

激光立体成形 TC4 钛合金组织和力学性能研究

李 静 林 鑫 钱远宏 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 采用实验研究的方法,对比分析了激光立体成形 TC4 钛合金不同热处理状态下的显微组织、静载力学性能和拉伸断口。研究表明,沉积态内部有较明显的层带结构,去应力退火和固溶时效均能减弱层带从而均匀化组织;去应力退火处理对强度和塑性提高较少,固溶时效处理则能显著提高综合力学性能。断口分析表明,固溶时效态的室温拉伸试样为韧性断口,而沉积态和去应力退火态拉伸试样拉伸断口均为混合型断口。通过显微组织和拉伸断口分析,重点解释了解理断面形成机理为:裂纹沿 α/β 界面快速扩展形成解理断面,裂纹尖端的空洞与裂纹连接形成解理面上的韧窝。

关键词 激光技术; 钛合金; 激光立体成形; 性能; 断口

中图分类号 TN249; TG113 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1103010

Study on Microstructure and Property of Laser Solid Forming TC4 Titanium Alloy

Li Jing Lin Xin Qian Yuanhong Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The microstructures, tensile strength and fractures of TC4 titanium alloys, fabricated by laser solid forming (LSF), are investigated experimentally in different heat treatment states. The results show that LSF Ti alloy TC4 contains layer bands which stress relief annealing and solid solution aging can help eliminate so that the microstructures become more homogeneous, while the former makes less contribution to the improvement of strength and ductility, the latter can get comprehensive mechanical properties. The tensile fracture shows that the fractures of solution-aging specimens are almost ductile fractures while the as-deposited and stress relief annealing specimens are all mixed fractures. The formation mechanism of cleavage is explained by researching microstructures and fractures which is that cracks propagation along the interface of α/β forms the cleavage plane and the pores joined to the crack forms the dimples.

Key words laser technique; titanium alloy; laser solid forming; properties; fractures

OCIS codes 140.3390; 140.3580; 050.6875; 160.3900

1 引 言

钛合金具有低质高强、良好的高温强度和较好的耐腐蚀性等性能,在航空航天、航海、汽车和医疗器械、运动器材等新兴领域得到了广泛的运用^[1-2]。作为一种中等强度 $\alpha\beta$ 型钛合金,TC4 主要用于制造飞机机身、机翼零件和发动机叶片等,是目前应用

最广泛的钛合金^[3]。而 TC4 合金具有高熔点、高熔融态活性以及大的变形抗力,采用传统等材及减材加工技术来制备 TC4 合金零件,具有加工困难、材料利用率低、成本高等缺点。而增材制造技术具有柔性化加工特点,能够实现难加工材料和复杂零件快速成形制造。

收稿日期: 2014-05-29; **收到修改稿日期**: 2014-06-09

基金项目: 国家 863 计划(2013AA031103)、国家 973 计划(2011CB610402)

作者简介: 李 静(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光加工及力学性能方面的研究。E-mail: jing40086@163.com

导师简介: 黄卫东(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事增材制造理论、技术及应用等方面研究。

E-mail: huang@nwpu.edu.cn

激光立体成形技术是 20 世纪 90 年代初发展起来的一种能够实现高性能复杂结构零件无模具、快速、全致密增材制造技术,已被成功运用于精密零件的成形及修复^[4-8]。采用激光立体成形技术加工 TC4 合金零件不仅可以获得较高的力学性能,而且可以提高材料利用率,缩短加工周期,从而大大节省成本^[9]。虽然激光立体成形 TC4 钛合金的组织 and 性能已有研究^[10-11],但关于热处理对层带结构影响和室温拉伸断裂机理研究较少。本实验尝试采用优化后的热处理制度,系统地研究了激光立体成形 TC4 钛合金沉积态、去应力退火态和优化后固溶时效态的显微组织、力学性能和拉伸断口,详细描述了不同热处理状态下层带结构变化,探究了不同状态下室温拉伸断口形成机理,为以后改进激光立体成形钛合金热处理制度提供了一定的参考。

2 实 验

实验是在凝固技术国家重点实验室建立的 LSF-III 设备上完成的,该系统由 PRC4000 CO₂ 激光器、DPSF-2 型高精度可调自动送粉器、同轴送粉

喷嘴等机构组成,激光器波长为 10.6 μm。实验用材料为 TC4 锻件基板和 80 目(178 μm)TC4 球形粉末,基板为锻造退火态 TC4 钛合金板,TC4 粉末粒度为 44~178 μm,粉末质量分数(%)为:6.02Al, 4.00V,0.098Fe,0.033Si,0.025C,0.04N,0.008H, 0.16O,其余为 Ti。实验之前对 TC4 粉末在 120 °C 真空条件下干燥,以除去粉末中吸附的水分;用砂纸打磨锻件基材,并用乙醇和丙酮溶液依次清洗,减少表面缺陷对沉积过程造成的影响。激光立体成形工艺参数为:功率 2.5 kW,扫描速度为 10 mm/s,光斑直径 2.5 mm,Z 轴行程 0.25 mm,搭接率为 50%,整个成形过程均在惰性气体氛围下进行。

激光立体成形制备 80 mm×30 mm×30 mm 块样,沿扫描方向加工成棒状拉伸试样,采用线切割在块状样中部切取 2 mm×2 mm×1 mm 金相试样。TC4 的 β 相变温度一般为 980 °C~1000 °C,根据前期实验结果^[10],改进了热处理参数,分别延长了退火保温、固溶及时效时间,使得固溶和时效过程进行得更充分,热处理参数如表 1 所示。

表 1 热处理方案

Table 1 Heat treatment process

	Heat treatment parameters
Stress relief annealing	545 °C×4 h, AC
Solution-aging treatment	920 °C (vacuum)×3 h, QC (argon gas)+545 °C×4 h, AC

3 实验结果及分析

3.1 激光立体成形 TC4 钛合金组织及形貌特征

沉积态试样由垂直并贯穿多个沉积层的粗大柱状晶组成,柱状晶直径约为 1 mm,长度十几到几十

毫米,如图 1(a1)所示。沉积层间表现出明暗相间的层带结构,层带底部 α 板条较顶部粗大,且层带底部 α 集束较多,这是由于后续多层堆积输入的热量对前堆积层有循环热处理的作用,使得层内不同位置显微组织不同^[11]。β 柱状晶内部由少量针状马氏

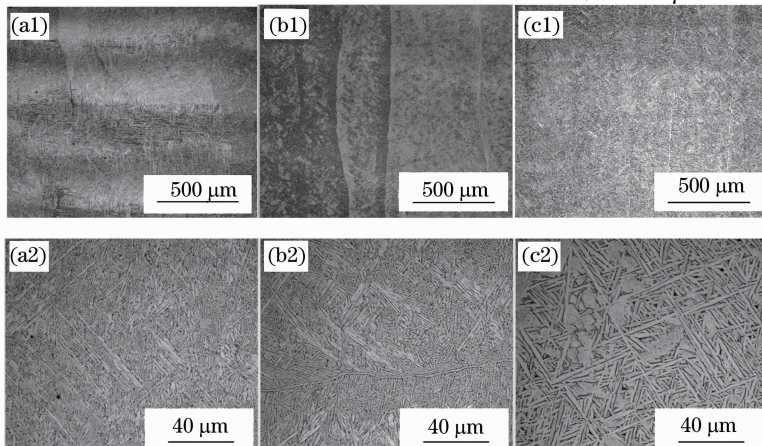


图 1 激光立体成形 TC4 显微组织。(a1),(a2)沉积态;(b1),(b2)去应力退火态;(c1),(c2)固溶时效态

Fig. 1 Microstructure of LSF Ti alloy TC4. (a1),(a2) As-deposited; (b1),(b2) stress relief annealing; (c1),(c2) solution-aging

体 α' 、大量魏氏 α 板条及板条间 β 相组成, α 板条宽约为 $0.5 \mu\text{m}$, 连续 α 相构成 β 晶界, 晶内分布有大小不等的 α 集束, 如图 1(a2) 所示。

去应力退火后 β 晶粒尺寸无变化, 层带现象减弱, 如图 1(b1) 所示。由于去应力退火低于再结晶温度, 试样整体发生回复, 在 $\alpha + \beta$ 相区保温时发生 $\alpha \leftrightarrow \beta$ 相变, 层带底部细小 α 板条优先转变为 β 相, 空冷过程中 α 相沿初生 α 相析出而使 α 板条粗化, α 板条长宽比减小, 最终使退火后试样组织趋于均匀化, 如图 1(b1) 所示。由于空冷过程中二次 α 相在晶界析出聚集形成取向较为规则的 $\alpha + \beta$ 组织, 而晶界两侧 $\alpha + \beta$ 组织位向不同, 使光镜下晶界腐蚀衬度较原始晶界的腐蚀衬度更明显, 如图 1(b2) 所示。

固溶保温过程中层带底部和原始 β 晶界处较小的 α 板条和针状 α' 较充分的溶于 β 相中, 淬火处理后得到分布较为均匀的过饱和 β 与 α 组织, 使得时效后层带基本消除, 如图 1(c1) 所示。固溶处理时板条 α 尖端具有较大的畸变能而易于溶于 β 中, 时效时 α 相首先在针状 α' 边界形核析出, 与此同时 V 元素不断被排出诱导 β 相沿 α 界面析出^[12-13], 使得 α 板条较沉积态粗短, 原始 α 板条的宽度增加至 $0.7 \sim 1 \mu\text{m}$, α 板条长宽比大大减小。经固溶时效处理后原始 β 晶界变得不连续, 残余 β 晶界处汇聚有粗大的连续 α 相, β 晶内主要以 α 板条编制网篮组织为主, 中间分布有近似等轴 α 相, 如图 1(c2) 所示。

表 2 激光立体成形 TC4 合金试样的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of laser solid forming Ti alloy TC4

Forming technique and status	σ_0/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\epsilon/\%$	$\Psi/\%$	Yield ratio
LSF (laser solid forming)	1071.80	990.30	10.50	18.96	0.92
LSF+stress relief annealing	1083.60	976.59	11.67	21.68	0.90
LSF+solution-aging	1002.38	920.89	16.17	36.96	0.86
Titanium alloy forgings	≥ 895	≥ 825	≥ 8	≥ 20	—

3.3 室温拉伸断口分析

3.3.1 不同状态下拉伸断口分析

图 2 为不同状态下激光立体成形 TC4 合金拉伸试样断口形貌, 断口均只由纤维区和剪切唇组成, 断口附近均出现明显的颈缩。沉积态和去应力退火态试样断口表现为混合性断口形貌, 纤维区较为平坦且分布有解理台阶, 如图 2(a1) 和 (b1) 所示。解理台阶面和侧壁上分布有撕裂棱和较浅的韧窝, 台阶根部有二次裂纹, 如图 3(a) 所示。固溶时效态试样断口接近锻件的断口形貌, 韧性特征更明显, 试样

3.2 激光立体成形 TC4 钛合金的力学性能

表 2 为不同状态下激光立体成形件 TC4 合金力学性能。由于激光立体成形试样晶粒内部分布有较多的细小相, 相界面的增多提高了位错运动阻力, 使其具有较高的强度。沉积态试样内部魏氏 α 板条与马氏体 α' 较为细小, 加之晶粒内部有较多的 α 集束, 其强度较高。原始 β 晶界处分布的连续 α 相与晶内组织的强度不同, 使其能起到协调塑性变形的能力^[14], 而沉积态试样内部晶界数目较少, 总体协调变形能力较差, 导致其塑性较差。

去应力退火使针状 α' 和细小 α 板条转变为粗大的层片组织, 位错滑移更容易进行, 另外晶界 α 相增多和内部组织的均匀化使变形时组织间协调变形能力增强, 导致试样塑性增加。退火后 α 集束取代针状 α' 使滑移程增加导致屈服强度降低, 同时位错和亚结构的减少导致滑移阻力降低也使屈服强度降低。虽然退火后的 α 片层的长宽比有所减小, 但 α 集束数量增多且晶界粗化使得滑移阻力大大增加, 总体上使抗拉强度增加。

固溶时效处理后晶界数量的减少大大降低了滑移阻力, 加之滑移程随 α 板条变宽而增长, 均使得强度降低而塑性增加。另外组织中的等轴 α 可以起到变形协调的作用, 其余网篮 α 组织能降低位错的塞积作用从而获得较高塑性^[15]。从表 2 可以看出, 固溶时效处理后的屈强比最小, 其综合力学性能最优。

断口附近的宏观塑性变形较大, 断口形貌近似杯锥状, 如图 2(c1) 所示。由图 2(a2), (b2), (c2) 可以看出, 固溶时效的等轴韧窝大而深, 大韧窝上分布有小韧窝, 而沉积态和去应力退火态韧窝小而浅, 且退火态较沉积态的韧窝更大而深, 这也说明了塑性按照固溶时效态、去应力退火态和沉积态依次降低, 这与所得力学性能测试结果相符合。在三组试样中均发现直径为 $50 \mu\text{m}$ 左右的气孔, 气孔均分布于裂纹扩展区, 可知其对试样静载拉伸断裂影响较小。

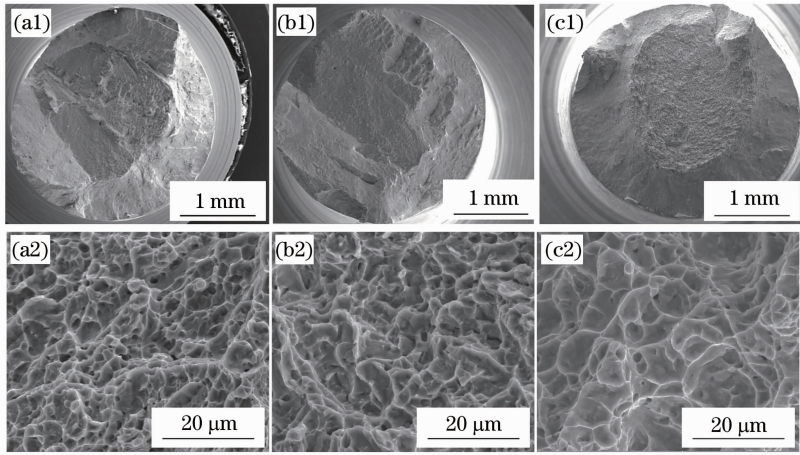


图 2 激光立体成形 TC4 拉伸断口。(a1),(a2)沉积态;(b1),(b2)去应力退火态;(c1),(c2)固溶时效态
Fig. 2 Tensile fracture of LSF Ti alloy TC4. (a1),(a2) As-deposited; (b1),(b2) incompleteness annealing; (c1),(c2) solution-aging

3.3.2 拉伸断口形成机制分析

激光立体成形 TC4 钛合金组织主要为 α 和 β 相,而 α/β 相界面处存在界面相,界面相易发生转变而严重影响钛合金的力学性能^[16]。另外, α 相和 β 相两者强度不同导致其界面处力学性能较差,从而使得裂纹易在 α/β 相界面快速扩展。裂纹尖端处的转变 β 组织中 α 相界面附近为塑性变形区,裂纹扩展时孔洞在塑性变形区的 α/β 界面处萌生,如图 3 所示。在拉伸变形时,裂纹在柱状晶内部平行的魏氏 α 板条间快速扩展形成解理台面,在扩展过程中裂纹与其尖端转变 β 组织中萌生的孔洞连接,最终表现为解理台面上的韧窝特征。当裂纹扩展过程中遇到与之相互垂直的较粗大魏氏 α 板条或晶界的阻碍后,

裂纹扩展发生转向或分叉,穿过周围较细小的 α 板条同时形成二次裂纹。当遇到与之平行的脆弱 α/β 界面后重复上述扩展过程,最后形成一个解理台阶,如图 3(a)所示。

固溶时效态以网篮组织为主, α 板条较为粗短且分布杂乱,滑移程相对魏氏组织较短,使裂纹难以在同一方向快速扩展成解理断面。由于固溶时效态内部有等轴 α 相,拉伸变形时滑移优先在等轴 α 相内进行^[17],大量位错在等轴 α 和网篮组织界面处塞挤引起应力集中而形成微小孔洞,之后孔洞通过网篮组织相互连接长大形成韧窝,最终纤维区以韧窝特征为主。

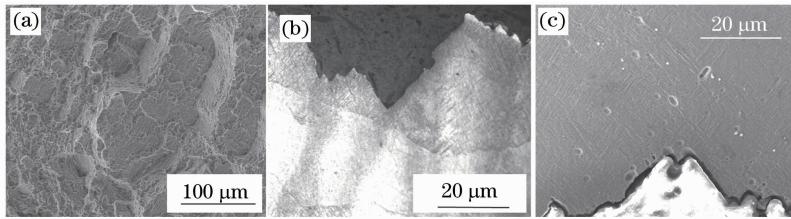


图 3 拉伸断口。(a)解理断面;(b)解理断面纵向光镜图;(c)解理断面纵向电镜图

Fig. 3 Tensile fracture. (a) Cleavage plane; (b) micrographs of longitudinal cleavage plain; (c) scanning electron microscope micrographs of longitudinal cleavage plain

4 结 论

1) 激光立体成形 TC4 合金由贯穿多个熔覆层的 β 柱状晶组成,沿沉积方向表现出明暗相间的层带结构,内部为魏氏组织并有较小的 α 集束和马氏体 α' 。

2) 去应力退火和固溶时效处理可以减弱层带现象,起到均匀化组织作用;去应力退火处理可以提

高整体的强度和塑性,但效果较差;固溶时效处理可以获得网篮组织,并能得到等轴 α 相,显著提高激光立体成形 TC4 合金的综合力学性能。

3) 激光立体成形 TC4 钛合金沉积态和去应力退火态拉伸断口为混合性断口,韧窝较浅小,解理台阶形成机理为裂纹沿晶内平行的魏氏 α 板条界面或晶界连续 α 相界面快速扩展形成;固溶时效态拉伸

断口为韧性断口, 固溶时效处理获得的等轴 α 相和网篮组织均能降低滑移程而抑制解理发生, 显著提高综合力学性能。

参 考 文 献

- 1 G Welsch, R Boyer, E W Collings. Material properties handbook; titanium alloys[M]. ASM International, 1994.
- 2 E Msaawad, Y Sano, L Wagner, *et al.*. Investigation of laser shock peening effects on residual stress state and fatigue performance of titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 536: 82-91.
- 3 Xue Lei, Chen Jing, Lin Xin, *et al.*. Microstructures and mechanical properties of laser rapid repaired Ti-6Al-4V alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(6): 989-993. 薛蕾, 陈静, 林鑫, 等. 激光快速修复 Ti-6Al-4V 合金的显微组织与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(6): 989-993.
- 4 Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired Ti-6Al-4V alloy component[J]. China Surface Engineering, 2009, 22(1): 1-24. 林鑫, 薛蕾, 陈静, 等. 激光成形修复 Ti-6Al-4V 钛合金零件的组织与性能[J]. 中国表面工程, 2009, 22(1): 19-24.
- 5 Wang Xiaoyan, Chen Jing, Tan Hua, *et al.*. Microstructures of laser forming repair 7050 aluminum alloy with AlSi12 powder[J]. Chinese J Laser, 2009, 36(6): 1585-1590. 王小艳, 陈静, 林鑫, 等. AlSi12 粉激光成形修复 7050 铝合金组织[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1585-1590.
- 6 Zhang Fengying, Chen Jing, Tan Hua, *et al.*. Powder delivery behavior during laser solid forming from blended elemental powders[J]. Chinese J Laser, 2009, 36(5): 1267-1272. 张凤英, 陈静, 谭华, 等. 混合元素法激光立体成形过程粉末输送性研究[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1267-1272.
- 7 Chen Jing, Zhang Qiang, Liu Yanhong, *et al.*. Research on microstructure and high-temperature properties of Ti17 titanium alloy fabricated by laser solid forming [J]. Chinese J Laser, 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.
- 8 Lin Xin, Yang Haiou, Chen Jing, *et al.*. Microstructure evolution of 316L stainless steel during laser rapid forming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(4): 361-368. 林鑫, 杨海欧, 陈静, 等. 激光快速成形过程中 316L 不锈钢显微组织的演变[J]. 金属学报, 2006, 42(4): 361-368.
- 9 Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27. 黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
- 10 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Influence of heat treatment on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser rapid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(7): 1263-1266. 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光立体成形 TC4 合金的组织性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(7): 1263-1266.
- 11 S M Kelly, S L Kampe. Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti-6Al-4V builds; part I. microstructural characterization[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(6): 1861-1867.
- 12 F X Gil Mur, D. Rodriguez, J A Planell. Influence of tempering temperature and time on the α' -Ti-6Al-4V martensite [J]. Journal of Alloys and Compounds, 1996, 234(2): 287-289.
- 13 Bey Vrancken, Lore Thijs, Jean-Pierre Kruth, *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.
- 14 G Lütjering. 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.
- 15 Zhou Y G, Zeng W D, Yu H Q. An investigation of a new near-beta forging process for titanium alloys and its application in aviation components[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 393(1-2): 204-212.
- 16 Kang Q, Guo Z X, Li D, *et al.*. Evidence of the existence an α/β interface phase in a near- α titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280: 182-186.
- 17 Zhou Yigang, Zeng Weidong, Yu Hanqing. The near β forging overthrows the conventional forging theory and develops a new Tri-modal microstructure[J]. Engineering Science, 2001, 3(5): 61-66. 周义刚, 曾卫东, 俞汉青. 近 β 锻造推翻陈旧理论发展了三态组织[J]. 中国工程科学, 2001, 3(5): 61-66.

栏目编辑: 张 雁