

引文格式: 朱言言, 李冲, 刘玉婷, 等. 复合制造 TC4 钛合金组织与拉伸性能 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(17): 14-20.

ZHU Yanyan, LI Chong, LIU Yuting, et al. Microstructure and tensile properties of hybrid manufacturing TC4 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(17): 14-20.

复合制造 TC4 钛合金组织与拉伸性能*

朱言言^{1,2,3}, 李冲⁴, 刘玉婷^{1,2}, 田象军^{1,2}

(1. 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学宁波创新研究院, 宁波 315800;

4. 电子工业出版社有限公司华信教育研究所, 北京 100036)

[摘要] 锻造与激光选区熔化相结合的复合制造技术为复杂整体钛合金构件制造提供了高效率、低成本技术新途径, 掌握复合制造钛合金的组织性能调控方法对于实现该技术工程应用至关重要。通过金相及扫描表征、室温拉伸测试和断口分析, 对比研究了单层层厚分别为 30 μm 和 60 μm 的两种选区激光熔化典型工艺参数的复合制造 TC4 钛合金结合区显微组织和室温拉伸性能。结果表明, 单层层厚对复合制造 TC4 钛合金结合区的显微组织和室温拉伸性能无明显影响, 选择大的层厚可显著提高成形效率。复合制造 TC4 结合区由增材区的马氏体组织和基体区的等轴组织构成梯度组织, 无明显热影响区, 增材区的显微硬度略高于锻件基体区。复合制造 TC4 钛合金增材区、基体区和结合区的室温拉伸性能均达到锻件标准要求, 结合区抗拉强度介于增材区和基体区之间, 而断后伸长率与增材区相当。由于增材区和基体区的拉伸强度和塑性差异, 试验提出在室温拉伸过程中梯度组织结合区界面会产生切应力以协调变形的推论, 结合区拉伸断口上增材和基体区分别呈现准解理和韧窝形貌。

关键词: 激光选区熔化; 复合制造; 钛合金; 显微组织; 力学性能; 梯度组织

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.17.014



朱言言

副研究员, 博士, 研究方向为激光增材制造。

激光选区熔化 (Selective laser melting, SLM) 技术基于二维逐层铺粉和可控熔凝堆积的技术原理, 可实现钛合金等难加工金属材料高性能复杂整体结构的高精度、短周期、低成本快速成形。经过近 20 年的快速发展, 激光选区熔化钛合金复杂整体构件已在航空航天领域逐渐实现工程应用^[1-4]。然而其小熔池逐点堆积的固有工艺特征导致沉积效率仅约 100~150g/h (单光束), 在制备尺寸较大构件时成形周期长、成本高, 且大

截面和体积的成形会导致热应力累积和变形开裂风险急剧增大, 这一瓶颈问题一定程度上限制了激光选区熔化技术的广泛应用^[5-9]。采用大幅度增加粉末单层层厚的方式来提高成形效率的作用不明显, 还可能致形成零件致密度和强度下降^[10-11]。

将传统锻造技术和激光选区熔化技术相互结合形成的复合制造技术成为解决该瓶颈问题的方向之一。复合制造技术采用化整为零的思想, 先将复杂整体构件中形状简单的规

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1106000); 国家自然科学基金 (52071005, 51801009); 北航双一流引导专项基金 (030810)。

则部分锻造成形,然后将该锻造部分作为基体,激光选区熔化制备出形状复杂的结构部分,完成整个构件制造。该技术充分发挥了锻造技术制备规则构件的低成本、高效率优势和增材制造技术的高性能、精细化、柔性化的特点,从而为实现复杂整体钛合金构件高效率、低成本制造提供了一条重要途径,对提升我国高端装备关键构件制造加工技术水平具有重要意义^[12-19]。

目前国内外学者在该领域的相关研究刚起步,尚未见到复合制造钛合金构件工程应用的报道^[13-18,20-21]。不同于一般激光选区熔化技术中基体仅作为支撑并在成形完后直接切除,复合制造技术中锻造基体要作为最终零件的一部分使用,掌握锻造/增材结合区的内部质量、显微组织和力学性能特征及控制方法是该技术应用的首要条件。钦兰云等^[18]报道了复合制造 TA15 试样包括锻造区、热影响区和增材区 3 部分不同组织,在热影响区(1.5~2mm)内随着距离增材区越近等轴状初生 α 相体积分数急剧减少,在热影响区上部接近增材区时 α 相完全消失并发生明显 β 晶粒长大。王亚辉等^[16]发现复合制造 TC4 结合区的热影响区(0.2mm)由组织明显不同的过渡区 1 和过渡区 2 构成,与其经历的热影响具体过程有关。王维^[17]和 Qin^[21]等研究了 750~850℃退火对复合制造 TC4 的组织及力学性能的影响,发现在高温退火过程中激光送粉增材区发生网篮组织粗化而激光选区熔化区发生马氏体分解,显微组织变化不同导致退火温度对各区域的拉伸性能影响规律不同。Zhu 等^[15]发现复合制造 TC11 钛合金的结合区拉伸塑性低于锻造区和增材区,原因在于结合区梯度组织的特殊变形机理。显然激光选区熔化的成形工艺参数会对锻造基体产生不同的热影响作用,从而影响复合制造钛合金锻造/增

材结合区的组织和性能,目前针对这方面的研究还鲜有报道。

本文以 TC4 钛合金锻件作为基体,采用不同单层层厚的两种典型增材工艺参数激光选区熔化制备出复合制造 TC4 钛合金试样,通过金相和扫描组织表征、室温拉伸测试及断口形貌观察,分析两种工艺的复合制造 TC4 试样显微组织和拉伸性能特征,重点揭示梯度组织结合区的组织形成机理和变形行为,获得锻造+激光选区熔化复合制造 TC4 钛合金的成形工艺参数和组织性能调控方法。

试验方法

1 原材料与复合制造

本试验所采用的 TC4 钛合金粉末为旋转电极雾化法制备,粉末球形度较好,粒径分布较为集中,中值粒径约为 46 μm 。粉末化学成分符合 GB/T 3620 要求,其中氧质量分数为 0.095%。TC4 钛合金锻造基体为 15mm 厚的轧制板材,锻造基体为等轴组织。本试验中激光选区熔化成形是在 EOS M280 设备上进行的,选择如表 1 所示的两种典型工艺参数进行 TC4 钛合金锻造基体上激

光选区熔化成形试验,分别获得层厚 30 μm 的 1# 试样和层厚 60 μm 的 2# 试样,以研究成形工艺对复合制造锻造/增材结合区显微组织和力学性能的影响。

试验前首先将粉末在真空干燥箱里进行 120℃/12h 的真空烘干处理以尽可能去除水蒸气。将 TC4 钛合金锻造基体加工成 252mm \times 252mm \times 15mm 基体并作表面清洗,达到粗糙度小于 1.6 μm 、平面度小于 0.03mm 的表面状态。由于选用的 TC4 钛合金锻件基体为 15mm 厚,在激光选区熔化成形过程中可能会发生变形,因此本试验设计了复合制造专用 40mm 厚固定装卡底板与锻造基体通过盲孔螺栓固定,然后一起固定在激光选区熔化设备上成形。每个工艺参数均成形用于组织分析的小方块试样和用于室温拉伸性能测试的矩形试样,成形过程示意图和样品如图 1 所示,成形完复合制造试样进行 600℃/4h、空冷的去应力退火处理。

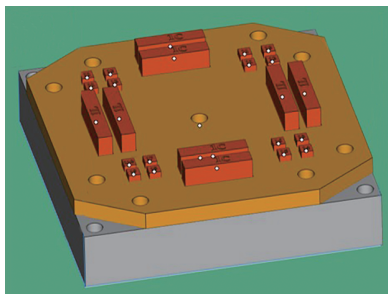
2 表征与测试

试样线切割后依次经过 60#、240#、500#、1000#、2000# 水磨砂纸打磨后再进行机械抛光,抛光液

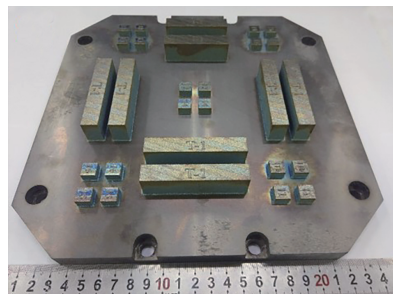
表 1 激光选区熔化基本工艺参数

Table 1 Process parameters of selective laser melting

| 试样编号 | 功率/W | 扫描速率/(mm \cdot s ⁻¹) | 光斑直径/ μm | 单层层厚/ μm | 扫描间距/mm |
|------|------|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------|
| 1# | 280 | 1200 | 90 | 30 | 0.12 |
| 2# | 340 | 1200 | 90 | 60 | 0.12 |



(a) 示意图



(b) 试样实物

图 1 复合制造 TC4 成形过程示意图和试样实物

Fig.1 Schematic illustration and sample images of hybrid manufacturing TC4 process

是 Fe_2O_3 和 CrO_3 悬浊液,之后采用 $HF:HNO_3:H_2O$ 体积比为 1:6:43 的腐蚀液进行腐蚀,清水冲洗吹干。采用莱卡 DM4000 型光学显微镜 (OM)、配有能谱仪 (EDS) 的 JSM-6010 和 CamScan-3400 型扫描电镜 (SEM) 观察显微组织和成分分析。采用恒一电子 FM1000 型显微维氏硬度计测试复合制造试样结合区的显微硬度,保压时间 10s,载荷为 200g。

复合制造 TC4 钛合金室温拉伸测试从锻造基体区 (W-T)、结合区 (A+W-T) 和增材区 (A-T) 分别取横向试样进行测试,如图 2 所示。其中 A+W-T 结合区试样横截面上增材区与基体区各占一半,界面平行于拉伸方向的横向试样,在室温拉伸过程中增材区一半和基体区一半必须协调同时变形,相比界面与拉伸方向垂直的纵向试样,能更全面地反映梯度组织的协调变形行为。试样尺寸为 M10×71 的标准拉伸试样,为减少测试误差,每组拉伸试验测试 3 个平行试样取平均值。室温拉伸测试委托钢研纳克公司按照 GB/T 228.1—2010 检测标准执行,测试数据包括屈服强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A 、断面收缩率 Z 以及工程应力-应变曲线。测试之后的断裂试样根据需要,观察断口或亚表面形貌特征。

试验结果与讨论

1 显微组织

两种典型工艺参数的锻造+激光选区熔化复合制造 TC4 试样金相照片如图 3 所示。从低倍金相上看,两种工艺的试样无明显区别,均包括增材区、结合区界面和锻件基体区 3 个部分,形成了梯度组织。锻造基体区显微组织为双相钛合金锻件常见的等轴组织,其中等轴初生 α 相平均尺寸约为 $(15 \pm 6) \mu m$,初生 α 相体积分率约为 $85\% \pm 9\%$ 。增材区组织由沿着沉积增高方向外延生长的 β 柱状晶和晶内均匀分布的

超细针状马氏体 α' 相构成,这是由于激光选区熔化成形过程中的超高温温度梯度和超快冷却速率的冶金条件导致的。其 β 柱状晶宽度分布约为 $50 \sim 200 \mu m$,长度可达数百微米甚至毫米级。尽管 2# 试样相比 1# 试样激光功率从 340W 降低到 280W,但其单层层厚也从 $60 \mu m$ 降低到 $30 \mu m$,使得两种成形工艺的熔池凝固条件和冷却速率差异不大,因此单层层厚 $30 \mu m$ 和 $60 \mu m$ 对增材区组织无明显影响。

两种工艺的试样结合区界面冶金质量均较好,在金相观察下未发现局部熔合不良、孔隙等金属增材制造常

见内部冶金缺陷(图 3),低倍下结合区界面连续平直,高倍下能看到的圆弧状曲线界面是第一层熔池与锻造基体之前的熔合线,如图 3 (b) 和 (d) 中白色虚线所示。层厚 $60 \mu m$ 的 2# 试样熔池深度略大于 1# 试样,是由于其较高的激光功率导致的。可见,采用 $30 \mu m$ 和 $60 \mu m$ 层厚的两种工艺参数均能够获得良好冶金质量的复合制造 TC4 钛合金试样。

在锻造基体上激光选区熔化成形过程中,激光形成的移动高温熔池会对锻造基体产生循环热影响作用,从而导致锻造基体发生组织粗化和晶粒长大等固态相变形成明显的热

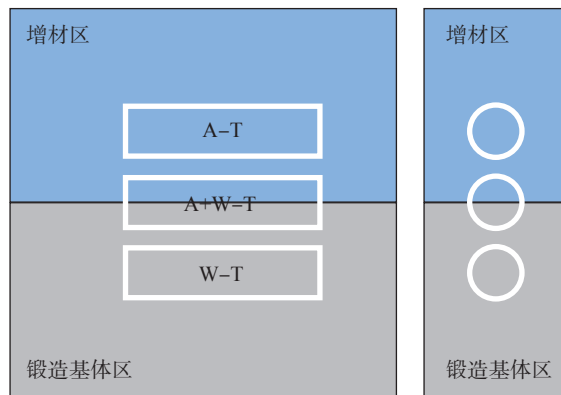


图 2 复合制造 TC4 室温拉伸测试取样示意图

Fig.2 Schematic illustration for room tensile testing specimen of hybrid manufacturing TC4 samples

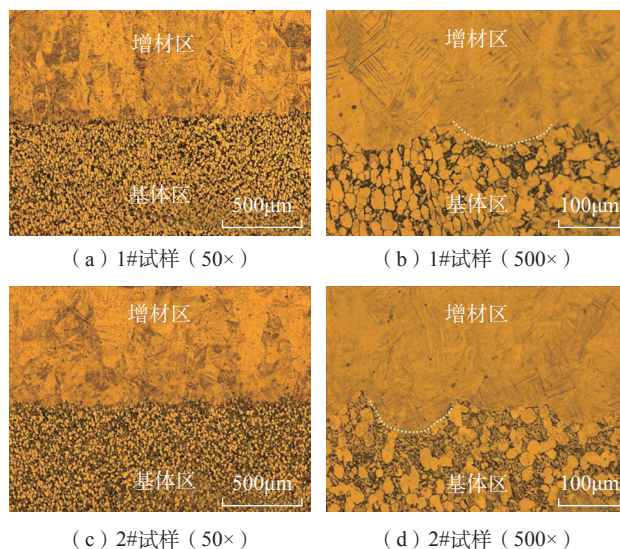


图 3 复合制造 TC4 金相组织

Fig.3 Metallographic images of hybrid manufacturing TC4 samples

影响区,使其力学性能降低。与焊接等冶金过程相似,控制热影响区的显微组织对复合制造 TC4 试样的力学性能至关重要。图 3 所示的金相照片并未发现基体顶部存在明显的热影响区。对结合区界面附近的锻造基体进行了高倍扫描组织观察,图 4 为层厚 60 μm 的 2# 试样的结合区和距结合区熔合线界面不同位置的基体的高倍显微组织。由此可见,距离结合区熔合线 20 μm 、50 μm 和 100 μm 的锻造基体显微组织均为等轴初生 α 相和少量片层 β 转变组织构成的等轴组织,与锻造基体的原始组织完全相同。如图 4 (a) 中箭头所示,甚至与熔合线相邻的基体组织中的初生 α 相都未发生固态相变转变为热力学稳定的高温 β 相。以上试验结果表明,本试验中激光选区熔化成形过程中高温移动熔池在锻造基体中不会形成组织粗化或晶粒长大的热影响区,或者说热影响区小到无法准确测量。在激光选区熔化过程中,激光功率小、扫描速度快导致热输入较小,同时较大的锻造基体又具有非常强烈的导热和散热作用,因此在增材

成形过程中,移动熔池下方的锻造基体在高温区的停留时间非常短,动力学上根本来不及发生固态相变。这一结果对于复合制造 TC4 钛合金结合区的力学性能具有非常重要的意义,其锻造基体的力学性能理论上不会出现明显下降。层厚 30 μm 的 1# 试样结合区显微组织与 2# 试样基本相同。

图 5 为两种工艺的复合制造 TC4 钛合金结合区显微硬度测试结果,可见层厚对显微硬度无明显影响。锻造基体区显微硬度平均值为 320HV,而增材区的显微硬度平均值为 373HV,这是由增材区快速冷却速率条件下形成的超细马氏体针状组织导致的。在熔合线以下的锻造基体区中,并未出现显微硬度渐变的热影响区,这也进一步说明该成形工艺条件下复合制造不会形成组织明显差异的热影响区。

2 拉伸性能

表 2 为两种典型工艺的复合制造 TC4 钛合金室温拉伸性能测试结果。两种成形工艺增材区的室温拉伸强度和塑性基本相同,可见层厚

30 μm 和 60 μm 对激光选区熔化 TC4 钛合金的力学性能无明显影响,这也与其相近的显微组织结果一致。两种工艺复合制造 TC4 试样的增材区、基体区和结合区力学性能均达到了 GJB 2744 中 TC4 锻件工程应用的技术标准。对于同一种工艺参数,结合区的室温拉伸性能与增材区、锻造基体区相比变化规律相同,这里以层厚 60 μm 的 2# 试样重点说明。由于增材区为快速冷却形成超细马氏体组织,而锻造基体区为细等轴晶组织,因而增材区的抗拉强度 1186MPa 比锻造基体区的 905MPa 高约 31%,而断后伸长率 7.5% 比锻造基体区的 16.1% 低约 53%。结合区试样 A+W-T 的抗拉强度 1064MPa 介于增材区 A-T 和基体区 W-T 之间,且基本等于二者的平均值,而结合区的断后伸长率 8.5% 与塑性较低的增材区基本相同。

复合制造 TC4 钛合金基体 / 增材结合区的这种室温拉伸性能特征是由其组织构成决定的。如图 6 (a) 所示,复合制造 TC4 结合区 A+W-T 试样的截面是由一半增材区和一半

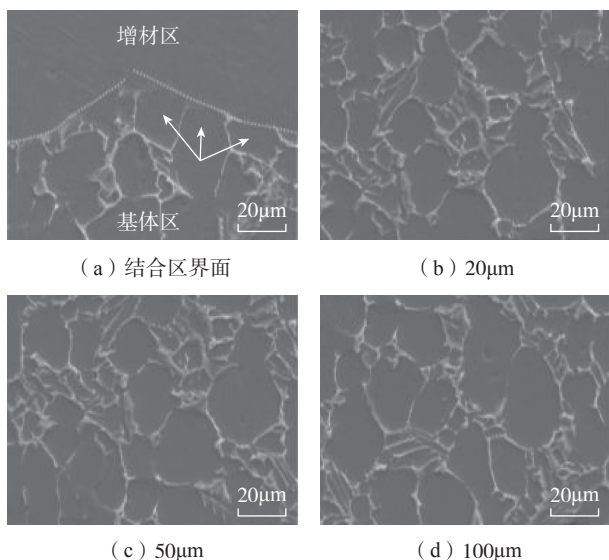


图 4 2# 复合制造 TC4 试样显微组织 (结合区界面及距界面不同距离的基体)

Fig.4 Microstructure of 2# hybrid manufacturing TC4 sample (Bond interface zone and substrate zone of different distances from interface)

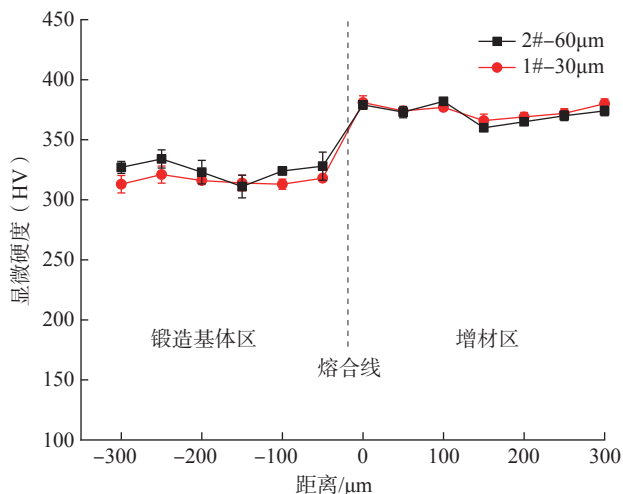


图 5 复合制造 TC4 钛合金结合区显微硬度
Fig.5 Microhardness for bond zone of hybrid manufacturing TC4 samples

锻造基体区组成,施加应力方向与结合区界面平行,在变形过程中同一截面的增材区一侧和基体区一侧必须协调同时变形。在室温拉伸过程中,如图 6 (b)所示,随着施加应力逐渐增大并首先达到锻造基体区的屈服强度(大约 855MPa),此时基体区一侧本应该开始塑性变形拉长,然而此时施加应力并未达到增材区的屈服强度(1116MPa),增材区一侧无法发生塑性变形,因此在结合区界面处就会产生一个切应力 τ (图 6 (a)中虚线箭头所示),在高强度的增材区一侧表现为拉应力而在低强度的基体区一侧表现为压应力,从而使得增材区的真实应力增加,基体区的真实应力降低,直至两侧的真实应力均达到了各自的屈服强度,结合区试样两侧相互协调产生相同的塑性变形而拉长。随着应力和应变的逐渐增大,微裂纹会优先在塑性较低的增材区一侧形成,并逐渐扩展到整个截面,导致结合区试样拉伸断裂,因此结合区的断后伸长率和断面收缩率与塑性较低的增材区基本相同。这就是复合制造 TC4 钛合金结合区室温拉伸强度介于高强度的增材区和低强度的基体区之间,而塑性与低塑性的增材区相当的现象的形成机理。

图 7 为层厚 60 μm 的 2# 复合制造 TC4 钛合金结合区 A+W-T 试样室温拉伸断口形貌照片。在断口低倍照片上能清晰地看到锻造基体区 W 和增材区 A 的界面,基体区一侧的断口呈现出较大较深的韧窝形貌,对应于锻造基体区本身具有较好的塑性;而增材区一侧的断口呈现出韧窝和准解理混合形貌,有明显的解理台阶形貌,对应于增材区本身较低的塑性。由此可见,尽管结合区试样两侧经历的施加应力和塑性变形应变相同,但由于其本身的组织和力学性能差异,其变形行为和失效机理并不相同。

表 2 复合制造 TC4 室温拉伸性能测试结果

Table 2 Room tensile properties of hybrid manufacturing TC4 samples

| 编号 | 取样位置 | 抗拉强度 R_m/MPa | 屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$ | 断后伸长率 $A/\%$ | 断面收缩率 $Z/\%$ |
|----|-----------|-----------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| 1# | 增材区 A-T | 1184 \pm 3 | 1113 \pm 3 | 8.8 \pm 0.6 | 16 \pm 2 |
| | 基体区 W-T | 905 \pm 4 | 855 \pm 2 | 16.1 \pm 2.8 | 39 \pm 6.9 |
| | 结合区 A+W-T | 1061 \pm 12 | 972 \pm 6 | 9.3 \pm 0.8 | 17 \pm 2.3 |
| 2# | 增材区 A-T | 1186 \pm 5 | 1116 \pm 3 | 7.5 \pm 0.5 | 22.3 \pm 0.6 |
| | 基体区 W-T | 905 \pm 4 | 855 \pm 2 | 16.1 \pm 2.8 | 39 \pm 6.9 |
| | 结合区 A+W-T | 1064 \pm 3 | 978 \pm 6 | 8.5 \pm 0 | 23.3 \pm 2.1 |

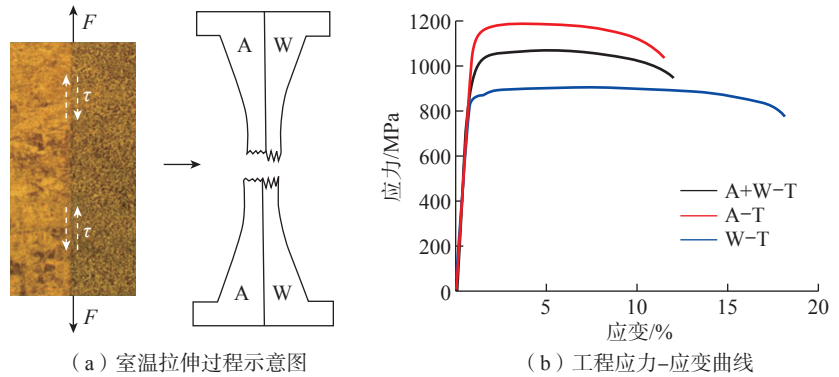


图 6 复合制造 TC4 室温拉伸过程示意图和工程应力-应变曲线

Fig.6 Schematic illustration and engineering stress-strain curve of room tensile testing of hybrid manufacturing TC4 sample

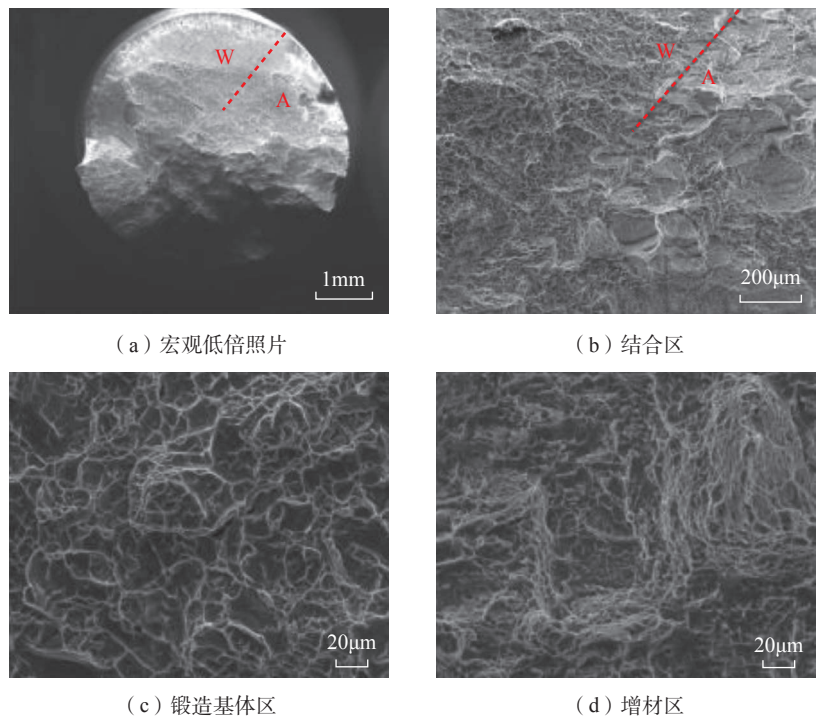


图 7 2# 复合制造 TC4 结合区试样室温拉伸断口形貌

Fig.7 Fractography images of the A+W-T room tensile specimen of 2# hybrid manufacturing TC4 sample

对于复合制造技术,从理论上来说激光选区熔化单层厚度越薄,结合区的冶金结合质量和内部缺陷控制越有利。从本试验结果来看,层厚 30 μm 和 60 μm 的工艺参数获得的复合制造 TC4 钛合金样品内部质量、显微组织和力学性能均无明显差异。单层厚度越大,成形时间越短、成形效率越高,复合制造试样成本也会越低。因此综合成形效率和成形质量控制来看,采用 60 μm 层厚的成形工艺参数进行复合制造更适合。

尽管本试验获得的复合制造 TC4 钛合金结合区室温拉伸性能良好,满足相关技术标准要求,但是复合制造试样锻造基体区与增材区的力学性能差异较大(抗拉强度相差 31%、伸长率相差 53%),对于工程应用也不利,后续还需要继续研究通过成形工艺和热处理调控,实现复合制造钛合金结合区力学性能的匹配调控。此外,这种复合制造钛合金梯度组织结合区的疲劳、裂纹扩展等关键性能和力学行为也需要进一步深入研究。

结论

(1) 两种成形工艺的锻造基体 + 激光选区熔化复合制造 TC4 钛合金结合区冶金质量良好,单层厚度对其显微组织和力学性能无明显影响。综合成形效率和质量控制,60 μm 层厚工艺更适合复合制造技术。

(2) 复合制造 TC4 试样由增材区、结合区和锻造基体区组成,增材区为外延生长 β 柱状晶和晶内快速冷却马氏体 α' 相组织,基体区为等轴组织,无明显热影响区。

(3) 复合制造 TC4 试样室温拉伸性能达到锻件技术标准。具有马氏体组织的增材区相比等轴组织的基体区具有更高的强度和较低的塑性,结合区强度(R_m 平均值为 1061~1064MPa) 介于二者之间,而断后伸长率(A 平均值为 8.5%~9.3%) 与增

材区相当。在拉伸过程中界面会产生切应力以协调变形,从而导致结合区强度能够高于基体区,结合区拉伸断口上增材区和基体区分别呈现准解理和韧窝形貌。

参考文献

[1] KUMAR P, RAMAMURTY U. Microstructural optimization through heat treatment for enhancing the fracture toughness and fatigue crack growth resistance of selective laser melted Ti6Al4V alloy[J]. Acta Materialia, 2019, 169: 45–59.

[2] QIU C, ADKINS N J E, ATTALLAH M M. Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 578: 230–239.

[3] WU M W, LAI P H, CHEN J K. Anisotropy in the impact toughness of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 650: 295–299.

[4] XU W, BRANDT M, SUN S, et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition[J]. Acta Materialia, 2015, 85: 74–84.

[5] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 38–42.

TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 38–42.

[6] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 32–55.

GU Dongdong, ZHANG Hongmei, CHEN Hongyu, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 32–55.

[7] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690–2698.

WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690–2698.

[8] 王华明, 张述泉, 王韬, 等. 激光增

材制造高性能大型钛合金构件凝固晶粒形态及显微组织控制研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 9–14.

WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Tao, et al. Progress on solidification grain morphology and microstructure control of laser additively manufactured large titanium components[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2018, 37(4): 9–14.

[9] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(9): 1111–1126.

LIN Xin, HUANG Weidong. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. Scientia Sinica Informations, 2015, 45(9): 1111–1126.

[10] 韩志嵘, 林芸, 刘洁, 等. 层厚对内燃机用激光选区熔化成形 Ti-5Al-2.5Sn 钛合金组织与性能的影响[J]. 应用激光, 2019, 39(2): 217–221.

HAN Zhirong, LIN Yun, LIU Jie, et al. Influences of layer thickness on microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-5Al-2.5Sn alloy[J]. Applied Laser, 2019, 39(2): 217–221.

[11] 肖美立, 艾百运, 姚斐, 等. 激光选区熔化 Ti-6Al-4V 合金工艺参数对致密度及显微硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(6): 105–108.

XIAO Meili, AI Baiyun, YAO Fei, et al. Influences of technological parameters on compactness and microhardness of selective laser melted Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(6): 105–108.

[12] BAMBACH M, SIZOVA I, SYDOW B, et al. Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 282: 116689.

[13] LIU Q, WANG Y, ZHENG H, et al. Microstructure and mechanical properties of LMD-SLM hybrid forming Ti6Al4V alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 660: 24–33.

[14] WANG Y, TANG H, FANG Y, et al. Microstructure and mechanical properties of hybrid fabricated 1Cr12Ni2WMoV Nb steel by laser melting deposition[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(2): 481–486.

[15] ZHU Y, LI J, TIAN X, 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 and Engineering: A, 2014, 607:

427-434.

[16] 王亚辉, 黄亮, 刘翔, 等. 基于增材制造和锻造复合成形的 TC4 钛合金组织和性能研究 [J/OL]. 稀有金属. (2020-01-21). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2111.TF.20200121.1421.001.html>.

WANG Yahui, HUANG Liang, LIU Xiang, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 alloy formed by additive manufacturing combined with forging[J/OL]. Chinese Journal of Rare Metals. (2020-01-21). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2111.TF.20200121.1421.001.html>.

[17] 王维, 张力书, 李长富, 等. LDM-SLM 复合成形 Ti6Al4V 钛合金的显微组织及力学性能 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(S2): 13-21.

WANG Wei, ZHANG Lishu, LI Changfu,

et al. Study on microstructure and mechanical properties of LDM-SLM hybrid manufactured Ti6Al4V titanium alloy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(S2): 13-21.

[18] 钦兰云, 何晓娣, 赵朔, 等. 循环热处理对激光复合制造 TA15 合金组织及性能影响 [J]. 稀有金属, 2020, 44(2): 139-146.

QIN Lanyun, HE Xiaodi, ZHAO Shuo, et al. Effect of cyclic thermal treatment on microstructures and mechanical properties of hybrid fabricated TA15 alloy by laser deposition manufacturing[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44(2): 139-146.

[19] 张海鸥, 向鹏洋, 芮道满, 等. 金属零件增量复合制造技术 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 34-36.

ZHANG Haiou, XIANG Pengyang, RUI Daoman, et al. Hybrid additive manufacturing

method of metallic parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 34-36.

[20] SHI X, MA S, LIU C, et al. Selective laser melting-wire arc additive manufacturing hybrid fabrication of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 684: 196-204.

[21] QIN L Y, MEN J H, ZHANG L S, et al. Microstructure homogenizations of Ti-6Al-4V alloy manufactured by hybrid selective laser melting and laser deposition manufacturing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 759: 404-414.

通讯作者: 田象军, 高级工程师, 博士, 研究方向为金属增材制造。

Microstructure and Tensile Properties of Hybrid Manufacturing TC4 Titanium Alloy

ZHU Yanyan^{1,2,3}, LI Chong⁴, LIU Yuting^{1,2}, TIAN Xiangjun^{1,2}

(1. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315800, China;

4. Huaxin Institute for Education Research, Publishing House of Electronics Industry Company Limited, Beijing 100036, China)

[ABSTRACT] The hybrid manufacturing technique combining forging and selective laser melting techniques provides an effective approach for the manufacturing of complex integral titanium alloy component with high efficiency and low cost. The microstructure and properties controlling method of hybrid manufacturing titanium alloys is very important for the engineering application. The microstructure and mechanical properties of hybrid manufacturing TC4 samples of two typical process parameters with the layer thickness of 30 μ m and 60 μ m of selective laser melting were studied by means of metallographic and microscopic observation, room tensile testing and fractography observation. The results showed that the layer thickness has no effect on the microstructure and properties, however, larger layer thickness can increase the forming efficiency. The gradient microstructure in the bond zone of hybrid manufacturing TC4 is consist of the martensite structure in additive zone and equiaxed structure in substrate zone. There is no obvious heat affected zone in the forging substrate. The micro hardness of additive manufacturing zone is higher than that in the forging zone. The tensile properties of hybrid manufacturing TC4 can satisfy the requirement of the forging standard. The tensile strength of the bond zone is between the additive manufacturing zone and forging zone, but the elongation is equal to the additive manufacturing zone. Due to their different strength and ductility, it is concluded that a shear stress in the interface of gradient microstructure bond zone would form to adjust the deformation in this research. The fractography of the bonding zone tensile specimen is consist of quasi cleavage morphology in the additive manufacturing half zone and dimple morphology in the forging half zone.

Keywords: Selective laser melting; Hybrid manufacturing; Titanium alloy; Microstructure; Mechanical properties;

Gradient microstructure

(责编 大漠)