

热处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织及力学性能的影响

陈 博¹ 邵 冰² 刘 栋^{1*} 田象军¹ 刘长猛¹ 王华明¹

(¹ 北京航空航天大学激光材料制备与成形实验室, 北京 100191)
(² 中国人民解放军海军驻沈阳地区军事代表室, 辽宁 沈阳 110000)

摘要 激光熔化沉积(LMD)TC17 钛合金在航空航天领域具有广阔的应用前景,其沉积态试样强度较高但塑性较差,为了改善其综合力学性能,首先对 LMD TC17 钛合金进行退火处理,结果表明随退火温度升高 α 相含量逐渐减小, α 片层粗化,塑性升高而强度下降,且退火后 LMD TC17 钛合金拉伸性能未达到盘件技术标准。进一步研究固溶时效对其组织性能的影响,固溶温度升高将使初生 α 相(α_P)相含量降低、 α_P 片层粗化;时效温度升高使次生 α 相(α_S)粗化。拉伸性能受 α_P 、 α_S 相含量、 α 片层厚度等因素影响, β 基体上均匀弥散析出细小 α_S 的组织将有利于提高强度, α_P 含量增加、组织粗化有利于提高塑性,通过 800 °C/4 h 固溶处理后水淬以及 630 °C/8 h 空热处理可以使 LMD TC17 钛合金获得较优的强塑性匹配,拉伸性能达到盘件技术标准。

关键词 激光技术; 激光熔化沉积; TC17 钛合金; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG146.2+3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0403001

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Melting Deposited TC17 Titanium Alloy

Chen Bo¹ Shao Bing² Liu Dong¹ Tian Xiangjun¹ Liu Changmeng¹ Wang Huaming¹

(¹ *Laboratory of Laser Materials Processing and Manufacturing, Beihang University, Beijing 100191, China*)
(² *Peoples Liberation Army Navy in Shenyang Area Military Representative Room, Shenyang, Liaoning 110000, China*)

Abstract Laser melting deposited (LMD) TC17 titanium alloy has a vast application prospect in aerospace industries. The mechanical properties of LMD TC17 as-deposited alloy exhibits excellent strength yet lower ductility. Therefore, in an attempt to improve the mechanical properties, anneal treatment for LMD TC17 alloy is firstly studied. The volume fraction of primary α phase (α_P) decreases and α lath coarsens with rising temperature, which is good for ductility but harmful for strength. Anneal treated LMD TC17 alloy cannot obtain optimistical combination of strength and ductility to conform to disk technical standard. The effect of solution-aging treatment on microstructure and mechanical properties of LMD TC17 alloy is further studied. The volume fraction of α_P increases and α lath coarsens with solution temperature rising, and α_S coarsens obviously when aged at high temperature. The mechanical properties are sensitive to volume fraction of α_P and α_S , as well as width of α lath. The ultra fine α_S precipitation in β matrix results in high strength. Coarsening α lath and increasing volume fraction of α_P are helpful for ductility. After 800 °C/4 h, annealing and water quenching, then 630 °C/8 h air cool treated, LMD TC17 alloy can obtain optimistical combination of strength and ductility, which conform to the disk technical standard.

Key words laser technique; laser melting deposition; TC17 titanium alloy; heat treatment; microstructure; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 160.3900

收稿日期: 2013-09-18; 收到修改稿日期: 2013-11-03

基金项目: 国家 973 计划(2010CB731705)

作者简介: 陈 博(1988—),男,硕士研究生,主要从事钛合金的激光熔化沉积方面的研究。

E-mail: cb460770063@126.com

导师简介: 王华明(1962—),男,博士,教授,主要从事大型金属结构件的激光直接制造方面的研究。

E-mail: wanghm@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liudong@buaa.edu.cn

1 引言

钛合金具有较高的比强度和优秀的抗腐蚀性,广泛应用于航空航天等领域^[1]。然而由于钛合金变形抗力大、切削加工工艺性能差,采用传统锻造和机械加工方法制造大型钛合金构件周期长、成本高、制造难度大。激光熔化沉积(LMD)技术是一种实体自由成形技术,以金属粉末为原材料,通过高能激光束对金属原材料的逐层熔化堆积,直接由零件的计算机辅助设计(CAD)模型一步完成全致密、高性能、大型复杂金属零件的“近终成形”制造^[2],具有成本低、加工周期短和材料利用率高等优点,在航空航天等工业中具有广泛的应用前景。

目前激光熔化沉积技术已成功应用于制备 TC4 钛合金构件,且得到深入系统的研究^[3-5],而有关激光熔化沉积 TC17 钛合金的报道较少。TC17 (名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr)是一种富 β 稳定元素的两相钛合金,具有强度高、断裂韧性好、淬透性高等优点,常用于设计大截面的锻件与发动机风扇、压气机盘件^[6-8]。由于激光熔化沉积 TC17 钛合金沉积态显微组织存在不均匀性,且力学性能表现为高强度低塑性,因此需要通过热处理改善组织以获得优异的综合力学性能。激光熔化沉积制备 TC17 钛合金不同于锻件 TC17 钛合金,热处理后显微组织与锻件存在明显差异^[9],晶内 α 相通常表现为板条状形貌,初生 α 相(α_P)相含量与 α 板条的长径比会受到固溶温度与固溶时间的影响^[10],且有研究表明激光熔化沉积 TC17 钛合金在去应力退火过程中,由于残余应力的作用板条状 α_P 会发生明显球化^[11]。然而目前研究的激光熔化沉积 TC17 钛合金的力学性能结果均无法达到 TC17 钛合金锻件标准,因此有必要对激光熔化沉积 TC17 钛合金的热处理进行系统研究。

本文首先研究了激光熔化沉积 TC17 钛合金沉积态的显微组织和力学性能。为了使激光熔化沉积 TC17 钛合金拉伸性能达到锻件标准,分别研究了普通退火热处理和固溶时效热处理对其组织和力学性能的影响,并讨论了热处理工艺对显微组织的影响规律以及显微组织与力学性能之间的关系,为热处理工艺进一步优化提供基础。

2 实验材料与方法

本实验以真空等离子旋转电极雾化 TC17 钛合金球形粉末作为原料,粉末粒度为 50~100 μm ,以经

打磨擦洗的 TA1 钛合金板为沉积基板,采用 8 kW 的 CO₂ 激光熔化沉积系统制备几何尺寸为 300 mm×200 mm×35 mm 的试样板,制备时采用氩气作为保护气体,氧气含量小于 5×10^{-5} (体积分数),工艺参数为:激光正常输出功率 5 kW,光斑直径约 5 mm,扫描速度为 800 mm/min,搭接率为 30%~40%,送粉率约 700 g/h。成形件化学成分(质量分数,%)为:5.02Al, 2.10Sn, 1.90Zr, 4.07Mo, 4.05Cr, 0.10Fe, 0.0093C, 0.030N, 0.0029H, 0.11O, 其余为 Ti。经金相法测定其相转变点 T_p 为 895 ± 5 $^{\circ}\text{C}$ 。

热处理试样均由电火花线切割加工、取自激光熔化沉积 TC17 试样板上,尺寸为 25 mm×25 mm×20 mm,并按顺序编号,1#、2#、3# 试样分别经 630 $^{\circ}\text{C}$ 、700 $^{\circ}\text{C}$ 、750 $^{\circ}\text{C}$ /8 h 普通退火热处理(AC); 4#、5#、6# 试样首先分别于 760 $^{\circ}\text{C}$ 、800 $^{\circ}\text{C}$ 、840 $^{\circ}\text{C}$ /4 h 固溶处理后水淬(WQ),然后进行 630 $^{\circ}\text{C}$ /8 h 时效处理; 7#、8# 则先进行 800 $^{\circ}\text{C}$ /4 h 水淬固溶处理,再分别进行 610 $^{\circ}\text{C}$ 、650 $^{\circ}\text{C}$ /8 h 时效处理,热处理制度如表 1 所示。

表 1 激光熔化沉积 TC17 钛合金热处理制度
Table 1 Heat treatment for LMD TC17 alloy

Samples	Heat treatment
As-deposited	—
1#	630 $^{\circ}\text{C}$ /8 h, AC
2#	700 $^{\circ}\text{C}$ /8 h, AC
3#	750 $^{\circ}\text{C}$ /8 h, AC
4#	760 $^{\circ}\text{C}$ /4 h, WQ+630 $^{\circ}\text{C}$ /8 h, AC
5#	800 $^{\circ}\text{C}$ /4 h, WQ+630 $^{\circ}\text{C}$ /8 h, AC
6#	840 $^{\circ}\text{C}$ /4 h, WQ+630 $^{\circ}\text{C}$ /8 h, AC
7#	800 $^{\circ}\text{C}$ /4 h, WQ+610 $^{\circ}\text{C}$ /8 h, AC
8#	800 $^{\circ}\text{C}$ /4 h, WQ+650 $^{\circ}\text{C}$ /8 h, AC

纵向(沿激光熔化沉积增高方向)金相(OM)试样经机械打磨并抛光后进行腐蚀,腐蚀剂选取体积比为 1:6:43 的 HF-HNO₃-H₂O 溶液。使用 Olympus BX51M 型光学显微镜(OM)和 CS3400 型扫描电子显微镜(SEM)观察分析合金的显微组织。采用 Siscias V8.0 图像分析软件对 α_P 的体积分数、 α 板条厚度进行定量分析。

根据 GB/T 228.1 标准进行室温拉伸性能测试,标准拉伸试样规格如图 1 所示。所有测试试样均沿激光熔化沉积 TC17 试样板材纵向自中心部取样,每组实验重复 3 根试样。

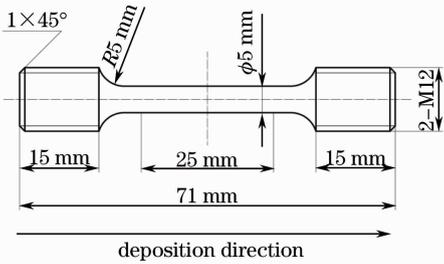


图 1 标准拉伸试样规格

Fig. 1 Standard tensile test specimen

3 实验结果与分析

3.1 激光熔化沉积 TC17 钛合金沉积态组织结构与性能

激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织如图 2 所示,其纵向截面可观察到厚度均匀、规律分布的多层沉积层以及贯穿数个沉积层、长短不一的柱状晶原始 β 晶粒形貌,晶粒宽度约 $300\ \mu\text{m}$,沉积态晶粒内为极细小的网篮组织, α 板条约 $0.3\sim 0.4\ \mu\text{m}$ 宽、 $1\sim 4\ \mu\text{m}$ 长。

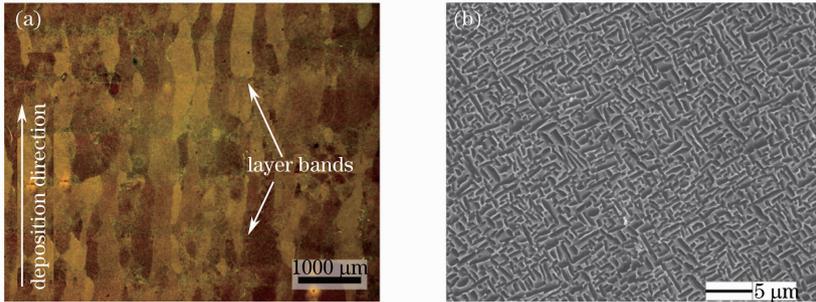


图 2 激光熔化沉积 TC17 钛合金沉积态显微组织。(a) OM 照片; (b) SEM 照片

Fig. 2 Microstructure of LMD TC17 as-deposited alloy. (a) OM photo; (b) SEM photo

原始 β 晶粒形貌形成于熔池的凝固过程^[12-13]。随着激光光斑的扫描移动,已沉积 TC17 钛合金材料顶层被激光辐照的区域会与同时送入的金属粉末共同熔化,形成熔池,随后快速凝固。在凝固过程中,由于热量通过已沉积合金向基板迅速传导散失,熔池内部存在较大的温度梯度,熔池底部凝固呈现在熔池基底晶粒上的外延取向生长特征。由于钛合金熔体具有很高的活性,熔池内部几乎不存在异质形核核心^[14],而熔池表面与气氛接触形成的细晶层又为下一层沉积层重熔完全消除,因此外延定向柱状晶形态没有因多层沉积受到破坏,通过逐层外延生长,最终形成了沿沉积方向贯穿数个沉积层的柱状晶晶粒形貌。

沉积态 α 片层形貌与熔池的快速凝固以及随后沉积过程中循环热影响有关。在激光熔化沉积过程

中,熔池中液态金属以极大的冷却速度凝固,形成了极细小的 β 转变组织,其后的逐层沉积过程会对这种原始凝固组织多次循环加热,导致其中极细小的 β 转变组织粗化,形成了细小的网篮组织^[15]。

激光熔化沉积 TC17 钛合金沉积态试样的拉伸性能为: 抗拉强度 $\sigma_b = 1230\ \text{MPa}$, 屈服强度 $\sigma_{0.2} = 1179\ \text{MPa}$, 断后伸长率 $\delta = 7.0\%$, 断面收缩率 $\Psi = 9.3\%$, 强度远超过 TC17 钛合金盘件技术标准 ($\sigma_b \geq 1120\ \text{MPa}$, $\sigma_{0.2} \geq 1030\ \text{MPa}$, $\delta \geq 5\%$, $\Psi \geq 10\%$)^[16], 而塑性略低,需要通过热处理调整性能配比。

3.2 退火处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金的影响

经退火处理后,原始 β 晶粒形貌与尺寸无明显变化,显微组织呈现较粗大的片状 α 相均匀分布在 β 基体上的特征,晶界上存在明显 α 相。与沉积态 TC17 相比,经退火处理后晶内 α 片层有所长大,且温度越高 α

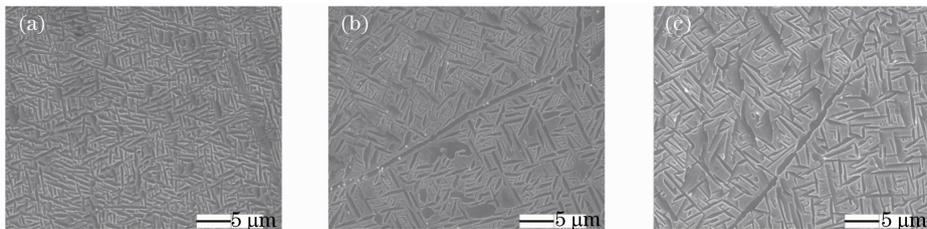


图 3 激光熔化沉积 TC17 钛合金经不同温度退火后显微组织。(a) 630 °C/8 h, 热退火处理;

(b) 700 °C/8 h, 热退火处理; (c) 750 °C/8 h, 热退火处理

Fig. 3 Microstructure of LMD TC17 alloy after annealing at different temperatures. (a) 630 °C/8 h, AC;

(b) 700 °C/8 h, AC; (c) 750 °C/8 h, AC

片层粗化程度越显著,随退火温度由 630 °C 升高到 750 °C, α_P 体积分数由 71% 减小到 59%, α 片层厚度由 0.40 μm 增加至 0.57 μm (如表 2 所示)。

表 2 激光熔化沉积 TC17 钛合金热处理后显微组织特征

Table 2 Microscopic characteristics of LMD TC17 alloy after heat treatment

Heat treatment	Samples	Volume fraction of α_P / %	Width of α_P lath / μm	Width of α_S lath / μm
Different annealing temperatures	1 #	71	0.40	—
	2 #	63	0.43	—
	3 #	59	0.57	—
Different solution temperatures	4 #	61	0.36	—
	5 #	54	0.63	0.10
	6 #	33	0.72	0.09
Different aging temperatures	7 #	50	0.62	0.07
	5 #	54	0.63	0.10
	8 #	52	0.65	0.12

在进行退火处理时,显微组织主要发生两个变化。首先,由于退火温度较高,该温度下平衡 α 相含量低于沉积态,因此部分 α 相会转变为 β 相, α 相含量随温度升高而降低。其次,在 α 溶解过程中同时伴随着以减小表面能为驱动力的相数量和尺寸变化,类似 Ostwald 熟化过程,细小 α 相具有较大的曲率,界面能高,不易稳定存在,将优先溶解, α 相数量减少,少量粗大 α 相则会保留下来,同时长径比减小、片层厚度增加,退火温度越高,元素扩散越容易,故 α 相尺寸随退火温度升高而增大^[17]。

1~3 # 退火试样的拉伸性能列于图 4。相比于沉积态试样 ($\sigma_b = 1230 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} = 1178 \text{ MPa}$, $\delta = 7.0 \%$, $\Psi = 9.3 \%$), 经退火处理后强度有明显降

低,塑性有很大提升。 α_P 为密排六方(HCP)结构,只有三个独立滑移系,故塑性变形能力低于体心立方(BCC)结构的 β 基体^[18], β 含量的增加提高了整体塑性。此外试样中没有次生 α 相(α_S)析出, α_P/β 界面起到主要的强化作用,随着 α_P 粗化, α 含量和数量减少、尺寸增大, α/β 界面明显减少,界面强化效应下降。因此对于退火处理的试样, α_P 相含量的降低以及 α_P 片层厚度的增加会导致强度降低,塑性提高。

经过 630 °C 退火处理,激光熔化沉积 TC17 强度满足 TC17 钛合金盘件技术标准所规定范围而塑性未达标,在较高温度退火(700 °C、750 °C)后,塑性有很大提升但强度大幅度下降,通过退火处理无法使强度与塑性达到较优的配比。

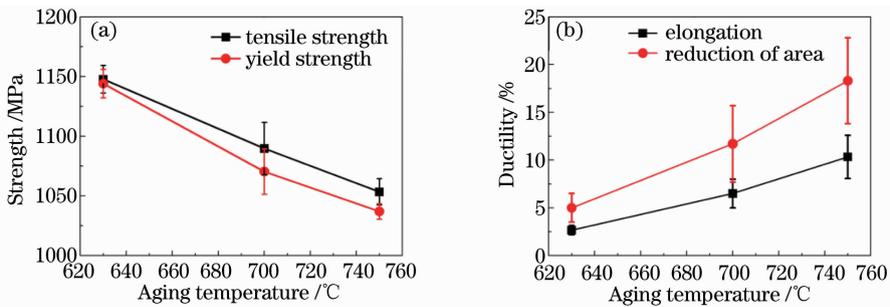


图 4 激光熔化沉积 TC17 钛合金经不同温度退火后纵向力学性能。(a) 强度性能;(b) 塑性性能

Fig. 4 Longitudinal mechanical properties of LMD TC17 alloy after annealing at different temperatures.

(a) Strength property; (b) ductility property

3.3 固溶时效处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金的影响

将 5 # 试样进行 800 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC 固溶时效热处理后, β 晶粒无明显变化,晶界上析出粗大连续的晶界 α 相,晶内显微组织通常由粗大 α_P 与细小弥散 α_S/β 转变组织组成。在固溶过程

中, α 相逐渐粗化且相含量逐渐降低,形成较粗大的 α_P 与晶界 α , α 片层厚度增大有助于提高塑性,之后水淬处理将大量元素固溶在 β 基体中,时效时 β 基体析出析出细小弥散的 α_S ,大大增加了 α/β 相界面,从而获得较高的强度。 α_P 含量、尺寸与 α 片层厚度会受到固溶时效温度等热处理工艺的影响,材料的力学性能随之改变。

3.3.1 固溶温度影响

将沉积态试样分别进行 760 °C、800 °C、840 °C 固溶处理,并在 630 °C 进行时效(4~6 号试样),热处理后试样显微组织如图 5 所示。经固溶时效处理后, α_P 相比于沉积态有明显长大,固溶温度显著影响 α_P 的

相体积分数与片层厚度,随着固溶温度由 760 °C 提高到 840 °C, α_P 体积分数由 61% 降低至 33%,片层厚度由 0.36 μm 增加到 0.72 μm (如表 2 所示),晶界两侧部分 α_P 优先溶解,逐渐形成没有 α_P 的区域,其宽度随固溶温度升高而增加(如图 5 所示)。

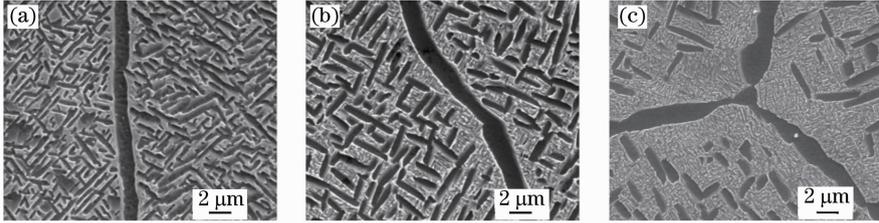


图 5 激光熔化沉积 TC17 钛合金经不同温度固溶且时效后显微组织。(a) 760 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC; (b) 800 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC; (c) 840 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC

Fig. 5 Microstructure of LMD TC17 alloy after solution and aging treatment with different solution temperatures.

(a) 760 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC; (b) 800 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC; (c) 840 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC

经过 630 °C 时效处理,对于 800 °C 与 840 °C 固溶处理试样(试样 5 号,6 号),在 β 基体中开始析出 α_S ,而 760 °C 固溶后时效没有 α_S 析出(试样 4 号)。对于试样 4 号,由于固溶温度较低,时效时 β 基体中过饱和固溶元素含量相对较少, α 相核驱动力小,难以在 β 基体中自发形核,因此时效过程中 α 相的脱溶析出是以依附于 α_P 长大、 α_P 粗化的方式进行,而不是从 β 基体中自由形核析出 α_S 。而对于试样 5 号和 6 号,时效过程中 α_P 的粗化与 α_S 的析出同时进行。

积态试样($\sigma_b = 1230 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} = 1178 \text{ MPa}$, $\delta = 7.0\%$, $\Psi = 9.3\%$),4 号、5 号试样强度明显降低,塑性明显提高,这是由于经过固溶时效处理后 α_P 片层发生粗化, α/β 相界面明显减少,对位错运动的阻碍降低,5 号试样中存在部分细小弥散析出相 α_S ,但数量有限,对强度的提升有限。随着固溶温度的升高,尽管 α_P 有明显粗化(840 °C 固溶时 α 片层厚度为 0.72 μm), β 基体中会析出大量细小弥散析出的 α_S ,产生大量相界面,对位错起到强烈的阻碍作用导致强度升高而塑性下降。

α_S 的含量对材料的强度有很大的提高作用。4~6 号试样的纵向拉伸性能如图 6 所示,相比于沉

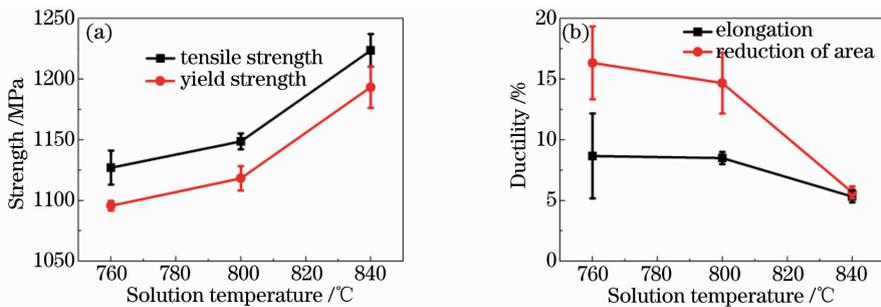


图 6 激光熔化沉积 TC17 钛合金经不同温度固溶处理且时效后纵向力学性能。(a) 强度性能; (b) 塑性性能

Fig. 6 Longitudinal mechanical properties of LMD TC17 alloy after solution and aging treatment with different solution temperatures. (a) Strength property; (b) ductility property

3.3.2 时效温度影响

将沉积态试样在 800 °C/4 h, WQ 固溶处理后分别进行 610 °C, 630 °C, 650 °C/8 h 时效(7 号, 5 号, 8 号试样),热处理后试样显微组织如图 7 所示,固溶处理时,试样中保留一定含量的 α_P ,在时效阶

段, β 基体中析出 α_S ,其片层厚度受时效温度影响较大,较高的时效温度可使元素扩散更容易, α_S 发生粗化。随着时效温度由 610 °C 提高到 650 °C, α_S 片层厚度由约 0.07 μm 提升到 0.12 μm ,提升约 70%,而 α_P 体积分数与片层厚度变化不明显。

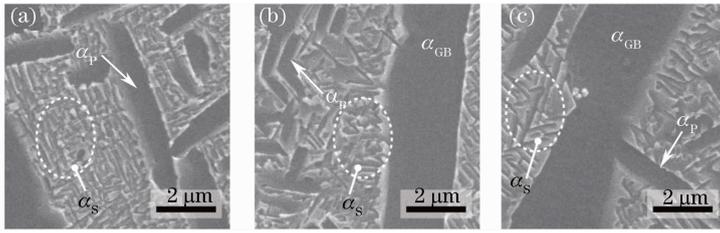


图 7 激光熔化沉积 TC17 钛合金固溶后经不同温度时效处理后显微照片。(a) 800 °C/4 h, WQ+610 °C/8 h, AC; (b) 800 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC; (c) 800 °C/4 h, WQ+650 °C/8 h, AC

Fig. 7 Microstructure of LMD TC17 alloy after solution and aging treatment with different aging temperatures.

(a) 800 °C/4 h, WQ+610 °C/8 h, AC; (b) 800 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC; (c) 800 °C/4 h, WQ+650 °C/8 h, AC

α_s 的片层厚度会对材料的强度与塑性产生明显影响,7#、5#、8# 试样的纵向拉伸性能如图 8 所

示, α_s 片层越厚,则 α_s/β 界面数量降低,界面强化作用减弱,材料的强度降低而塑性提高。

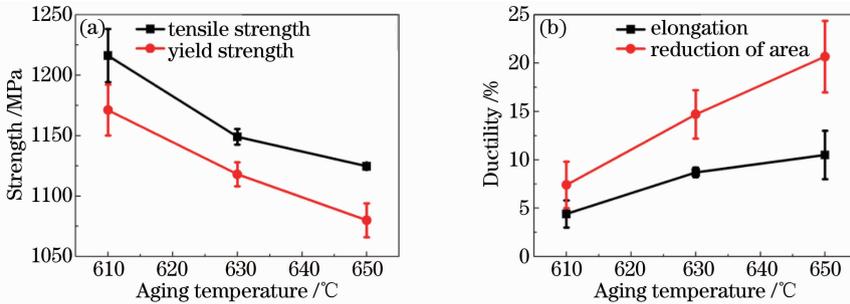


图 8 激光熔化沉积 TC17 钛合金固溶处理后经不同温度时效处理后纵向力学性能。(a) 强度性能;(b) 塑性性能

Fig. 8 Longitudinal mechanical properties of LMD TC17 alloy after solution and aging treatment with different aging temperatures. (a) Strength property; (b) ductility property

固溶时效处理中,固溶温度与时效温度均对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织有很大影响。固溶温度主要影响 α_p 的含量和尺寸,固溶温度越高,则 α_p 体积分数越小,细小 α_s/β 片层组织越多,界面强化效应越强,故强度越高塑性越低。而 α_p 片层增厚,对塑性有利。时效温度主要影响 α_s 的体积分数和片层厚度,时效温度越高, α_s 体积分数越小,同时发粗化, α/β 界面减少,位错运动所受阻碍减小,界面强化效应减弱,故强度下降塑性提高。

相比于退火处理与沉积态试样,激光熔化沉积 TC17 钛合金经过固溶时效处理后其强度与塑性匹配有较大改善。其中,经 800 °C/4 h, WQ+630 °C/8 h, AC 固溶时效处理后(5# 试样),材料表现出强塑性匹配较好的拉伸性能($\sigma_b = 1149$ MPa, $\sigma_{0.2} = 1118$ MPa, $\delta = 8.5\%$, $\Psi = 14.7\%$),强度较沉积态降低 60~80 MPa,断后伸长率与沉积态相当,断面收缩率提高近 50%,纵向拉伸性能达到 TC17 钛合金盘件技术标准,可在此基础上探究适用于激光熔化沉积 TC17 钛合金的热处理工艺。

4 结 论

1) 激光熔化沉积 TC17 钛合金的宏观组织为沿沉积增高方向外延生长、贯穿数个沉积层的柱状晶,显微组织为细密的网篮组织。沉积态试样强度较高但塑性较差。

2) 激光熔化沉积 TC17 钛合金经过退火处理后显微组织转变为粗大的网篮组织,随着退火温度升高, α 相体积分数逐渐降低, α 片层厚度逐渐增加,材料的塑性升高但强度下降明显,仍不能满足盘件技术标准。

3) 激光熔化沉积 TC17 钛合金经过固溶时效处理后显微组织转变为具有粗大初生 α 相(α_p) 和细小次生 α 相(α_s) 的双态组织。随固溶温度的降低, α_s 相体积分数逐渐降低, α_p 片层厚度减小,强度降低而塑性升高。随时效温度的降低, α_s 片层厚度减小,强度升高而塑性下降。

4) 激光熔化沉积 TC17 钛合金经过 800 °C/4 h, WQ + 630 °C/8 h, AC 热处理后强塑性匹配达到最佳,其纵向拉伸性能($\sigma_b = 1148$ MPa, $\sigma_{0.2} =$

1118 MPa, $\delta=8.5\%$, $\Psi=14.7\%$) 可满足盘件拉伸测试技术标准 ($\sigma_b \geq 1120$ MPa, $\sigma_{0.2} \geq 1030$ MPa, $\delta \geq 5.0\%$, $\Psi \geq 10\%$)。

参 考 文 献

- 1 Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, 213(1-2): 103-114.
- 2 Wang Huaming, Zhang Lingyun, Li An, *et al.*. Progress on rapid solidification laser processing for advanced materials and components[J]. *World Sci Tech R&D*, 2004, 26(3): 27-31.
王华明, 张凌云, 李安, 等. 先进材料与高性能零件快速凝固激光加工研究进展[J]. *世界科技研究与发展*, 2004, 26(3): 27-31.
- 3 Kelly S M, Kampe S L. Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti-M4V builds: part I. microstructural characterization[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, 35A(6): 1861-1867.
- 4 Kelly S M, Kampe S L. Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti-6Al-4V builds: part II. thermal modeling [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, 35A(6): 1869-1879.
- 5 Wu X, Liang J, Mei J, *et al.*. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V[J]. *Materials & design*, 2004, 25(2): 137-144.
- 6 Teixeira J D C, Appolaire B, Aeby-Gautier E, *et al.*. Transformation kinetics and microstructures of Ti17 titanium alloy during continuous cooling [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 448(1-2): 135-145.
- 7 Wang Tao, Guo Hongzhen, Tan Lijun, *et al.*. Beta grain growth behaviour of TG6 and Ti17 titanium alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(21): 6375-6380.
- 8 Zhao Zhanglong, Guo Hongzhen, Wang Xiaochen, *et al.*. Deformation behavior of isothermally forged Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr powder compact [J]. *J Materials Processing Technology*, 2009, 209(15-16): 5509-5513.
- 9 Li Xu, Liu Dong, Tang Haibo, *et al.*. Fiber laser welding characteristics of laser melting deposited TC17 alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0103010.
李旭, 刘栋, 汤海波, 等. 激光熔化沉积 TC17 钛合金光纤激光焊接特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0103010.
- 10 Sun Xiaomin, Liu Dong, Tang Haibo, *et al.*. Effect of solution and aging heat treatment on microstructure of laser melting deposited TC17 Alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(14): 226-229.
- 11 孙晓敏, 刘栋, 汤海波, 等. 固溶时效对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织的影响[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(14): 226-229.
- 11 Wang Junwei, Chen Jing, Liu Yanhong, *et al.*. Research on microstructure of TC17 titanium alloy fabricated by laser solid forming[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 847-851.
王俊伟, 陈静, 刘彦红, 等. 激光立体成形 TC17 钛合金组织研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 847-851.
- 12 Liu C M, Tian X J, Tang H B, *et al.*. Microstructural characterization of laser melting deposited Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe near β titanium alloy[J]. *J Alloys and Compounds*, 2013, 572: 17-24.
- 13 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 Laser Engineering*, 2010, 39(3): 521-525.
王堃, 孟牧, 王华明. 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.
- 14 Mridha S, Baker T N. Effects of nitrogen gas flow rates on the microstructure and properties of laser-nitrided IMI318 titanium alloy (Ti-4V-6Al)[J]. *J Materials Processing Technology*, 1998, 77(1-3): 115-121.
- 15 Tian Xiangjun, Zhang Shuquan, Tang Haibo, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited titanium alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2009, 34(12): 51-54.
田象军, 张述泉, 汤海波, 等. 激光熔化沉积 TC2 钛合金显微组织及力学性能[J]. *金属热处理*, 2009, 34(12): 51-54.
- 16 Huang Boyun, Li Chenggong, Shi Likai, *et al.*. *China Materials Engineering Canon Non-Ferrous Metal Engineering*, vol. 4[J]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 620-621.
黄伯云, 李成功, 石力开, 等. *中国材料工程大典(第4卷): 有色金属材料工程(上)*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 620-621.
- 17 Tarin P, Fernandez A L, Simon A G, *et al.*. Transformations in the Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti-17) alloy and mechanical and microstructural characteristics [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 438: 364-368.
- 18 Tian X J, Zhang S Q, Li A, *et al.*. Effect of annealing temperature on the notch impact toughness of a laser melting deposited titanium alloy Ti-4Al-1.5 Mn[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(7-8): 1821-1827.

栏目编辑: 宋梅梅