

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

肖振楠^{1,2}, 刘婷婷^{1,2}, 廖文和^{1,2}, 张长东^{1,2*}, 杨涛^{1,2}

¹南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

²南京理工大学数控成形技术与装备国家地方联合实验室, 江苏 南京 210094

摘要 研究了退火、两相区固溶、固溶时效三种热处理方法对激光选区熔化(SLM)技术成形 TC4 钛合金微观组织和力学性能的影响。结果表明,在 SLM 成形 TC4 钛合金中形成了细针状马氏体组织,几乎不存在 β 相,强度较高,塑性较差;经过 840 °C/2 h/空冷(AC)退火处理后,TC4 钛合金的显微组织由 $(\alpha+\beta)$ 相构成,具有较高的强度和塑性;经过 940 °C/1 h/水淬(WQ)固溶处理后, β 相的含量增加,晶粒长大,形成交错的 $(\alpha+\beta)$ 网篮组织,强度明显下降,塑性提高;经过 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC 固溶时效处理后,形成了均匀弥散的 $(\alpha+\beta)$ 相, α 相粗化,强度降低,塑性小幅提高。TC4 钛合金经过热处理后,内部残余应力减小,变形开裂倾向降低。采用 840 °C/2 h/AC 退火处理工艺,可使 SLM 成形 TC4 钛合金获得较佳的强度/塑性匹配。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; TC4 钛合金; 热处理; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG166.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0902001

Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy Formed by Selective Laser Melting After Heat Treatment

Xiao Zhennan^{1,2}, Liu Tingting^{1,2}, Liao Wenhe^{1,2}, Zhang Changdong^{1,2}, Yang Tao^{1,2}

¹School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²National Joint Laboratory of NC Forming Technology and Equipment, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract The effects of three heat treatment methods which include annealing, solution hardening of two-phase regions, and solution and aging treatment on the microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy formed by selective laser melting (SLM) are investigated. The results show that the fine acicular martensite is formed in the TC4 titanium alloy formed by SLM and there is nearly no β phase, which makes the TC4 titanium alloy have high strength and poor plasticity. After the 840 °C/2 h/air-cooling (AC) annealing, the microstructure of TC4 titanium alloy is consisted of $(\alpha+\beta)$ phases, which makes TC4 titanium alloys have better strength and plasticity. After the 940 °C/1 h/water-quenching (WQ) solution hardening, the staggered basket-weave $(\alpha+\beta)$ microstructure is obtained in TC4 titanium alloys, the strength decreases significantly and the plasticity increases because of the increase of β phase content and grain size. After 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC solution and aging heat treatment, the $(\alpha+\beta)$ phases are formed and uniformly dispersed, and the α phase coarsens, which result in the decrease of strength and the slight increase of plasticity. After heat treatment, the residual stress and the tendency of the strain cracking of TC4 titanium alloy decrease. The better strength/plasticity matching of TC4

收稿日期: 2017-03-16; 收到修改稿日期: 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(51375242)、江苏省重点研发计划(BE2015165)

作者简介: 肖振楠(1992—),女,硕士研究生,主要从事激光选区熔化成形金属热处理工艺方面的研究。

E-mail: 18252033270@163.com

导师简介: 刘婷婷(1975—),女,教授,硕士生导师,主要从事数字化设计制造、增材制造方面的研究。

E-mail: liutingting@mail.njust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zcd@mail.njust.edu.cn

titanium alloy formed by SLM can be obtained by the annealing heat treatment of 840 °C/2 h/AC.

Key words laser technique; selective laser melting; TC4 titanium alloy; heat treatment; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

Ti6Al4V(TC4,6%,4%为对应组分的质量分数)钛合金因其密度小、强度高、耐腐蚀性好等特点而被广泛应用于各个领域^[1-4]。激光选区熔化(SLM)技术利用高能量激光熔化固体粉末,通过逐层铺粉、逐层固化叠加的方式,直接成形三维零件^[5]。然而,与传统锻铸件相比,TC4钛合金在激光熔化快速凝固过程中会形成分布均匀的针状马氏体^[6-8],致密度和强度高但塑性差^[9]。同时,SLM成形过程中极易积聚热应力,引起工件的变形和开裂。合适的热处理工艺可以释放快熔急凝过程中的残余应力,控制 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变,调整相的形状、尺寸和含量,优化组织和力学性能^[10]。德国 Concept Laser 公司对 SLM 成形 TC4 钛合金进行 830 °C/2 h/炉冷(FC)处理后,试样抗拉强度为 1100~1300 MPa,断后延伸率仅为 5%~10%。德国 EOS 公司对 SLM 成形 TC4 钛合金进行 800 °C/2 h/空冷(AC)处理后,试样拉伸强度为 1040 MPa,断后延伸率约为 14%。Vrancken 等^[11]研究了热处理工艺对 SLM 成形 TC4 钛合金零件力学性能和微观组织的影响,进行 850 °C/2 h/FC 热处理后,可使试样的延伸率从(7.36±1.32)%提高到(12.84±1.36)%。梁晓康等^[12]通过(750±20) °C/90 min/AC 退火处理,使试样的抗拉强度达到 1110~1130 MPa,屈服强度为 1080~1100 MPa,断后延伸率为 11.0%~13.0%。为了进一步提高 SLM 成形 TC4 钛合金的塑性,实现强度/塑性的较佳匹配,本文研究了退火、两相区固溶、固溶时效三种热处理方案对 SLM 成形 TC4 钛合金组织和性能的影响规律,并通过实验与仿真相结合的方法,从残余应力角度分析了不同热处理工艺对 SLM 成形 TC4 钛合金性能的影响。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料及试件成形设计

以无锡飞尔康公司生产的平均粒径为 45 μm 的 TC4 钛合金粉末作为 SLM 成形材料,其化学成分见表 1。采用德国 Concept Laser 公司的 M2 激光成形机,以体积分数为 99.99%的氩气为保护气体,扫描方式为蛇形扫描,成形参数见表 2。拉伸件的具体尺寸参数如图 1 所示。图 2 为拉伸试样的实物图片。根据文献^[13-14]可知,沿垂直于圆柱长轴方向成形拉伸件时,内部晶粒晶界与拉伸方向近似垂直,阻碍了拉伸过程中的塑性变形,故拉伸件强度较高而塑性较低;沿圆柱长轴方向成形拉伸件时,内部晶粒生长方向与拉伸方向近似平行,多层间晶界对变形的阻碍作用较弱,故拉伸件强度降低,塑性较高。考虑到 TC4 钛合金成形件的塑性是较为重要的力学性能参数,选择沿圆柱长轴方向成形拉伸件。

表 1 Ti6Al4V 粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Ti6Al4V power (mass fraction, %)

Element	Al	V	Fe	C	O	N	H	Mo	Mn	Cu	Sn	Y	Zr	Ti
Content	5.500-6.750	3.500-4.500	0.140	0.007	0.130	0.007	0.002	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	Bal.

表 2 TC4 钛合金 SLM 成形参数

Table 2 Parameters of TC4 titanium alloy formed by SLM

Parameter	Laser power /W	Scanning speed /(mm·s ⁻¹)	Layer thickness /μm
Value	180	1250	30

2.2 热处理工艺方案设计

对 SLM 成形 TC4 钛合金进行退火、固溶、固溶时效三种热处理实验,具体热处理参数见表 3,其中 WQ 表示水淬。退火处理可以消除试件在加工过程中产生的残余应力,稳定其组织结构,提高其塑性。为了避免形成魏氏体组织,使合金性能恶化,退火温度宜介于再结晶温度(750 °C)和 β 相变温度(995 °C^[6])之间,本文取退火温度为 840 °C。固溶处理通过高温保温过程使合金中各相溶解,强化固溶体,提高试样韧性,消除其

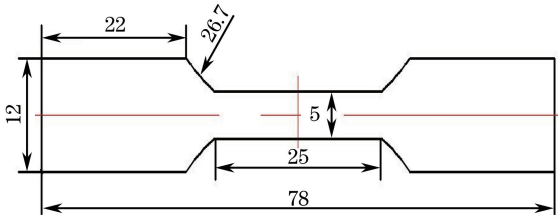


图 1 SLM 成形 TC4 钛合金圆柱状拉伸件

Fig. 1 Cylindrical drawing part of TC4 titanium alloy formed by SLM

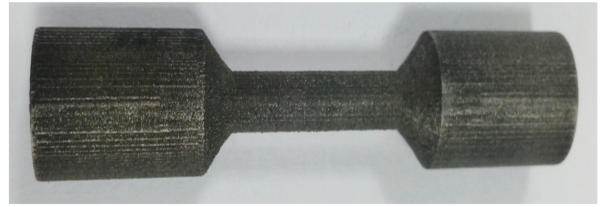


图 2 SLM 成形 TC4 钛合金拉伸件实物图

Fig. 2 Physical picture of drawing part of TC4 titanium alloy formed by SLM

应力,为了防止 β 晶粒快速长大,固溶温度一般比 β 相变温度低 $40\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$,本文固溶温度设为 $940\text{ }^\circ\text{C}$ 。固溶时效处理可释放固溶处理产生的晶格畸变能,促进不稳定相的分解,弱化过饱和固溶体的饱和度,改变试样综合性能。为了避开 W 相脆化区同时保证强度,时效温度设为 $540\text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 3 SLM 成形 TC4 钛合金热处理条件

Table 3 Heat treatment conditions for TC4 titanium alloy formed by SLM

Heat treatment mode	Heat treatment condition
Annealing	$840\text{ }^\circ\text{C}/2\text{ h}/\text{AC}$
Solution hardening	$940\text{ }^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{WQ}$
Solution and aging treatment	$940\text{ }^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{WQ}+540\text{ }^\circ\text{C}/4\text{ h}/\text{AC}$

2.3 力学性能和微观组织测试

用砂纸对热处理后的拉伸试样进行打磨,使其表面光亮^[15]。利用万能拉伸试验机(UTM/CMT5000型,深圳三思纵横科技股份有限公司,深圳),以 $0.6\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的加载速率对试样进行拉伸性能测试。通过线切割方法,切取热处理后试样的纵剖面作为金相试样。利用体积配比为 $V_{\text{HF}}:V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{H}_2\text{O}}=1:2:7$ 的凯勒试剂腐蚀金相试样^[16]。借助金相显微镜(4XCE型,上海长方光学仪器有限公司,中国)和场发射环境扫描电子显微镜(SEM,Quant250FEG,FEI公司,美国)分别观察试样的微观组织和断口形貌。通过 X 射线应力测定仪(X-350A型,爱斯特应力技术有限公司,中国)测试 TC4 钛合金试样的残余应力,选择 $\{213\}$ 晶面方向,衍射角 2θ 设定为 $152^\circ\sim 159^\circ$ 。采用定量金相分析法测定 β 相体积分数和 α 相晶粒厚度。

3 实验结果与分析

3.1 热处理工艺对 SLM 成形 TC4 钛合金微观组织的影响

TC4 钛合金属于 $\alpha+\beta$ 型合金,其性能与组织结构密切相关^[17-18]。密排六方结构的 α 相和体心立方结构的 β 相构成了 TC4 钛合金的基本相,两相的比例、形状和尺寸决定着 TC4 的力学性能^[19]。TC4 钛合金的初始微观组织形貌主要取决于成形工艺过程中的冷却速率,冷却速率越高,组织越细化。由于激光选区熔化技术的冷却速率高达 $10^8\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[20],因此其成形试样的微观组织细密。图 3 所示为 SLM 成形 TC4 钛合金的微观组织,其中 OM 表示光学显微镜。可以看到,整体组织是由分布均匀的针状 α' 马氏体构成, α' 相晶

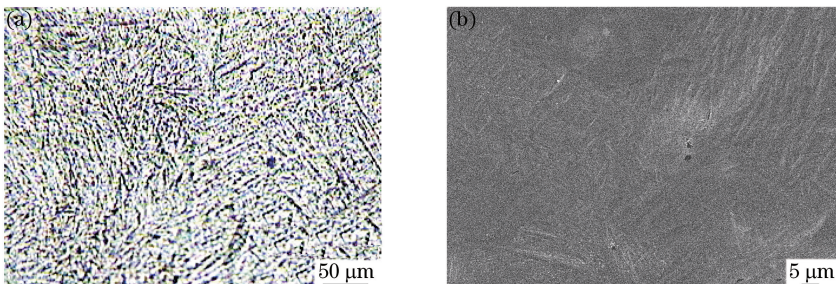


图 3 未热处理试样的微观组织。(a) OM 照片(亮色部分为 α' 相,暗色部分为 β 相);(b) SEM 照片

Fig. 3 Microstructure of untreated sample. (a) OM photo (light part is α' phase and dark part is β phase); (b) SEM photo

粒宽度为 $(1.08 \pm 0.07) \mu\text{m}$, β 相含量很少, 经测定其体积分数约为 1.5%, 基本上不存在晶界。

图 4 所示为试样经过 840 °C/2 h/AC 热处理后获得的微观组织, 可以看到, 其由 $\alpha + \beta$ 混合组织构成, β 相体积分数为 21%, 较未热处理时有显著提高。同时与未经热处理的显微组织相比, α 相发生了粗化, 晶粒宽度为 $(1.50 \pm 0.04) \mu\text{m}$ 。粗化后的 α 相发生积聚, 形成内部具有相同取向的 α 集束。

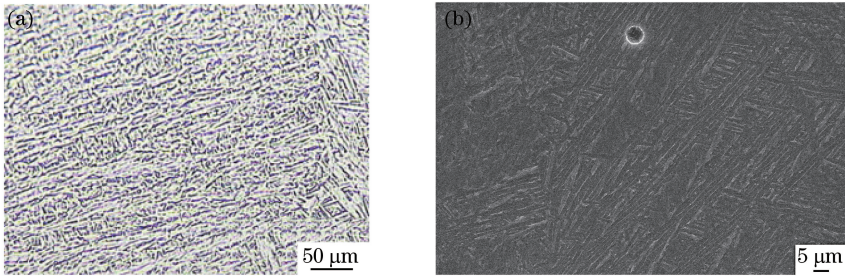


图 4 840 °C/2 h/AC 退火处理后 TC4 钛合金的显微组织。(a) OM 照片(亮色部分为 α 相, 暗色部分为 β 相); (b) SEM 照片
Fig. 4 Microstructure of TC4 titanium alloy after 840 °C/2 h/AC annealing treatment. (a) OM photo (light part is α phase and dark part is β phase); (b) SEM photo

经 940 °C/1 h/WQ 两相区固溶处理后, TC4 钛合金形成了交错编织排列的网篮组织, 如图 5 所示。由图 5 可知, 与成形态和退火态相比, 试样微观组织中 β 相的含量增多, 体积分数为 41%; α 相含量减少, 且发生粗化, 晶粒宽度变为 $(3.60 \pm 0.10) \mu\text{m}$, 长宽比例下降。组织中部分长直的 α 相发生了弯曲, 如图 5(a) 中箭头处所示。

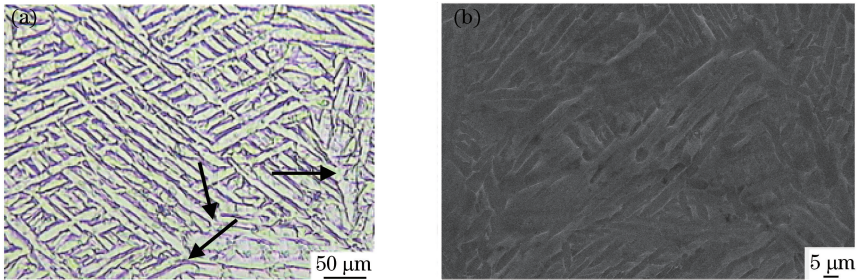


图 5 940 °C/1 h/WQ 固溶处理后 TC4 钛合金的显微组织。(a) OM 照片(亮色部分为 α 相, 暗色部分为 β 相); (b) SEM 照片
Fig. 5 Microstructure of TC4 titanium alloy after 940 °C/1 h/WQ solution hardening. (a) OM photo (light part is α phase and dark part is β phase); (b) SEM photo

图 6 所示为 TC4 钛合金经 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC 固溶时效处理后的微观组织。整体组织由均匀弥散的($\alpha + \beta$)相构成, 条状 α 相发生粗化, 晶粒宽度为 $(4.18 \pm 0.13) \mu\text{m}$, 与 TC4 钛合金成形态、退火态及固溶态相比, 其晶粒宽度最大。断续 α 相勾勒的原始 β 晶界更加清晰, 同时部分晶界内形成交错分布的

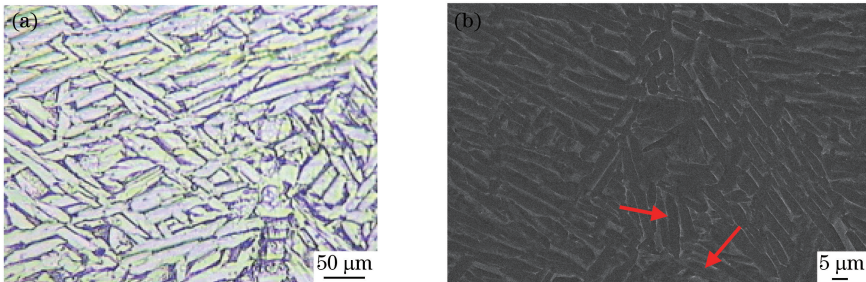


图 6 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC 固溶时效处理后 TC4 钛合金的显微组织。
(a) OM 照片(亮色部分为 α 相, 暗色部分为 β 相); (b) SEM 照片

Fig. 6 Microstructure of TC4 titanium alloy after 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC solution and aging treatment.
(a) OM photo (light part is α phase and dark part is β phase); (b) SEM photo

TC4 钛合金成形态针状马氏体在加热时会发生分解。在 840 °C/2 h/AC 退火温度下,亚稳 α' 组织通过形核和长大过程分解,形成 $(\alpha+\beta)$ 稳定组织。在该分解过程中, β 相在马氏体边界和内部亚组织处产生不均匀形核, α' 相逐渐转变为该加热温度下与 β 相处于平衡状态的 α 相。组织中 β 相的体积分数增大,保温过程使得组织内部晶粒不断长大,晶粒尺寸相较于成形态有小幅提高。940 °C/1 h/WQ 固溶在两相区保温的过程是冷却的逆过程,其加热温度接近 β 相变温度, β 相成为合金的基体, β 相中合金元素溶解度随温度的升高而增加,更多的 α 相稳定元素固溶到 β 基体中,促进了晶内 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变, α 相的体积分数减小;同时,由于固溶温度低于 β 相变温度, α 相未完全转变为 β 相,部分 α 晶粒保留下来同时发生粗化。在随后的水冷过程中,长条状 α 相在 β 相基体上析出,形成过饱和 β 固溶体;同时,由于冷却速率快,温度梯度大, α 相和残余 β 相得以保留。在 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC 固溶时效的时效阶段,可释放固溶处理后产生的晶格畸变能,通过过渡相在体心立方点阵的 β 相基体中生核,促进不稳定残余 β 相分解形成均匀弥散的 $(\alpha+\beta)$ 相,减小过饱和 β 固溶体的饱和度。较低的时效温度及较长的保温时间为 α 相的长大提供了条件,因此晶界内 α 相发生粗化。

图 7 所示为不同热处理工艺下 TC4 钛合金的 X 射线衍射(XRD)图谱。由图 7 可知,在 4 种工艺下,代表 β 相的衍射峰峰值强度较小,且随着加热温度的升高,峰值强度不断增大。说明 SLM 成形 TC4 钛合金微观组织中 β 相的体积分数较小,且 β 相体积分数随着加热温度的升高而增大,与 SEM 微观分析结果一致。代表 α 相的衍射峰强度,按照成形态、退火态、固溶态、固溶时效态的顺序依次增加,说明试样经过三种热处理后, α 相发生粗化,且 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC 固溶时效处理后,其晶粒尺寸最大。

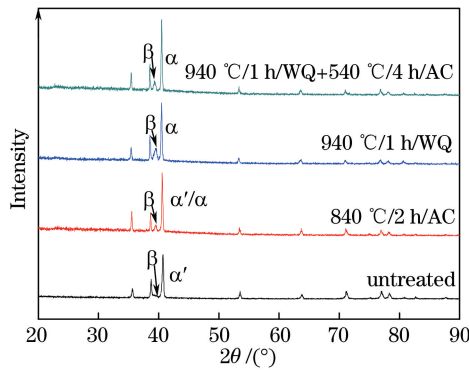


图 7 不同热处理工艺下 SLM 成形 TC4 钛合金试样 XRD 图谱

Fig. 7 XRD patterns of TC4 titanium alloy samples produced by SLM after different heat treatment processes

以上结果表明,SLM 成形 TC4 钛合金经热处理后,其 α 相晶粒按照退火、固溶、固溶时效的顺序依次粗化,晶界愈加清晰;同时随着加热温度的升高, β 相的体积分数不断增大。

3.2 热处理工艺对 SLM 成形 TC4 钛合金力学性能的影响

对热处理后的 TC4 钛合金试样进行力学性能测试,测试结果见表 4。

表 4 不同热处理工艺下 SLM 成形 TC4 钛合金试样的力学性能

Table 4 Mechanical properties of TC4 titanium alloy samples formed by SLM after different heat treatment processes

Heat treatment mode	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Reduction of area /%
No heat treatment	1130.55	1079.44	12.73	22.49
840 °C/2 h/AC	954.84	927.16	18.95	31.44
940 °C/1 h/WQ	880.67	841.37	15.95	15.36
940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC	901.93	890.31	15.35	10.89

由参考文献[21]可知,普通热轧退火 TC4 钛合金的抗拉强度为 996.43 MPa,屈服强度为 945.86 MPa,延伸率为 18.80%,断面收缩率为 30.00%。由表 4 可知,与普通热轧退火 TC4 钛合金相比,SLM 成形 TC4 钛合金具有强度高、塑性低的特点。而 SLM 成形 TC4 钛合金试样经过 840 °C/2 h/AC 退火处理后,针状 α' 马氏体转变为粗化的 $(\alpha+\beta)$ 相,对塑性的损伤作用减弱;同时,Al 和 O 等强化元素富集在 α 相中^[22], β 转变相的强度会低于 α 相的强度,因此最终试件的强度降低而塑性显著提高。试件经

940 °C/1 h/WQ 两相固溶处理后, α 相粗化, β 相的体积分数大幅度增大, 部分长直的 α 相发生了弯曲, 破坏了 β 相构成的连续晶界, 进行拉伸时, 对滑移阻碍作用减弱, 滑移较容易在晶界处发生位错积塞, 因此试样强度明显下降, 塑性提高; 与未经热处理的 SLM 成形 TC4 钛合金试件相比, 试件经 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC 固溶时效处理后, 强度降低, 塑性增大; 与固溶态相比, 固溶时效态 β 相晶界清晰, 但晶界两侧晶粒取向不同, 在进行拉伸时, 会阻碍滑移在晶粒间的延续, 强度/塑性匹配性能提高。对于 SLM 成形 TC4 钛合金件, 840 °C/2 h/AC 退火是比较合适的热处理工艺, 会提升其综合力学性能, 获得较佳的强度/塑性匹配。

图 8 所示为 SLM 成形 TC4 钛合金在 4 种处理方案下的断口形貌。未经热处理的试样, 其断口既有河流状的解理特征花样, 又存在韧窝特征, 断裂机制为韧脆性混合断裂。对于退火态、固溶态和固溶时效态试样, 其断裂机制均为韧性断裂; 在拉伸过程中, 滑移作用使材料内部分离形成的显微空洞不断聚集合并形成等轴韧窝, 塑性较好。

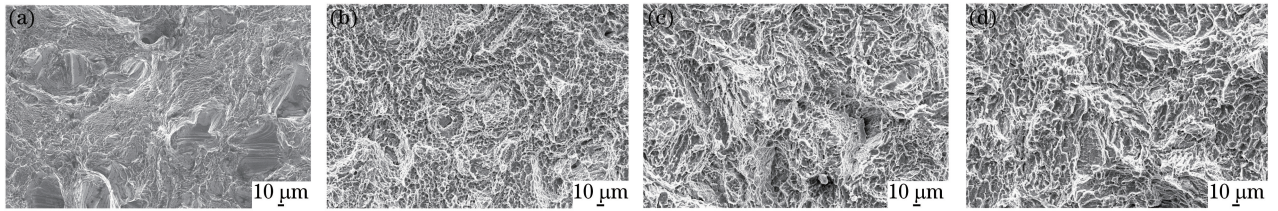


图 8 不同热处理工艺下试样的断口形貌。(a)未热处理;(b) 840 °C/2 h/AC;
(c) 940 °C/1 h/WQ;(d) 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC

Fig. 8 Fracture morphologies of samples after different heat treatment processes.

(a) Untreated; (b) 840 °C/2 h/AC; (c) 940 °C/1 h/WQ; (d) 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC

3.3 热处理工艺对 SLM 成形 TC4 钛合金残余应力的影响

在试样上下两端的夹持部位、中间拉伸部分及圆弧过渡处各取一点, 对 SLM 成形 TC4 钛合金成形态及热处理试样的残余应力进行测定, 图 9 所示为测量点示意图。借助 Simufact Additive 有限元软件对热处理前后试样的残余应力进行仿真, 获得残余应力云图, 如图 10 所示。实测结果及仿真数据见表 5, 可以发现, 残余应力实际测量值与仿真结果之间的误差约为 10%, 残余应力变化趋势基本一致, 即最高残余应力位于成形方向上端的圆弧过渡处; 经过退火热处理、固溶或固溶时效处理后, 试样各处残余应力均大幅度减小。TC4 钛合金 SLM 成形过程是一个急剧升温 and 快速凝固的过程, 材料在短时间内剧烈地热膨胀和冷却收缩, 产生了较大的温度梯度, 造成加工试样内积聚了不均匀的热应力; 同时, 由于材料相变, 受热材料与周围已凝固材料之间形成了结构上的不匹配^[23-24], 产生了相变应力, 热应力和相变应力的存在导致试样产生较大的残余应力。退火、固溶或固溶时效这三种热处理方式, 均通过加热升温过程提高了 TC4 钛合金原子活动能力, 实现了原子的重新排列组合, 促使亚稳定非平衡组织逐步转变为稳定平衡组织, 消除了晶粒中位错的聚集, 从而减小了试样的残余应力。因此, 热处理会减小 SLM 成形 TC4 钛合金试样的残余应力, 减少零件在工程应用中的变形开裂缺陷。

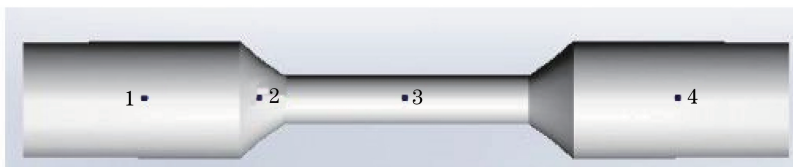


图 9 TC4 钛合金试样残余应力测量点示意图

Fig. 9 Schematic of residual stress measurement points on TC4 titanium alloy sample

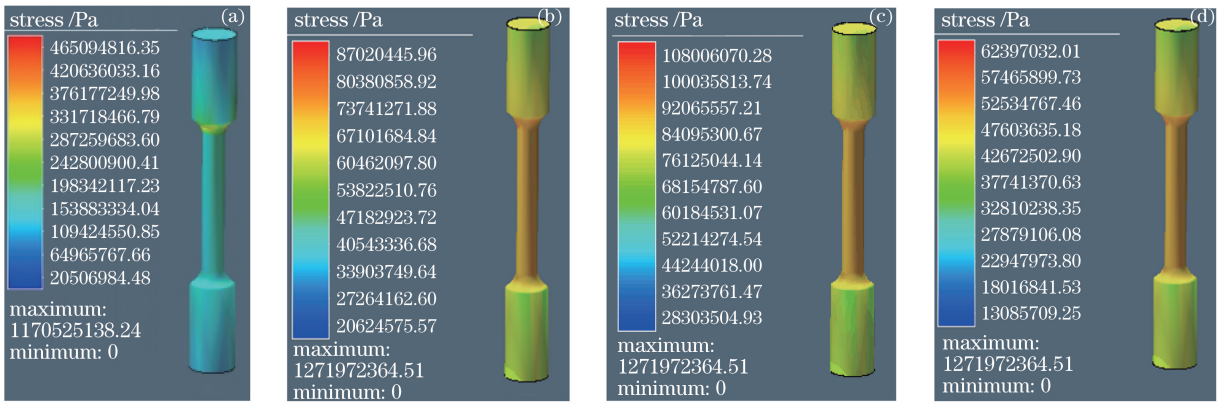


图 10 不同热处理工艺下 TC4 钛合金试样应力仿真。(a)未热处理;(b) 840 °C/2 h/AC;
(c) 940 °C/1 h/WQ;(d) 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC

Fig. 10 Stress simulation of TC4 titanium alloy samples after different heat treatment processes.
(a) Untreated; (b) 840 °C/2 h/AC; (c) 940 °C/1 h/WQ; (d) 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC

表 5 不同热处理工艺下 SLM 成形 TC4 钛合金试样的残余应力实测及仿真值

Table 5 Measured and simulated residual stresses of TC4 titanium alloy samples formed by SLM after different heat treatment processes

Heat treatment mode	Measured point	Residual stress /MPa	
		Measured	Simulated
Untreated	Point 1	175.5	183
	Point 2	258.4	260
	Point 3	113.3	127
	Point 4	106.1	115
840 °C/2 h/AC	Point 1	58.6	59
	Point 2	72.0	76
	Point 3	68.9	72
	Point 4	59.3	55
940 °C/1 h/WQ	Point 1	83.0	77
	Point 2	94.3	95
	Point 3	82.6	91
	Point 4	73.1	71
940 °C/1 h/WQ +540 °C/4 h/AC	Point 1	47.1	41
	Point 2	59.9	55
	Point 3	49.5	51
	Point 4	41.0	40

4 结 论

研究了 SLM 成形 TC4 钛合金的三种热处理工艺,分析了三种热处理方法下试样组织和力学性能的差异,得到如下结论。

1) SLM 成形 TC4 钛合金为细针状马氏体组织,强度高,塑性低。经过 840 °C/2 h/AC 退火处理后,SLM 成形 TC4 钛合金的显微组织由($\alpha+\beta$)相构成,试样的抗拉强度大于 950 MPa,断后延伸率高于 18%,获得了较佳的强度/塑性匹配。

2) 通过 940 °C/1 h/WQ 两相区固溶处理,SLM 成形 TC4 钛合金形成了交错的($\alpha+\beta$)网篮组织,随着加热温度的升高, β 相的含量增大,晶粒粗化,试样强度明显下降,塑性提高。

3) SLM 成形 TC4 钛合金经过 940 °C/1 h/WQ+540 °C/4 h/AC 固溶时效处理后,生成均匀弥散的($\alpha+\beta$)相, α 相粗化,强度降低,塑性小幅提高。

4) SLM 成形 TC4 钛合金经过热处理后,残余应力大幅减小,试样变形开裂倾向降低。

今后需要进一步研究热处理加热温度、保温时间、冷却速度等工艺参数对 SLM 成形 TC4 钛合金微观组织和宏观力学性能的影响规律,以建立便于工程应用的热处理制度及与零件性能匹配的数据库。

参 考 文 献

- [1] Sun L P, Lin G Y, Liu J, *et al.* Effect of low temperature thermo-mechanical treatment on microstructures and mechanical properties of TC4 alloy[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(3): 443-448.
- [2] Ji Shude, Wen Quan, Ma Lin, *et al.* Microstructure along thickness direction of friction stir welding TC4 titanium alloy joint[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(11): 1391-1399.
姬书得, 温泉, 马琳, 等. TC4 钛合金搅拌摩擦焊厚度方向的显微组织[J]. 金属学报, 2015, 51(11): 1391-1399.
- [3] Chen Xi, Yao Gang, Huang Rui, *et al.* Laser welding of TC4 titanium with aluminum insert[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603006.
陈曦, 姚刚, 黄锐, 等. TC4 钛合金加入铝夹层的激光焊接[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603006.
- [4] Xia Changqing, Li Jia, Gu Yi, *et al.* Interaction behavior between NiCrAlY coating and TC4 alloy substrate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2005, 36(4): 550-554.
夏长清, 李佳, 古一, 等. NiCrAlY 涂层/TC4 基体界面反应机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(4): 550-554.
- [5] Zhang Sheng, Gui Ruizhi, Wei Qingsong, *et al.* Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy formed by selective laser melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 21-27.
张升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4 钛合金开裂行为及其机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 21-27.
- [6] Diószegi A, Elmquist L, Orlenius J, *et al.* Defect formation of gray iron casting[J]. International Journal of Metalcasting, 2009, 3(4): 49-58.
- [7] Samavedam S, Sundarrajan S. Al-Si and Al-Si-Mg cast alloys shrinkage porosity estimation[J]. Archives of Foundry Engineering, 2016, 16(1): 61-68.
- [8] Xie Xuxia, Zhang Shuquan, Tang Haibo, *et al.* Effect of annealing temperatures on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TA15 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(9): 1510-1515.
谢旭霞, 张述泉, 汤海波, 等. 退火温度对激光熔化沉积 TA15 钛合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 1510-1515.
- [9] Yang Yongqiang, Wang Di, Wu Weihui. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601007.
杨永强, 王迪, 吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601007.
- [10] Han J C, Xiao S L, Tian J, *et al.* Microstructure characterization and tensile properties of a Ni-containing TiAl-based alloy with heat treatment[J]. Rare Metals, 2016, 35(1): 26-34.
- [11] Vrancken B, Thijs L, Kruth J P, *et al.* Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541: 177-185.
- [12] Liang Xiaokang, Dong Peng, Chen Jilun, *et al.* Microstructure and mechanical properties of selective laser melting Ti-6Al-4V alloy[J]. Applied laser, 2014, 34(2): 101-104.
梁晓康, 董鹏, 陈济轮, 等. 激光选区熔化成形 Ti-6Al-4V 钛合金的显微组织及性能[J]. 应用激光, 2014, 34(2): 101-104.
- [13] Chen Jing, Zhang Shuangyin, Xue Lei, *et al.* Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy by laser rapid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(3): 475-479.
陈静, 张霜银, 薛蕾, 等. 激光快速成形 Ti-6Al-4V 合金力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 475-479.
- [14] Gu D D, Meiners W, Wissenbach K, *et al.* Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2012, 57(3): 133-164.
- [15] Jie L I, Liu Y Y, Wang Q J, *et al.* Effect of continuous variable cross-section recycling extrusion on microstructure of TC4 alloy[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 344-350.
- [16] Wang Kun, Meng Mu, Wang Huaming. Effect of heat treatment and laser multi-track overlapping on microstructure of

- a laser melting deposition TC18 titanium alloy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 521-525.
- 王 堃, 孟 牧, 王华明, 等. 热处理及激光多道搭接对激光熔化沉积 TC18 钛合金组织的影响[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 521-525.
- [17] Sun Longsheng, Wu Jinman. Effect of melting method and forging temperature on TC4 disc[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(s1): 337-338.
- 孙龙生, 吴金满. 熔炼方法和锻造温度对 TC4 锻饼组织性能的影响[J]. *金属学报*, 2002, 38(s1): 337-338.
- [18] Sun S D, Zong Y Y, Shan D B, *et al.* Hot deformation behavior and microstructure evolution of TC4 titanium alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(11): 2181-2184.
- [19] Dong Zhijun, Lü Tao, Lei Zhenglong, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 alloys[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2013(1): 27-30.
- 董智军, 吕 涛, 雷正龙, 等. 激光焊接 TC4 钛合金组织性能研究[J]. *航天制造技术*, 2013(1): 27-30.
- [20] Yang J, Han J, Yu H, *et al.* Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 110: 558-570.
- [21] Peng X N, Guo H Z, Shi Z F, *et al.* Microstructure characterization and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy after thermomechanical treatment[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(3): 682-689.
- [22] Huang Zhengyang, Guo Zijing, Wen Guangping, *et al.* Mechanical properties of TC4 alloy annealed with different processes[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(9): 175-179.
- 黄正阳, 郭子静, 文光平, 等. 不同工艺退火后 TC4 合金的力学性能[J]. *金属热处理*, 2015, 40(9): 175-179.
- [23] Zhang Kai, Liu Tingting, Zhang Changdong, *et al.* Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0903007.
- 张 凯, 刘婷婷, 张长东, 等. 基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903007.
- [24] Kruth J P, Levy G, Klocke F, *et al.* Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2007, 56(2): 730-759.