

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.02

面向深海装备的Ti-6Al-4V合金增材制造： 组织及性能研究

王怀慎¹, 董 鹏^{1,2*}, 汪卓然¹, 贾本业¹, 胡焱玲¹, 田胜云¹

1. 中国船舶集团汾西重工有限责任公司, 山西 太原 030027

2. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024

摘 要: 为解决深海装备用TC4钛合金在传统锻造和铸造加工中遇到的难题, 采用激光选区熔化技术(SLM)进行TC4钛合金的制备, 并对其微观组织和力学性能进行了深入研究。研究发现, SLM制备的TC4钛合金呈现针状 α' 马氏体组织, 与传统轧制态的等轴晶粒结构有显著不同, 且在SLM样品中几乎未检测到 β 相。SLM制备的TC4钛合金展现出了5.36 GPa的纳米硬度, 显著高于传统轧制态的1.54 GPa。此外, 其抗拉强度高达1 123.9 MPa, 延伸率为9.78%, 尽管冲击韧性为43 J, 略低于轧制态TC4的59.5 J, 但依然满足国家标准要求。研究表明, SLM技术制备的TC4钛合金在力学性能上不仅满足了深海装备的应用标准, 而且在某些性能上超越了传统材料, 对深海装备的发展具有重要的推动作用。

关键词: 激光选区熔化技术(SLM); TC4钛合金; 微观组织; 力学性能; 深海装备

中图分类号: TG457.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)03-0007-08

Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy for Deep-Sea Equipment: A Study on Microstructure and Properties

WANG Huaishen¹, DONG Peng^{1,2*}, WANG Zhuoran¹, JIA Benye¹, HU Yanling¹, TIAN Shengyun¹

1. China Shipbuilding Group Fenxi Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030027, China

2. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract: This study aims to address the challenges encountered in traditional forging and casting processes when working with TC4 titanium alloy for deep-sea equipment. The study employs Selective Laser Melting (SLM) technology for the fabrication of TC4 titanium alloy and conducts an in-depth investigation of its microstructure and mechanical properties. It was found that the TC4 titanium alloy prepared by SLM exhibits a needle-like α' martensitic structure, which is significantly different from the equiaxed grain structure of the traditional rolled state, and almost no β phase was detected in the SLM samples. The TC4 titanium alloy prepared by SLM demonstrated a nanohardness of 5.36 GPa, which is substantially higher than the 1.54 GPa of the traditionally rolled state. Moreover, it has a tensile strength of up to 1123.9 MPa and an elongation rate of 9.78%. Although the impact toughness is 43 J, slightly lower than the 59.5 J of the rolled TC4, it still meets the national standard requirements. This study indicates that the TC4 titanium alloy prepared by SLM technology not only meets the application standards for deep-sea equipment in terms of mechanical properties but also surpasses traditional materials in some aspects, playing a significant role in advancing the development of deep-sea equipment.

Keywords: selective laser melting (SLM); TC4 titanium alloy; microstructure; mechanical properties; deep-sea equipment

引用格式: 王怀慎, 董鹏, 汪卓然, 等. 面向深海装备的Ti-6Al-4V合金增材制造: 组织及性能研究[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 7-14.

Citation: WANG Huaishen, DONG Peng, WANG Zhuoran, et al. Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy for Deep-Sea Equipment: A Study on Microstructure and Properties[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 7-14.

收稿日期: 2024-05-14 修回日期: 2024-05-27

基金项目: 山西省重点研发计划(202102150401003)

作者简介: 王怀慎(1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事先进材料增材制造。

通讯作者: 董 鹏(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事焊接与增材制造方面的研究。E-mail: dongpeng@tyut.edu.cn。

0 引言

我国海岸线长达 18 000 公里,海域面积 300 万平方公里,资源丰富。深海装备对于海洋强国战略和海军战略转型至关重要,包括军事装备、载人/无人潜水器等。随着海洋战略的扩展,深海装备面临高水压和腐蚀挑战,对材料要求更高。钛合金以其轻质、高强度、耐蚀等特性成为深海装备的理想材料,有助于提升装备性能,被广泛应用于世界深潜器制造中^[1-3]。钛合金在深海装备制造中虽有优势,但也面临加工难题。主要问题有:屈服比大导致加工难度增加;热导率低易造成刀具磨损和材料应力集中;对 H、O、N 极其敏感(300 °C 以上快速吸氢、450 °C 以上快速吸氧、600 °C 以上快速吸氮);超规格原材料需求与传统制备技术瓶颈;导致制备效率低、稳定性差、成本高^[4-6]。

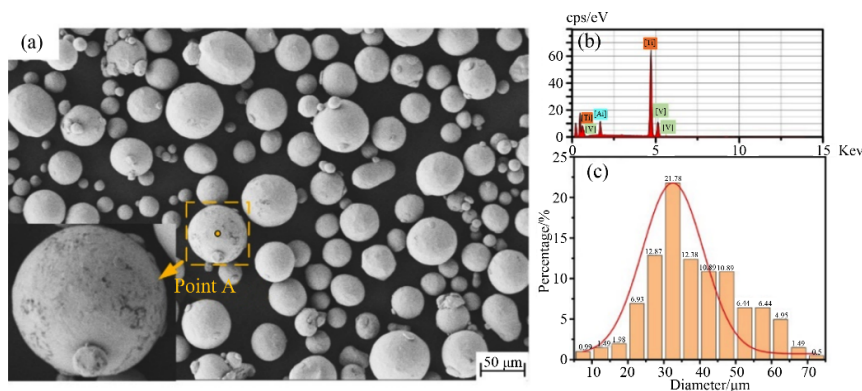
但这些挑战也促进了增材制造技术的变革性应用。SLM 以其高设计自由度、高材料利用率、降低加工难度、小热影响区和快速定制化生产等优势,为钛合金零件的制造提供了创新性解决方案,尤其在制造复杂结构和轻量化设计的深海装备部件方面展现出巨大潜力^[7-8]。尽管当前对 SLM 技术制备 TC4 钛合金的研究已经取得了较为成熟的进展,但是,研究指出^[1]SLM 过程中的工艺参数对制件的致密度和力学性能具有显著影响。这些参数同样影响着内部孔隙和裂纹等缺陷的形成与扩展。通过精细的工艺参数优化,可以实现高密度和高强度 Ti-6Al-4V 合金的 SLM 制造,具体表现为达到了

99.45% 的相对密度、1 188 MPa 的抗拉强度以及 9.5% 的断裂伸长率。此外,拉伸测试结果表明,SLM 制备的 Ti-6Al-4V 合金在强度上超过了锻造 Ti-6Al-4V 合金,但在冲击韧性方面则相对较低。在 SLM 技术制备 Ti-5Al-2.5Sn 钛合金时,激光能量输入对材料的孔隙率有显著影响,较高能量输入易形成球形孔隙,而较低能量输入则导致未熔合缺陷^[9]。Yao 等人^[5]对 SLM 技术成型 TC4 钛合金的工艺参数与拉伸性能关系进行深入研究,然而与基板材料(轧制态)的比较尚不明确。鉴于冲击韧性是材料在快速冲击或冲击载荷下吸收能量、防止断裂的关键性能指标,其对深海装备的安全性和可靠性至关重要;同时,纳米压痕测试对于深入理解材料在微观尺度上,尤其是在深海高压环境下的性能表现具有重要意义。

本文以 SLM 技术制备的 Ti-6Al-4V(TC4)作为研究对象,通过与轧制态 TC4 合金的对比分析,全面探究 SLM 制备的 TC4 合金的微观组织结构及力学性能。研究核心目标是验证 SLM 制备的 TC4 合金在深海装备应用中的可靠性,以期为其在海洋工程领域的实际应用提供科学依据和技术支持。

1 试验方法

试验使用 Ti64 气雾化粉末(化学成分为 Ti-5.89Al-4.2V wt.%)作为原料,成功制备了 Ti-6Al-4V 合金试样。该合金粉末主要以球形颗粒形式存在,表面光滑,平均粒径约为 38 μm ,如图 1 所示。



(a)粉末形貌;(b)元素分析;(c)颗粒分布频率

图1 TC4粉末

Fig. 1 TC4 powder

SLM成型工艺参数详见表1。

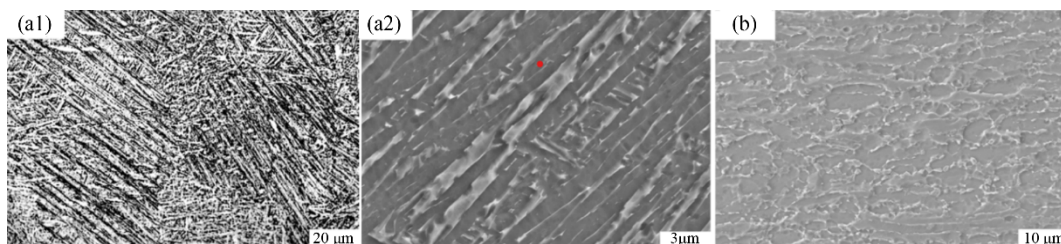
表1 SLM工艺参数

Table 1 SLM process parameters

光斑直径 /mm	激光功率 /W	扫描速度 /(mm·s ⁻¹)	层厚 /mm	扫描间距 /mm
150	190	1200	0.03	0.03

试样制备完成后,首先采用砂纸进行逐级打磨抛光,随后进行特定的化学蚀刻处理(蚀刻液配比为HF:HNO₃:H₂O=2:6:92),以揭示合金的微观组织结构。之后,利用光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)和背散射衍射仪(EBSD)对合金的微观组织进行了详细的分析和表征。

为了全面评估SLM制备的Ti-6Al-4V合金的力学性能,进行了纳米压痕测试以测定硬度,以及电子万能试验机上的拉伸测试(拉伸速率设定为0.5 mm/min),从而获得了合金的硬度和拉伸性能数据。此外,还通过冲击试验机对试样的冲击韧性进行了测量,以评价其在深海中受到冲击负荷时的韧性表现。



(a1)SLMed TC4的OM图

(a2)SLMed TC4的SEM图

(b)轧制态TC4的SEM图

图2 成形试样的微观组织

Fig. 2 Microstructure of the formed samples

2.1.2 物相分析

XRD衍射图谱如图3所示,与标准PDF卡片对比,SLMed TC4中几乎无 β 组织生成,而轧制态相的衍射峰明显。在SLM过程中,激光束的高能量输入和快速扫描速度导致材料的冷却速率非常快,通常可达 $10^3 \sim 10^8$ °C/s。这种快速冷却条件有利于 α' 马氏体的形成,因为 α' 马氏体的形核和生长速率通常远高于形成平衡 β 相的临界冷却速度 410 °C/s^[10]。同时由于冷却速率快, β 相的形成和稳定化时间不足。对于轧制板TC4钛合金进行XRD分析中,观察到 α -Ti相的衍射峰为主导。在衍射角约 57° 处,存在可辨识 β -Ti的衍射峰为 $\beta(202)$ 。这可能是因为在轧制过程中的高应变率和较低的热处理温度导致 α 相

2 试验结果与讨论

2.1 微观组织及物相分析

2.1.1 微观组织

SLM试样微观组织如图2所示。SLM试样内部组织相互交叉排列,网篮状组织排列明显,网篮状组织由针状 α' 马氏体组成。图2a2为SLMed TC4微观组织的SEM形貌。微观组织特征是马氏体以交织的方式排列,形成网篮状结构,并且这些马氏体组织与晶界呈 45° 生长。与图2a1的OM结果相符,这两个不同的成形面上,针状 α' 马氏体是主要组织形态,尺寸基本一致,宽度在 $0 \sim 1$ μm 之间,长度则在几十到几百微米不等。

轧制态TC4的组织如图2b所示,轧制过程使得晶粒被拉长。主要由等轴 α 晶粒(图中黑色区域)、 β 转变组织(图中白色区域),其中 β 转变组织通常包含片状 $\alpha+\beta$ 组织、原始 β 晶粒边界上的初始 α 组织,以及初生 α 组织与片状 $\alpha+\beta$ 组织之间的 β 组织。

的稳定化,并促使部分 β 相在冷却时转变为 α 相。

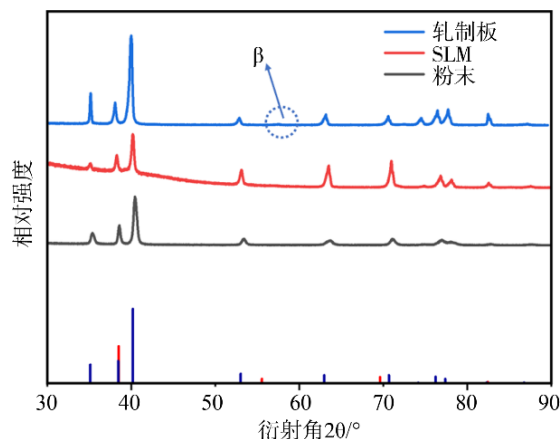


图3 XRD图

Fig. 3 X-ray diffraction (XRD) pattern

2.1.3 EBSD 分析

SLMed TC4 晶粒尺寸主要集中在 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 之间, 平均尺寸为 $2.5\ \mu\text{m}$ (见图 4a)。而传统轧制的 TC4 钛合金晶粒则呈现出顺着轧制方向的拉伸状结构, 其平均晶粒尺寸约为 $3.7\ \mu\text{m}$ 。这种差异归因于增材制造过程中较高的冷却速率, 高冷却速率有助于形成更细小的晶粒。这些细小晶粒在随后的冷却过程中没有充分时间长大只能保持较小尺寸^[11]。相较之下, 轧制板 TC4 钛合金由于冷却速率较低, 尤其是在轧制后未进行快速冷却处理时, 材料有更充分的时间进行晶粒增长, 导致较大的等轴晶粒形成。

SLMed TC4 中 α' 马氏体组织仍占主导地位为 0.997, β 组织含量仅为 0.003, SLM 快速冷却过程中的“冷冻效应”导致部分高温稳定的 β 在室温下得以

保留 (见图 4b)。对于轧制板的 TC4 钛合金, β 组织含量显著增加至 0.055, 由于塑性变形和位错积累, 部分 β 组织得以保留。这样可以为材料提供更好的塑性和韧性, 但也会导致力学性能中的强度和硬度相对较低。

SLMed TC4 晶界附近区域的颜色较深, 表明斯密特因子分布与晶粒内部有所不同, 推测是晶界在变形协调中所起的影响所致 (见图 4c)。斯密特因子的平均值分别是 0.320 03 和 0.372 69, 代表了各自材料的屈服强度, 其中更高的斯密特因子意味着滑移系统启动的可能性更大, 而更低的斯密特因子表示更高的屈服强度^[11]。可预测 SLMed TC4 具有相对较高强度, 而轧制板的 TC4 尽管屈服强度相对较低, 却可能提供更优的塑性和韧性^[12]。

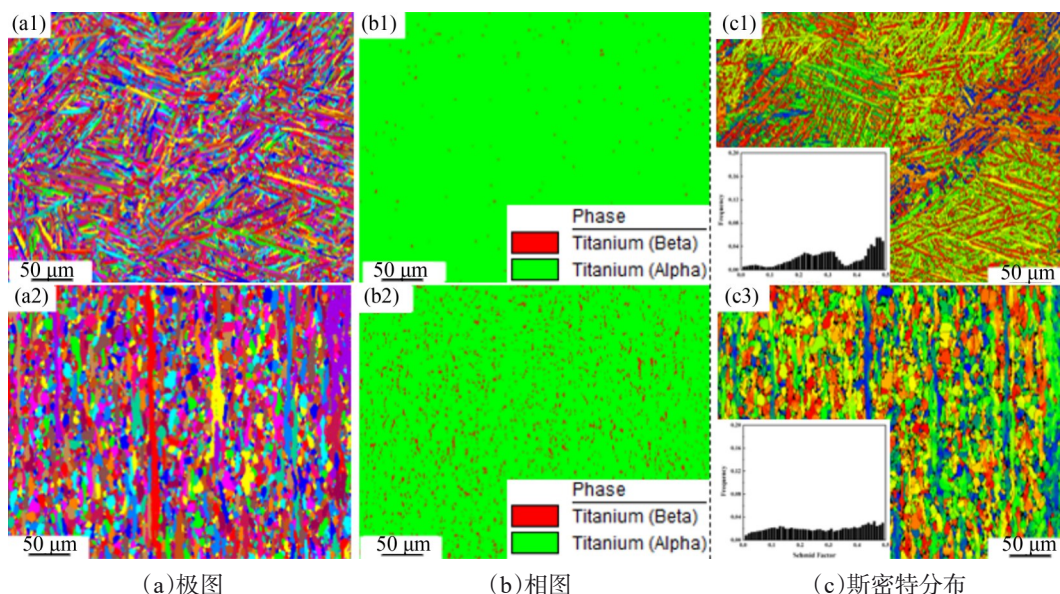


图4 SLMed TC4 和轧制态 TC4 EBSD 图

Fig. 4 SLMed TC4 and rolled TC4 EBSD diagram

2.2 力学性能

2.2.1 纳米压痕

从图 5a 中的纳米压痕 P-h (载荷-位移) 曲线可以看出, 不同成形方式的 TC4 合金在加载和卸载过程中显示出一致的趋势, 且多次测量结果一致, SLMed 和轧制态 TC4 平均压痕深度为 1 239.1 nm 和 706 nm, 压痕形貌如图 5c 所示, 轧制态被压痕破坏更加明显。

与轧制板 TC4 相比, SLMed TC4 合金在相同载荷下表现出更好的抵抗变形能力, 即硬度更高, 且

变形量和变形速率更小。SLMed 试样的高峰值硬度为 229.9 GPa, 相比轧制板 TC4 的 20.3 GPa 有大幅提升。在卸载阶段, SLM 试样的纳米硬度稳定在 5.36 GPa, 而轧制板 TC4 的稳定硬度仅为 1.54 GPa。SLM 试样硬度的提高可归因于成型过程中的反复加热, 促进了位错的活动并增强了晶界强化效果, 导致位错密度升高并在材料内部形成了“钉扎”效应, 进而提高了抵抗塑性变形的能力^[13-14]。在深海装备的应用中, 这种提高的变形抗力意味着激光增材制造的 TC4 合金能够更好地承受高压和动态负

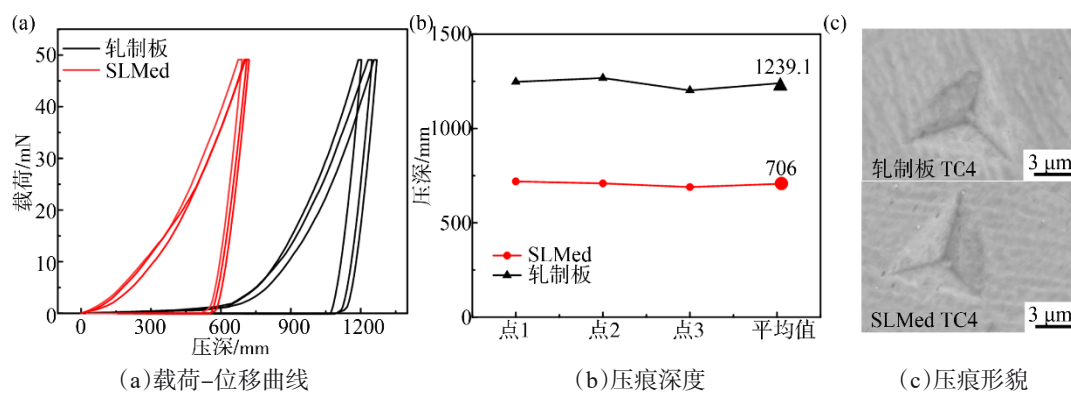


图5 成形试样的纳米压痕行为

Fig. 5 Nanoindentation behavior of the formed samples

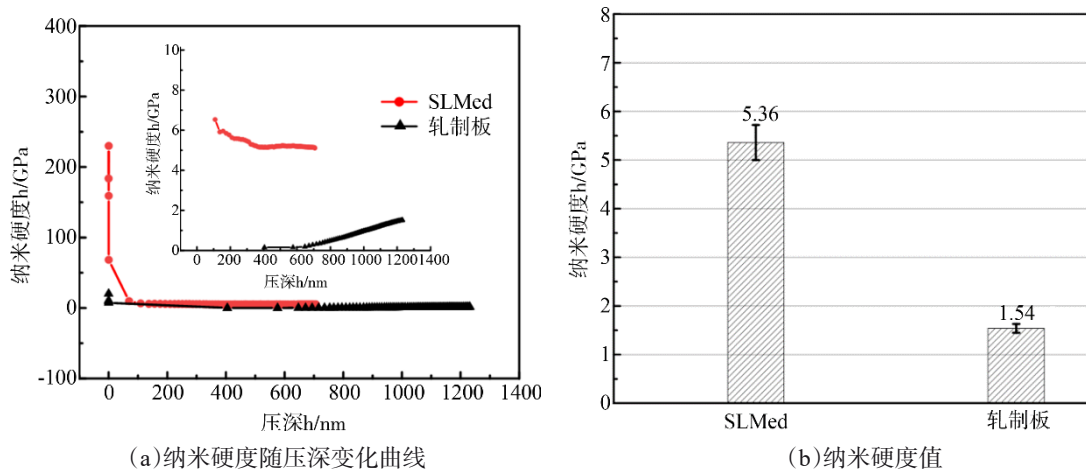


图6 纳米硬度

Fig. 6 Nanohardness

载,确保装备的结构完整性和长期稳定性^[15]。

2.2.2 拉伸性能

拉伸性能在衡量材料力学性能上起着基础且关键的作用,两种试样的拉伸性能如图7所示,均满足GB/T3621—2022的最低要求。SLMed钛合金在高压深海环境中展现的高抗拉强度(1 123.9 MPa)是维持结构完整性的重要因素。这种强度使得材料能承受重大负载而不发生断裂,对于静态负载尤其关键。但是,SLMed试样的低延伸率(9.78%)表明其在冲击负荷或过度变形下的塑性差,这可能导致在没有足够变形能力吸收能量的情况下容易发生脆性断裂。

这种力学性能上的差异源于不同的微观结构。SLMed试样中含有的大量BCC结构针状马氏体 α' 马氏体,具有较少的滑移系,限制了材料在塑性变形时可供位错移动的路径数量,从而降低了塑性;

此外, α' 马氏体中的高钒含量通过固溶强化效应进一步阻碍了位错的移动,提高了强度,但牺牲了塑性。相比之下,轧制板TC4轧制板中 $\alpha+\beta$ 双相结构,尤其是 β 相的FCC结构提供了更多滑移系统,使得材料在拉伸过程中可以发生更多塑性变形,因此在延伸率上表现更优(14.58%),尽管牺牲了一些抗拉强度(946.4 MPa)。

拉伸断口的微观形貌分析如图8所示,结合以上的拉伸性能结果,不同成形方式制备的TC4合金展现出了不同的断裂特性,这些特性反映了各自的微观组织和成形过程的特点。韧窝的深度和大小反映了材料的塑性和加工硬化能力:韧窝越深大,说明材料在断裂前能够经受更多的塑性变形,表现出更好的塑性。相对于轧制态TC4,SLMed TC4合金试样的断口则显示了粗糙的表面、含有未熔化粉末颗粒,以及较大范围的解理面和撕裂棱,韧窝小

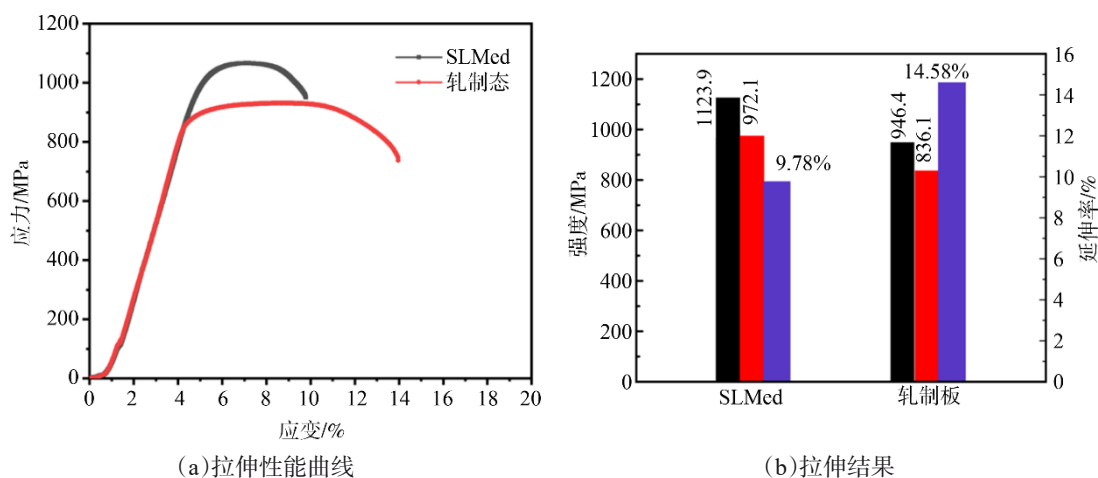


图7 拉伸性能

Fig. 7 Tensile properties

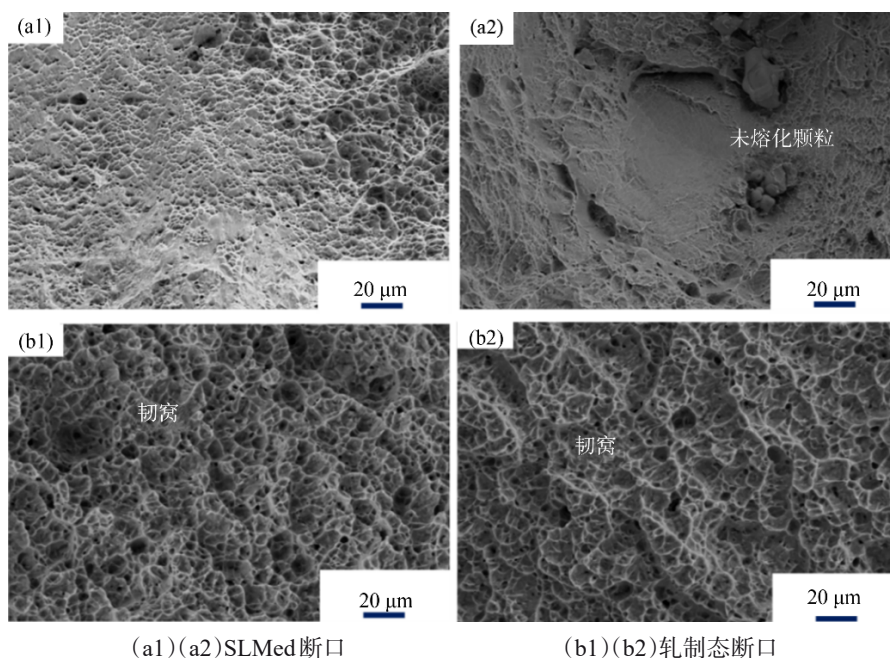


图8 拉伸断口

Fig. 8 Tensile fracture

而浅^[9,11]。这些特征指示了材料在受到拉伸力时发生了脆性断裂,这种断裂模式与SLM制造过程中快速的冷却速率和由此产生的非均匀微观组织有关。

2.2.3 冲击性能

冲击韧性是评价材料在突然受到撞击负载时抵抗破坏能力的重要性能指标。对于深海装备用增材制造的TC4钛合金来说,冲击韧性的高低直接关系到其在水下复杂压力环境和意外撞击下的结构完整性与安全性。高冲击韧性的材料能够在不断裂的情况下吸收更多的能量,这对于保证深海装

备在极端环境中的稳定运作至关重要。

图9为试样在室温下(25℃)的冲击性能,SLMed TC4的冲击韧性分别为43 J,相比传统轧制TC4的59.4 J显著降低。SLM工艺的高冷却速率可能导致过细的晶粒和应力集中,从而减少了材料的塑性变形能力和冲击抵抗性,微观组织的差异同样使得冲击韧性产生差异^[16-17]。通常情况下,相对轧制板TC4,增材制造由于快速冷却过程限制了 β 相的形成,而 β 相为材料的塑性变形提供了路径,使位错滑移更易于通过 β/α 界面。此外,由于 β 相尺寸较

小,滑移长度受限,降低了材料整体的变形均匀性。而在双态组织中,较多的 β 相有助于增加冲击载荷下的变形能力,使得材料能够吸收更多冲击能量,表现出更好的冲击韧性^[16]。

冲击试样的断口形貌如图10所示。SLMed试样的宏观断口相较于轧制板TC4更为平坦,剪切唇区域相对较小,显示了它们在冲击载荷下的变形能力低于轧制板TC4。微观形貌分析表明,增材试样的断口表面粗糙度低,韧窝的尺寸和深度均小于轧制板TC4,证明增材试样在冲击过程中经历的塑性变形较少。此外,增材试样表现出较不明显的空洞特征,解理特征和二次裂纹较为显著,特别是SLMed试样中的未熔化粉末颗粒,进一步降低了材

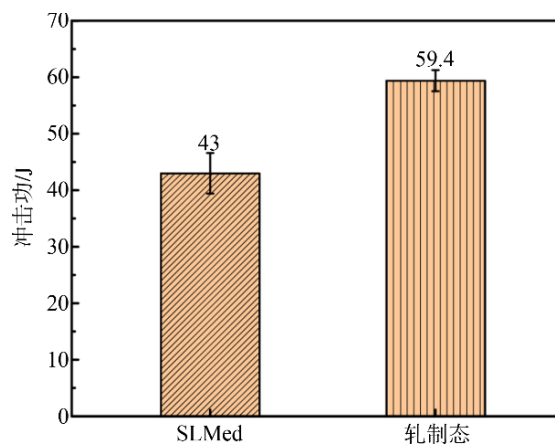


图9 冲击韧性

Fig. 9 Impact toughness

料的冲击韧性。

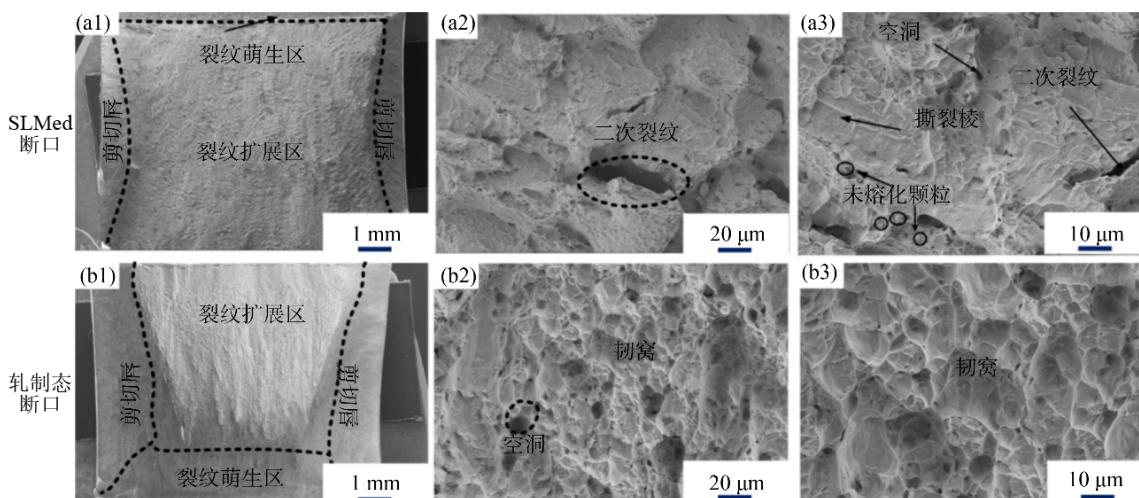


图10 冲击断口

Fig. 10 Impact fracture

3 结论

本研究通过对比分析激光选区熔化(SLM)技术制备的Ti-6Al-4V合金(TC4)与传统轧制态TC4合金的微观组织及力学性能,得出以下结论:

(1)SLM制备的TC4合金具有独特的网篮状微观组织,主要由针状 α' 马氏体组成,而轧制态TC4合金则主要由等轴 α 组织和拉长的 β 转变组织组成,两者在组织形态、含量和尺寸上存在显著差异,主要归因于SLM过程中快速冷却导致的“冷冻效应”以及轧制过程中的塑性变形和位错积累。

(2)SLM制备的TC4合金晶粒尺寸更小,平均约

为2.5 μm ,而轧制态TC4合金晶粒尺寸较大,平均约为3.7 μm 。细小晶粒的形成有助于提高材料的强度和硬度,但也降低了塑性变形能力。

(3)纳米压痕测试结果表明,SLMed TC4合金纳米硬度高达5.36 GPa,是传统轧制态TC4合金的3.5倍。在相同的载荷条件下,SLM试样的压入深度仅为706 nm,相当于轧制板TC4的56%,这表明SLMed TC4合金具有显著提升的纳米硬度和抗变形能力。

(3)SLMed TC4具有更高的抗拉强度,达到1 123 MPa,较传统轧制态的946 MPa有显著增加。尽管其延伸率略低于轧制态,为9.78%,但依然符合

国家标准。SLM TC4 合金的拉伸断口分析显示,未熔化的粉末颗粒会影响其延伸率。

(4)SLMed TC4 的冲击韧性为 43 J,略低于轧制态的 59.4 J。在冲击断口的微观结构中,SLMed TC4 的韧窝较浅,剪切唇也相对较小。这些发现表明,SLM TC4 的冲击韧性在后续研究中具有显著的提升潜力。

综上,SLM 技术制备的 TC4 钛合金在硬度和强度上优于传统轧制态,尽管冲击韧性略低,但仍具备良好的应用前景,对于深海装备等高性能应用具有积极影响。

参考文献:

- [1] SUN Q D, SUN J, GUO K, et al. Influences of processing parameters and heat treatment on microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V fabricated using selective laser melting[J]. *Advances in Manufacturing*, 2022, 10(4): 520-540.
- [2] DONG Y, HUANG S, WANG Y, et al. Stress corrosion cracking of TC4 ELI alloy with different microstructure in 3.5% NaCl solution[J]. *Materials Characterization*, 2022, 194: 112357.
- [3] CHERNEVA S, PETRUNOV V, PETKOV V, et al. Structure and Mechanical Properties of Milled and 3D-Printed Ti-6Al-4V Alloys for Subtractive and Additive CAD/CAM Manufacturing in Dentistry [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(21): 11958.
- [4] BOWER K, MURRAY S, REINHART A, et al. Corrosion Resistance of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy in Salt Fog Environment[J]. *Results in Materials*, 2020, 8: 100122.
- [5] YAO Z, HE M, YI J, et al. High-strength titanium alloy with hierarchical-microstructure design via in-situ refinement-splitting strategy in additive manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 80: 103969.
- [6] LEON A, KATARIVAS LEVY G, RON T, et al. The effect of strain rate on stress corrosion performance of Ti6Al4V alloy produced by additive manufacturing process[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 4097-4105.
- [7] HAMZA H M, DEEN K M, HAIDER W. Microstructural examination and corrosion behavior of selective laser melted and conventionally manufactured Ti6Al4V for dental applications[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2020, 113: 110980.
- [8] SUN D, GU D, LIN K, et al. Selective laser melting of titanium parts: Influence of laser process parameters on macro- and microstructures and tensile property [J]. *Powder Technology*, 2019, 342: 371-379.
- [9] WEI K, WANG Z, LI F, et al. Densification behavior, microstructure evolution, and mechanical performances of selective laser melted Ti-5Al-2.5Sn α titanium alloy: Effect of laser energy input [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 774: 1024-35.
- [10] DAI N, ZHANG L C, ZHANG J, et al. Distinction in corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy on different planes [J]. *Corrosion science*, 2016, 111(08): 703-710.
- [11] SIMONELLI M, TSE Y Y, TUCK C. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 616: 1-11.
- [12] WEN S, CHEN K, LI W, et al. Selective laser melting of reduced graphene oxide/S136 metal matrix composites with tailored microstructures and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2019, 175: 107811.
- [13] 谭孟曦. 利用纳米压痕加载曲线计算硬度-压入深度关系及弹性模量[J]. *金属学报*, 2005, 41(10): 1020-1024.
- TAN M X. Extracting Hardness-displacement Relations and Elastic Modulus Using Nanoindentation Loading Curves [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 41(10): 1020-1024.
- [14] ZHAO W, CHEN M, CHEN S, et al. Static strain aging behavior of an X100 pipeline steel [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 550(07): 418-422.
- [15] LI W, LIU J, ZHOU Y, et al. Effect of substrate pre-heating on the texture, phase and nanohardness of a Ti-45Al-2Cr-5Nb alloy processed by selective laser melting[J]. *Scripta Materialia*, 2016, 118: 13-18.
- [16] LEI L, ZHAO Y, ZHAO Q, et al. Impact toughness and deformation modes of Ti-6Al-4V alloy with different microstructures [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 801: 140411.
- [17] LI Y, WANG F, SUN Q, et al. Study on the microstructure and impact toughness of TC11 titanium alloy by a novel electromagnetic shocking treatment [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 876: 145149.