

选区激光熔化成形 Ti6Al4V 合金 拉伸性能提高的研究

徐仰立, 张冬云, 郭彦梧, 胡松涛, 陈润平

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘 要: **目的** 提高选区激光熔化 (SLM) 成形 Ti6Al4V 合金的成形态延伸率, 使成形态组织的拉伸性能接近或达到锻件标准。**方法** 采用原位分解的方法, 通过调节 SLM 成形过程中的工艺参数, 如激光功率、能量密度、层厚、支撑所占面积比等, 使已成形层中的针状 α' 马氏体在温度场作用下分解成 $\alpha+\beta$ 相。利用微观组织分析 (SEM)、物相分析 (XRD) 和拉伸性能测试, 明确 Ti6Al4V 合金发生原位分解的条件。**结果** 增加 SLM 制造的层厚 (60 μm), 提高激光功率 (375 W), 有利于降低 SLM 制造过程中的冷却速度和温度梯度, 使马氏体组织发生 $\alpha'\rightarrow\alpha+\beta$ 相变。SEM 和 XRD 结果表明, Ti6Al4V 合金原位分解后的成形态显微组织由针状 α 相和颗粒状 β 相构成, 不同于高温梯度和极快冷却速度下的常规 SLM 成形态组织。拉伸性能测试结果表明, Ti6Al4V 经过原位分解后, 在提高延伸率的同时, 仍保持高屈服强度, 屈服强度达到 1100 MPa 以上, 延伸率达到 8%。断裂机制为韧性断裂。**结论** SLM 成形的 Ti6Al4V 合金经原位分解后, 拥有更好的韧性, 成形态的拉伸性能得到提高。

关键词: 选区激光熔化; Ti6Al4V; 延伸率; 屈服强度; 原位分解; 拉伸性能

中图分类号: V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0108-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.017

Improvement of Tensile Properties of Ti6Al4V Alloy by Selective Laser Melting

XU Yang-li, ZHANG Dong-yun, GUO Yan-wu, HU Song-tao, CHEN Run-ping

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the elongation of Ti6Al4V alloy formed by selective laser melting (SLM), so that the tensile properties of the formed structure can approach or meet the forging standard. The in-situ decomposition method was used to decompose the acicular α' martensite in the formed layer into $\alpha+\beta$ phase by adjusting the process parameters such as laser power, energy density, thickness of the layer and the area ratio of the support in the SLM forming process under the thermal cycle of heat source reciprocating motion for reciprocating heating and cooling. By means of microstructure observations (SEM), phase analysis (XRD) and tensile test, the conditions for in-situ decomposition of Ti6Al4V alloy were determined. Increasing the thickness of SLM layer (60 μm) and laser power (375 W) was beneficial to reducing the cooling rate and temperature gradi-

收稿日期: 2018-11-30; 修订日期: 2019-02-17

Received: 2018-11-30; Revised: 2019-02-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51675012)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51675012)

作者简介: 徐仰立 (1991—), 男, 博士, 主要研究方向为选区激光熔化成形钛合金。

Biography: XU Yang-li (1991—), Male, Doctor, Research focus: selective laser melting forming of titanium alloys.

通讯作者: 张冬云 (1969—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为选区激光熔化成形钛合金。邮箱: zhangdy@bjut.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Dong-yun (1969—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: selective laser melting forming of titanium alloys. E-mail: zhangdy@bjut.edu.cn

ent in SLM manufacturing process, resulting in $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ transformation of martensite structure. The results of SEM and XRD showed that the morphology of Ti6Al4V alloy after in-situ decomposition was composed of acicular α phase and granular β phase, which was different from that of conventional SLM at high temperature gradient and extremely fast cooling rate. The tensile test results showed that the elongation of Ti6Al4V specimens increased while high yield strength was maintained after in-situ decomposition. The yield strength reached more than 1100 MPa, and the elongation reached 8%. The fracture mechanism was ductile fracture. SLM-formed Ti6Al4V alloy has better toughness after in-situ decomposition, which can improve the tensile properties of Ti6Al4V alloy.

KEY WORDS: selective laser melting; Ti6Al4V alloy; ductility; yield strength; situ martensite decomposition; tensile properties

对金属微观组织结构形貌和成分的分析,是研究和预测其力学性能的有效方法^[1]。Ti6Al4V 合金是一种双相 ($\alpha + \beta$) 钛合金,组织稳定性好,材料密度小,而且具有非常好的机械性能和耐腐蚀性能,适用于航空航天、医疗器械和汽车制造等领域^[2]。然而,对于一些具有特殊几何形状(比如需要内流散热通道和多曲面)的结构件,用传统的制造方法(铸造和锻造)往往需要付出很大的时间和人力成本。因此,利用选区激光熔化成形技术(Selective Laser Melting, SLM)制造金属,能够打破这种制造壁垒,不仅可以制造形状复杂的结构件,节省大量的人力和时间成本,而且极大地提高材料的利用率。

SLM 成形 Ti6Al4V 合金,由于加工过程中熔池的冷却速度极快(一般能达到 10^6 K/s),Ti6Al4V 合金的微观组织为极细针状 α' 马氏体组织,这种组织的拉伸性能往往表现为高屈服强度(1000~1200 MPa),但是延伸率比较低(3%~7%)^[3-6]。传统的解决方法是:通过提高预热温度(600 °C 以上)和后期热处理工艺,使 Ti6Al4V 合金的微观组织从极细的 α' 相分解为粗化的 $\alpha + \beta$ 相组织,来提高 Ti6Al4V 合金的延伸率。虽然这两种方法都能有效地提高材料的延伸率(达到 10% 以上),但是它们会大大降低 Ti6Al4V 合金的屈服强度(1000 MPa 以下),同时,这两种工艺往往需要花费大量的时间和设备成本^[7-8]。澳大利亚麦考瑞大学的科学家 Xu^[9-12]提出了钛合金组织原位分解的方法(钛合金组织 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ 相转变),即在选区激光熔化成形 Ti6Al4V 合金的过程中,通过调控工艺参数,使 Ti6Al4V 合金成形态组织的延伸率提高到 11.4%,同时保持高的屈服强度(>1100 MPa)。该研究有一些局限:1)仅限于小尺寸的钛合金试样力学性能研究;2)只研究了 SLM 成形竖直拉伸试样力学性能。SLM 成形的竖直拉伸试样和水平拉伸试样在力学性能上存在各向异性^[13],关于 SLM 成形水平拉伸试样,通过工艺参数优化(未经热处理^[14],下称成形态),直接调控 Ti6Al4V 合金的微观组织,进而提高成形态力学性能方面的研究还未见报道。

综上所述,为了提高 SLM 成形 Ti6Al4V 合金水平拉伸试样的延伸率,同时又不降低其屈服强度,本文通过调控 SLM 制造过程中的工艺参数,来实现钛

合金组织发生 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ 相转变。通过调节激光功率、扫描速度、制造层厚、焦点偏移(Focal Offset Distance, FOD)、支撑所占面积比等参数,实现了不同程度的钛合金原位分解,基于金相显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)组织观测、XRD 物相分析和拉伸性能测试结果,提出了提高 SLM 成形 Ti6Al4V 合金水平拉伸试样力学性能的工艺参数和机制。

1 试验

1.1 试验设备

1.1.1 选区激光熔化成形设备

本研究所用的 SLM 成形设备为德国 SLM Solutions 公司的 M280 成形系统,如图 1 所示,由一个最大功率为 400 W 的 YLR-400 光纤激光器(波长为 $1.06 \mu\text{m}$)、供粉系统、成形室、气体保护系统以及计算机控制系统组成,最大成形尺寸为 $280 \text{ mm} \times 280 \text{ mm} \times 325 \text{ mm}$,焦平面的光斑直径为 $80 \mu\text{m}$ 。成形过程中采用氩气保护,以避免熔池金属发生氧化、氮化现象,同时为了减少 SLM 成形过程中的残余应力,将钛合金基板预热温度设为 200 °C。



图 1 SLM Solutions M280 金属快速成形机
Fig.1 SLM Solutions M280 metal rapid prototyping machine

1.1.2 性能检测

SLM 成形 Ti6Al4V 合金拉伸棒为尺寸 $90 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$ 的长方体(如图 2a),将长方体前端预

留的 10 mm 长度用电火花线切割机切下,用于金相分析,剩余长方体根据国际拉伸试样标准(IOS6892 : 1998-03) 加工成标准拉伸试样棒,尺寸示意图如图 2b 所示。将金相试样的横截面和纵截面分别经 180#、240#、400#、600#、800#、1000#、1500#、2000#水磨砂纸粗磨、抛光处理后,用标准的 Kroll 试剂(体积比 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=2:6:92$) 腐蚀 60 s。通过金相显微镜(Olympus-PMG3)、扫描电子显微镜 SEM (FEI-Quanta200) 观察试样的组织和断口。为了进一步确定试样中的物相类别,使用 Bruker-D8 X 射线衍射仪对试样进行物相定性分析。拉伸性能采用德国 Zwick/Roell 公司的万能材料试验机(ZWICK/ROELL Z050) 进行测试。

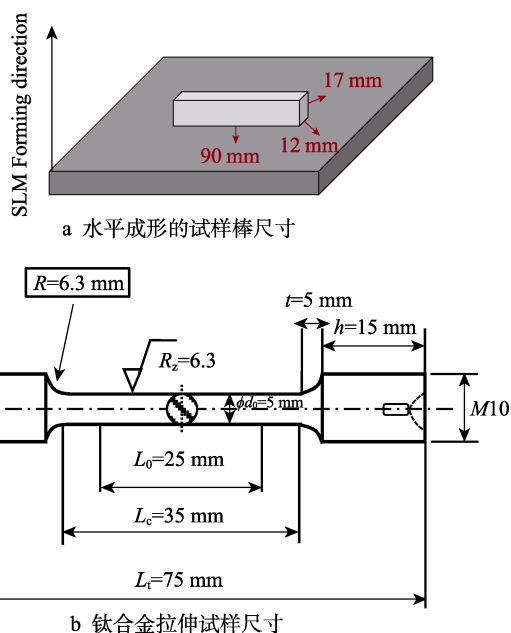
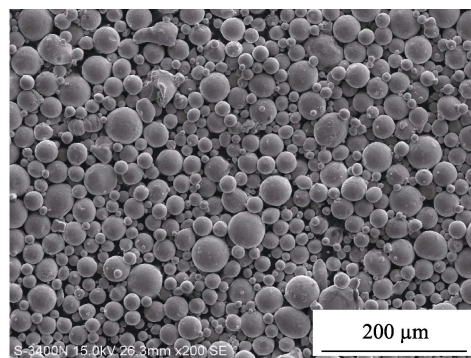


图2 样品尺寸

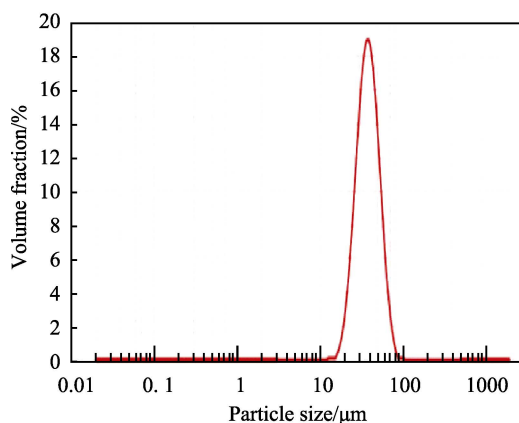
Fig.2 Forming and processing dimensions: (a) dimensions of horizontally formed specimen bars; (b) dimensions of titanium alloy tensile specimens

1.2 试验材料

本研究中所使用的 Ti6Al4V 合金粉末为德国 EOS 公司提供的气雾化粉末材料,图 3 为粉末颗粒的粒径分布范围及 SEM 微观形貌图,其平均粒径为 $38\ \mu\text{m}$,呈正态分布,并具有良好的球形度。基板材料为国产牌号 TC4 热轧制钛合金板材,几何尺寸为 $280\text{ mm}\times 280\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。试验前对 Ti6Al4V 合金粉末进行 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 真空烘干处理,以减少水分对成形结果的影响。为了避免油污等杂质及基板表面氧化膜对试验结果的影响,同时提高基板表面的粗糙度,使铺粉过程中粉末更容易停留在基板上,试验前对基板表面进行喷砂处理并使用无水乙醇进行擦拭,最后通过压缩空气将其吹干。



a SEM微观形貌



b 粒度分布检测数据

图3 Ti6Al4V 粉末参数

Fig.3 (a) SEM observation and (b) size distribution of Ti6Al4V particle

1.3 试验方法

在 SLM 成形拉伸试样试验中,调控设备的焦点偏移量 $\text{FOD}=2\text{ mm}$ (如图 4a),测得实际光斑大小为 $88\ \mu\text{m}$ 。本研究中共设定 9 组参数,其中 P 代表激光功率 (W), d 代表制造层厚 (μm), v 代表扫描速度 (mm/s), h 代表扫描间距 (mm),支撑所占面积比 (S_s/S_t) 代表拉伸棒底面支撑面积占总面积的比值(如图 4b), E 代表激光体能量密度 ($E = \frac{P}{v d h}$, J/mm^3),热

处理工艺采用全程在氩气环境下进行退火热处理 ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 4 h,炉冷)。9 组试样的具体参数如表 1 所示。将 9 组试样分成 3 个小组进行分析: Group 1 包括 S1—S3 三组参数,研究激光体能量密度对 Ti6Al4V 原位分解的影响; Group 2 包括 S4—S7 四组参数,研究在最优的体能量密度 (50.62 J/mm^3) 下,改变功率 (P)、扫描间距 (h)、制造层厚 (d) 和支撑所占面积比 (S_s/S_t) 对 Ti6Al4V 原位分解的影响; Group 3 包括 S8 和 S9 两组参数作为对照组,参数 S8 得到的试样微观组织为完全的 α' 马氏体组织,参数 S9 的试样经过了退火热处理,其组织为完全的 $\alpha+\beta$ 相。

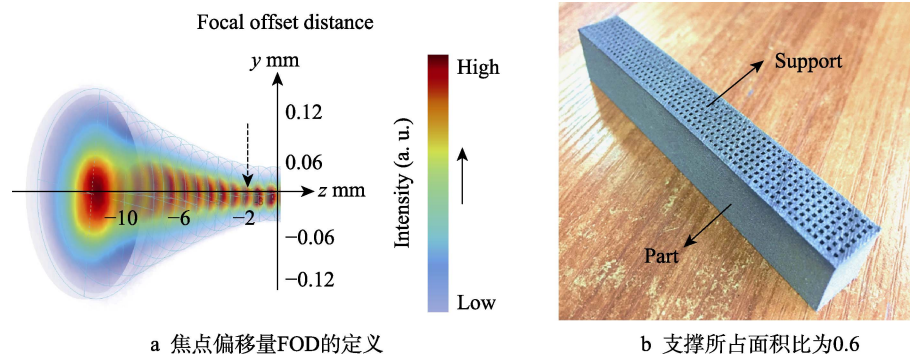


图 4 参数定义
Fig.4 Parameter definition: (a) definition of focal offset distance; (b) support area ratio of 0.6

表 1 Ti6Al4V 合金原位分解工艺参数
Tab.1 Process parameter for in-situ decomposition of titanium alloy

Samples	P/W	$d/\mu\text{m}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	h/mm	$E/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-3})$	S_s/S_t	Heat treatment
S1	375	60	858	0.12	60.74	0.6	No
S2	375	60	1029	0.12	50.62	0.6	No
S3	375	60	1160	0.12	44.90	0.6	No
S4	340	60	933	0.12	50.62	0.6	No
S5	375	60	1235	0.10	50.62	0.6	No
S6	375	80	772	0.12	50.62	0.6	No
S7	375	60	1029	0.12	50.62	1.0	No
S8	280	30	1250	0.12	62.22	1.0	No
S9	280	30	1250	0.12	62.22	1.0	800 °C/4 h

2 试验结果与讨论分析

2.1 三维金相显微组织形貌

图 5a 为 SLM 成形 Ti6Al4V 合金的三维金相显微组织形貌（来自试样 S1）。结果表明，Ti6Al4V 表面并未出现孔洞和未熔合等缺陷，预示着具有较强的冶金结合性能。通过观察 Ti6Al4V 的横截面金相组织（图 5b），可以很明显地观察到 SLM 工艺下特有的棋盘状格子结构，经测量，棋盘格子的平均宽度约为

90 μm ，与激光的光斑直径相匹配。在 SLM 成形水平拉伸试样的纵截面上（图 5c），可以看到典型的原始 β 晶粒形成的柱状晶界，柱状晶的生长方向与热流方向相反。柱状晶的宽度越大，表明冷却速度越慢。有文献报道^[9]，当 SLM 成形层厚为 30 μm 时，由于冷却速度极快，形成的柱状晶宽度大约为 15 μm 。经测量，本研究中的试样 S1 的柱状晶宽度约为 60~70 μm ，说明其冷却速度较慢。柱状晶内部主要由大量的极细针状 α' 马氏体组织构成，并以 45° 的角度分布。

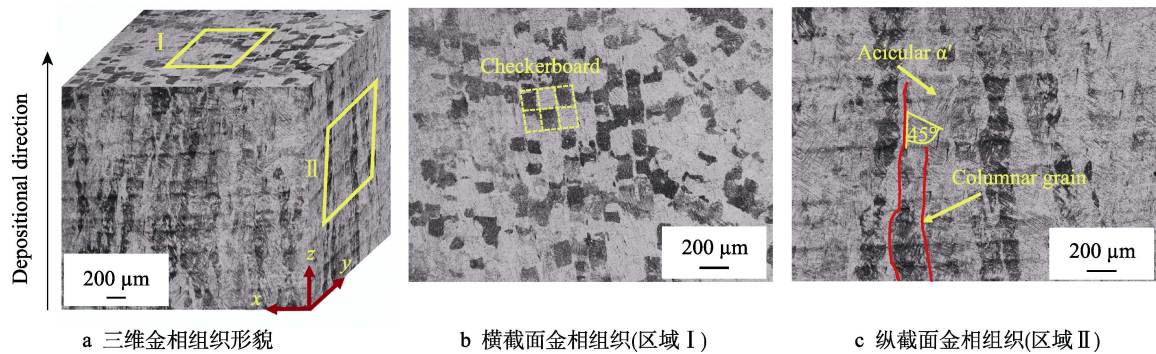


图 5 试样 S1 金相图
Fig.5 Metallographic structure of sample S1: (a) three dimensional metallographic structure of sample S1; (b) cross section metallographic structure I ; (c) longitudinal section metallographic structure II

2.2 Ti6Al4V 原位分解的 SEM 结果

SLM 成形 Ti6Al4V 合金原位分解的要求比较苛刻,既要保证熔池冷却速度较慢,又要在 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ 相转变温度区间保持较长的时间^[15]。另外,由于 FOD

值会影响熔池的热循环,合适的 FOD 值能延长 Ti6Al4V 合金原位分解的时间,因此本研究选取 FOD 的值为 2 mm。9 组试样纵截面上 SEM 微观组织形貌如图 6 所示,讨论如下。

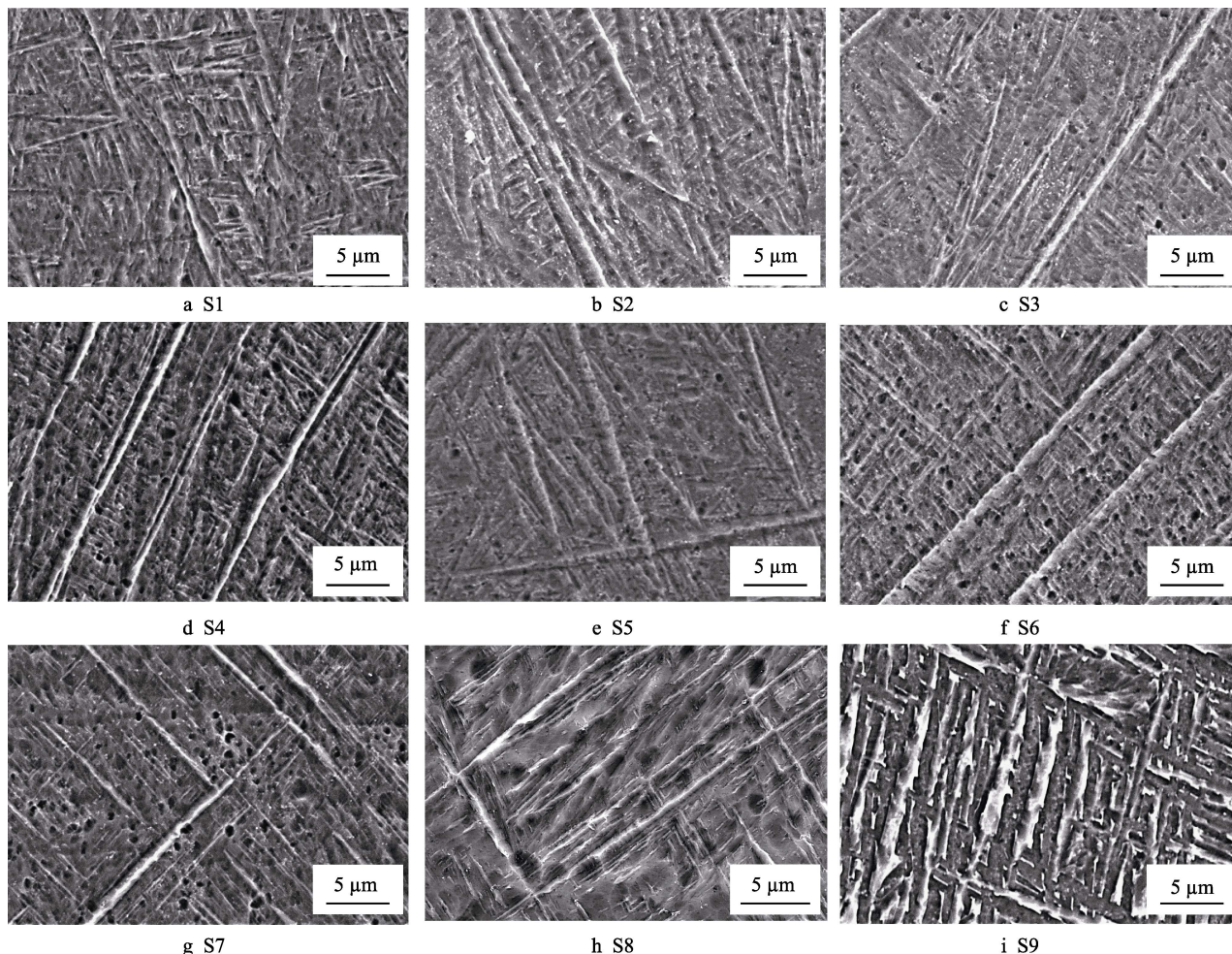


图 6 9 组试样 SEM 微观组织形貌
Fig.6 SEM microstructure of 9 specimens

2.2.1 Group 1 的微观组织观察

S1—S3 试样重点研究激光体能量密度对 α' 马氏体原位分解的影响,从图中可以发现,三组参数下均析出了白色颗粒状的 β 相。S1 试样体能量密度为 60.74 J/mm^3 ,微观组织中只析出了微量的 β 相。随着体能量密度降低到 50.62 J/mm^3 ,S2 试样中 α' 马氏体发生了较为充分的原位分解,析出了大量的 β 相,其组织为针状 ($\alpha + \beta$) 相,宽度大约为 $0.5 \mu\text{m}$ 。继续降低能量密度到 44.9 J/mm^3 时,S3 试样中 β 相的含量略有降低。产生上述现象的原因是, Ti6Al4V ($\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$) 相转变温度区间为 $600 \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$,当温度超过 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 (体能量密度过高),会产生相转变的效应,无法实现充分地原位分解。当温度低于 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, α' 马氏体无法获得足够的能量进行分解。因此, S2 (体能量密度为 50.62 J/mm^3) 是较为适宜 α' 马氏体原位分解的参数。

2.2.2 Group 2 的微观组织观察

在激光体能量密度为 50.62 J/mm^3 的条件下, S4—S7 试样依次改变的参数是激光功率、扫描间距、层厚和支撑所占面积比。当激光功率从 375 W 降低到 340 W 时, S4 试样虽然保持高的体能量输入,但是并没有发生原位分解,微观组织由细针状 α' 马氏体构成,说明高激光功率才能保证原位分解的充分进行。S5 试样扫描间距降低到 0.1 mm 时也未发生原位分解,内部是针状 α' 马氏体组织,因为扫描间距降低,熔道之间产生了过多的热累积,超过了原位分解的温度区间。当增加层厚到 $80 \mu\text{m}$ 时, S6 试样中虽然仍有颗粒状 β 相析出,但是在金相显微镜下试样内部存在扁平状的孔洞和大量圆形气孔 (如图 7 所示),这说明 $80 \mu\text{m}$ 的层厚会使层与层之间的冶金结合变差,也预示着较差的力学性能。与其他试样支撑所占面积

比为 0.6 的块状支撑不同, S7 试样变为支撑所占面积比为 1 的实体支撑, 析出的颗粒状 β 相含量减少, 显微组织为针状 $\alpha' + (\alpha + \beta)$ 相, 这是因为实体支撑散热快, 在 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ 相转变温度区间保温时间短, 热累计作用小所致。理论上来说, 支撑所占面积比越小, 散热速度越慢, 越有利于原位分解, 但是如果支撑所占面积比过小, 成形过程中产生的内应力会导致试样翘曲, 造成成形的失败。

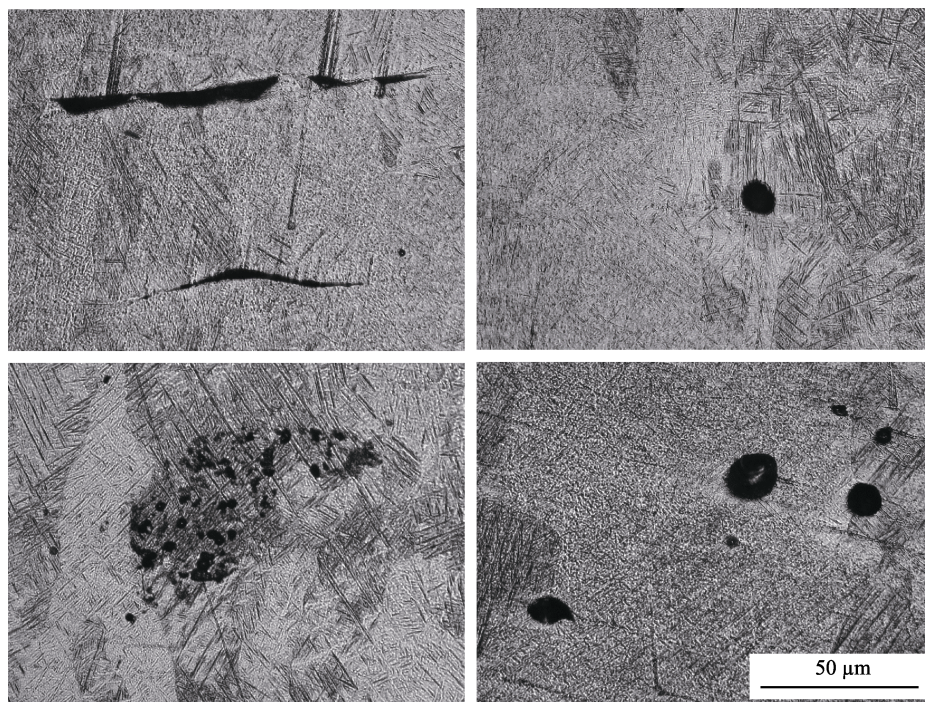


图 7 试样 S6 金相组织观察结果
Fig.7 Metallographic observation of sample S6

2.3 9 组试样 XRD 结果分析

图 8 是 9 组试样的 XRD 测试结果。对于 Ti6Al4V 合金来说, 由于 α 和 α' 相具有相同的密排六方堆积结构, 它们的晶格常数相近, 所以它们的特征峰重叠, 很难进行区别, 在图中统一用 α'/α 表示。 β 相的特征峰出现在衍射角 39.5° 和 57.5° 附近, 衍射峰的高度能在一定程度上表征 β 相的含量。图 8c 作为对照组, 给出了 S8 和 S9 的 XRD 检测结果, 分别对应 α' 和 $(\alpha + \beta)$

2.2.3 Group 3 的微观组织观察

S8 和 S9 是对照组。S8 试样的微观组织为完全针状 α' 马氏体, 组织的宽度大约为 $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$, 说明在标准参数下不发生原位分解。通过与 S1—S7 的组织宽度对比, 说明原位分解的工艺不改变组织的尺寸。然而, 在经过 800°C 保温 4 h 热处理后, S9 试样微观组织转变为粗大的 $\alpha + \beta$ 组织, 组织宽度约为 $1.2 \mu\text{m}$ 。

两种微观组织成分。试样 S1—S7 的 XRD 结果与 SEM 微观组织分析结果吻合, 主要分成三种情况: 对于 S4、S5 和 S6, 因为没有检测到 β 相的特征峰, 说明没有 β 相析出; 对于 S1 和 S7, 检测到微弱的 β 相特征峰, 结合 SEM 观察结果, 认为其微观组织结构为 $\alpha' + (\alpha + \beta)$; 对于 S2、S3, XRD 结果中观察到了明显可见的 β 相特征峰, 这说明 Ti6Al4V 在 SLM 成形过程中有大量的 α' 相分解成 $(\alpha + \beta)$ 组织, 结合 SEM 观察结果, 认为这两个试样发生了完全的 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ 相转变。

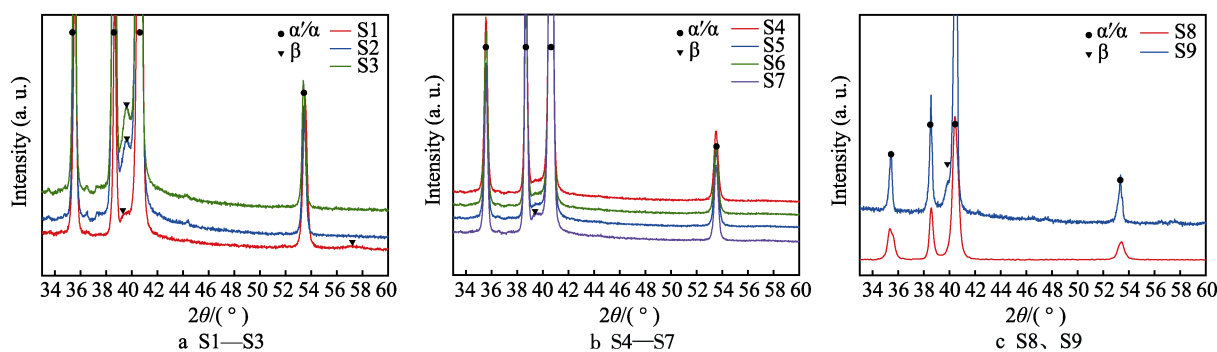


图 8 9 组试样的 XRD 物相检测结果
Fig.8 XRD analysis of nine samples

2.4 力学性能评价

图9是9组参数下成形拉伸试样的力学性能测试结果。对于发生完全原位分解的试样S2,在不降低强度的情况下(屈服强度在1100 MPa以上),延伸率达到了8%。根据9组试样的SEM和XRD结果,发现微观组织成分和尺寸影响试样的力学性能,以下将从强度和延伸率两个角度进行讨论。

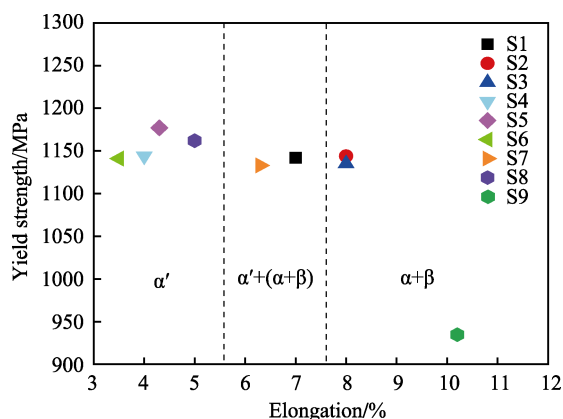


图9 9组试样拉伸性能测试结果

Fig.9 Test results for tensile properties of nine specimens

2.4.1 Ti6Al4V 屈服强度

拉伸结果表明,未经过热处理的试样S1—S8,屈服强度全部都超过1100 MPa;经过退火热处理的试样S9,屈服强度低于1000 MPa。这是因为拉伸试

样的屈服强度主要受微观组织中 α'/α 马氏体组织宽度的影响。在拉伸过程中,宽度较小的马氏体组织晶界多,对位错滑移的阻力大。从前面的结果可知,S1—S8试样成形态 α'/α 马氏体组织的宽度约为0.4~0.6 μm ,因此屈服强度能稳定在较高的水平;而经过热处理的试样S9,马氏体转变为 α 相,并在保温阶段长大,组织的宽度变大,阻止位错和塑性变形的能力下降,屈服强度明显降低。

2.4.2 Ti6Al4V 延伸率和断口形貌

结合XRD和SEM结果,可以把9组试样的延伸率分成三个级别:1)低水平延伸率<5.5%,对应完全 α' 马氏体微观组织;2)中等水平延伸率5.5%~8%,对应 $\alpha'+(\alpha+\beta)$ 微观组织;3)高水平延伸率>8%,对应 $(\alpha+\beta)$ 微观组织。基于这三个级别,分别选取了三组具有代表性的微观组织,观察对应的拉伸试样断口形貌,即 α' 马氏体微观组织的试样S5、 $\alpha'+(\alpha+\beta)$ 微观组织的试样S1和 $(\alpha+\beta)$ 微观组织的试样S2,如图10所示。试样S5的断口形貌(如图10a和b)中存在阶梯状特征,主要以解理面为主,部分为穿晶断裂。撕裂棱(红线标记)边缘存在一些网状韧窝,表明断裂机制为脆性和韧性的混合模式。试样S1的断口形貌(如图10c和d)和S5类似。但是与S5相比,试样S1撕裂棱附近的韧窝数量较多,表明S1的韧性较好。试样S2的断口形貌为无解理面的韧窝组成,韧窝数量较多,直径大约为2~5 μm (如图10e和f)。这表明,试样S2遵循韧性断裂机制,拥有更好的韧性。

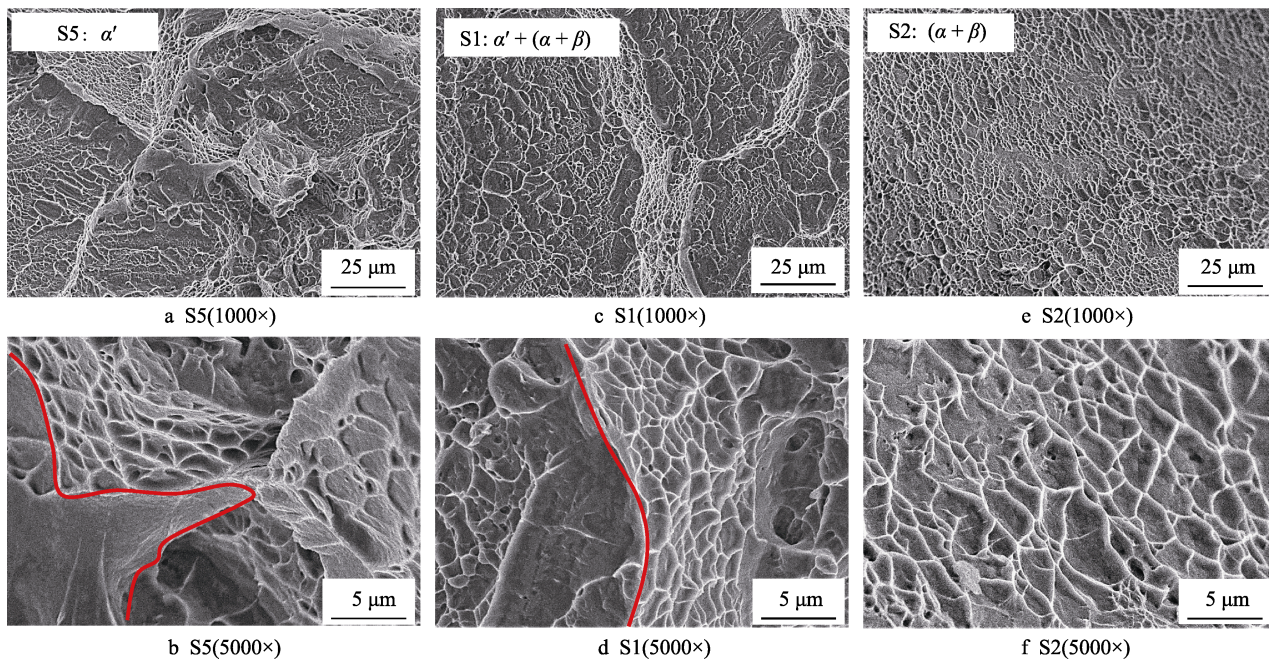


图10 三组试样断口微观形貌

Fig.10 Fracture morphology of three specimens

3 结论

1) 最有利于原位分解的工艺参数为:激光功率

375 W,扫描速度1029 mm/s,扫描间距0.12 mm,制造层厚60 μm ,激光体能量密度50.52 J/mm³。

2) 支撑所占面积比为0.6的试样比实体支撑更

有利于原位分解。

3) 发生原位分解的试样的拉伸性能得到提高, 屈服强度达到 1100 MPa 以上, 延伸率达到 8%。

4) 未发生原位分解的试样 S5 有明显的撕裂棱, 韧窝数量较少; 微量原位分解的试样 S1 断口有明显的准解理面和韧窝形貌, 韧窝的数量比试样 S5 明显增多, 韧窝尺寸小; 发生原位分解的试样 S2 断口上分布着大量韧窝, 韧窝大且深, 预示着更好的延展性。

参考文献:

- [1] 曹玄扬. 多孔网格结构的拓扑优化设计及 SLM 制造[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
CAO Xuan-yang. Topological optimization design and SLM manufacturing of porous grid structures[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [2] XU Y, ZHANG D, ZHOU Y, et al. Study on topology optimization design, manufacturability, and performance evaluation of Ti-6Al-4V porous structures fabricated by selective laser melting (SLM)[J]. *Materials*, 2017, 10(9): 1048.
- [3] SHUMMUGAVEL M, POLISHETTY A, LITTLEFAIR G. Microstructure and mechanical properties of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V cylindrical bars[J]. *Procedia Technology*, 2015, 20: 231-236.
- [4] QIU C L, 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(8): 230-239.
- [5] RAFI H K, KARTHI N V, GONG H, et al. Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting[J]. *Journal of materials engineering & performance*, 2013, 22(12): 3872-3883.
- [6] LU S, TANG H, NING Y, et al. Microstructure and mechanical properties of long Ti-6Al-4V rods additively manufactured out of a deep powder bed by selective electron beam melting with and without subsequent hot isostatic pressing[J]. *Metallurgical & materials transactions A*, 2015, 46(9): 3824-3834.
- [7] ALI H, MA L, GHADBEI H, et al. In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of selective laser melted Ti6Al4V[J]. *Materials science & engineering A*, 2017, 695: 211-220.
- [8] LEUDERS S, THONE M, RIEME A, et al. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: fatigue resistance and crack growth performance[J]. *International journal of fatigue*, 2013, 48(3): 300-307.
- [9] XU W, BRANDT M, SUN S, et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti6Al4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition[J]. *Acta materialia*, 2015, 85: 74-84.
- [10] XU W, SUN S, ELAMBASSERIL J, et al. Ti-6Al-4V additively manufactured by selective laser melting with superior mechanical properties[J]. *JOM*, 2015, 67(3): 668-673.
- [11] XU W, LUI E W, PATERAS A, et al. In situ, tailoring microstructure in additively manufactured Ti-6Al-4V for superior mechanical performance[J]. *Acta Materialia*, 2017, 125: 390-400.
- [12] LUI E W, XU W, PATERAS A, et al. New development in selective laser melting of Ti6Al4V: a wider processing window for the achievement of fully lamellar $\alpha+\beta$ microstructures[J]. *JOM*, 2017(1): 1-5.
- [13] ZHAO X, LI S, ZHANG M, et al. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting[J]. *Materials & design*, 2016, 95: 21-31.
- [14] 杨光, 王文东, 钦兰云, 等. 退火处理及沉积方向对激光沉积 TA15 钛合金组织和性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(12): 3295-3301.
YANG Guang, WANG Wen-dong, QIN Lan-yun, et al. Effect of annealing treatment and deposition direction on microstructure and properties of laser deposited TA15 titanium alloy[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2016, 45(12): 3295-3301.
- [15] 孙晓敏, 刘栋, 汤海波, 等. TC17 钛合金构件激光直接成形固态相变行为及显微组织[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(4): 724-729.
SUN Xiao-min, LIU Dong, TANG Hai-bo, et al. Solid-phase transformation behavior and microstructure of TC17 titanium alloy components by laser direct forming[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2013, 42(4): 724-729.