

激光电弧复合增材制造 TC4 组织与力学性能研究

钱梓尧¹ 徐萌翀¹ 李文龙² 翟文正¹

1. 华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

2. 武汉科技大学机械工程学院, 湖北 武汉 430081

[摘要]随着航空航天等高端制造领域对高性能、轻量化材料的需求增加, 钛合金(如 TC4)因其优异的性能成为应用热门。传统制造工艺在复杂结构件制造中存在局限性, 而增材制造技术通过逐层堆积材料的方式提供了新的解决方案。激光电弧复合增材制造技术通过激光辅助电弧增材制造, 并引入同步轧制工艺进一步改善材料的微观组织和力学性能, 从而制造出综合性能优秀的 TC4 合金。然而, 关于激光电弧复合增材制造技术在 TC4 合金中的应用及其对组织与力学性能的影响研究尚不充分, 尤其是在不同工艺参数和退火处理条件下的研究更为有限。本研究旨在探讨激光电弧复合增材制造技术在 TC4 合金中的应用, 分析退火前后激光模式(振荡/脉冲)、轧制工艺及送丝速度对材料组织与性能的影响, 并研究退火处理对材料性能的改善机制, 为高性能钛合金零件的制造提供理论依据和技术支持。

[关键词]TC4 合金; 复合增材制造; 微观组织; 相变机制; 力学性能

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17713

中图分类号: TG444

文献标识码: A

Research on the Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Produced by Laser Arc Composite Additive Manufacturing

QIAN Ziyao¹, XU Mengchong¹, LI Wenlong², ZHAI Wenzheng¹

1. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China

2. School of Mechanical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430081, China

Abstract: With the increasing demand for high-performance and lightweight materials in high-end manufacturing fields such as aerospace, titanium alloys (such as TC4) have become popular due to their excellent performance. Traditional manufacturing processes have limitations in the manufacturing of complex structural components, while additive manufacturing technology provides a new solution by stacking materials layer by layer. The laser arc composite additive manufacturing technology uses laser assisted arc additive manufacturing and introduces synchronous rolling technology to further improve the microstructure and mechanical properties of the material, thereby producing TC4 alloy with excellent comprehensive performance. However, there is still insufficient research on the application of laser arc composite additive manufacturing technology in TC4 alloy and its impact on the microstructure and mechanical properties, especially under different process parameters and annealing conditions. The purpose of this study is to explore the application of laser arc composite additive manufacturing technology in TC4 alloy, analyze the effects of laser mode (oscillation/pulse), rolling process, and wire feeding speed on material structure and properties before and after annealing, and investigate the improvement mechanism of annealing treatment on material properties, providing theoretical basis and technical support for the manufacturing of high-performance titanium alloy parts.

Keywords: TC4 alloy; composite additive manufacturing; microstructure; phase transition mechanism; mechanical properties

1 研究背景

钛合金因具有优异的比强度、耐蚀性及高温性能, 自 20 世纪 50 年代问世以来, 已被广泛应用于航空航天、兵器舰船、化工、汽车、医疗及建筑等领域^[1,2]。其对酸碱溶液、海水及海洋环境具有出色的抗侵蚀能力, 因此被誉为“海洋金属”^[3,4]。

在众多钛合金中, TC4(Ti-6Al-4V)是典型的 $\alpha + \beta$ 型双相合金, 兼具较高的强度、塑性和可焊性。其中, 铝为 α 稳定元素, 稳定密排六方结构的 α 相; 钒为 β 稳定元素, 稳定体心立方结构的 β 相。两者共同决定了合金的组成与相变特性^[5]。TC4 的 β 转变温度约为 882.5°C, 高

于此温度以 β 相为主, 低于时 β 相逐渐转变为 α 相。在冷却过程中, β 相可通过扩散型转变或无扩散型马氏体相变形成亚稳的 α 相。在快速冷却时, β 相还可能转变为马氏体 α' 相, 这是一种亚稳的体心立方结构, 进一步增强了合金的强度。

为克服传统钛合金加工工艺在复杂构件制造中的局限, 近年来增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术的发展为钛合金高性能制造提供了新思路。该技术通过逐层堆积材料实现复杂构件的近净成形, 具有材料利用率高、周期短及设计灵活等优势^[6,7]。目前, 应用于 TC4 合金的增材制造技术主要包括激光粉末床熔融(Laser Powder

Bed Fusion, LPBF)、激光定向能量沉积 (Laser Directed Energy Deposition, LDED) 以及电弧增材制造 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)。其中, LPBF 技术因凝固冷却速率和温度梯度极高, 可获得细小晶粒和精细组织, 从而赋予零件较高强度^[8]。但其残余应力较大, 需经热处理等手段调控^[9]。相比之下, WAAM 技术冷却速率较低, 残余应力小, 但晶粒生长充分, 组织较粗。两种工艺各具优劣, 需依据应用需求选择与优化^[10]。

针对传统增材制造技术的局限, 通过引入机械场、磁场、声场或多热源等辅助能量, 显著优化了 TC4 钛合金的成形过程^[11]。其中, 激光电弧复合增材制造融合激光与电弧熔化沉积优势^[12], 并在沉积过程中施加同步轧制作用, 可显著改善组织与力学性能^[13]。该技术不仅提升了沉积效率和成形精度, 还降低了气孔、裂纹等缺陷, 使部件具备更高致密度与力学性能, 适用于高性能金属构件制造。然而, 复合能场引入的复杂热力耦合效应使组织演变与性能调控机理仍不清晰。系统研究不同工艺参数对成形质量、组织和性能的影响规律, 是推动该技术应用与性能优化的关键。

本文主要研究了新型增材制造工艺参数及退火处理对双相 TC4 合金显微组织与力学性能的影响。通过微观组织表征、室温拉伸实验及硬度测试, 系统分析了不同工艺条件及退火处理下 TC4 合金的组织演变与力学性能变化规律, 并探索了优化增材制造工艺参数的途径。

2 实验材料样品制备与实验方法

本文所使用的 TC4 合金是通过激光电弧复合增材制造在保护气氛环境中打印而成。随后, 对试样进行了热处理, 探究热处理对其性能和组织结构的改善效果。试验所用原材料为 TC4 丝材, 焊丝直径 1.2mm, 该丝材的主要化学成分如表 1 所示, 各元素含量符合国标 GB/T 3623—2007 的要求。实验所用基板材料为两相区锻造退火态的 TC4 钛合金。通过金相法对钛合金成形试块的相变点进行实测, 结果为 $985\pm5^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 实验用基板与焊丝化学成分 (wt%)

元素	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
TC4 基板	Bal.	6.10~6.13	4.10~4.12	0.10	0.01	0.01	0.001	0.10
TC4-D 焊丝	Bal.	5.92~5.93	3.95~4.0	<0.05	0.012~0.015	0.0093	0.004	0.097

激光电弧成形实验采用了实验室自主研发的复合增材制造设备和系统。该系统由激光器、电弧焊机、送丝机构和同步轧制装置组成, 具备激光与电弧双热源耦合以及实时机械加载功能。实验过程中保护气体为 99.999% 的高纯氩, 气流量设定为 17L/min, 搭配伊特克斯净化系统进行整体气氛保护, 氧含量控制在低于 100ppm, 水含量控制在低于 20ppm。系统同时配备水冷循环装置以控制基板

温升, 防止热积累造成晶粒粗化。

本研究中的 TC4 合金是基于激光电弧复合增材制造实验系统加工的。激光器和送丝机与基板角度为 60° , 轧辊位于焊枪滚动方向后 35mm, 轧辊轧制力固定为 15kN, 轧辊行走速度为 500mm/min, 电弧电流为 220A, TC4 试样详细沉积参数见表 2。

表 2 激光电弧复合增材制造 TC4 试样工艺参数

序号	固定参数	工艺参数变化量
LAM-1	500 mm/min 行走速度, 220A 电流, 4m/min 送丝速度	连续激光 (1600W)
LAM-2		激光 (1600W) + 轧制 (15 kN)
LAM-3		脉冲激光 (50 占空比、100Hz)
LAM-4		脉冲激光 (50 占空比、100 Hz) + 轧制 (15kN)
LAM-5		振荡激光 (5mm 振幅、100 Hz)
LAM-6		振荡激光 (5mm 振幅、100Hz) + 轧制 (15kN)
LAM-7		脉冲振荡激光 (50 占空比、5mm 振幅、100Hz)
LAM-8		脉冲振荡激光 (50 占空比、5mm 振幅、100Hz) + 轧制 (15kN)
LAM-9		振荡激光 (5mm 振幅、100 Hz) + 轧制 (15kN)
LAM-10		振荡激光 (5mm 振幅、100Hz) + 轧制 (15kN)

成形完成后, 样品采用线切割机沿沉积方向 (Z 向) 和行进方向 (X 向) 取样, 以便后续组织与性能测试。金相样品经镶嵌、磨抛与腐蚀制备, 腐蚀剂为 Kroll 试剂, 其成分为 $\text{HF}+\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}$ (1:2:17), 腐蚀时间控制在 15~18s 之间, 以显露 α 相与 β 相边界。用于 EBSD 分析的样品在抛光后进行多次轻腐蚀, 以去除表面应变层并获得高质量衍射图像。

显微组织采用光学显微镜和扫描电子显微镜观察, 以检测磨屑形貌以及磨损体积与微观形貌分析。扫描电子显微镜配备能谱分析仪 (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS), 可以利用表面电子进行能谱分析测试。电子背散射衍射 (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 用于低倍宏观晶粒的观测。X 射线衍射仪 (X-ray Diffraction, XRD) 用于对试样的成分和退火加工后试样表面成分进行检测。

3 力学性能测试条件

根据不同试件取样条件, 室温拉伸性能测试采用片状 (图 1) 试样, 测试过程按 GB/T 228.1 标准执行。除特殊描述外, 在试验过程中, 从开始试验至达到屈服强度期间, 采用应变速率控制, 应变速率为 0.005mm/min, 发生屈服之后, 切换横梁位移速率为 5mm/min。

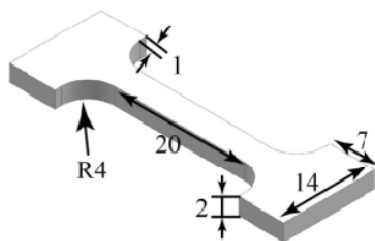


图1 拉伸片状试样

将上文中测试的 EBSD 的样品进行表面打磨抛光至光滑后，每个样品测试五个点，参数使用默认设置 Test force=100mN, Min force=0.2mN, Speed=1.025mN/sec, Hold time=0 sec, 得到维氏硬度数据和图表。

4 结果与分析

4.1 增材制造 TC4 合金相组织分析

不同工艺下单道直壁宏观组织差异明显。低倍组织以等轴晶组织为主，高倍组织为片层状组织。未轧制试样（LAM-1、3、5、7）晶粒为粗大的柱状晶，最大晶粒尺寸超过 7 mm。施加 15KN 轧制后，焊道宽度显著增大，晶粒细化至 200 μm 以下。脉冲激光与振荡激光的加入会进一步减小晶粒尺寸。

从 Y-Z 截面的组织形貌可见，试样中部晶粒受挤压呈现出与 X 方向呈一定角度的扁平状等轴晶，两端为细小等轴状晶粒。道间两侧的凹陷部分易形成尺寸较大的晶粒，存在组织不均匀性，可能引发应力集中，腐蚀-磨损下易成为裂纹萌生位点。

未经轧制处理的 TC4 试样的微观组织形貌，存在较大的晶粒及柱状晶结构，各向异性强；轧制后微观组织变得更细小均匀， α 相和 β 相的边界清晰，各向异性降低。连续激光（LAM-1）、脉冲激光（LAM-3）与振荡激光（LAM-5）均能改善均匀性。脉冲振荡激光耦合工艺（LAM-7），反而均匀性降低，各向异性增强。随着送丝速度的增加，冷却速率降低，晶粒长大并形成树枝晶结构。轧制通过晶粒细化和取向随机化提升整体力学均匀性，提高了材料质量和减少了微观缺陷。

热处理是让打印试样在 850 $^{\circ}\text{C}$ 高温下保温两小时后空气中自然冷却。该温度位于 TC4 的 $\alpha+\beta$ 两相区（低于 β 转变点约 980 $^{\circ}\text{C}$ ）。此时， α 相与 β 相间的元素扩散活跃，促进两相体积分数向平衡状态转变。缓慢的空冷速率使从 β 基体中以片层形态析出，形成典型的双态组织——由等轴初生 α 相和转变 β 基体中的次生 α 片层构成。与未退火样品相比，退火后原先的针状或板条状 α' 马氏体相转化为平衡 α 相，轧制破碎的弥散 β 相聚集并长大为短棒状 β 相。这种转变易使得材料的强度降低，塑性提高。退火处理促使 α 相和 β 相的转变，在后续的时效过程中分解并形成细小的针状 α 相或层状 $\alpha+\beta$ 相，晶粒间连接更紧密，减少位错密度和各向异性。

4.2 增材制造 TC4 合金晶粒尺寸与结构分析

通过 EBSD 分析，可以观察到 LAM-1、LAM-5、LAM-6、LAM-8 和 LAM-10 工艺条件下制备的合金样品具有不同的晶粒尺寸分布。在 LAM-1 中因高能量密度激光导致的瞬时热梯度 G 增加，凝固速率降低，促进了两相晶粒外延生长（3-7 μm ）。振荡激光（LAM-5），通过引入周期搅拌，降低热梯度，使熔池温度分布更加均匀，晶粒尺寸有所减小。LAM-6（振荡激光+轧制）工艺中，轧制引入的塑性变形激活动态再结晶机制，形成亚晶界，同时轧制破碎晶粒，抑制晶粒生长，晶粒集中在 1~4 μm 。LAM-8（脉冲振荡激光+轧制）周期性热输入，并对熔池产生冲击效应，促进了非均匀形核，同时轧制细化晶粒，使得晶粒尺寸较 LAM-6 进一步减小。当送丝速度从 4 m/min 增加到 6 m/min（LAM-10）时，晶粒尺寸增大，但分布较为集中。

根据相邻晶粒取向之间的取向角 θ ，晶界可分为两种类型：高角度晶界（High - Angle Grain Boundary, HAGB）和低角度晶界（Low - Angle Grain Boundary, LAGB）。Jiang 等^[14]的研究表明，与 LAGBs 相比，HAGBs 在阻碍位错运动方面表现出更优越的能力，有助于抑制甚至阻止裂纹扩展，从而提升合金的整体韧性及其他理想性能。LAGBs 的取向角范围为 2 $^{\circ}$ ~ 15 $^{\circ}$ ，而 HAGBs 的取向角大于 15 $^{\circ}$ 。TC4 样品中晶界类型以 HAGBs 为主。由图 2 可以看出，LAM-1 晶粒尺寸较大且分布较离散，低角度晶界（LAGBs）比例为 9.4%。引入振荡激光的 LAM-5 低角度晶界比例增加至 16%。振荡激光引起周期性温度波动，激活位错运动和晶界迁移，使晶粒结构更细小均匀。LAM-6 工艺中结合轧制，低角度晶界比例降至 7.1%。轧制过程促进了动态再结晶的发生，使晶粒间取向差角度增大，高角度晶界比例显著提升。这一结果表明，轧制工艺能够有效细化晶粒并改善其取向一致性。脉冲振荡激光结合轧制的 LAM-8 工艺优化了晶粒结构，低角度晶界比例增加到 11.7%。脉冲激光的高能量密度和快速冷却速率不仅有助于形成更细小的晶粒，还能促进更均匀的晶界分布。送丝速度从 4 m/min 增加到 6 m/min 时，低角度晶界比例增加到 15%。这些动态变化最终导致材料的微观组织从以高角度晶界主导的细晶结构，转向含有更多亚晶和低角度晶界的复合结构。尽管晶粒尺寸略有增大，但低角度晶界的形成优化了晶界化学稳定性，从而在耐腐蚀性方面表现出积极影响。

重构 β 相的极图（Inverse Pole Figure, IPF）与晶粒尺寸的统计分析结果表明，未经轧制的晶粒呈柱状形貌，而轧制后的晶粒则转变为等轴状形貌。由于未轧制试样的晶粒尺寸过大，仅对轧制后的增材制造 TC4 合金进行统计。大部分晶粒尺寸小于 200 μm ，其中 LAM-6 样品的平均晶粒尺寸最小，为 71.3 μm 。随着送丝速度的增加，平均晶粒尺

寸呈增大趋势, LAM-10 的平均晶粒尺寸达到 $126.9\mu\text{m}$, 并出现接近 $900\mu\text{m}$ 的较大尺寸晶粒。这可能是由于熔池稳定性变差, 晶粒生长速度不一, 同时还可能干扰同步轧制正常作用、减弱其细化晶粒效果, 最终产生不均匀的晶粒组织。

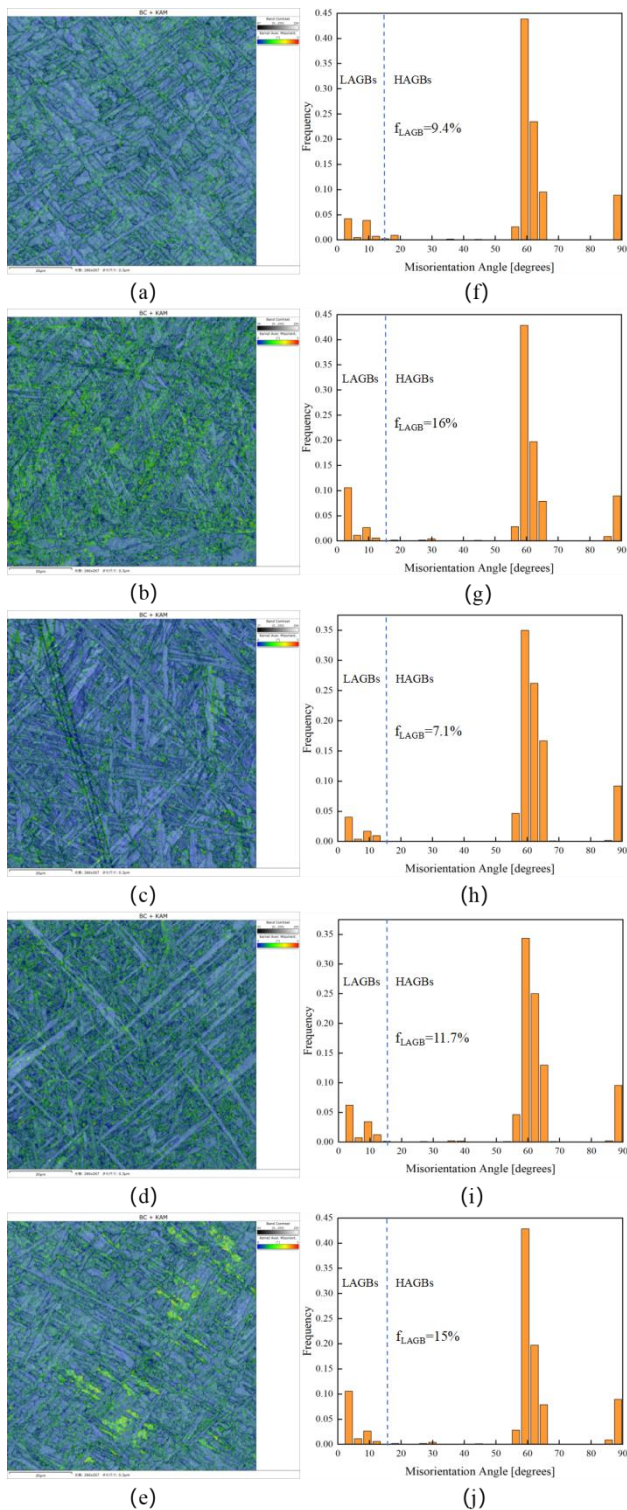


图2 TC4 合金样品的晶界分布图和取向差角分布统计图(a、f)LAM-1、

(b、g) LAM-5、(c、h) LAM-6、(d、i) LAM-8、(e、j) LAM-10

为探究热处理对材料微观组织的影响机制, 对热处理前后的轧制试样进行了 XRD 测试。热处理后 α 相的衍射峰呈现出明显的尖锐化且右移, 表明晶粒尺寸增大且残余应力显著降低, 择优取向程度减弱; β 相的衍射峰特征变化并不显著。根据布拉格定律 ($2d\sin\theta=n\lambda$), 衍射峰位置与晶面间距 (d 值) 呈负相关关系, 晶面间距的减小将导致衍射角 (2θ) 增大, 退火后观察到的 XRD 峰右移现象主要归因于晶格常数的减小和残余应力的释放, 这一变化证实了材料微观结构的均匀化和稳定性得到改善。

4.3 增材制造 TC4 合金硬度分析

通过不同工艺下硬度对比结果可知, 轧制参数试样的硬度显著高于未轧制试样, 且硬度波动范围更小, 组织硬度分布更加均匀。此外, 振荡激光 (LAM-6) 与轧制工艺的协同作用对试样硬度的提升效果明显优于脉冲激光与轧制复合工艺 (LAM-4), 而单独使用振荡激光 (LAM-5) 对硬度的提升效果则低于单独使用脉冲激光 (LAM-3)。而较高的送丝速度 (LAM-10) 对材料硬度产生了负面影响。通过对比发现, 试样 9 的硬度值最大, 达到 342HV; 试样 6 的硬度值次之, 为 339HV, 但总体上, 轧制后试样的硬度差异较小。

4.4 增材制造 TC4 拉伸性能分析

通过不同工艺下在室温下 X 向与 Z 向的拉伸生成的拉伸曲线可知, X 向的极限抗拉强度优于 Z 向。X 方向的抗拉强度和屈服强度均大于 Z 方向, 而延伸率分布则无明显规律, 而 Z 方向是逐层堆积的方向, 每一层的热循环会导致热影响区和层界线的形成, 强度较低。施加轧制力的试样的抗拉强度、屈服强度与延伸率优于未轧制试样。图 3 为热处理前拉伸性能数据。由图可以看出, 与连续激光相比, 脉冲激光、振荡激光与脉冲振荡激光对 TC4 合金的抗拉强度与屈服强度无明显优化, 延伸率有所降低。随着送丝速度的增加, TC4 合金拉伸性能有所下降。经对比, 试样 LAM-6 的综合力学性能最佳, 其 X 向抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 961.5MPa、844.1MPa 和 15.1%; Z 向抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 891.1MPa、802MPa 和 12.1%, LAM-4 与 LAM-8 拉伸性能略微有所降低。

图 4 为热处理后拉伸性能数据。由图可知, X 向的极限抗拉强度均有所下降, Z 向的极限抗拉强度有所上升。退火处理后的拉伸强度数据对比如图 4 所示。通过对比, 热处理后 X 方向的抗拉强度和屈服强度依旧均大于 Z 方向。与未热处理试样对比, X 方向与 Z 方向的抗拉强度和屈服强度差距明显减小。X 方向的强度略微减小, Z 方向上的

强度增加,整体强度均匀化。延伸率在热处理后明显提升,这是由于热处理改善了材料的微观结构,减少了应力集中和脆性相含量,从而显著提高了 TC4 合金的塑性和变形能力。此外,送丝速度的提升,拉伸性能仍为下降趋势,与未处理试样规律一致,但整体拉伸强度下降率降低,表明退火处理后送丝速率对 TC4 合金的负面影响有所改善。RLAM-8 试样在热处理后性能得到了显著的优化,综合力学性能最佳,其 X 向抗拉、屈服强度和延伸率分别为 900MPa、839MPa 和 13.3%;Z 向抗拉、屈服强度和延伸率分别为 884.8MPa、789.4MPa 和 12.3%。RLAM-4、RLAM-6 与 RLAM-9 拉伸性能略微有所下降。

5 结论

本研究系统探讨了激光电弧复合增材制造工艺及退火处理对 TC4 钛合金显微组织与力学性能的影响。振荡激光与同步轧制协同作用可有效细化晶粒并改善组织均匀性,显著减弱各向异性。轧制引入的塑性变形激活了动态再结晶,使柱状晶向等轴晶转变,晶粒平均尺寸显

著降低。而且单向轧制能明显细化晶粒,但对复杂形貌区的粗晶仍需多向轧制或后加工优化。送丝速度的增加导致单位面积轧制力降低,轧制力的减弱减少了对晶粒的塑性变形和动态再结晶的驱动力,从而削弱了晶粒细化的效果。

退火处理促使 α' 马氏体向平衡 α 相转变,并伴随 β 相的聚集与长大,形成等轴-片层双态组织。该过程释放了残余应力并降低了晶格常数,材料的组织稳定性与塑性得到提升。力学性能分析显示不同激光模式与轧制协同辅助电弧增材制造工艺显著提高了 TC4 合金的硬度与拉伸性能, LAM-6 工艺样品表现出最优的综合性能。退火处理进一步均化了 X/Z 方向的强度差异,延伸率显著提高。过高的送丝速度削弱了微轧制细化作用,对力学性能产生不利影响。

基金项目: 国家自然科学基金(52175169), 项目名称: 基于拓扑优化的金属超滑表面微纳形貌构建及界面调控研究。

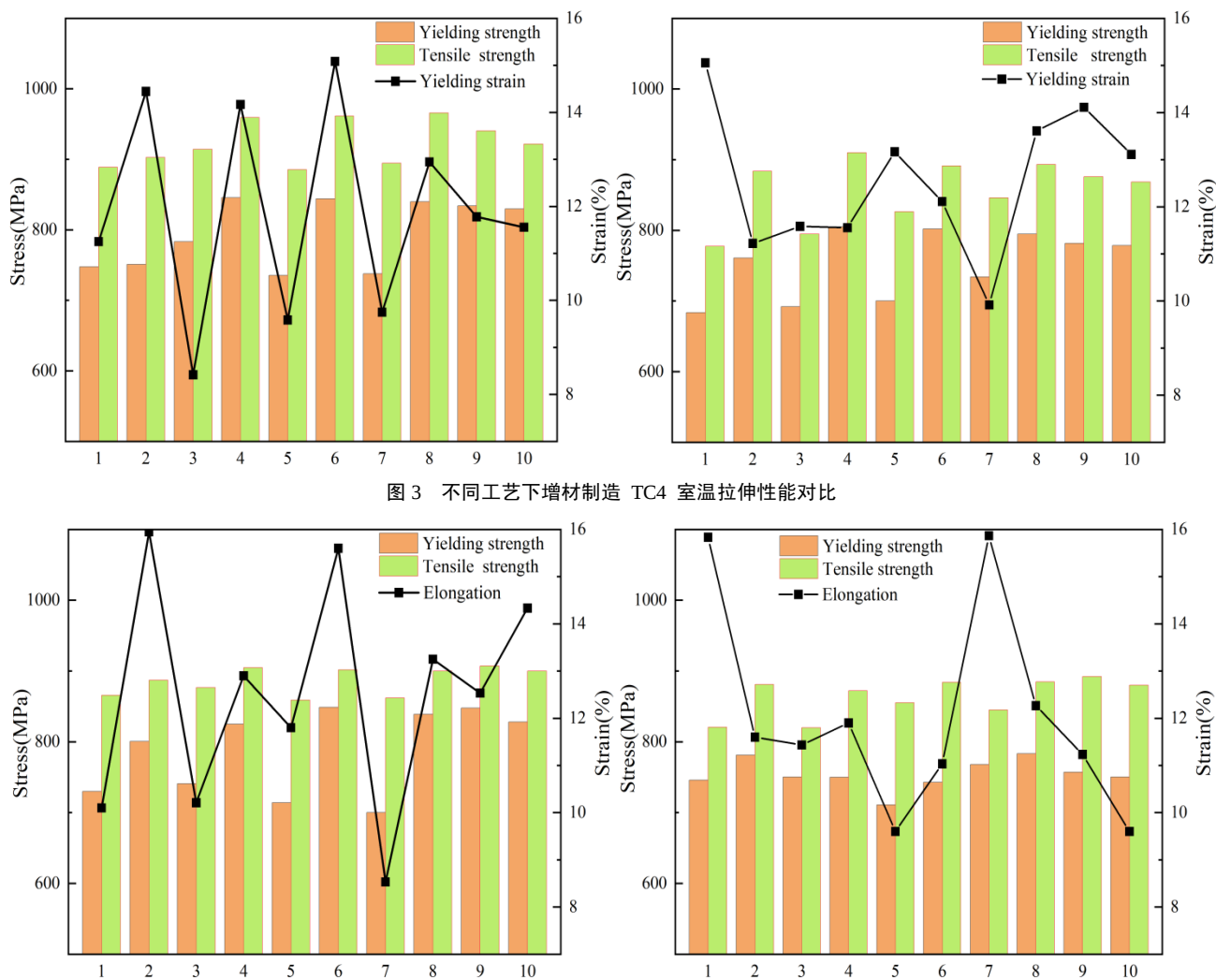


图4 热处理后室温拉伸性能对比

[参考文献]

- [1]SHAO L,LI W,LI D,et al.A review on combustion behavior and mechanism of Ti alloys for advanced aero-engine[J].Journal of Alloys and Compounds,2023(960):170584.
- [2]RAZA D,K UMAR G,UZAIR M,et al.Development and heat treatment of β -phase titanium alloy for orthopedic application[J].Materials Today:Proceedings,2022(50):649-654.
- [3]YANG X,LIN B,ZHANG H,et al.Influence of stress on the corrosion behavior of Ti alloys: A review[J].Journal of Alloys and Compounds,2024(985):173346.
- [4]OKONKWO B O,LI Z,LI L,et al.Multifaceted study of the galvanic corrosion behaviour of titanium-TC4 and 304 stainless steel dissimilar metals couple in deep-sea environment[J].Electrochimica Acta,2025(517):145753.
- [5]OBASI G C,BIROSCA S,FONSECA J Q D.Effect of p grain growth on variant selection and texture memory effect during $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ phase transformation in Ti-6 Al-4 V[J].Acta materialia,2012,60(3):1048-1058.
- [6]卢秉恒.增材制造技术——现状与未来[J].中国机械工程,2020,31(1):19-23.
- [7]NAJMON J C,RAEISI S,TOVAR A.Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry[M].Additive Manufacturing for the Aerospace Industry.Amsterdam:Elsevier Science,2019.
- [8]王泽宇,冯泉,杨森,等.激光粉末床熔融 3D 打印 TC4 钛

合金的研究进展[J].阀门,2025(2):210-219.

[9]邹定锦,张亮,吴文恒.激光粉末床熔融成形 TC4 钛合金疲劳与断裂韧性研究进展[J].材料工程,2024(9):1-13.

[10]SIDDQUI N A,MUZAMIL M,JAMIL T,et al.Heat sources in wire arc additive manufacturing and their impact on macro-microstructural characteristics and mechanical properties – An overview[J].Smart Materials in Manufacturing,2025(3):100059.

[11]CHAOLIN T,RUNSHENG L,JINLONG S,et al.Review on field assisted metal additive manufacturing[J].International Journal of Machine Tools and Manufacture,2023(189):104032.

[12]PARDAL G,MARTINA F,WILLIAMS S.Laser stabilization of GMAW additive manufacturing of Ti-6Al-4V components[J].Journal of Materials Processing Technology,2019(272):1-8.

[13]JIMING L,KAIYU L,HAIFEI L,et al.Achieving high strength and ductility in selective laser melting Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening[J].Journal of Alloys and Compounds,2022(899):163335.

[14]JIANG P F,NIE M H,ZONG X M,et al.Microstructure and mechanical properties of TC4/NiTi bionic gradient heterogeneous alloy prepared by multi-wire arc additive manufacturing[J].Materials Science and Engineering:A,2023(866):144678.

作者简介：钱梓尧（2002.9—），男，毕业院校：英国南安普顿大学，所学专业：电子工程。