

激光沉积修复钛合金热影响区异质结构及 后续热处理的性能

安金岚¹, 王澜斌², 周松^{2,3}, 黄研清¹

(1. 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, 沈阳 110136; 2. 沈阳航空航天大学机电工程学院, 沈阳 110136; 3. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

摘要: 针对钛合金零件性能良好但材料利用率较低和在恶劣环境中易出现损坏的特点, 采用激光沉积修复技术对其进行快速修复。研究了不同热处理对激光沉积修复钛合金(Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V)显微组织及力学性能的影响, 结果表明, 锻造区为双态组织, 激光修复区为网篮组织, 热影响区呈现异质结构, 底部热影响区形成了 Ghost α 相, 顶部热影响区形成了大量的块状 β 相; 拉伸试验表明其力学性能整体上呈现高强度低塑性, 且均为韧性断裂, 920 °C/1 h 的热处理方式获得了强度与塑性的良好匹配。通过数字化图像处理技术分析发现激光修复区决定了整体试样的综合性能, 更薄的 α 片层和 β 基体中析出的短棒状 α 相有助于提高其力学性能。

关键词: 激光沉积修复技术; 力学性能; 钛合金; 数字化图像处理技术

中图分类号: TG405 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)06-1931-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231006

Microstructure of titanium alloy heat affected zone repaired by laser deposition and properties of subsequent heat treatment

AN Jin-lan¹, WANG Lan-bin², ZHOU Song^{2,3}, HUANG Yan-qing¹

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 3. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: In view of the characteristics of titanium alloy parts with good performance but low material utilization rate and damage in harsh environments, laser deposition repair technology was used to quickly repair them. The effects of different heat treatments on the microstructure and mechanical properties of titanium alloy (Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V) repaired by laser deposition were studied. The results show that the forging zone has a bi-modal microstructure, the laser repair zone has a basketweave microstructure, the Ghost α phase was formed in the bottom heat-affected zone, and a large number of massive β phases were formed in the top heat-affected zone. Tensile tests show that its mechanical properties were generally high strength and low plasticity, and were all ductile fractures. The heat treatment method of 920 °C/1 h

收稿日期: 2023-09-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105157); 中国博士后科学基金项目(2023MD734242).

作者简介: 安金岚(1989-), 女, 讲师, 博士. 研究方向: 航空材料与结构强度. E-mail: 845423087@qq.com

通信作者: 周松(1987-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 航空材料与结构强度. E-mail: zhousong23@163.com

achieves a good match between strength and plasticity. Through Digital image processing technology analysis, it was found that the laser repair zone determines the overall performance of the entire sample, and the thinner lamellar α and the short rod-shaped α phase precipitated in the β matrix help to improve the mechanical properties.

Key words: laser deposition repair technology; mechanical properties; titanium alloys; digital image processing technology

0 引言

TA15 钛合金(Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V)是一种两相钛合金,因其优异的机械性能、耐腐蚀性和抗蠕变性,广泛应用于航空航天领域^[1]。钛合金零件长期服役于负载恶劣环境,极易损坏甚至报废,更换零件将造成巨大的经济损失。

激光沉积修复技术是结合激光熔覆与激光立体成型两者优势的新型修复工艺,利用高能激光热源在待修复部位直接逐层叠加成型缺陷损伤部位几何形貌,从而恢复零件的几何尺寸和力学性能,已被应用于航空、航天等高端装备零部件的修复中。在减少巨额经济损失的同时可保证生产和研发周期,具有很大的军事效益和经济效益。

目前,激光沉积修复技术应用广泛,针对镍基合金^[2]、钢^[3]以及钛合金^[4]等金属材料进行了研究。Ma 等^[5]研究了激光沉积修复 Ti-6Al-4V 钛合金的显微组织和力学性能,因热历史的不同,热影响区自下而上形成了梯度组织,相比于锻造态和沉积态,抗拉强度和屈服强度较高,但伸长率较低;Zhu 等^[6]制备了激光沉积修复 TC11 钛合金试样,其抗拉强度可以达到 1 033 MPa,但伸长率为 6.8%,并且拉伸试验中断裂发生于基体中,说明结合区的力学性能更好。综上所述,激光沉积修复钛合金力学性能整体表现为高强度、低塑性。

激光沉积修复试样通常在基材、热影响区和激光修复区表现出强度的不匹配性,塑性的不理想是由于激光沉积修复过程中在基材待修复表面形成了表现为异质结构的热影响区,并且热影响区微观组织具有复杂性和不均匀性。热处理可以改善激光沉积修复试样力学性能,刘丰刚等^[7]采用激光立体成型技术进行了 300 M 钢修复试验,经淬火+回火后,试样各项力学性能指标均有提高;卞宏友等^[8]通过固溶+时效的热处理方式使激光沉积修复 GH4169 合金的延伸率显著提高;Vilar 等^[9]发现通过均质退火可以解决激光沉积修

复镍基合金过程中合金元素在凝固时分配产生的不均匀性。虽然激光沉积修复技术的应用较多,但是后续热处理对其性能的影响鲜有报道。

本文对激光沉积修复 TA15 钛合金不同热处理后显微组织演化及力学性能的改变进行分析,以热影响区的显微组织变化为分析重点,采用不同的热处理制度改善组织,提高试样的综合力学性能,使激光沉积修复 TA15 钛合金的力学性能达到最优。

1 材料及方法

1.1 试验材料

试验采用的设备为 LDM800 激光增材制造系统,该系统由 6 000 W 半导体激光器、载气式送粉器、环境控制系统、冷却系统和数控工作台等部分组成。试验采用粉末为钛合金球形粉,其化学成分如下: $w(\text{Al})=6.53\%$; $w(\text{Zr})=1.78\%$; $w(\text{Mo})=1.53\%$; $w(\text{V})=1.47\%$; $w(\text{Fe})=0.13\%$; $w(\text{O})=0.11$; 其余为 Ti。其主要由球形颗粒组成,粒宽为 75~150 μm ,使用前对粉末进行风干处理。基体部分为锻造 TA15 钛合金,850 $^{\circ}\text{C}$ 退火 2.5 h,尺寸为 160 mm \times 70 mm \times 40 mm,试验前对基体待沉积表面进行打磨、清洗和抛光,去除表面氧化层及污渍,基材与沉积区体积比为 1:1,取样方式如图 1(b)所示,沿着沉积方向取样,拉伸试样尺寸如图 1(c)所示。沉积过程采用短边单项往复扫描方式,具体工艺参数如表 1 所示。

1.2 热处理

样品后续热处理在 880、920、960 $^{\circ}\text{C}$ 的人工箱式电阻炉(SGM146)中进行常规退火(以下分别称为“HT880”“HT920”“HT960”),加热速率为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,保温 1 h,随后从炉中取出在空气环境中冷却。HT880、HT920 和 HT960 的氧含量差异可以忽略不计。

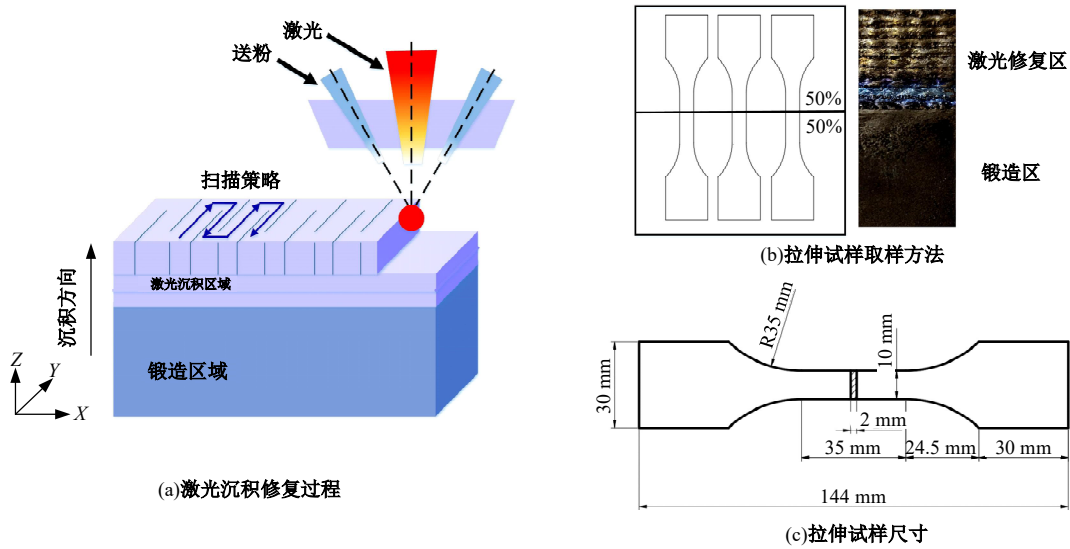


图1 试验方案

Fig. 1 Test scheme

表1 激光沉积修复工艺参数

Table 1 Process parameters of laser deposition repair

参数	数值
激光功率/W	3 000±200
扫描间距/mm	3
扫描速度/(mm·min ⁻¹)	1 000±100
送粉速度/(rad·min ⁻¹)	2~2.8
分层厚度/mm	0.9

1.3 微观结构分析

在显微结构分析之前进行微观结构分析,样品使用砂纸(400-3000#)进行机械研磨,然后使用金刚石研磨膏进行抛光,抛光后的样品分别使用Kroll腐蚀剂(HF-HNO₃-H₂O,体积比为1:6:7)进行腐蚀。使用Olympus GX51光学显微镜(Optical microscope, OM)和KYKY-2800B型扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)对金相组织进行观察分析,扫描电镜工作电压为20 kV。使用NanoMeasurer软件对 α 相尺寸进行测量;使用ImageJ软件对 α 相含量进行测量;使用华银HVS-100A数显显微硬度计进行硬度测试。

1.4 室温拉伸试验和全场应变试验

室温拉伸试验用板材样品制备拉伸样品(144 mm×30 mm×2 mm)(见图1(c))。采用朗杰100型疲劳试验机测试试样的拉伸性能,拉伸速率为1 mm/min。按照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228-2002),在室温环境、每种条件下对2个样品进行研究,获得平均抗拉强度、屈服强度和延伸率。

试验过程中使用XTDIC-CONST-SD标准

型三维全场应变测量系统的数字化图像处理技术(Digital image correlation, DIC)对实时应变演化进行记录。

2 结果分析及讨论

2.1 无热处理试样显微组织

图2为激光沉积修复的TA15钛合金宏观组织形貌,根据显微组织形貌不同,将激光沉积修复TA15钛合金分为锻造区、热影响区和激光修复区。锻造区为双态组织,激光修复区为粗大的 β 柱状晶。在激光沉积修复过程中,由于移动熔池单一的散热方向以及周期性的剧烈加热和冷却,使修复部分的组织宏观上呈现明显的粗大 β 柱状晶。热影响区表现为由双态组织到网篮组织的过渡,从锻造区到激光修复区,等轴状初生 α 相的体积分数逐渐减少, β 相的体积分数增加,当到达激光修复区后,等轴状初生 α 相完全消失。

热影响区属于基材的一部分,由于高能激光束的剧烈加热和冷却,使其具有复杂的微观结构,热影响区最终的结构依赖于复杂的热历史(不同位置的峰值温度和不同冷却速率)。根据显微形貌的不同,将热影响区分为两部分:顶部热影响区和底部热影响区。由于顶部热影响区在第一道沉积层加工时接触熔池,激光热源及熔池的温度远远高于 β 相转变点,并在接下来的沉积层加工时继续经历热循环,最终等轴 α 相几乎全部转变为块状 β 相(图2(b2));底部热影响区显微组织相比于锻造区有很大的差别,主要由片层 α 相和Ghost α 相^[10]组成,如图2(b1)所示,热影响区显

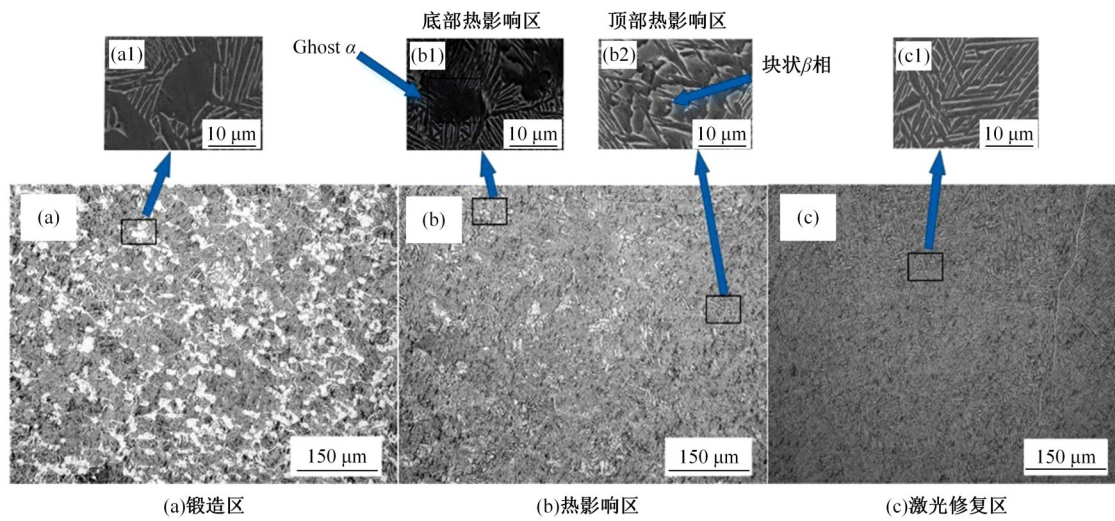


图 2 无热处理试样显微组织

Fig. 2 Microstructure of the sample without heat treatment

微组织中片层 α 的尺寸及长宽比相比于锻造区更大,这是由于其在经历激光沉积过程中持续热循环而不断长大形成的。

2.2 后续热处理试样宏观显微组织

图 3 为不同热处理后激光沉积修复 TA15 钛合金不同区域的宏观显微组织形貌。在不同试样的锻造区中,其显微组织均呈现等轴 α 相、片层 α

相和 β 相的双态组织,HT880 和 HT920 试样无明显变化,HT960 试样中可以看到等轴 α 相含量显著增加,片层 α 相含量减少。

如图 3(b1)(b2)(b3)所示,在光学显微镜下观察的激光沉积修复 TA15 钛合金热影响区宏观组织,热影响区在宏观上呈现柱状晶和等轴晶粒交替排列的现象,这是由熔池移动和重叠造成

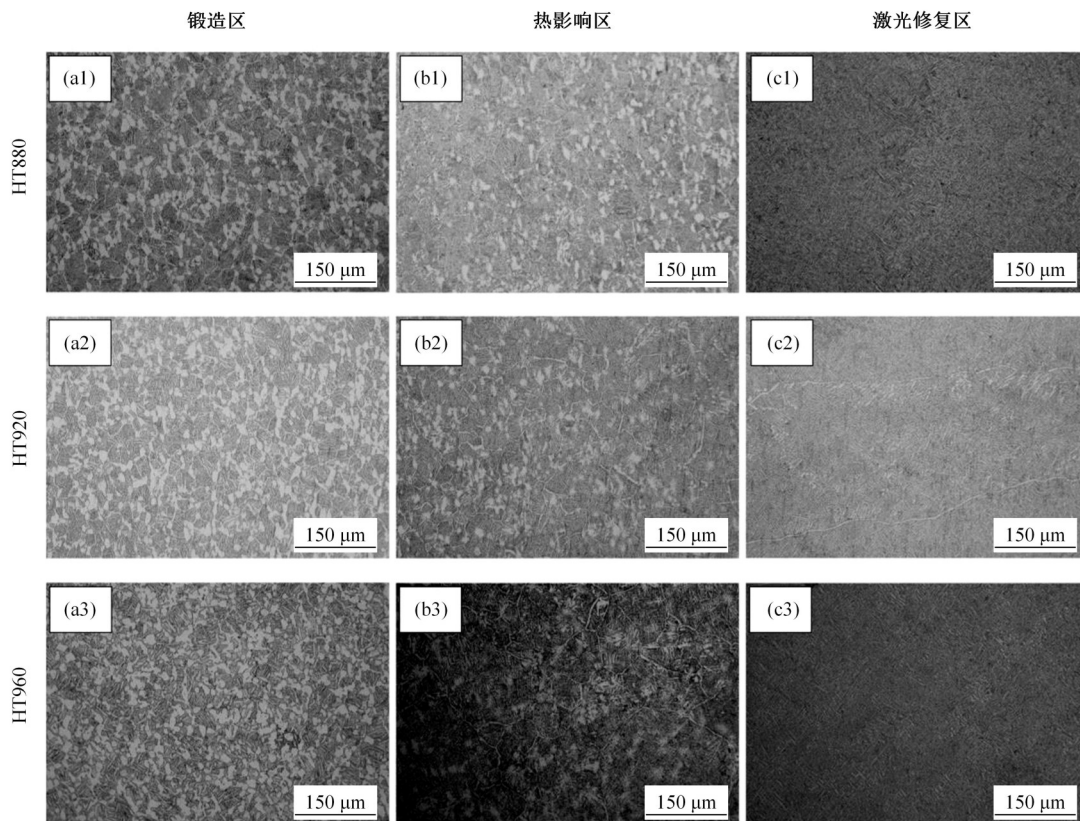


图 3 激光沉积修复 TA15 钛合金宏观组织

Fig. 3 Macroscopic structure of TA15 titanium alloy repaired by laser deposition

的^[11],厚度为1.5~2.0 mm,随着向激光修复区靠近,等轴 α 相含量逐渐减少,到达激光修复区后,等轴状初生 α 相完全消失,显微组织呈现网篮组织。

经过4种热处理后的激光沉积修复TA15修复区显微组织如图3(c1)(c2)(c3)所示,由于钛合金外延生长强烈,在激光沉积修复过程中温度梯

度较大,柱状晶可以连续生长,其宏观上仍然表现为贯穿多个沉积层的 β 柱状晶^[12],微观上均为网篮组织。

2.3 后续热处理试样微观组织

热影响区(见图4)呈现典型的异质微观结构,没有气体孔隙、缺乏熔合孔隙或者裂缝等缺陷,说明形成了致密的冶金结合。

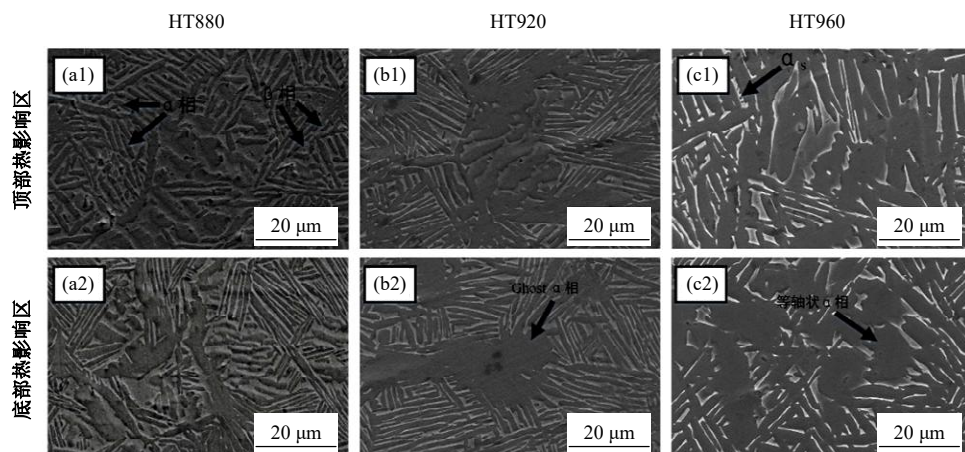


图4 激光沉积修复TA15钛合金热影响区微观结构

Figure. 4 Microstructure of heat affected zone of TA15 titanium alloy repaired by laser deposition

随着后续热处理温度的升高,顶部热影响区的块状 β 发生重熔,形成了边缘曲折的棒状 β 相,厚度随着温度的升高而减小,板条状 β 相和 α 相由于热量积累粗化,在HT960试样中发现部分 α 相呈现“等轴”化。在底部热影响区中,由于激光热源的剧烈加热形成的Ghost α 相含量明显减少,热处理温度达到960 $^{\circ}\text{C}$ 时全部消失。

图5给出了HT880、HT920和HT960这三个

试样激光修复区的微观结构,由图5可以看出,其微观结构均呈现网篮组织,由相互交错的片层 α 相组成。HT880试样激光修复区中由片层 α 相、少量的等轴 α 相和板条状 β 相组成;后续热处理温度达到920 $^{\circ}\text{C}$ 时,在 β 相内部产生了短棒状 α 相;当温度进一步升高至960 $^{\circ}\text{C}$ 时, α 相片层厚度显著增加,同时温度升高, β 板条的厚度逐渐降低。

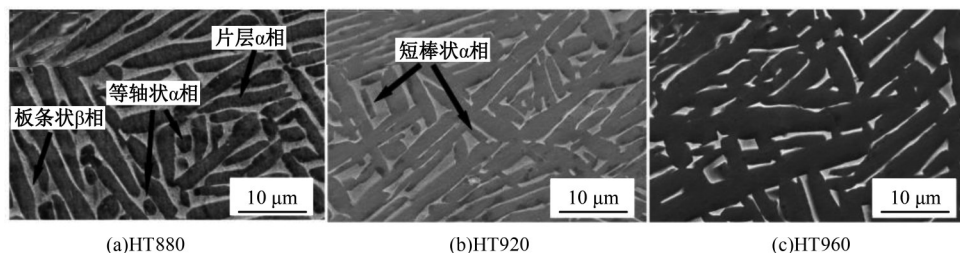


图5 激光沉积修复TA15钛合金激光修复区微观组织

Fig. 5 Microstructure of TA15 titanium alloy repaired by laser deposition

2.4 显微硬度

激光沉积修复TA15钛合金及其后续热处理试样的硬度如图6(a)所示,可以发现,在无热处理试样、HT880和HT920这三种试样中,每个试样不同区域并没有发生明显改变。HT920和HT960试样显微硬度显著提高,其中,HT960试样中修复区的平均硬度达到580 HV_{0.2},最大硬度

超过600 HV_{0.2}。从晶体结构看, α 相的滑移系总数为3个,而 β 相的滑移系总数为12个;从滑移能量看, β 相的最小滑移距离比 α 相更小,所以 α 相的塑性变形能力比 β 相更弱,因此 α 相含量越高,显微硬度值越大^[13]。然而在锻造区中,等轴 α 相尺寸较大,但是对硬度的贡献有限,导致其硬度值较低。

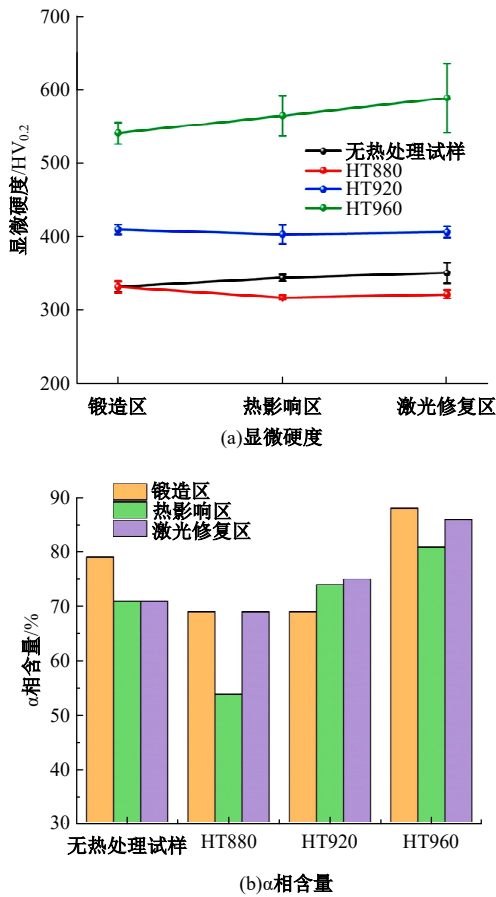


图 6 激光沉积修复 TA15 钛合金显微硬度及 α 相含量

Fig. 6 Microhardness and α phase content of TA15 titanium alloy repaired by laser deposition

2.5 拉伸性能

激光沉积修复 TA15 钛合金不同热处理条件下试样的室温拉伸试验结果如图 7 所示,可见 3 种

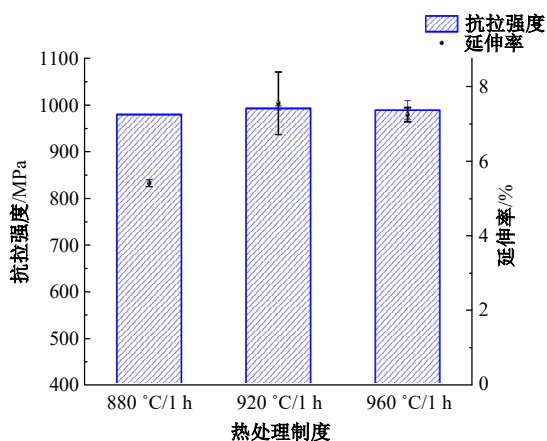


图 7 激光沉积修复 TA15 钛合金不同后续热处理拉伸性能

Fig. 7 Different tensile properties of TA15 titanium alloy repaired by laser deposition after heat treatment

热处理试样均表现出高强度低塑性的特点。HT880 试样中,抗拉强度为 963.59 MPa,但延伸率仅为 5.41%,然而 HT920 和 HT960 试样中抗拉强度明显增大,分别达到 992.93、989.59 MPa,同时延伸率显著提高,分别为 7.55% 和 7.25%,相比于 HT880 试样分别提高了 40% 和 34%,HT920 试样的力学性能得到了明显改善,取得了强度与塑性的良好匹配。

3 讨论

3.1 全场应变分析

图 8 为 DIC 测量的 HT880、HT920 和 HT960 试样拉伸过程中应变演化结果,并在试样表面沿拉伸方向选取不同点,测量其轴向位移-时间曲线,图中,1~8 分别对应基准点 1~8。如图 8(g) 所示,以各个试样顶部基准点为基础,以 $L=|y_i - y_0|$ 为步长,测量各点的位移,其中 L 为点 i 在时刻 t 的位移, y_i 为不同点的位移; y_0 为基准点的位移。图 8(b)(d)(f) 为试样在拉伸过程中各点的位移-时间曲线。位移距离在位置 8 处(激光修复区)增加,说明拉伸试验中断裂发生在该位置。根据位移曲线的斜率,可将整个过程分为弹性变形和塑性变形两个阶段。

图 8(a)(b) 为 HT880 试样在拉伸试验过程中的应变演化图。在拉伸试验开始时,最大应变出现在截面的中间部分,随着拉伸试验的进行,最大应变向下转移,并在截面底部集中,说明修复区承受了大部分的塑性变形,同时试样断裂在修复区。

图 8(c)(d) 为 HT920 试样在拉伸试验过程中的应变演化图。拉伸试验开始时,最大应变出现在截面的左上角和左下角区域,说明网篮组织和双态组织承受的应变相似。随着拉伸试验的进行,最大应变逐渐向激光修复区转移,最后,最大应变出现在激光修复区,试样在此区域断裂。

图 8(e)(f) 为 HT960 试样在拉伸试验过程中的应变演化图。在弹性变形阶段的应变分布是不规则的,当应力在超过屈服极限的区域受力时,两种试件发生塑性变形,应变分布逐渐稳定并发生较大差异。由于激光沉积修复 TA15 钛合金的结构不均匀性和高强度低塑性的特点,在屈服后,试件首先发生强烈的局部塑性应变,最大拉伸应变集中在激光修复区。

总体来说,锻造区和热影响区的力学性能要

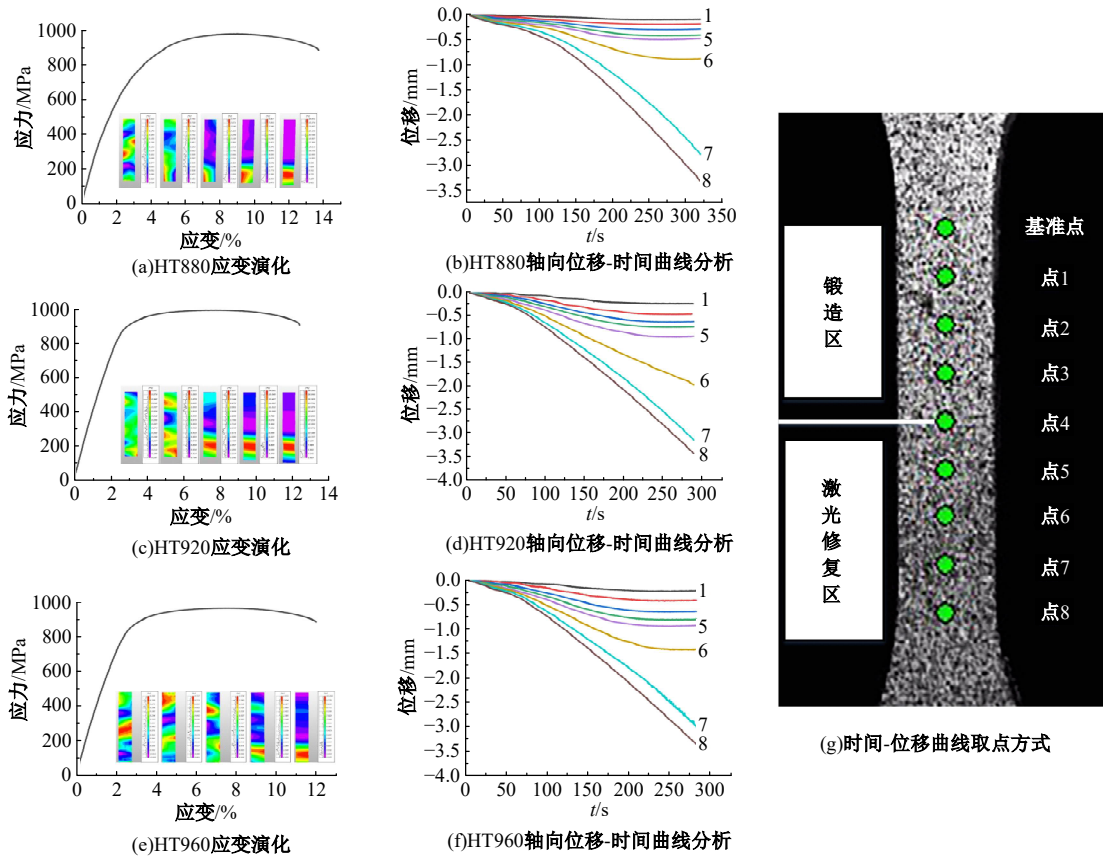


图 8 全场应变记录拉伸过程应变演化及轴向位移-时间曲线分析

Fig. 8 Strain evolution and axial displacement-time curve analysis during tensile process

好于激光修复区,试样均断在激光修复区。后续热处理中,920 °C和960 °C的热处理方式显著提高了修复试样的力学性能,并且从DIC记录拉伸过程中可以发现,两种热处理制度后修复区的力学性能逐渐接近锻造区和热影响区,同时也说明激光沉积修复TA15钛合金的性能取决于修复区的力学性能。在非均匀试样中,应变通常集中在较弱的区域,导致该区域发生断裂。

3.2 力学性能分析

HT920、HT960试样中激光修复区力学性能的提高主要与晶粒生长有关,经880 °C热处理后, α 片层表现为细长棒状,具有较大的长宽比,由于片层 α 相生长导致其相互截断产生了少量的直径为1 μm 等轴状 α 相。当热处理温度升高到920 °C时,片层 α 相厚度变化不明显,平均厚度与HT880试样均在1.60 μm 左右,少量板条状 β 相内部产生短棒状 α 相,部分 β 板条厚度降低。短棒状 α 相比于与较低温度热处理时产生的长棒状 α 相而言,短棒状 α 相可以使变形更加协调一致,抑制显微裂纹和空洞的形成和发展,显示出更高的塑

性^[14],使HT3获得了强度和延伸率的良好组合。由于HT920试样中部分 β 相表现为较薄的针状,使其形成了大量的 α/β 界面,有效地阻碍了位错滑移。随着退火温度升高到960 °C,由于后续热处理温度过高, α 片层明显变厚,平均厚度达到2.24 μm , α 相的生长使 β 相的含量降低,并且温度过高,柱状晶晶界部分消融,晶界两侧组织开始融合,使晶界的滑移阻碍作用减弱,造成了抗拉强度的下降。

3.3 断口分析

图9为不同热处理后激光沉积修复TA15钛合金的断口形貌。由图9可以看出,拉伸试样的断口形貌均呈现韧窝的特征,说明断裂机制均为韧性断裂。其中,HT880试样的断口形貌较平整,韧窝表现为小而浅的特点;HT920和HT960试样的宏观断口更曲折,韧窝明显变大变深,塑性也得到了显著提高,并且从图9(b2)(c2)中可以看到撕裂棱。激光沉积修复TA15钛合金在3种后续热处理后均为韧性断裂,说明本文3种热处理对断裂机制影响不大。

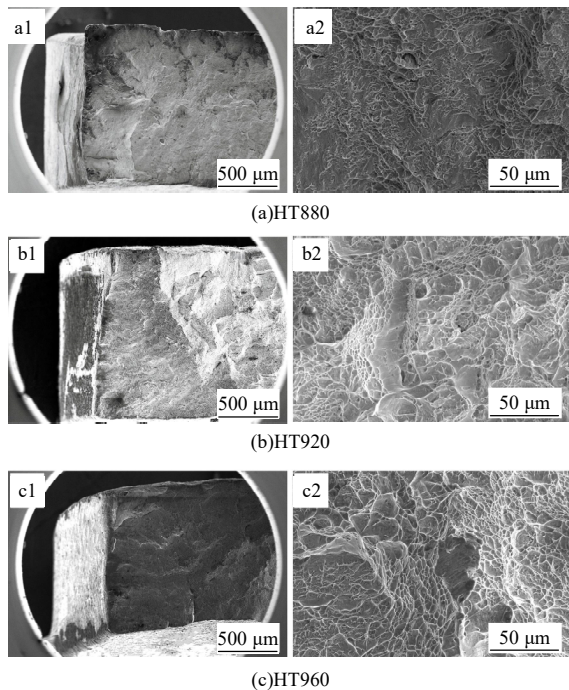


图 9 拉伸断口形貌

Fig. 9 Tensile fracture morphology

4 结 论

(1) 由于热历史的不同,热影响区形成了异质结构;底部热影响区由 Ghost α 相和片层 α 、板条状 β 相组成,顶部热影响区形成了大量的块状 β 相。在不同的后续热处理后,随着温度的升高, α 片层厚度明显增加,顶部热影响区中块状 β 相发生重熔,并发现了 β 板条中析出次生 α 相,底部热影响区中 Ghost α 相逐渐变小。

(2) 不同后续热处理后的试样在力学性能上均表现出高强度、低塑性的特点,其中 HT920 试样在保持高强度的同时,显著提高了塑性,达到了最优的力学性能。不同后续热处理对激光沉积修复 TA15 钛合金的断裂机制无明显影响,均为韧性断裂,HT920 和 HT960 试样的韧窝明显变大变深。

(3) 通过 DIC 分析得到激光沉积修复 TA15 钛合金的力学性能取决于激光修复区,其贡献了塑性变形中的大部分应变。异质结构中,应变通常会集中在较弱的区域,并在该区域断裂。

参考文献:

- [1] 回丽, 陆家琛, 周松, 等. 热处理对 TC4 钛合金激光双束焊接接头疲劳性能的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(1): 105-110.
Hui Li, Lu Jia-chen, Zhou Song, et al. Effect of heat treatment on fatigue properties of TC4 titanium alloy by laser double beam welded joint[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(1): 105-110.
- [2] Kumar L J, Nair C G K. Laser metal deposition repair applications for Inconel 718 alloy[J]. Materials Today Proceedings, 2017, 4(10): 11068-11077.
- [3] Wang Y D, Tang H B, Fang Y L, et al. Microstructure and mechanical properties of hybrid fabricated 1Cr12Ni2WMoVNb steel by laser melting deposition [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(2): 481-486.
- [4] Malakizadi A, Mallipeddi D, Dadbakhsh S, et al. Post-processing of additively manufactured metallic alloys: a review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 179: No. 103908.
- [5] Ma J, Zhang Y, Li J, et al. Microstructure and mechanical properties of forging-additive hybrid manufactured Ti-6Al-4V alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 811(5): No. 140984.
- [6] Zhu Y Y, Li J, Tian X G, et al. Microstructure and mechanical properties of hybrid fabricated Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy by laser additive manufacturing[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 607(6): 427-434.
- [7] 刘丰刚, 林鑫, 宋衍, 等. 激光修复 300M 钢的组织及力学性能研究[J]. 金属学报, 2017, 53(3): 325-334.
Liu Feng-gang, Lin Xin, Song Kan, et al. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 300M steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(3): 325-334.
- [8] 卞宏友, 赵翔鹏, 曲伸, 等. 基体预热对激光沉积修复 GH4169 合金性能的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 98-103.
Bian Hong-you, Zhao Xiang-peng, Qu Shen, et al. Effect of substrate preheating on property of GH4169 alloys repaired by laser deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 98-103.
- [9] Vilar R, Almeida A. Repair and manufacturing of single crystal Ni-based superalloys components by laser powder deposition: a review[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27 (Sup. 1): S17004.
- [10] Shen S X, He B, Wang H M. Heterogeneous deformation behavior of hybrid manufactured high strength titanium alloy: coordinate deformation and stress concentration[J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 849: No. 12.
- [11] Liu C M, Wang H M, Tian X J, et al. Subtransus

- triplex heat treatment of laser melting deposited Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe near β titanium alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 590: 30-36.
- [12] Liu C M, Wang H M, Tian X J, et al. Subtransus triplex heat treatment of laser melting deposited Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe near β titanium alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 590 (jan. 10):30-36.
- [13] 杨光, 王文东, 钦兰云, 等. $\alpha+\beta$ 区退火对激光沉积TA15钛合金组织及硬度的影响[J]. *金属热处理*, 2017, 42(12): 39-43.
- Yang Guang, Wang Wen-dong, Qin Lan-yun, et al. Effect of $\alpha + \beta$ phase zone annealing on microstructure and microhardness of laser deposition manufactured TA15 titanium alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(12): 39-43.
- [14] 钦兰云, 徐丽丽, 杨光, 等. 退火方式对激光沉积TA15钛合金组织及力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 208-214.
- Qin Lan-yun, Xu Li-li, Yang Guang, et al. Effect of annealing method on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloys by laser deposition manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 208-214.