

激光与光电子学进展

点式锻造激光沉积 TC17 钛合金热处理组织与力学性能

崔广发, 席明哲*, 周昊阳, 陈帅, 程焜

燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 采用点式锻造激光沉积技术在 TA0 基板上成形三维 TC17 厚壁件。利用光学显微镜、扫描电子显微镜、单向拉伸试验和显微测试硬度来分析其沉积态和退火态组织与力学性能。结果表明,原始宏观晶粒呈等轴状形貌,晶粒内部以大量初生细小 α 板条、少量的等轴 α 相和 β 转变组织形成。分别对沿沉积高度方向和垂直沉积高度方向做室温单向拉伸试验,两个方向拉伸强度均超过锻件退火态国家标准。硬度测试表明原始沉积区维氏硬度在 400 HV 左右,随着温度增加,硬度呈下降趋势。单向拉伸试验结果显示,经 850 °C/1 h 退火后,两个方向的强度和塑性都明显地下降,610 °C/1 h 退火后,材料强度显著增加,塑性显著降低。730 °C/1 h 退火后,试样两个方向的强度与沉积态相比稍有降低,塑性得到提升,扫描电镜照片显示,经 730 °C 处理后的拉伸断口韧窝深且密,表现为韧性断裂。

关键词 材料; 点式锻造; 激光沉积; TC17 钛合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG132.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0316003

Microstructure and Mechanical Properties of Heat-Treated TC17 Titanium Alloy Formed via Point-Mode Forging Laser Deposition

Cui Guangfa, Xi Mingzhe*, Zhou Haoyang, Chen Shuai, Cheng Kun

Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A three-dimensional TC17 thick-walled part was formed on a TA0 substrate using point-mode forging laser deposition technology. Its deposited and annealed structure and mechanical properties were analyzed using an optical microscope, scanning electron microscope, uniaxial tensile test, and microhardness test. The results show that the original macroscopic grains have an equiaxed morphology, and the grains' interiors are formed by numerous primary fine α laths, few equiaxed α phases, and β transformation structures. The uniaxial tensile test was performed at room temperature along the deposition height direction and vertical deposition height direction. Tensile strength in both directions exceeded the national standard for forgings in the annealed state. The hardness test shows that the original deposition area has a Vickers hardness of ~ 400 HV, and the hardness exhibits a downward trend as the temperature increases. The uniaxial tensile test results show that the strength and plasticity in both directions significantly reduced after annealing at 850 °C/1 h. After annealing at 610 °C/1 h, the material's strength is significantly increased, and the plasticity is significantly reduced. After annealing at 730 °C/1 h, the sample's strength in both directions is slightly reduced compared with the deposited state, but its plasticity is improved. The scanning electron microscope photos show that the tensile fracture dimples formed after 730 °C treatment are deep and dense, indicating toughness fracture.

Key words material; point-mode forging; laser deposition; TC17 titanium alloy; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-08; 录用日期: 2021-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(51875502)

通信作者: *ximingzhe@ysu.edu.cn

1 引言

TC17[Ti(1%)、Al(5%)、Sn(2%)、Zr(2%)、Mo(4%)、Cr(4%)，质量分数]钛合金，美国代号 Ti-17，通用公司于 20 世纪 70 年代研制成功，并制造出先进的 GE 发动机。TC17 钛合金作为一种富 β 稳定元素的两相钛合金，具有高强、高韧、高淬透性的特点，故又称之为“三高”合金。TC17 钛合金主要在温度低于 500 °C 环境下工作，表现出优异的综合力学性能，主要应用于制造发动机风扇、压气机盘件等航空用关键零部件^[1-3]。

激光技术的快速发展，使得钛合金、高温合金等合金系列成形技术得到了新的突破。区别于传统的减材制造，激光成形技术是基于计算机技术和快速原型技术的发展，衍生出来的一种新的近净成形的快速增材制造技术，具有生产周期短、成形自由度高、材料利用率高等加工优点，广泛应用于航空航天关键零部件的制造^[4-7]。

钛合金锻件的等轴晶组织其力学性能表现为各向同性，而由激光增材制造技术成形的钛合金零件的组织通常为粗大、定向凝固外延生长的柱状晶组织，力学性能表现出明显的各向异性，这就限制了激光增材制造技术成形钛合金零件在多向应力状态下的应用^[8]。

TC17 作为富 β 型两相钛合金，成形工艺和热处理工艺参数的变化会使得成形组织发生明显的变化。对此，已有较多学者对 TC17 钛合金材料特性展开系列研究。孙晓敏等^[9]采用激光熔化沉积技术直接成形 TC17 钛合金构件，研究表明激光熔化沉积 TC17 钛合金厚壁件可以清晰观察到宏观层带形貌，晶粒组织呈现定向生长的粗大柱状 β 晶貌或者柱状晶与等轴晶交替的“指节”形貌，晶粒内部为板条 α 相互交割的网篮组织。王俊伟等^[2]通过对激光立体成形 TC17 钛合金沉积态、去应力退火状态及时效热处理状态下的微观组织分析，研究了不同热处理方式对激光立体成形组织的影响。Zhu 等^[10] 研究表明激光增材制造的 TC17 钛合金宏观组织由粗大柱状晶、小柱状晶和细小的等轴晶粒组成。

拉伸结果显示沉积件强度高于锻件标准，塑性则未达到锻件标准。热处理后性能得到明显改善，在保证强度情况下， $\alpha + \beta$ 相区退火后固溶时效塑性提升 114%， β 相区退火后固溶时效塑性也提升 69%。Zhang 等^[11] 激光增材制造的 TC17 钛合金拉伸性能呈现明显的各向异性。沉积件两个方向上强度差为 180 MPa，而塑性则相差 4.1 倍。退火热处理后，沿沉积高度方向(L 向)强度得到提高与垂直沉积高度方向(T 向)强度相当，两个方向的塑性均降低，尤其是 L 向最为明显，延伸率由 14% 下降到 3.8%。

基于前期对其他型号合金研究成果，采用点式锻造激光沉积方法成形试样沉积态组织和力学性能表现良好，两个方向上室温拉伸结果均达到钛合金锻件指标。为了探究本工艺在 TC17 钛合金材料的应用，试验制备了 TC17 钛合金厚壁件，研究了沉积态和不同温度退火后的显微组织与室温拉伸性能。重点分析了不同退火温度下，TC17 钛合金退火组织形态及其成形机理，以及组织变化对力学性能的影响，以期探索适应于本成形工艺的热处理机制，为激光工艺成形 TC17 钛合金后续研究提供一些参考。

2 试验材料与方法

试验在实验室课题组团队自主组建的 PF-LD (point-mode forging laser deposition) 系统上完成，成形工艺流程参照文献^[8]。试验系统主要包括：3300 W 光纤激光器、四轴 LD 工作平台和数控点式冷锻机、三路同轴送粉头、双路送粉器、惰性气氛保护箱、在线测氧仪。

试验所用 TC17 粉末颗粒直径为 -100~+150 目，化学成分(质量分数)：Al(5.12%)、Sn(2.03%)、Zr(2.10)、Mo(4.04)、Cr(3.94%)、Fe(0.10%)、C(0.012%)、N(0.007%)、H(0.007%)、O(0.12%)，其余为钛 Ti。试验前，将 TC17 钛合金粉末放置真空干燥箱，设置为 120 °C 保温 2 h，以降低粉末黏着水分。为防止 TC17 钛合金在 PF-LD 成形过程氧化，惰性气氛箱内气氛氧体积分数小于 1.2×10^{-4} 。试验工艺参数如表 1 所示。

试验前基板用砂纸打磨去除氧化层，用丙酮清

表 1 点式锻造激光沉积试验工艺参数

Table 1 Experimental process parameters of point-mode forging laser direct deposition

| Power / kW | Scanning speed / (mm·min ⁻¹) | Scanning overlap rate / % | Spot diameter / mm | Single layer thickness / mm | Powder feeding rate / (g·min ⁻¹) | Depression / mm | Indenter diameter / mm | Point forging lap rate / % |
|------------|--|---------------------------|--------------------|-----------------------------|--|-----------------|------------------------|----------------------------|
| 1.6 | 360 | 33 | 3.0 | 0.7 | 3.5 | 0.25 | 3.5 | 0 |

洗干净后做干燥处理。在其上制备了尺寸分别为 $54\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 42\text{ mm}$ 的 TC17 钛合金厚壁件, 单向拉伸试件按照预设尺寸和位置从沉积厚壁件切割制取, 如图 1 所示。

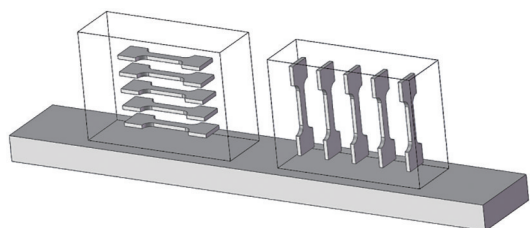


图 1 沉积件和取样位置示意图

Fig. 1 Schematic of sediment and sampling location

金相观察试样采用标准金相试样制备方法, 腐蚀剂选用 Kroll 试剂 [$V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:12$]。利用 Axiovert 200 MAT 金相光学显微镜 (OM) 观察组织。采用 ZESIS Sigma500 型扫描电镜 (SEM) 进行相分析和试样拉伸断口形貌观察。用 FM-ARS9000 型全自动显微 Vickers 硬度计测试显微硬度, 所用载荷为 200 gf ($1\text{ gf} \approx 0.0098\text{ N}$), 加载时间为 20 s 。在 Insekt100 Table 型微机控制万能试验机上进行单向拉伸试验, 过程采用位移控制, 拉伸

速度 1 mm/min 。拉伸试件均由线切割标准制样尺寸如图 2 所示 (R_3 为拉伸式样的平行段与式样两端同侧连接的过度圆角半径), 对试样分组后进行不同温度的热处理, 每个条件下两个方向均取三个试样, 拉伸结果取平均值, 以减少试验误差。

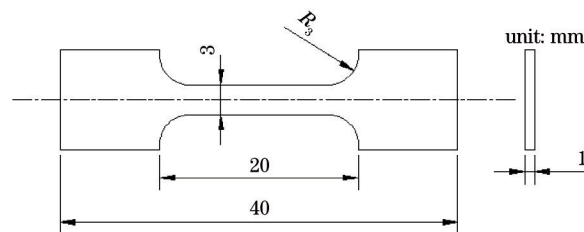


图 2 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 2 Schematic of size of tensile specimen

3 试验结果与分析

3.1 显微组织

图 3 为点式锻造激光沉积 TC17 钛合金沉积态组织形貌。在低倍显微镜下观察, 沉积件整体由等轴状晶粒组成, 由基体沿沉积高度向上分为两个区域, 如图 3(a) 所示, 靠近基板的小晶粒区和靠近上部的大晶粒区, 晶粒尺寸分别在 $200\text{ }\mu\text{m}$ 和 $300\text{ }\mu\text{m}$ 左右。

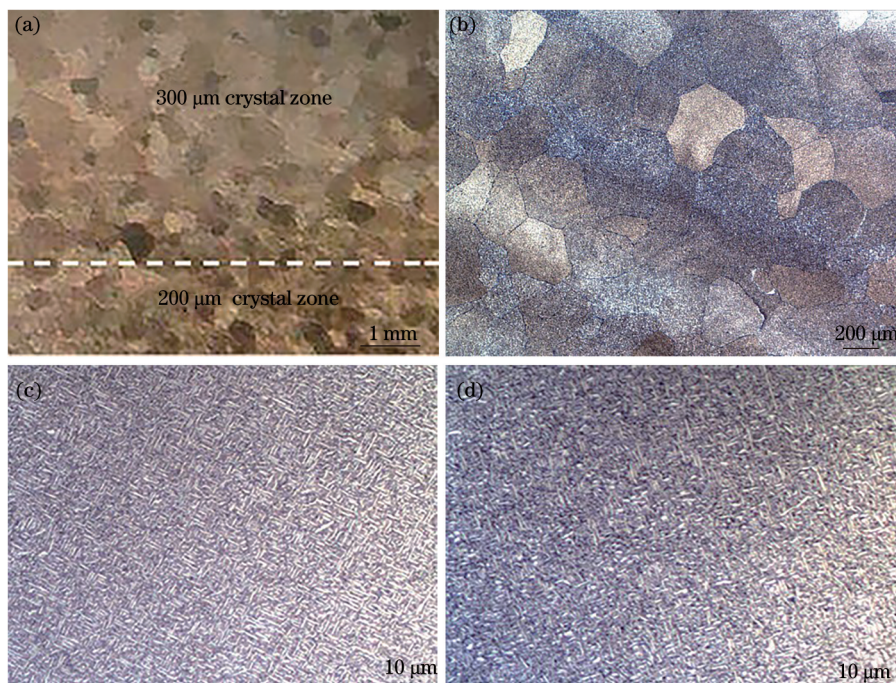


图 3 点式锻造激光沉积 TC17 钛合金金相组织形貌

Fig. 3 Metallographic morphology of TC17 titanium alloy of point-mode forging laser deposition

在文献 [12] 中已经证实, 点式锻造激光沉积是一个“沉积+冷塑性变形”循环交替进行的过程, 且在点式锻造过程中, 沉积层的受力状态与塑性加工

中小送进比拔长和窄砧压缩有限高坯料的情况相似。文献指出半无限高坯料表层塑性变形区的深度 d_1 为平冲头宽度的一半, 即 $d_1 = b$ 。激光熔池在

凝固的过程中,熔池中绝大多数热量通过基板以热传导方式快速散出,形成较大的温度过冷,液态金属在此过程中沿着反向快速外延生长,单层沉积的材料理论上会形成枝晶或柱状晶。后续点式锻造过程使前一过程的沉积层发生冷塑性变形。本试验工艺参数中点式压头直径 $D = 3.5 \text{ mm}$, 根据公式 $d_1 = D/2$, 可知 $d_1 = 1.75 \text{ mm}$ 。已知点式锻压的压下量为 0.25 mm , 所以,钛合金零件表层塑性变形区的变形量 $\epsilon = 0.25/1.75 = 14\%$ 。PF-LD TC17 钛合金试样中每层厚度为 0.8 mm , 由于连续点式锻压使钛合金零件表层发生塑性变形的深度 $d_1 = 1.75 \text{ mm}$, 所以,钛合金零件表层塑性变形区的深度约为钛合金试样层厚的 2.2 倍。由于试验过程为逐层沉积和锻造交替,点式锻造后的沉积层,当激光再次扫描时,在很短时间内,经过冷塑性变形的沉积层被加热到相变点以上,所以每一沉积层都至少经历一次冷塑性变形和再结晶过程。因此沉积件内部晶粒整体呈现等轴形貌,而且不同高度沉积层受热历史不同,在不同高度,晶粒度有所差异。

放大倍数观察,大晶粒区的晶粒形貌如图 3(b) 所示。由于晶粒取向不同,每个晶粒颜色不尽相同,晶界清晰可辨,晶粒内部显微组织极其细小,低倍状态无法观察到相组织形貌。图 3(c) 和图 3(d) 分别为两个尺寸晶区晶粒内部相组织形貌,由细小的长条初生 α 相、等轴初生 α 相和 β 转变组织构成的类网篮组织。经过冷塑性变形的沉积层,经过激光扫描再次熔化发生再结晶,由于靠近基板,温度梯度较大,形核率高, β 相冷却析出,随即发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变,并由于 Hcp α 和 Bcc β 的晶体对称性, α 相和 β 相间的 Burgers 位向关系^[13],大量 α 相在再结晶晶粒内高温 β 相各处同时析出,并沿 12 个不同方向呈板条形状生长,从而相互编织在一起形成网篮组织,又因为 TC17 富含 β 稳定元素较多,对 α 相的析出有一定的阻碍作用,所以新再结晶晶粒内部显微组织较为细小。此外,显微组织中含有部分等轴状的初生 α 相,文献[14]中提到,双态组织一般在锻件退火后形成,等轴 α 相形成的两个必要条件是热处理和预变形,PF-LD 过程具备此特征,所以沉积态的显微组织同时具备等轴 α 相和板条状 α 相。

图 4 为不同温度退火处理后的晶粒和相组织金相图。由于未达到再结晶温度,对晶粒尺寸未产生影响,只引起相组织发生改变。从图 4(a1)、(b1) 和 (c1) 中可以看出,从 $610 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $850 \text{ }^\circ\text{C}$, 随着退火温度

升高,晶界 α 相粗化明显。这是由于凝固偏析,与晶界处相比, β 晶粒内部含有更高溶度的 α 相稳定元素,所以 α 相通常在初生 β 晶界首先形核析出,形成晶界 α 相,晶界 α 相不断连接起来形成粗化的晶界^[15]。晶粒内部则由初生板条 α 相和板条间 β 相组成。从图 4(a2)、(b2) 和 (c2) 中可以看出,随着退火温度升高,晶粒内部初生 α 相板条体积分数逐渐减少,尺寸有所长大,同时长宽比减小,板条间 β 转变组织体积分数逐渐增加。这是因为,当温度升高,溶质原子获得足够迁移的驱动力, $\alpha \rightarrow \beta$ 相变量越大,从而在退火冷却后形成如图 4 所示组织形貌^[16]。

如图 4(c2) 所示,晶粒内部出现片状 α 相和大小不一的板条 α , 相对于图 4(b2), 组织更加不均匀。这是因为在高温条件下,初生 α 相板条尖端处曲率较小溶解度大,板条周围基体中含有较高的 α 相稳定元素浓度,而初生 α 相板条平面处曲率半径较大部位溶解度小,周围接触的基体含有较低的 α 相稳定元素浓度,因此,在初生 α 相板条界面与附近的基体中就存在元素浓度差,必将导致扩散,使得初生 α 相板条尖角溶解而使其曲率半径增大,而初生 α 相板条平面处将长大而使其曲率半径减小,以致初生 α 相板条长宽比降低,进而逐渐成为各处曲率半径相近的如图 4(c2) 所示的片状 α 相。此外,从图 4(c2) 可以看出,组织中含有大小不一的初生 α 相板条,其产生的原因是沉积态板条状初生 α 相的大小不一,导致其溶解度不同,将在基体内形成浓度梯度。受热后,基体中的稳定 α 相的元素原子由小尺寸初生 α 相板条处向大尺寸初生 α 相板条处扩散,最终小尺寸初生 α 相板条溶解,较大尺寸初生 α 相板条继续长大^[17]。

3.2 显微硬度

取沉积态和热处理态试样进行显微硬度测试,取点位置如图 5 所示,硬度数值以及变化趋势如图 6 和图 7 所示。沉积态试样沿沉积高度方向 L 向,随着高度的增加,显微硬度数值波动起伏较大,且随着高度增加,硬度有上升趋势,因为随着沉积高度增加,试件各部分的受热循环有明显差异,各部分的显微组织存在较大差别。相对而言,在沿着沉积件 T 方向测试时,沉积高度是一定的,此时受热循环相同,热历史对内部显微组织影响相同,硬度只在小范围内波动,这是由于在熔池凝固时由于元素的不均匀分布导致显微组织存在一定的差异所致。经过不同温度退火后,组织中初生 α 相的体积分数

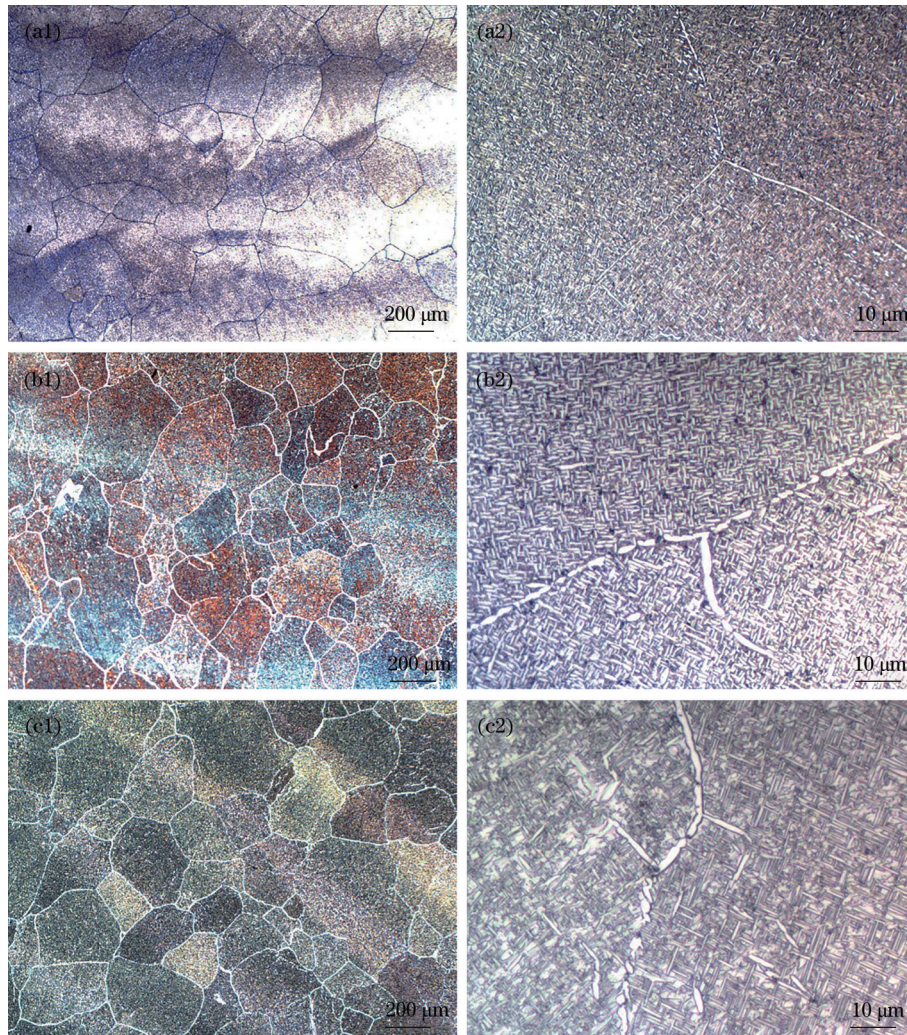


图 4 不同热处理工艺低倍和高倍组织图。(a1) 610 °C/1 h, 空气冷却 (AC), 50×; (b1) 730 °C/1 h, AC, 50×; (c1) 850 °C/1 h, AC, 50×; (a2) 610 °C/1 h, AC, 1000×; (b2) 730 °C/1 h, AC, 1000×; (c2) 850 °C/1 h, AC, 1000×

Fig. 4 Low-magnification and high-magnification structures of different heat treatment processes. (a1) 610 °C/1 h, air cooling (AC), 50×; (b1) 730 °C/1 h, AC, 50×; (c1) 850 °C/1 h, AC, 50×; (a2) 610 °C/1 h, AC, 1000×; (b2) 730 °C/1 h, AC, 1000×; (c2) 850 °C/1 h, AC, 1000×

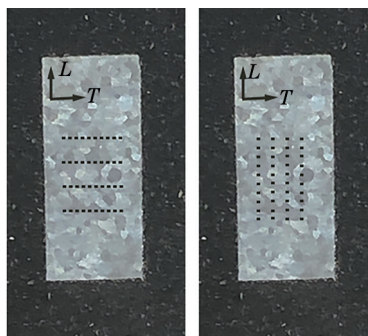


图 5 显微硬度测试取点位置示意图

Fig. 5 Schematic of location of microhardness test points

有所改变,随着温度升高,初生 α 相含量逐渐减少,且尺寸和形貌发生改变,热处理后的初生 α 相较沉积态有所长大。显微硬度随着不同的热处理工艺

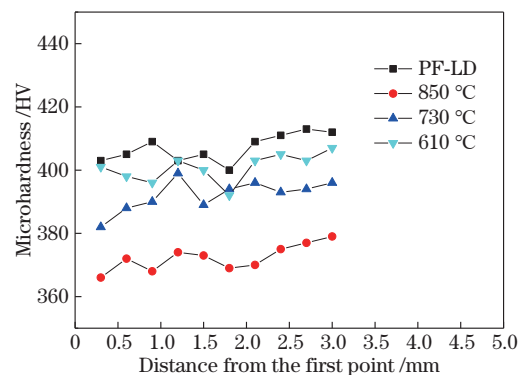


图 6 不同状态下 L 向硬度变化

Fig. 6 L-direction hardness changes under different conditions 对显微组织产生的影响不同而发生相应的改变。由于 α 相比 β 相硬度稍硬,所以 α 相的变化会导致显

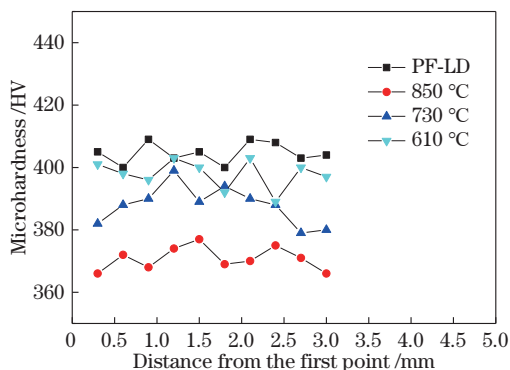


图 7 不同状态下 T 向硬度变化

Fig. 7 T -direction hardness changes under different conditions

微硬度升高或降低^[18]。由图 4 可知,高温退火会使得内部显微组织粗化,初生 α 相含量减少,所以温度越高硬度降低越明显。但是,在固溶时效后的试样中产生次生 α 相时,材料硬度会显著提高^[19]。

3.3 室温拉伸

对沉积态和热处理件在两个方向进行室温单向拉伸试验,应力应变曲线分别如图 8 和图 9 所示。

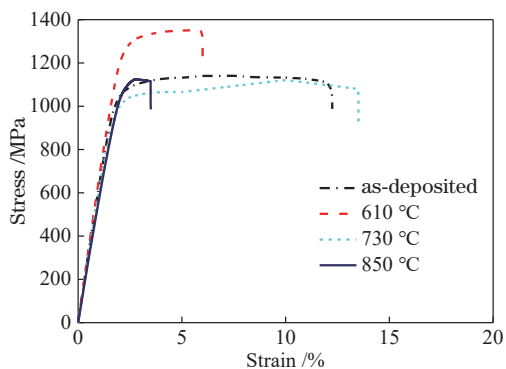


图 8 L 向室温拉伸应力-应变曲线图

Fig. 8 Room temperature tensile stress-strain curves in L -direction

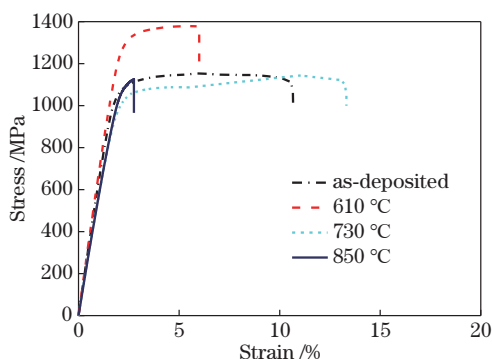


图 9 T 向室温拉伸应力-应变曲线

Fig. 9 Room temperature tensile stress-strain curves in T -direction

沉积态 L 向的拉伸强度在 1140 MPa 左右,延伸率达 10.4%, T 向拉伸强度约 1180 MPa,延伸率 7.8%。沉积态试样两个方向上强度相当,塑性延伸率存在差异且均优于 TC17 钛合金锻件退火拉伸力学标准。根据传统 TC17 钛合金锻件热处理工艺进行预试验,拉伸结果不理想。后基于退火工艺进行试验探究,拉伸数据显示,经过 610 °C/1 h 空冷退火处理后,试样抗拉强度较沉积态相比显著增加达 1300 MPa 以上,而延伸率明显降低,塑性显然低于 TC17 钛合金锻件退火拉伸力学性能指标。当温度上升到 850 °C,在相变点以下附近温度做退火处理,拉伸试样的强度和塑性都急剧下降,远远低于锻件退火力学性能指标。由图 4(a2)可知,在 610 °C 时,组织长大不明显,仍为细密的网篮组织, α/β 相界面较多,因此强度较高。在 850 °C 时,由图 4(c2)所示,初生 α 相板条体积分数明显大幅度降低,同时,组织不均匀性越发突出,同时伴随着 β 转变组织体积分数的增加。在拉伸时, β 转变基体中的 α/β 界面上容易产生空洞,并使得片层组织中的空洞在较低应变下扩展到临界尺寸,导致塑性降低^[20]。图 4(c2)中,高温退火后, β 转变基体组织中的 α/β 界面面积大幅增加,拉伸时,产生空洞的几率相应特明显提升,从而导致塑性下降。而强度的降低可能与初生 α 相体积分数的减少、晶粒度和晶粒内部组织的不均匀性相关。但是,在 730 °C 时,组织如图 4(b2)所示,初生 α 板条长大并发生尖角溶解,形成短棒状的初生 α 相,与 850 °C 相比,组织占比体积分数下降较少,并且在组织分布上更加均匀。由于组织中未生成次生 α 相,初生 α/β 界面起到主要强化作用,随着初生 α 相粗化导致体积分数下降,界面强化作用下降,最终在拉伸数据中显示,经过 730 °C 退火后的试样强度较沉积态稍有降低,但塑性在两个方上均得到改善,差异也相应减小^[21-22]。由此可见,将点式锻造激光沉积 TC17 钛合金在合适的 $\alpha+\beta$ 两相区温度退火,通过退火温度来控制初生 α 相板条向 β 相的转变量,空冷后,获得合理的初生 α 相板条与 β 相转变组织间体积分数的比例及理想的初生 α 相板条形貌,是获得具有优异拉伸力学性能的点式锻造激光沉积 TC17 钛合金的组织基础^[23]。

图 10 为点式锻造激光沉积 TC17 钛合金沉积态和经不同温度退火热处理后的室温拉伸断口韧窝形貌。从图 10(a)和(c)可以看出,沉积态和经 730 °C/1 h 退火后 TC17 钛合金拉伸断口由大量韧窝组成,

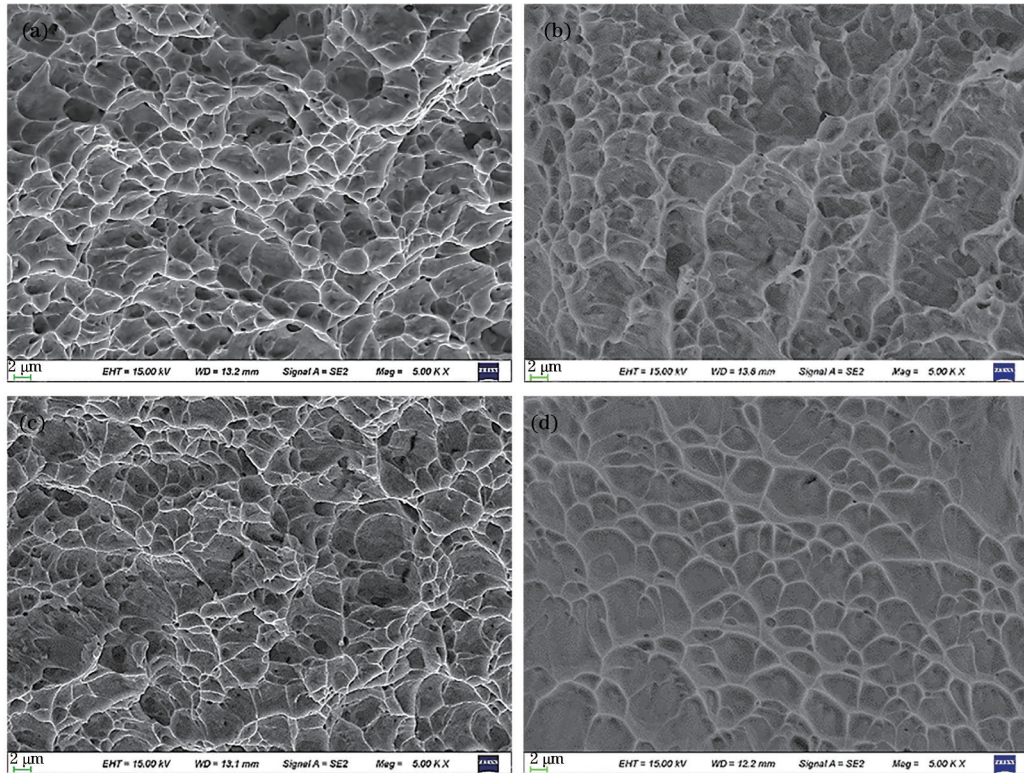


图 10 沉积态和不同退火态的断口中心韧窝形貌。(a) 沉积态; (b) 610 °C/1 h 退火; (c) 730 °C/1 h 退火; (d) 850 °C/1 h 退火

Fig. 10 Dimple morphology of fracture center in as-deposited state and different annealed states. (a) As-deposited state; (b) annealing at 610 °C/1 h; (c) annealing at 730 °C/1 h; (d) annealing at 850 °C/1 h

表明其室温拉伸断裂为韧性断裂,这与图 8 和图 9 中所示的室温拉伸性能相符。如图 10(b)和(d)所示,经 610 °C/1 h、空冷和 850 °C/1 h、空冷热处理后,TC17 钛合金拉伸断口为典型的准解理断裂,拉伸断

4 结 论

点式锻造激光沉积 TC17 钛合金沉积态组织极其细小,最大量级在几个微米。组织由大量细小板条 α 相、少许等轴 α 相和 β 转变基体组成的网篮组织。随着沉积高度的增加,晶粒和晶粒内部的尺寸有一定的增大。

沉积态的单向室温拉伸表明在沿沉积高度和垂直沉积高度方向两个方向的强度相当,延伸率存在一定差异,但均高于锻件退火力学性能标准。不同位置组织的分布导致试样的硬度数值也随着位置变化,同一沉积高度上的显微硬度上下波动较小,而随着沉积高度增加,显微硬度也有增加趋势。

在一定温度范围内,随着退火温度的升高和时间的延长,连续的晶界 α 相粗化并在高温下发生断裂。晶粒内部的初生 α 板条长大且长宽比减小,晶粒内部组织更加均匀化。由于未能达到再结晶温

口由平滑断裂小平面和少量韧窝组成。这两种热处理状态下的 TC17 钛合金的室温拉伸性能较差,强塑性差异较大,强度过高或过低,且延伸率均小于 TC17 钛合金锻造退火态的拉伸力学性能。随着组织的粗化,试样显微硬度下降,但硬度变化趋势与沉积态相同。

高温退火后强塑性显著下降,甚至发生脆断行为;低温退火后试样强度显著升高,延伸率未能达到锻件退火标准;只有在中部两相区退火试样的强塑性匹配良好,试样强度稍有降低,延伸率在两个方向上数值差异减小,且强度和塑性都满足使用标准。

参 考 文 献

- [1] Liu X C, Guo Z J, Wang H W, et al. Effect of solution treatment on microstructure and property of TC17 alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(4): 5-7.
刘小春, 郭志军, 王红武, 等. 固溶处理对 TC17 合金组织与性能的影响[J]. 钛工业进展, 2006, 23(4): 5-7.
- [2] Wang J W, Chen J, Liu Y H, et al. Research on microstructure of TC17 titanium alloy fabricated by

- laser solid forming[J]. Chinese Journal of 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.
- [3] Chen J, Zhang Q, Liu Y H, et al. Research on microstructure and high-temperature properties of Ti17 titanium alloy fabricated by laser solid forming [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0603022. 陈静, 张强, 刘彦红, 等. 激光成形修复 Ti17 合金组织与高温性能研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603022.
- [4] Han X F, Ruan X Q, Zhang L, et al. Microstructures and mechanical properties of laser forming repair of TA19 titanium alloy[J]. Applied Laser, 2020, 40(6): 962-967. 韩秀峰, 阮雪茜, 张露, 等. 激光成形修复 TA19 钛合金组织与性能研究 [J]. 应用激光, 2020, 40(6): 962-967.
- [5] Xi M Z, Zhou H Y, Chen S, et al. Microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy forgings repaired by point-mode forging and laser repairing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002103. 席明哲, 周昊阳, 陈帅, 等. 点式锻压激光修复 TA15 钛合金锻件的组织与性能 [J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002103.
- [6] Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4. 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
- [7] Wang H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698. 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [8] Xi M Z, Lü C, Wu Z H, et al. Microstructures and mechanical properties of TC11 titanium alloy formed by laser rapid forming and its combination with consecutive point-mode forging[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(9): 1065-1074. 席明哲, 吕超, 吴贞号, 等. 连续点式锻压激光快速成形 TC11 钛合金的组织力学性能 [J]. 金属学报, 2017, 53(9): 1065-1074.
- [9] Sun X M, Liu D, Tang H B, et al. Solid-state phase transformation and microstructure of laser direct manufactured TC17 titanium alloy components[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(4): 724-729. 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.
- [10] Zhu Y Y, Chen B, Tang H B, et al. Influence of heat treatments on microstructure and mechanical properties of laser additive manufacturing Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(1): 36-46.
- [11] Zhang Q, Chen J, Tan H, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of laser additive manufactured Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(8): 2058-2066.
- [12] Xi M Z, Liu J B, Zhao Y, et al. Microstructures of heat treatment and properties of TA15 titanium alloy formed by technology of laser rapid forming combined with continuous point forging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0203001. 席明哲, 刘静波, 赵毅, 等. 连续点式锻压激光快速成形 TA15 钛合金热处理组织与性能 [J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203001.
- [13] Zhao Z, Chen J, Tan H, et al. Microstructure and mechanical properties of laser repaired TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(7): 1792-1797.
- [14] Zhao Z, Wang M, Chen J, et al. Researches on microstructure and tensile properties of laser repaired β -riched Ti17 titanium alloy[J]. Applied Laser, 2015, 35(3): 271-276. 赵庄, 王鸣, 陈静, 等. 富 β Ti17 合金小尺寸损伤的激光修复组织性能研究 [J]. 应用激光, 2015, 35(3): 271-276.
- [15] Xi M Z, Gao S Y. Microstructures of heat treatment and mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by technology of laser rapid forming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1): 0103007. 席明哲, 高士友. 激光快速成形 TA15 钛合金热处理组织及其力学性能 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103007.
- [16] Qin L Y, He X D, Li M D, et al. Effect of annealing treatment on microstructures and mechanical properties of TC4 titanium alloy manufactured by laser deposition[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(2): 148-155. 钦兰云, 何晓娣, 李明东, 等. 退火处理对激光沉积

- 制造 TC4 钛合金组织及力学性能影响[J]. 材料工程, 2020, 48(2): 148-155.
- [17] Wu C, Zhan M. Effect of solution plus aging heat treatment on microstructural evolution and mechanical properties of near- β titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(5): 997-1006.
- [18] 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.
- [19] Shi R R. Study of consecutive point-mode forging and laser rapid forming microstructure and mechanical properties of functionally gradient material of TC11 titanium alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
石润润. TC11 钛合金连续点式锻压激光快速成形梯度性能材料组织和力学性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [20] Vrancken B, Thijs L, Kruth J P, et al. Heat treatment of Ti_6Al_4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541: 177-185.
- [21] Qin L Y, Jin Z X, Zhao S, et al. Effect of α texture on mechanical behavior of TC4 alloy fabricated by laser deposition manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102007.
钦兰云, 金子心, 赵朔, 等. α 相织构对激光沉积制造 TC4 合金力学行为影响研究[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102007.
- [22] Chen B, Shao B, Liu D, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC17 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0403001.
陈博, 邵冰, 刘栋, 等. 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[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403001.
- [23] Lütjering G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha + \beta$) titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 243(1/2): 32-45.