

增材修复对激光沉积制造 TC4 组织与力学性能的影响

杨光¹, 马玥^{1*}, 王超¹, 刘佳蓬², 钦兰云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, 辽宁 沈阳 110136;

²中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621700

摘要 采用激光沉积修复技术和电弧增材修复技术分别对预制损伤激光沉积制造 TC4 进行修复, 然后对其进行不同的热处理, 研究两种修复制件在热处理前后的组织和力学性能。结果表明: 两种修复件的修复区均与基材形成了致密的冶金结合, 无明显的热影响区; 两种修复件的显微组织存在差异, 激光修复区中的 β 柱状晶由基材延伸到修复区顶部, 整体组织较为一致, 而电弧修复区中出现了粗大的 β 等轴晶, 晶内 α 相较基材的更细长; 激光修复件的综合性能较好, 其强度与塑性均高于 TC4 锻件标准, 电弧修复件的强度与激光修复件的相当, 但断面收缩率较激光修复件的低; 600 °C 退火处理对组织及性能的影响较小, 而固溶时效处理能使 α 相明显粗化, 大幅提升其塑性, 且对强度的影响不大, 可使制件获得较佳的强度/塑性匹配; 两种热处理态修复件的拉伸断裂机制不同, 激光修复件的断口表面布满大而深的韧窝, 为韧性断裂, 而电弧修复件断口上的颈缩不明显, 韧窝较浅且起伏较小, 表现为准解理断裂特征。

关键词 激光光学; 激光修复; 电弧修复; TC4 钛合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1202002

Effects of Additive Repair on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured TC4 Titanium

Yang Guang¹, Ma Yue^{1*}, Wang Chao¹, Liu Jiapeng², Qin Lanyun¹

¹Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China;

²Aero Engine Corporation of China, Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang, Sichuan 621700, China

Abstract Laser deposition technology and weld additive manufacturing technology are used to repair the laser deposition manufactured TC4 titanium alloy with defects, and then different heat treatments are carried out. Microstructures and mechanical properties of two kinds of repaired specimens are analyzed before and after heat treatments. The results show that there is dense metallurgical bonding between repaired zone and the substrate, and there is no obvious heat affected zone. In the laser repaired zone, prior columnar beta grain extends from the substrate to the top of repaired zone and the whole structure is almost same. In the weld repaired zone, there are huge equiaxed beta grains, the transgranular alpha phases are longer than alpha phases in the substrate. The strength and plasticity of laser repaired specimen are higher than those of TC4 forging standard. The strength of the weld repaired specimen is similar to that of the laser repaired specimen, but the reduction of area of the former is lower than that of the latter. The annealing heat treatment has little effects on microstructure and mechanical. The solution and aging treatment can coarse the alpha phase obviously and promote the plastic sharply of the specimen, and it has slight effect on strength, so the specimen can obtain good strength and plasticity. The two kinds of repaired specimen in heat treatment state have different tensile fracture mechanisms. The fracture surface of laser repaired specimen is covered with big and deep dimples, and the fracture shows ductile characteristics. The weld repaired specimen exhibits quasi-cleavage fracture with slight necking fracture, and shallow and flat dimples.

Key words laser optics; laser repairing; weld repairing; TC4 titanium alloy; microstructure; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2018-07-09; 修回日期: 2018-07-26; 录用日期: 2018-07-27

基金项目: 工信部民用飞机专项科研项目(MJZ-2016-G-71); 国家重点研发计划(2017YFB1104002, 2016YFB1100504)

* E-mail: yangguang@sau.edu.cn

1 引 言

激光沉积制造(LDM)是增材制造技术的一种。该技术能降低工业成本,加快加工速度及提高材料利用率,近年来在航空航天等领域得到了广泛应用^[1-3]。但该技术还存在一些不足,如采用该技术制造的零件可能会出现制造缺陷,如机加工和服役过程中出现的机加超差和服役损伤等^[4-5],如若不加以修复,就会造成极大的材料浪费。目前,国内外学者多集中于研究通过增材制造技术修复铸造和锻造的坏损件,鲜有关于对增材缺陷件进行修复的研究。

与送粉式激光沉积制造技术相比,电弧增材制造(WAAM)技术的制造成本更低,沉积效率可高达1 kg/h,材料利用率接近100%^[6],是一种更加高效、低价的送丝式增材制造工艺。迄今已有大量研究人员对电弧增材制造TC4钛合金展开研究,并取得一定成果。Wang等^[7]在单壁成型件的不同位置、不同方向上分析,发现它们的塑性差异较大,它们的力学性能优于铸件的力学性能,可与锻件的力学性能相媲美;Baufeld等^[8]对电弧增材制造TC4的各向异性进行了分析,结果显示,不同方向上成型件的抗拉强度相差不大,但塑性有较大差异;Duchosal等^[9]在修复铸钢时发现,表面生成的细小的初生碳化物会影响焊接裂纹敏感性。这些电弧增材制造技术的基础性研究为低成本、高效率的电弧修复技术的应用提供了可能。

激光沉积和电弧增材制造技术的光源不同,导致采用这两种技术制备的TC4钛合金在组织、性能

上存在差异。激光沉积件的宏观组织为外延生长的粗大 β 柱状晶,晶内由极少量针状板条和大量魏氏 α 板条组成^[10];电弧增材件的宏观组织呈两种层带结构,中下部为平行层带,顶部为弧状层带,柱状晶内为顶部细小底部粗大的魏氏组织^[11]。Baufled等^[12]发现,激光沉积制造TC4的抗拉强度较高,而电弧增材制造TC4的延伸率较高。由此可见,采用上述两种工艺修复后的制件的组织、性能也可能存在差异。

为恢复LDM TC4的几何形貌和力学性能,本课题组以经600℃退火的LDM TC4为待修复基材,采用激光沉积修复技术和电弧增材修复技术对其进行修复,研究修复件的组织、室温拉伸性能及断裂机理,以及热处理对修复件组织、力学性能的影响,并从力学性能、成本、效率等方面分析两种修复工艺的优劣,以期对激光沉积件的修复工艺提供参考。

2 实 验

激光沉积修复实验在激光沉积制造系统上完成,该系统包括光纤激光器、送粉器、四路同轴送粉头、稀有气体保护箱以及氧分析仪等。电弧增材修复实验在电弧增材制造系统上完成,该系统主要由KuKa机器人、Fronius焊机、送丝机、氧分析仪和局部保护装置组成。激光沉积修复实验和电弧增材修复实验分别选用粒径为45~180 μm 的TC4球形粉末和直径为1.2 mm的TC4焊丝作为原材料,材料成分及制造工艺参数如表1~3所示(Δz 为 z 轴单层行程)。

表1 TC4钛合金粉末和焊丝的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of TC4 powder and wire (mass fraction) %

Material	Al	V	Fe	C	O	Ti
Powder	5.50-6.80	3.50-4.50	≤0.30	≤0.05	≤0.20	Bal.
Wire	5.50-6.30	3.60-4.40	≤0.25	≤0.05	≤0.03	Bal.

表2 激光增材修复工艺参数
Table 2 Processing parameter of LDM

Laser power /W	Scanning speed / (mm · s ⁻¹)	Power feeding rate /(g · mm ⁻¹)	Laser beam diameter /mm	Overlapped rate /%	Δz /mm
2400	11	8.0	4.0	55	0.6

表3 电弧增材修复工艺参数
Table 3 Processing parameter of WAAM

Weld current /A	Travel speed / (mm · s ⁻¹)	Wire feeding rate /(m · s ⁻¹)	Scanning gap /mm	Overlapped rate /%	Δz /mm
160	6.0	150	2.5	50	1.2

待修复基材选用经 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$ +空冷处理后的 LDM TC4, 预制损伤如图 1(a)所示, 图 1(b)、(c)分别为拉伸试样取样示意图和拉伸试样的尺寸。修复后试样的热处理方案如表 4 所示。退火处理的作用是消除残余应力, 优化组织。固溶时效处理中的固溶处理使合金中的各相在高温过程中溶解, 可以提高试样的韧性; 时效处理可以释放固溶处理过程中产生的晶格畸变能, 促进不稳定相的分解, 降低过饱和固溶体的饱和度, 改善试样的综合性能^[13]。金

相试样经镶嵌、预磨和抛光后, 用 Kroll 试剂(HF、HNO₃、H₂O 的体积比为 1:6:7)进行腐蚀。采用 GX51 OLYMPUS 光学金相显微镜(OM)和 ZEISS SIGMA 扫描电子显微镜(SEM)进行显微组织分析; 利用金相组织分析软件 Nano 测定 α 相的长宽比; 采用 X 射线衍射(XRD)方法识别相的成分; 采用 HVS-1000A 型显微硬度计测试试样的显微硬度; 在 INSTRON5982 电子万能试验机上测试试样的室温拉伸性能。

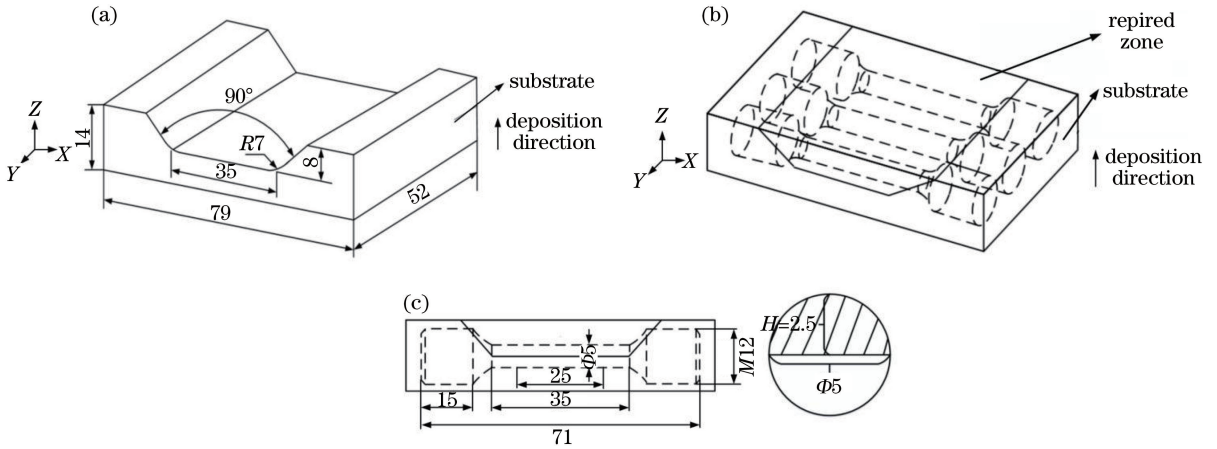


图 1 示意图。(a)待修复的基材;(b)拉伸试样取样示意图;(c)拉伸试样的尺寸

Fig. 1 Schematics. (a) Substrate; (b) sampling for tensile samples; (c) size of tensile samples

表 4 热处理方案

Table 4 Heat treatment process

No.	Heat treatment parameter
HT1	$600\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$, air cooling
HT2	$920\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vacuum) $\times 3\text{ h}$, GQ(argon gas quenching)+ $540\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$, air cooling

3 结果与分析

3.1 修复件的显微组织

激光修复件和电弧修复件的显微组织如图 2 所示, 两种修复件的组织差异明显。采用激光沉积修复后, 基材顶部的 β 柱状晶被熔化并以此为基础生长, 层间熔合良好, 如图 2(a)所示; 修复区及基材区的组织一致, 热影响区不明显; 晶内由大量的细长状 α 板条、短棒状 α 相及少量的 β 相组成, α 相呈网篮组织特征, β 柱状晶的晶界完整, 晶界处由连续的 α 相构成, 晶界处出现了少量取向一致的 α 集束, 如图 2(c)所示。电弧修复件的修复区出现了等轴状 β 晶粒, 晶粒粗大, 最大粒径接近 2 mm, 如图 2(b)所示。粗大等轴晶的形成与扫描速率有关。晶粒宽度 λ 与扫描速率、温度梯度存在如下关系:

$$\lambda \propto v^{-m}G^{-n}, \quad (1)$$

式中: v 为扫描速率; G 为温度梯度; m 、 n 为与材料有关的系数^[14]。电弧增材修复工艺的扫描速率较小($v_{\text{weld}} = 6\text{ mm/s}$, $v_{\text{laser}} = 11\text{ mm/s}$, $v_{\text{weld}} < v_{\text{laser}}$), 由(1)式可知, 电弧修复件的晶粒宽度较大, 同时, 由于扫描速率较低, 熔池中的温度梯度很小, 此时, 熔池各处的形核条件接近一致, 晶核在固-液界面和熔池内部同步形核并长大, 形成几乎对称的等轴晶^[6]。晶内 α 相快冷后生长不充分, 长宽比较大, 部分 α 相的长度可达 $50\text{ }\mu\text{m}$, 修复区 α 相较基材区偏细长, 如图 2(e)所示。

为优化组织, 采用 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火(HT1)和固溶时效(HT2)两种热处理工艺对修复件进行处理, 得到图 3 所示的热处理态修复件修复区的显微组织。可见: 经 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火后, 组织变化不明显, 部分 α 片层继续生长并发生相互截断; 两种修复件的 α 相长度略有下降, 但宽度无明显变化, α 相长宽比略低于沉积态的长宽比; 固溶时效处理达到了优化组织的目的, α 相充分生长, 组织发生粗化, 粗大的 α 片层间夹杂着长宽比较小的粗短状 α 相, α 相宽度大幅增加, 长宽比明显下降。由图 4 可知, 激光沉积和电弧增材修复区的 α 相的长宽比分别约为 4 和 6.6。

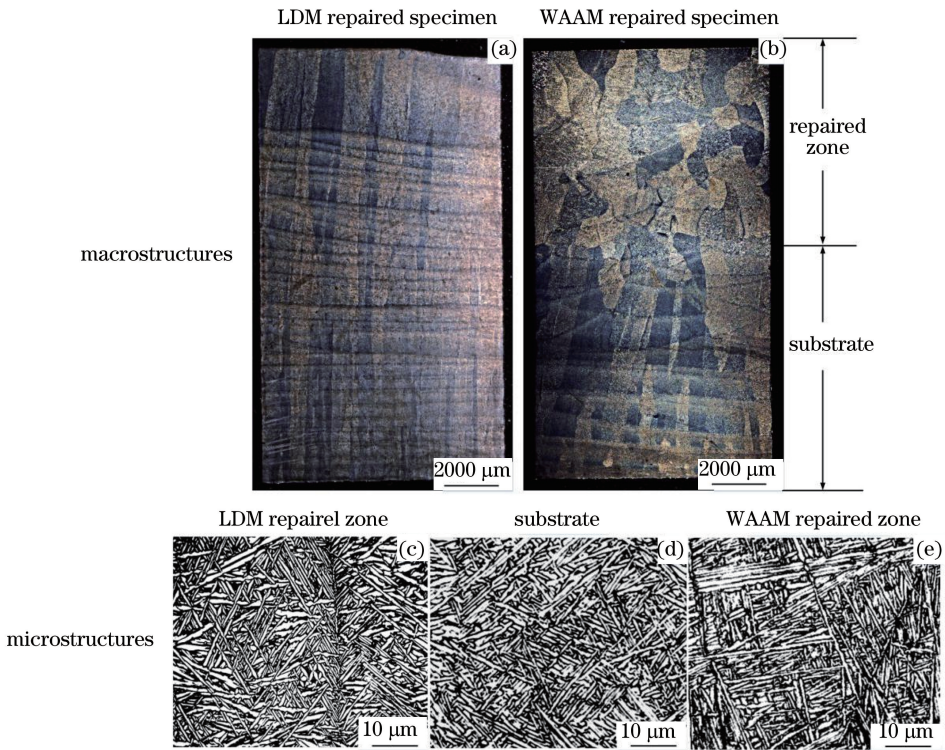


图 2 激光修复件和电弧修复件的显微组织

Fig. 2 Macrostructures and microstructures of the LDM repaired specimens and WAAM repaired specimens

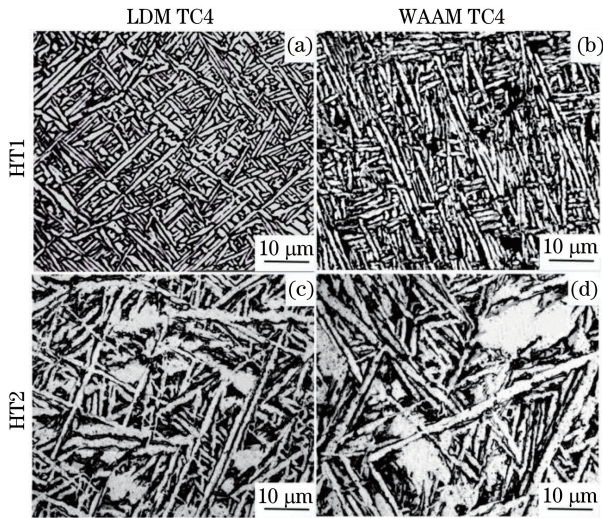


图 3 修复件修复区经不同热处理后的显微组织

Fig. 3 Microstructures of the repaired zones of heat-treated specimens

固溶时效后 α 相的粗化现象是高温下的原子扩散造成的。查阅文献可知,构成片层状 α 、 β 相中元素的浓度梯度不同,该浓度梯度便成为片层组织间原子扩散的驱动力^[15-16]。高温下 α 相的稳定元素 Al 在 β 相中的浓度较大,造成 Al 原子的扩散能力高于其他原子,而这种浓度差驱使 β 相中的 Al 扩散到 α 相中,造成 α 相粗化,而 β 相则在一定程度上发

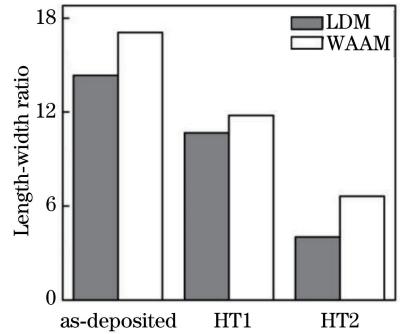


图 4 激光和电弧修复件修复区 α 相的长宽比

Fig. 4 Length-width ratio of the alpha phase in the additive repaired specimen

生溶解^[17-18]。同时, α 相尖角处的曲率半径小于平面处的曲率半径,使尖角处的溶解度大于平面处的溶解度而产生浓度差,故初生 α 相的尖角处溶解而平面处长大,使 α 相的长宽比明显下降^[19]。

图 5 为热处理修复区的 XRD 谱线,从衍射峰的变化可以判定合金在热处理过程中发生的相变^[20]。600 °C 退火后,激光修复区存在大量的 α 相衍射峰,如 $(100)_\alpha$ 、 $(002)_\alpha$ 、 $(101)_\alpha$ 等,以及少量的 β 相衍射峰 $(200)_\beta$, 而电弧修复区除此之外还存在 α 相 $(202)_\alpha$ 。激光修复区的 α 相衍射峰 $(102)_\alpha$ 、 $(110)_\alpha$ 及 β 相衍射峰 $(200)_\beta$ 明显强于电弧修复区,而电弧修复区的 $(100)_\alpha$ 、 $(002)_\alpha$ 、 $(101)_\alpha$ 衍射峰值高于激光

修复区。说明两种工艺生成的 α 相的形态、尺寸不同,使得 α 相衍射峰的种类、峰值强弱发生变化,与光学显微镜显示的微观组织一致。固溶时效处理后, $2\theta \approx 44^\circ$ 处的 α 相 $(102)_\alpha$ 均消失,激光修复区 α 相 $(101)_\alpha$ 峰值增强, β 相 $(200)_\beta$ 变弱;电弧修复区中的 β 相 $(200)_\beta$ 消失, α 相 $(202)_\alpha$ 及 $2\theta \approx 78^\circ$ 处的 α 相 $(201)_\alpha$ 增强,说明固溶时效的高温环境促使 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变,导致 β 相含量减少, β 相峰值变弱, α 相形状发生粗化,部分 α 相衍射峰消失,部分峰值增强。上述情况与两组热处理后显微组织的变化一致。

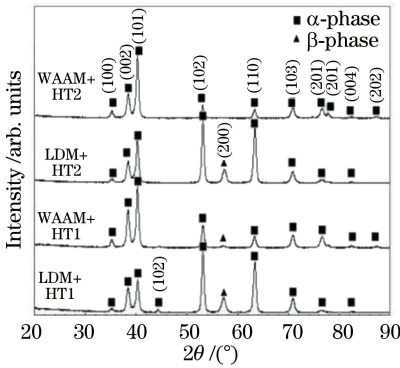


图 5 不同热处理制度下修复件修复区的 XRD 谱
Fig. 5 XRD patterns of the repaired zones at different heat treatments

3.2 室温拉伸性能

修复件的室温拉伸性能数据如表 5 所示 (σ_b 为抗拉强度, $\sigma_{0.2}$ 与屈服强度, δ 为延伸率, Ψ 为断面收缩率)。可见:热处理态激光修复件的综合拉伸性能较好,强度及塑性均高于 TC4 锻件的标准 (HB 5432—1989);电弧修复件的抗拉强度、屈服强度与激光修复件的相近,但其断面收缩率低于激光修复件,且远小于 TC4 锻件标准。600 °C 退火对拉伸性能的影响较小,而固溶时效处理能有效改善 LDM TC4 强度高而塑性低的不足,大幅提高了激光、电弧修复件的塑性,且对强度的影响不大。

固溶时效处理对塑性的提升与其微观相的形态有关。这是因为微观相的形态决定着位错滑移的难易程度,位错越易发生滑移,塑性就越高。TC4 是 $\alpha + \beta$ 型钛合金, α 相是密排六方结构 (bcc), β 相是体心立方结构 (hcp), hcp 结构的滑移系一般有 3 个,而 bcc 结构的滑移系有 12 个,因此 β 相的滑移系高于 α 相;同时, bcc 晶格的最小滑移距离小于 hcp 晶格,其塑性变形所需的能量更低^[21],所以 α 相的塑性变形能力低于 β 相,位错更易在较软的 β 基体上发生滑移。微观位错滑移的累积表现为宏观塑性的

改变,所以宏观塑性的变化由位错在 β 基体中的滑移距离及位错切过 α 相所产生的变形共同决定。热处理后 α 相的宽度变化会改变这两方面贡献的大小:宽度小于 2.7 μm 的片状 α 相,其塑性改变受两种机制的共同作用,随 α 相的宽度增加,位错切过 α 相引起的变形和位错在 β 基体中滑移距离的增加导致宏观塑性增大;对于宽度介于 2.7~3.1 μm 的 α 相,随着宽度增加,位错在 β 基体上的滑移距离增大,塑性变形程度随之变大; α 相的宽度大于 3.1 μm 时,位错不能切过 α 相,随 α 相的宽度增加及长度降低,位错在 α, β 界面中的塞积减少,从而发生更多的塑性变形^[22]。总之,塑性随 α 相宽度的增加而增大。另外, α, β 的相界面是阻碍位错运动的主要屏障,固溶时效后,随 α 相的长宽比下降,宽度增加, α, β 相间的界面变小,在相同的体积下,随 α 相宽度增大, α, β 的相界数量减少,使相界对位错滑移的阻力变弱,塑性提升。

电弧修复件的断面收缩率经固溶时效后有所提高,但仍低于 TC4 锻件标准,这可能是因为修复区仍存在长度较大的 α 相,使组织的整体协调变形能力较差,位错滑移阻力较大,从而导致断面收缩率较低。

表 5 修复件的室温拉伸性能

Table 5 Room temperature tensile properties of the repaired specimens

Status of materials	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	Ψ /%
Substrate	1012	928	10.2	19.45
(as-deposited)				
HT1+LDM	1010.2	964.5	10.9	27.7
HT2+LDM	951.2	900.0	16.2	32.8
HT1+WAAM	1043.7	961.1	9.9	12.8
HT2+WAAM	956.6	842.1	14.5	19.4
HB 5432—1989	≥ 895	≥ 825	≥ 10	≥ 25

3.3 拉伸断口分析

图 6 为修复件的拉伸断口形貌。激光修复件的颈缩明显,断口主要由纤维区和剪切唇区组成,纤维区内呈韧窝形貌,韧窝大而深,韧性良好,为典型的韧性断裂。电弧修复件的颈缩较小,断口主要由放射区和剪切唇区组成;600 °C 退火后,解理面上的韧窝较浅,塑性较差,其断裂方式为准解理断裂;固溶时效后,韧窝加深,但颈缩仍不明显,表现为准解理断裂特征。

4 结 论

本研究对比分析了激光沉积修复技术和电弧增材修复技术对 LDM TC4 缺陷件修复后组织的差异,

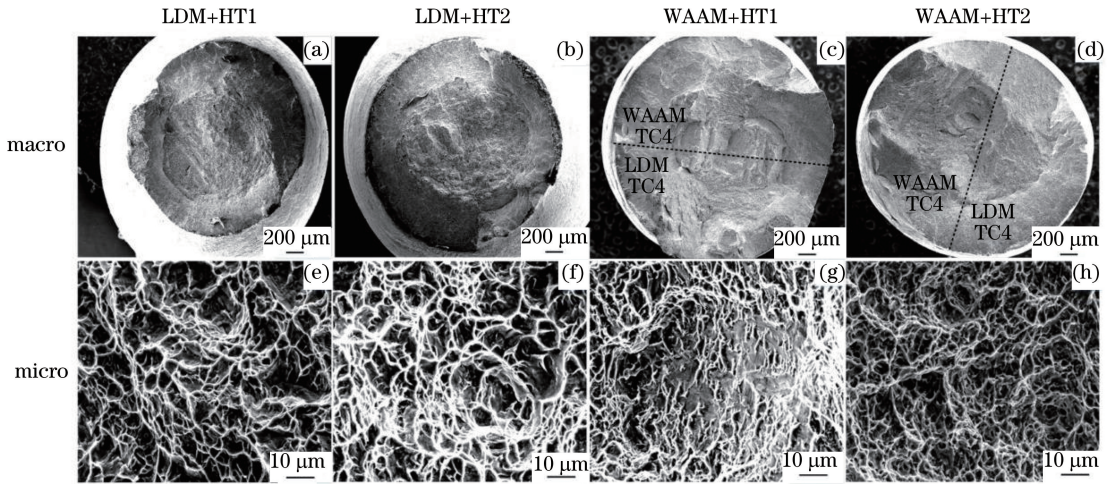


图 6 修复件的拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture of the repaired specimens

并考察了600 ℃退火及固溶时效处理对修复件组织、性能的影响,得到如下结论:

1) 两种修复件的显微组织存在差异。激光修复区的β柱状晶由基材延伸到修复区顶端,两区域内α相的形态、尺寸相近;电弧修复区的β晶呈粗大的等轴状,晶内的α板条较基材更细长。

2) 激光修复件的综合力学性能优于电弧修复件,其强度、塑性均高于TC4锻件标准。电弧修复件的强度与激光修复件的相当,但断面收缩率较低。

3) 600 ℃退火处理对修复件组织、性能的影响不大。固溶时效处理有效改善了LDM TC4强度高、塑性差的特点,使α相粗化,塑性大幅提升,且对强度的影响不大。

4) 两种修复件的拉伸断裂机制不同,激光修复件的断裂机制为韧性断裂,电弧修复件的断裂方式为准解理断裂。

参 考 文 献

[1] Zhang S Y, Lin X, Chen J, *et al.* Influence of heat treatment on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser rapid forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(7): 1263-1266.
张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光成形 TC4 合金组织及性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(7): 1263-1266.

[2] Lin X, Huang W D. High performance metal additive manufacturing technology applied in aviation field [J]. *Materials China*, 2015, 34(9): 684-688, 658.
林鑫, 黄卫东. 应用于航空领域的金属高性能增材制造技术 [J]. *中国材料进展*, 2015, 34(9): 684-688,

658.

[3] Yang G, Wang W D, Qin L Y, *et al.* Effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of laser deposited TA15 titanium alloys [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202007.
杨光, 王文东, 钦兰云, 等. 退火温度对激光沉积 TA15 合金组织及性能的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202007.

[4] He B, Tian X J, Cheng X, *et al.* Effect of weld repair on microstructure and mechanical properties of laser additive manufactured Ti-55511 alloy [J]. *Materials & Design*, 2017, 119: 437-445.

[5] Wang H M, Zhang S Q, Wang X M. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components (invited paper) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3204-3209.
王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战(邀请论文) [J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3204-3209.

[6] Zhang M. Research on laser additive manufacturing characteristics of titanium alloy with powder and wire [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
章敏. 送粉式和送丝式的钛合金激光增材制造特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[7] Wang F D, Williams S, Colegrove P, *et al.* Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44(2): 968-977.

[8] Baufeld B, van der Biest O, Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(S1):

- S106-S111.
- [9] Duchosal A, Deschoux-Beaume F, Lours P, *et al.* Analysis of weld-cracking and improvement of the weld-repair process of superplastic forming tools[J]. *Materials & Design*, 2013, 46: 731-739.
- [10] Zhang S Y. Research on microstructures and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy in laser rapid forming processing [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University, 2006.
张霜银. 激光快速成形 TC4 钛合金的组织与力学性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [11] Zhang Q, Chen J, Guo P F, *et al.* Texture and microstructure characterization in laser additive manufactured Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1.5Cr-2Nb titanium alloy [J]. *Materials & Design*, 2015, 88: 550-557.
- [12] Baufeld B, Brandl E, van der Biest O. Wire based additive layer manufacturing: comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(6): 1146-1158.
- [13] Xiao Z N, Liu T T, Liao W H, *et al.* Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy formed by selective laser melting after heat treatment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0902001.
肖振楠, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金热处理后微观组织和力学性能[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0902001.
- [14] Hunt J D. Solidification and casting of metals: international conference proceedings [M]. London: The Metal Society, 1979.
- [15] Fang J, Wang K L, Lu S Q, *et al.* Progress on globularization mechanisms and models in titanium alloys with lamellar structure[J]. *Materials Research and Application*, 2010, 4(1): 13-18.
方军, 王克鲁, 鲁世强, 等. 钛合金片层组织球化规律及模型的研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2010, 4(1): 13-18.
- [16] Tian Y L, Kraft R W. Mechanisms of pearlite spheroidization [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1987, 18(8): 1403-1414.
- [17] Chen S H, Zhang M C, Jia M L, *et al.* Microstructure and texture evolution of TC4 titanium alloy during continuous hot deformation process[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2017, 38(5): 54-60.
陈少华, 张麦仓, 贾萌柳, 等. TC4 钛合金连续热变形过程中的组织及取向演变[J]. *材料热处理学报*, 2017, 38(5): 54-60.
- [18] Zheng P Q. Study on TC11 titanium alloy microstructure evolution and α lamellae equiaxiation mechanism [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
郑佩琦. TC11 钛合金组织演变及 α 片层等轴化机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [19] Xi M Z, Gao S Y. Heat-treated microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser rapid forming[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0103007.
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.
- [20] Xin S W, Zhao Y S, Zeng W D. Inductions and discussions of solid state phase transformation of titanium alloy (III) — major testing methods[J]. *Titanium Industry Progress*, 2008, 25(3): 26-33.
辛社伟, 赵永生, 曾卫东. 钛合金固态相变的归纳与讨论(III)——常用检测方法[J]. *钛工业进展*, 2008, 25(3): 26-33.
- [21] Yang G, Wang W D, Qin L Y, *et al.* Annealing treatment and basketweave structure deformation mechanism of laser deposition manufactured TA15 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(7): 1935-1942.
杨光, 王文东, 钦兰云, 等. 激光沉积 TA15 钛合金退火处理工艺及网篮组织变形机制[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(7): 1935-1942.
- [22] Shi X H, Zeng W D, Sun Y, *et al.* Quantitative analysis on microstructure-tensile property relationship for Ti-6Al-4V alloy with basket weave structure[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(9): 2327-2331.
石晓辉, 曾卫东, 孙宇, 等. Ti-6Al-4V 合金网篮组织与拉伸性能定量关系研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(9): 2327-2331.