

TC11 钛合金零件的激光熔化沉积修复研究

官新勇 刘铭坤 李 岩 张永忠

(北京有色金属研究总院复合材料中心, 北京 100088)

摘要 结合飞机起动机钛合金叶轮的修复需要,研究了 Ti-6Al-3.5Mo-1.8Zr-0.23Si(TC11)钛合金激光熔化沉积修复工艺及界面的组织与力学性能。结果表明,激光熔化沉积 TC11 钛合金及界面重熔区具有典型的魏氏组织特征,基体热影响区组织逐渐由魏氏组织向双态组织过渡;激光熔化沉积 TC11 钛合金的抗拉强度高于界面过渡区及基体,而塑性稍低于基体。通过采用逐点熔化沉积的方法对叶轮受损叶片进行了修复,经加工检验后通过了超转试验考核,实现了装机应用。

关键词 激光技术;激光熔化沉积;修复;TC11 钛合金;显微组织

中图分类号 TG146.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0203005

Research on Repair of TC11 Titanium Alloy Components by Laser Melting Deposition Process

Gong Xinyong Liu Mingkun Li Yan Zhang Yongzhong

(Center for Composites, General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract To repair the titanium alloy impeller for airplane starter, laser melting deposited Ti-6Al-3.5Mo-1.8Zr-0.23Si(TC11) titanium alloys, as well as the microstructure and properties of the interface, are investigated. The results indicate that the deposited TC11 titanium alloys and the interfacial re-melted layer present a typical Widmanstätten structure and the heat affected zone (HAZ) within the substrate changes gradually from Widmanstätten to duplex microstructure. Compared to the interface transition zone and the substrate, the as-deposited TC11 alloy possesses higher tensile strength and lower ductility. The damaged impeller blades are repaired by laser melting deposition in a point-by-point way. After machining and checking, the repaired impeller passes the over speed test and comes into real use.

Key words laser technique; laser melting deposition; repair; TC11 titanium alloy; microstructure

OCIS codes 140.3390; 310.1860; 310.3840; 310.4295; 160.3900

1 引 言

随着全球范围内资源的日益枯竭和环境污染的不断加剧,采用新型表面工程技术及激光熔化沉积技术实现受损零部件的修复和再制造,具有显著的经济效益和社会价值,近年来得到了快速发展^[1~3]。与目前普遍采用的氩弧堆焊、电镀、等离子及电子束堆焊等修复技术相比,激光熔化沉积技术具有修复精度高、对基体的热输入和热影响小、修复层及界面

组织性能优越、自动化程度高等优点,在航空、电力、石化、冶金、汽车等领域高附加值零件的高质量修复方面具有广阔的发展应用前景^[4~9]。由于激光熔化沉积技术在保证零件修复质量方面的优势,目前正在代替钨惰性气体(TIG)焊接,成为航空发动机零件修复的重要方法^[10~12]。

本文结合某飞机起动机 Ti-6Al-3.5Mo-1.8Zr-0.23Si(TC11)钛合金叶轮的修复需要,研究激光熔化

收稿日期: 2011-08-16; 收到修改稿日期: 2011-11-11

基金项目: 国家 973 计划(2011CB606305)和国家自然科学基金(50871023)资助课题。

作者简介: 官新勇(1984—),男,博士研究生,主要从事钛合金零件的激光熔化沉积修复方面的研究。

E-mail: huagu1984@126.com

导师简介: 张永忠(1970—),男,博士,高级工程师,主要从事高性能金属零件及梯度复合材料的激光熔化沉积成形等方面的研究。E-mail: yzhang@grinm.com

沉积 TC11 钛合金的基本工艺、界面过渡区组织及性能,然后针对叶轮叶片不同部位的受损,进行了激光熔化沉积修复尝试。

2 试验过程

为研究激光熔化沉积修复 TC11 钛合金与基体的界面性能,通过在 3 mm 厚锻造退火态 TC11 薄板侧壁逐层堆积一定高度的 TC11 钛合金,沉积所用的 TC11 合金粉采用等离子旋转电极雾化法制备,粉末粒径为 38~164 μm ,其平均成分为 Ti-6.42Al-3.29Mo-1.79Zr-0.23Si(质量分数)。

激光熔化沉积及修复试验在配有 5 kW CO_2 横流激光器的激光熔化沉积系统上进行,采用焦长为 200 mm 的透射聚焦镜聚焦激光束,光斑直径约 2 mm,采用单道多层往复沉积制备出一定高度的薄壁。激光熔化沉积工艺为:激光功率 1.5 kW,扫描速度 4 mm/s,采用同轴方式送粉,送粉速率为 5.8 g/min,载气(氩气)流量为 2.5 L/min,每层沉积层高度设为 0.3 mm,所有试验均在保护气氛箱内进行,箱体内氧体积分数低于 10^{-4} ,基板尺寸为 110 mm \times 31 mm \times 3 mm,沉积薄壁尺寸为 62 mm \times 30 mm \times 3 mm,如图 1 所示。沉积后沿沉积高度方向加工出拉伸试样,使得结合界面位于拉伸试样的中心位置,同时沿所沉积薄壁的水平方向加工出拉伸试样,以评价激光熔化沉积材料的力学性能。

沿图 1 中所示 $x-z$ 截面切取样品,制成金相试样,采用 S-4800 扫描电子显微镜(SEM)观察所沉积材料及界面附近区域的微观组织,在 AG-G 电子万能试验机上测试室温拉伸性能,拉伸头的移动速率为 0.5 mm/min。激光熔化沉积修复在实际受损的叶轮上进行。

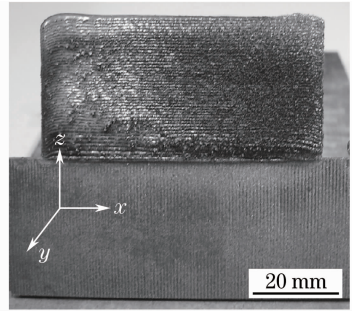


图 1 激光熔化沉积 TC11 钛合金薄壁样
Fig. 1 Thin wall sample of TC11 titanium alloy prepared by laser melting deposition

3 结果与分析

3.1 微观组织分析

图 2 为激光熔化沉积 TC11 钛合金薄壁中部及顶部的微观组织,文中所有微观组织照片与薄壁的相对方向如图 2(a)中所示。由图 2 可见,所沉积 TC11 钛合金为典型的魏氏组织,原始 β 晶界清晰完整,晶粒内部沿晶界存在位向、尺寸均不相同的长条状 α 团簇(位于图中明暗相间的暗色条状区域),不同方向的 α 团簇相互交织在一起,原始 β 晶粒内部还存在少量取向不同、呈粗片状无规则排列的板条 α 相。激光熔化沉积过程温度梯度(G)与凝固速度(R)的比值(G/R)是决定固/液界面处组织形态的关键因素^[13],随着这一比值的逐渐减小,材料组织由柱状晶向等轴晶转变。在 Berjeza 等^[14]所建立的数值模型基础上,Wang 等^[15]计算了钛合金表面激光熔覆过程中熔池温度场的分布,表明从熔池底部至顶部,随着固/液界面的移动,温度梯度逐渐减小,比值 G/R 从凝固开始为无穷大变为凝固结束时等于零。因此,熔池凝固后组织大部分为柱状晶,熔池顶部形成的极少等轴晶也会被下一层的熔覆重熔掉^[16]。钛合金在冷却凝固过程中, α 相沿 β 柱状晶

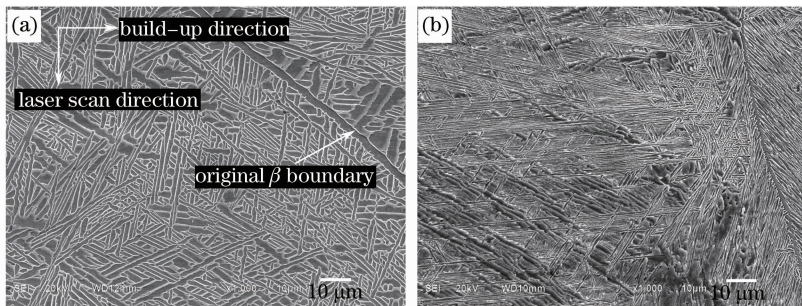


图 2 激光熔化沉积 TC11 钛合金的微观组织。(a)薄壁中部;(b)薄壁顶部

Fig. 2 Microstructure of laser melting deposited TC11 titanium alloy. (a) Middle of the deposited wall; (b) top of the wall

晶界形核析出并沿惯析面在 β 柱状晶晶内平行生长,呈现魏氏组织特征。在薄壁顶部[图 2(b)],魏氏组织特征更为明显, α 团簇尺寸较大(甚至能贯穿整个原始 β 晶粒), α 相更细更长,这主要与薄壁顶部未经过后续沉积时的热作用有关。每一层的后续沉积都相当于对前一层进行退火处理^[17,18]。有研究^[19]认为 TC11 合金在 950 °C~1030 °C(相变点在 990 °C~1000 °C)循环退火数次,会引起片状 α 相变短变粗。所沉积薄壁的顶部由于未受热循环作用而形成细长的片状 α 相。沉积态顶部这种细小的层片状组织具有高的断裂韧性、优异的抗蠕变性能和抗疲劳裂纹扩展性能^[20]。

图 3 为激光熔化沉积 TC11 钛合金薄壁(图 1)界面附近区域的微观组织。图 3(a)为锻造钛合金基体内部组织,为典型的双态组织形貌,即由等轴的初生 α 相和 β 相转变组织构成。这种组织是在 $\alpha+\beta$ 两相区引入变形能后再结晶的结果。双态组织综合

了层片状和等轴状组织的特点,通常具有高的塑性和疲劳强度,易于塑性变形,但较之层状组织其裂纹扩展抗力较差。图 3(b)~(e)分别为基体一侧距离沉积界面 2.0、1.5、1.0、0.5 mm 处的组织,可见,由锻造基体至沉积态材料其组织逐渐由双态组织过渡至魏氏组织。在距离沉积界面 2.0 mm 处基体保持着原有的双态组织特征。在距离界面 1.5 mm 处初生 α 相含量明显减少[图 3(c)中深色部分],边界变得模糊,出现 $\alpha+\beta$ 型钛合金的混合组织^[19],表明激光熔化沉积时此处的温度已达到 $\alpha\rightarrow\beta$ 相变温度,部分初生 α 相转变成 β 相,随后在冷却过程中形成 $\alpha+\beta$ 层片状组织,表现为 β 转变组织逐渐吞噬初生 α 相[图 3(c)、(d)],上述结果表明激光熔化沉积时基体的热影响区深度在 1.5 mm 左右。随着接近沉积界面,初生 α 相逐渐减小,直至完全消失,在距离界面 0.5 mm 处呈现出与沉积材料一样的魏氏组织,沉积时此处温度已达到液相线温度,为激光重熔后形

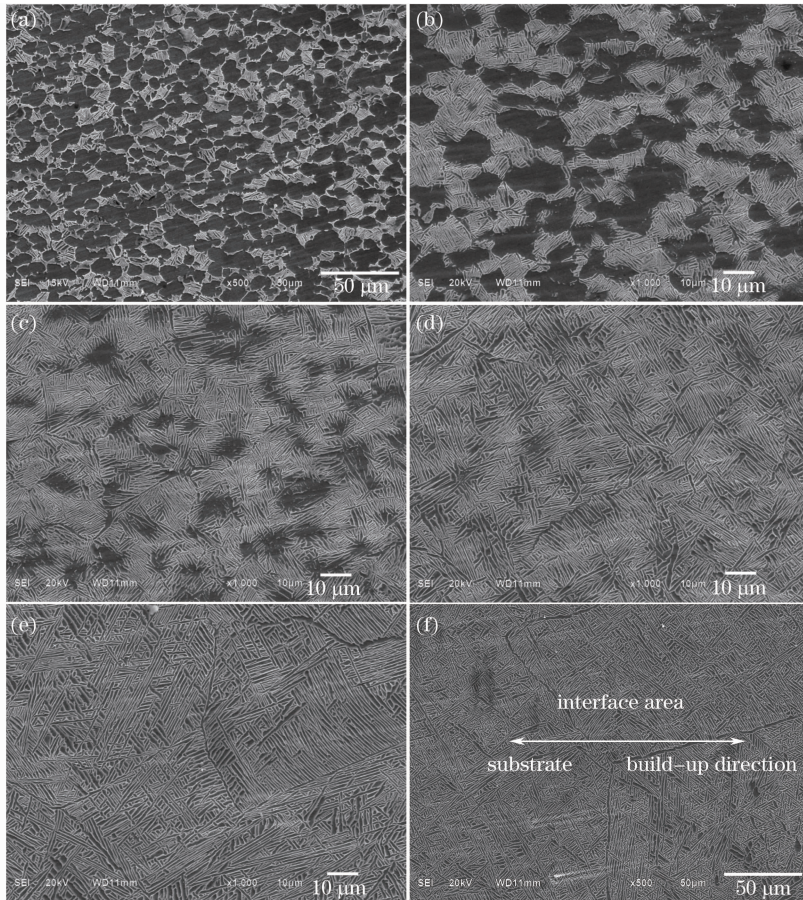


图 3 激光熔化沉积 TC11 钛合金薄壁界面附近区域的微观组织。(a)基体内部;(b)距界面 2.0 mm;

(c)距界面 1.5 mm;(d)距界面 1.0 mm;(e)距界面 0.5 mm;(f)界面处

Fig. 3 Microstructure of laser melting deposited TC11 titanium alloy thin wall. (a) Inside of the substrate; (b) 2.0 mm from the interface; (c) 1.5 mm from the interface; (d) 1.0 mm from the interface; (e) 0.5 mm from the interface; (f) interface area

成的组织,原始 β 晶粒尺寸较基体显著增大, α 片层变长,相互交织在一起[图3(e)].出现上述组织特征的原因在于热影响区的温度随着与界面距离的减小而增大,等轴 α 相在加热过程中发生了向 β 相的固溶扩散转变.热影响区温度越高,这种转变程度越大,等轴 α 相的体积分数和尺度越小,直至距界面0.5 mm处等轴 α 相完全消失.在沉积界面处,沉积材料与基体完全融合为一体,两侧的组织近乎一致,没有任何冶金缺陷.

3.2 力学性能及断口分析

表1给出了室温下激光沉积TC11钛合金及界面拉伸的力学性能,结果表明,激光熔化沉积TC11钛合金的拉伸强度约1200 MPa,明显高于环界面拉伸试样,但塑性较低.通过观察环界面拉伸试样断口附近的微观组织,可以判断出试样1、2的断裂位置均位于基体内部,界面拉伸的力学性能基本反映的是基体的性能,激光熔化沉积材料及界面结合区的拉伸强度均要高于基体.由前面的组织分析可知,热影响区内组织逐渐由双态组织向魏氏组织过渡,其拉伸强度要优于基体的双态组织,劣于沉积材料的魏氏组织,而塑性则相反.

表1 室温拉伸测试结果

Table 1 Results of tensile test under room temperature

Sample No.	Tensile strength σ_b /MPa	Elongation δ_5 /%	Remarks
1	1010	10.5	Interface test
2	990	11.5	Interface test
3	1210	7.5	As-deposited
4	1190	4.5	As-deposited

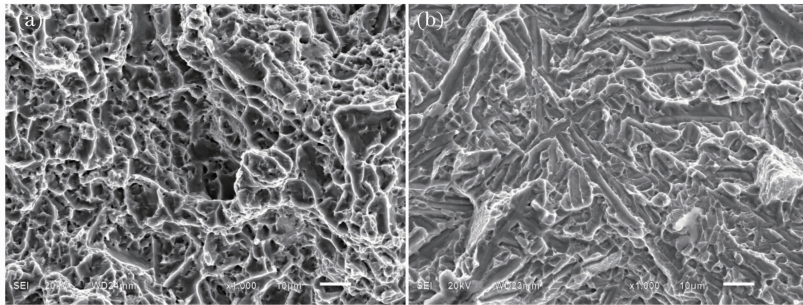


图4 拉伸断口的SEM形貌。(a)试样1;(b)试样3

Fig. 4 SEM morphology of tensile fracture surfaces. (a) Sample 1; (b) sample 3

3.3 叶轮的修复

图5(a)为待修复的某飞机起动机TC11钛合金叶轮.叶片的边缘部位由于外物的撞击出现了不同程度的损伤,并有一叶片在叶身高度的2/3处出现了断裂.由于叶片边缘部位非常薄(约0.5 mm),采用高功率激光熔化沉积时极易导致叶片边缘部位

激光熔化沉积TC11钛合金具有近快速凝固的组织特征,其凝固组织中 α 片层较薄且不同取向的 α 片层相互交织在一起,这有助于提高材料的强度,但由于沉积材料中不存在初生 α 相,且原始 β 晶粒尺寸较大(晶界出现连续 α 相),降低了材料的塑性.沉积材料与基体的过渡区域主要由部分未转变初生 α 相和 β 转变组织组成,其强度和塑性介于基体和沉积材料之间.有研究表明,双态组织中初生 α 相的含量与室温拉伸强度关系不大,但却与拉伸塑性有密切关系,初生 α 相含量越高,拉伸塑性越高^[19].

图4(a)为试样1拉伸断口的SEM照片,断口表面具有明显的韧窝特征,该试样断裂于基体内部,表明具有双态组织的基体在拉伸过程中发生了韧性断裂.而激光熔化沉积试样的断口表面具有明显的脆性断裂特征[图4(b)].

转子叶片主要有外物损伤、变形伸长和断裂三种失效模式^[21].通常,压气机转子叶片受外物撞击形成的凹坑、裂纹被认为是形成疲劳断裂的初因.从这个角度考虑,激光熔化沉积所形成的具有高拉伸强度的魏氏组织对于后两种失效模式具有积极意义,抗疲劳裂纹扩展性能及断裂韧性的提高能够有效减缓断裂失效模式的发生.由于叶片工作环境的复杂性,等轴 α 相及层片状 α 相魏氏组织的力学性能表现还有待于做进一步综合评价.一般认为,提高材料的塑韧性能能够有效减少叶片因外物撞击导致的损伤及断裂的发生.因此,通过优化激光熔化沉积工艺及对所沉积材料进行热处理组织性能调控以提高沉积材料的塑韧性成为下一阶段的研究重点.

的过度熔化和产生严重的热影响区.因此,实际修复过程中采用逐点沉积的方法,每点的沉积时间为1 s,激光功率为1 kW,沉积点之间的距离为0.8 mm.对于出现断裂的叶片,在先逐点沉积三层后再采用连续扫描沉积的方式进行尺寸恢复.通过对TC4钛合金叶片快速成型过程温度场的数值模

拟^[22,23],认为熔池高温区会随熔覆高度的增加而持续扩大。为避免基体温度过高及熔池热影响区过大,连续扫描时在每层沉积层之间停留10 s。另外,修复过程中为防止激光熔池的热辐射及漏光对叶片的热损伤,修复前用0.8 mm厚的纯铜片对叶身进行保护。图5(b)为激光熔化沉积修复后的叶轮,沉积

材料具有光亮的表面。经过对修复后的叶轮进行仿形加工、无损检测、动平衡校验和60000 r/min的超转试验,最终实现了装机应用。如经无损检测发现气孔、裂纹等缺陷则对其清理后重新进行二次修复。上述结果表明,通过合理控制激光熔化沉积修复工艺,可以实现起动机叶轮的高质量修复。

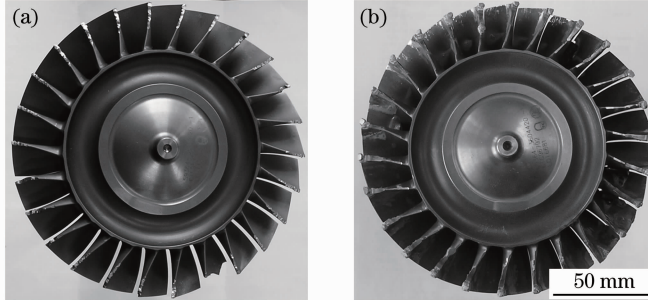


图5 飞机起动机钛合金叶轮。(a)修复前;(b)激光熔化沉积修复后

Fig. 5 Titanium alloy impeller for airplane starter. (a) Before repairing; (b) repaired by laser melting deposition

4 结 论

1) 激光熔化沉积 TC11 钛合金及界面处基体重熔区为魏氏组织,基体热影响区逐渐由魏氏组织过渡至基体的双态组织,激光熔化沉积材料及界面过渡区无冶金缺陷。

2) 激光沉积 TC11 钛合金的拉伸强度高于界面过渡区及基体,而塑性稍低,界面拉伸时断裂发生于基体内部。

3) 采用逐点沉积的方法对实际受损的 TC11 钛合金叶轮进行了修复,修复后的叶轮通过了超转试验考核,获得了实际应用。

参 考 文 献

- 1 M. Hedges, N. Calder. Near Net Shape Rapid Manufacture & Repair by LENS[R]. AVT-139 Report, 2006. 13
- 2 P. Vuoristo, J. Vihinen. High-performance laser coatings for manufacturing and maintenance of industrial components and equipment[J]. *Maintenance Research in Finland*, 2002, (5): 2~8
- 3 Yang Xichen, Li Huishan, Liu Yunwu *et al.*. Laser remanufacturing technology and its industrial application [J]. *China Surface Engineering*, 2003, 6(4): 43~46
杨洗陈, 李会山, 刘运武等. 激光再制造技术及其工业应用[J]. *中国表面工程*, 2003, 6(4): 43~46
- 4 C. Bremer. Automated repair and overhaul of aero-engine and industrial gas turbine components[C]. ASME Turbo Expo 2005, 2005. 841~846
- 5 D. W. Gandy, G. Frederick, J. T. Stover *et al.*. Overview of hot section components repair methods [C]. ASM Materials Solutions Conference & Exposition, Energy & Utilities Program, 2000. 9~12
- 6 K. H. Richter, S. Orban, S. Nowotny. Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades[C]. Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and

- Electro-Optics, 2004. 4~7
- 7 Wang Xiaoyan, Chen Jing, Lin Xin *et al.*. Microstructure of laser forming repair 7050 aluminum alloy with AlSi12 powder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(6): 1586~1590
王小艳, 陈静, 林鑫等. AlSi12 粉激光成型修复 7050 铝合金组织[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1586~1590
- 8 Guo Yongli, Liang Gongying, Li Lu. Laser cladding reparation of aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(2): 303~306
郭永利, 梁工英, 李路. 铝合金的激光熔覆修复[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 303~306
- 9 Yang Yongqiang, Wang Di, Wu Weihui. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(6): 0601007
杨永强, 王迪, 吴伟辉. 金属零件选取激光熔化直接成型技术研究进展[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0601007
- 10 L. Sexton, S. Lavin, G. Byrne *et al.*. Laser cladding of aerospace materials [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2002, 122(1): 63~68
- 11 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): 1817~1820
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): 1817~1820
- 12 Li Jianing, Chen Chuanzhong. Research situation of laser cladding technology in aviation manufacturing [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, (5): 51~54
李嘉宁, 陈传忠. 激光熔覆技术在航空领域中的研究现状[J]. *航空制造技术*, 2010, (5): 51~54
- 13 W. Kurz, D. J. Fisher. Fundamentals of Solidification (2nd ed.) [M]. Enfield: Trans. Tech. Publications, 1998. 51
- 14 N. A. Berjeza, S. P. Velikevitch, V. I. Mazhukin *et al.*. Influence of temperature gradient to solidification velocity ratio on the structure transformation in pulsed- and CW-laser surface treatment [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1995, 86(1-5): 303~309
- 15 Wang Weifu, Wang Maocai, Zhang Jie *et al.*. Research on the microstructure and wear resistance of titanium alloy structural members repaired by laser cladding [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(11): 810~816
- 16 Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing *et al.*. Microstructure and

- mechanical properties of laser forming repaired Ti-6Al-4V alloy component[J]. *China Surface Engineering*, 2009, **22**(1): 19~24
- 林 鑫, 薛 蕾, 陈 静 等. 激光成型修复 Ti-6Al-4V 钛合金零件的组织与性能[J]. *中国表面工程*, 2009, **22**(1): 19~24
- 17 Chen Jing, Zhang Qiang, Liu Yanhong *et al.*. Research on microstructure and high-temperature properties of Ti17 titanium alloy fabricated by laser solid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603022
- 陈 静, 张 强, 刘彦红 等. 激光成型修复 Ti17 合金组织与高温性能研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603022
- 18 Li Liqun, Zhang Liang, Dai Jingming. Numerical simulation of temperature and stress fields in wire filling laser multilayer welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003002
- 李俐群, 张 亮, 戴景明. 激光填丝多层焊温度场和应力场的数值模拟[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1003002
- 19 Wang Jinyou, Ge Zhiming, Zhou Yanbang *et al.*. Aerospace Titanium Alloy[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985. 201~221
- 王金友, 葛志明, 周彦邦 等. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 201~221
- 20 C. Leyens, M. Peters. Titanium and Titanium Alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 15
- 21 Tao Chunhu, Zhong Peidao, Wang Renzhi *et al.*. Failure Analysis and Prevention for Rotor in Aero-Engine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 46
- 陶春虎, 钟培道, 王仁智 等. 航空发动机转动部件的失效与预防 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 46
- 22 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Temperature stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1308~1312
- 贾文鹏, 林 鑫, 陈 静 等. 空心叶片激光快速成型过程的温度/应力场数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1308~1312
- 23 Jia Wenpeng, Lin Xin, Tan Hua *et al.*. Numerical simulation for temperature field of TC4 titanium alloy hollow blade during laser rapid forming process [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(7): 1193~1199
- 贾文鹏, 林 鑫, 谭 华 等. TC4 钛合金空心叶片激光快速成型过程温度场数值模拟[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, **36**(7): 1193~1199

栏目编辑: 宋梅梅