
- [10] Wu Xinhua, Liang Jing, Mei Junfa, et al. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Materials & Design*, 2004, 25(2): 137-144.
- [11] Dutta Majumdar J, Pinkerton A, Liu Z, et al. Microstructure characterisation and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 247(1-4): 320-327.
- [12] Chen Jing, Yang Haiou, Huang Weidong, et al. The research on two kinds of cracking behavior and mechanism of cladding in rapid laser forming process [J]. *Applied Laser*, 2002, 22(3): 300-305. (in Chinese)
陈静, 杨海欧, 黄卫东, 等. 激光快速成形过程中熔覆层的两种开裂行为及其机理研究 [J]. 应用激光, 2002, 22(3): 300-305.
- [13] Zhang Fengying, Chen Jing, Tan Hua, et al. Research on forming mechanism of defects in laser rapid formed titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36

- (2): 211–215. (in Chinese)
张凤英, 陈静, 谭华, 等. 钛合金激光快速成形过程中缺陷形成机理研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36 (2): 211–215.
- [14] Gong Xinyong, Liu Mingkun, Li Yan, et al. Research on repair of TC11 titanium alloy component by laser melting deposition process [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (2): 0203005–1–6. (in Chinese)
宫新勇, 刘铭坤, 李岩, 等. TC11 钛合金零件的激光熔化沉积修复研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203005–1–6.
- [15] Wang Kai, Yang Haiou, Lin Xin, et al. Finite element analysis on thin wall ring part during laser rapid repair[J]. *Casting Forging · Welding*, 2012, 41 (11): 210–215. (in Chinese)
王凯, 杨海欧, 林鑫, 等. 激光快速成形修复薄壁盘环零件的有限元分析 [J]. 金属铸锻焊技术, 2012, 41 (11): 210–215.
- [16] Yu Xinnian, Sun Fuquan, Liu Xinyu, et al. Research on laser cladding repairing for defect on titanium alloy surface [J]. *Test and Mechanism Analysis*, 2011 (16): 116–118. (in Chinese)
于新年, 孙福权, 刘新宇, 等. 钛合金表面缺陷的激光熔覆修复研究[J]. 测试与机理分析, 2011(16): 116–118.
- [17] Qin Lanyun, Wang Wei, Yang Guang. Experimental study on ultrasonic-assisted laser metal deposition of titanium alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0103001–1–6. (in Chinese)
钦兰云, 王维, 杨光. 超声辅助钛合金激光沉积成形试验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103001–1–6.
- [18] He Ruijun, Wang Huaming. Microstructure features of laser deposited Ti–6Al–2Zr–Mo–V alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2009, 29(6): 18–22. (in Chinese)
贺瑞军, 王华明. 激光熔化沉积 Ti–6Al–2Zr–Mo–V 钛合金组织特征研究[J]. 航空材料学报, 2009, 29(6): 18–22.
- [19] Xi Mingzhe, Gao Shiyu. Heat-treated microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser rapid forming [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0103007–1–6. (in Chinese)
席明哲, 高士友. 激光快速成形 TA15 钛合金热处理组织及其力学性能[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103007–1–6.
- [20] Zhang Zhu, Wang Qunjiao, Mo Wei. Titanium Metallography and Heat Treatment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 48. (in Chinese)
张翥, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学和热处理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 48.
- [21] Xue Lei, Chen Jing, Zhang Fengying, et al. Laser rapid repair of the aircraft components of titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2006, 35 (11): 1817–1821. (in Chinese)
薛蕾, 陈静, 张凤英, 等. 飞机用钛合金零件的激光快速修复[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(11): 1817–1821.