

激光快速成形 TA15 钛合金热处理组织及其力学性能

席明哲 高士友

(燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 采用激光快速成形方法制备了 TA15(Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V)钛合金厚壁件,研究了不同退火温度对激光快速成形 TA15 钛合金组织和室温拉伸力学性能的影响。结果表明,随着退火温度的升高,粗大 β 晶内的初生 α 相板条体积分数减少,而 β 转变组织体积分数增加,且 β 转变组织形貌由板条状(β) \rightarrow 层片状($\alpha+\beta$) \rightarrow 细层片状($\alpha+\beta$)转变。力学测试结果表明,经 940 $^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$,空冷热处理后,激光快速成形 TA15 钛合金室温拉伸力学性能达到最优;而当退火温度大于等于 970 $^{\circ}\text{C}$ 时,其室温拉伸力学性能大幅度降低,拉伸断口扫描电镜(SEM)照片表明,室温拉伸断裂为脆性断裂。

关键词 激光技术;激光快速成形;TA15 钛合金;热处理;显微组织;力学性能

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0103007

Heat-Treated Microstructures and Mechanical Properties of TA15 Titanium Alloy Fabricated by Laser Rapid Forming

Xi Mingzhe Gao Shiyu

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A thick-wall part of TA15 (Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V) titanium alloy is prepared by laser rapid forming (LRF). The influence of annealing temperature on the microstructures and the tensile properties at room temperature of laser rapid formed TA15 titanium alloy is also investigated. Results show that the volume fraction of primary α lath inside coarse β grain decreases and that of the transformed β increases, and the pattern of the transformed β changes from lath (β) \rightarrow layered tablets ($\alpha+\beta$) \rightarrow finer layered tablets ($\alpha+\beta$) with the annealing temperature increasing. Results also show that after the heat treatment of 940 $^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$, air cooling, the tensile properties of the formed TA15 alloy are optimal; when the annealing temperature is no less than 970 $^{\circ}\text{C}$, the tensile properties of the formed TA15 alloy decrease greatly, and the fractographs show that the tensile failures are brittle fracture.

Key words laser technique; laser rapid forming; TA15 titanium alloy; heat treatment; microstructure; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3800

1 引 言

TA15(Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V)钛合金属于高 Al 当量的近 α 型钛合金,不仅具有 α 型钛合金良好的热强性和可焊性以及接近于 α - β 型钛合金的工艺塑性,还具有中等的室温和高温强度以及良好的热稳定性,主要被用来制造 500 $^{\circ}\text{C}$ 以下长时间工作的飞机、发动机零件和焊接承力零部件^[1]。对于形状、结构复杂的 TA15 钛合金飞机结构零件的制造,传统

锻造方法明显存在设备要求高、工艺复杂、材料利用率低、生产周期长等缺点。金属零件激光快速成形(LRF)是 1995 年由美国首先提出并开发的一种快速、高效制造致密金属零件的近净成形技术^[2-4],该技术特别适合形状复杂、小批量金属零件的制造。由于零件具有均匀、细小的快速凝固组织,所以综合力学性能优异,该技术为钛合金飞机结构零件的制造提供了新的技术途径^[5,6]。对于近 α 型 TA15 钛

收稿日期: 2011-08-11; 收到修改稿日期: 2011-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(50871022)资助课题。

作者简介: 席明哲(1968—),男,副教授,主要从事三维激光快速成形、激光修复方面的研究。

E-mail: ximingzhe@ysu.edu.cn

合金,由于其热处理强化效果不明显,一般为退火态下使用。目前,针对 TA15 钛合金的热处理已有较多的研究^[7~10],但激光快速成形 TA15 钛合金热处理组织及力学性能的研究工作较少。谢旭霞等^[11,12]研究了激光熔化沉积 TA15 钛合金退火组织和性能。张小红等^[13]研究了热处理对激光立体成形 TA15 钛合金组织和性能的影响。本文采用激光快速成形方法制备了 TA15 钛合金厚壁零件,重点研究了不同退火温度下,TA15 钛合金退火组织的形成机制以及 TA15 钛合金退火组织特征对室温拉伸力学性能的影响,以期优化激光快速成形 TA15 钛合金的退火工艺奠定基础。

2 实验材料及方法

激光快速成形 TA15 钛合金厚壁件(60 mm×25 mm×55 mm)实验在激光快速成形系统上完成,系统组成主要包括 5000 W CO₂ 激光器、四轴激光数控加工平台、双路同轴送粉头、送粉器、惰性气氛保护箱和进口在线氧分析仪。激光快速成形 TA15 钛合金的工艺参数为:激光功率 1600 W;扫描速度 3 mm/s;光斑直径 2 mm;每层层厚 0.25 mm;送粉速率 5 g/min。基材采用 TA15 热轧板(100 mm×40 mm×6 mm),所用粉末为等离子旋转电极法制备的 TA15 球形粉末,其化学成分(原子数分数)为 6.5Al,1.92Zr,1.78Mo,2.28V,0.065Fe,0.047Si,0.008C,0.015N,0.006H,0.13O。为防止钛合金在激光快速成形过程中氧化,惰性气氛箱内气氛氧含量小于 5×10^{-5} (体积分数)。将激光快速成形的 TA15 钛合金厚壁件线切割,制成小块试样,在箱式马弗炉中进行热处理,分别选取 720 °C、940 °C、955 °C、970 °C、1000 °C 退火,在各个温度下保温 1 h,空冷。退火后用线切割先去除约 1 mm 厚的表面氧化层,然后制成沉积高度方向的拉伸试样。金

相试样采用标准金相试样制备方法,腐蚀剂为 Kroll 试剂,即体积比为 1:6:7 的 HF-HNO₃-H₂O 溶液。用 Axiovert 200 MAT 金相显微镜和 KYKY-2800B 型扫描电镜(SEM)进行组织分析。用 1000 号砂纸打磨拉伸试样以保证表面光洁度,每个退火温度制备两个拉伸试样。在 Insekt100 Table 型微机控制试验机上测试力学性能,拉伸时采用位移控制,加载速率 2 mm/min。采用 KYKY-2800B 型扫描电镜分析试样拉伸断口形貌。

3 实验结果与讨论

3.1 宏观形貌与显微组织

图 1 为激光快速成形 TA15 钛合金经 955 °C 退火,保温 1 h,空冷后的低倍组织。从图 1(a)可以看出,该低倍组织为沿沉积高度方向贯穿多个沉积层的粗大 β 柱状晶。图 1(b)为图 1(a)中粗大柱状晶的横截面组织形貌。激光快速成形过程中,激光束焦斑与基体(基板或先沉积材料)表面相互作用并使之熔化,形成激光熔池,与此同时,同轴输送的金属粉末由惰性气体(Ar 气)输送进入激光熔池并熔化。激光束焦斑运动离开后,激光熔池中小熔体在基体的冷却作用下凝固,形成新的材料沉积。在激光熔池凝固过程中,熔池中绝大部分热量以热传导的方式通过基材沿垂直向下的方向散失,熔池小熔体将在熔池底部同质材料上逆着热流方向外延生长。在晶体长大过程中,晶体凝固生长并排出溶质,凝固前沿,固液界面溶质浓度升高,产生小的成分过冷区,固液界面上偶然突起,进入过冷液体,可以长大,但因过冷区窄,突出距离不大,不产生侧向分枝,发展成枝晶,从而形成胞状界面。随着凝固过程的进行,胞晶单向凝固长大成为沿沉积高度方向的柱状晶。文献[13]指出,随着激光熔池凝固的进行,柱状晶向等轴晶转化,将在沉积层的表层内形成等轴晶

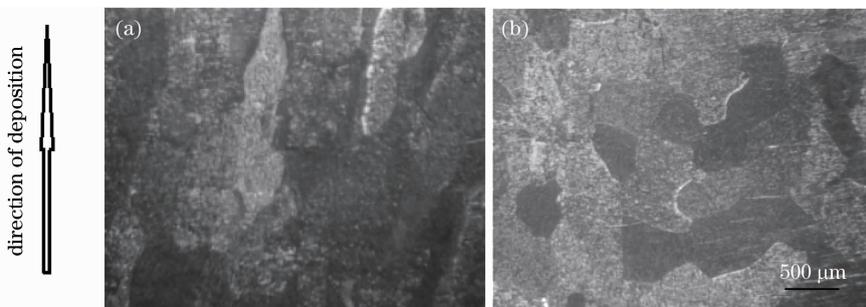


图 1 激光快速成形 TA15 钛合金 955 °C 退火 1 h 空冷后低倍组织:(a)粗大 β 柱状晶;(b)粗大 β 柱状晶的横截面组织形貌

Fig. 1 Macrostructures of LRF TA15 titanium alloy annealed at 955 °C/1 h, air-cooling (AC). (a) Coarse columnar β grains; (b) cross section of coarse columnar β grains

组织,而该等轴晶组织会在后续激光熔化沉积过程中,由于重熔而消失。上述过程循环往复,最终形成如图 1(a)所示的沿沉积高度方向贯穿多个沉积层外延生长的粗大 β 柱状晶组织。

图 2 和图 3 分别为激光快速成形 TA15 钛合金经不同温度退火,保温 1 h,空冷后横截面的显微组织的光学显微镜(OM)和扫描电镜照片。从图 2(a)可以看出,由于凝固偏析,最后凝固的初生 β 晶界相对于 β 晶内含有更高浓度的 α 相稳定元素,所以, α 相通常在初生 β 晶界首先形核析出,即形成晶界 α 相,并在初生 β 晶内形成由 α 相板条加板条间 β 相组成的组织。如图 2(b)、(c)、(e)和图 3(b)、(c)、(d)所示,随着退火温度升高,初生 α 相板条体积分数逐渐减少,且其长宽比降低,初生 α 相板条间的 β 转变组织体积分数逐渐增加。这是因为,温度越高, $\alpha \rightarrow \beta$ 相变量越大,因此初生 α 相体积分数也就逐渐减少,从而退火冷却后,初生 α 相板条间的 β 转变组织体积分数增多。而初生 α 相板条长宽比降低及图 2(c)中出现一些块状 α 相的原因如下。研究表明,第二相粒子在固溶体中的溶解度 C_r 与第二相粒子的半径 r 有关^[14],可表示为

$$\ln \frac{C_r}{C_\infty} = \frac{2M\sigma}{RT r \rho}, \quad (1)$$

式中 C_r 为第二相粒子半径为 r 时的溶解度, C_∞ 为第

二相粒子半径为 ∞ 时的溶解度, M 为第二相粒子的相对分子质量, σ 为单位面积界面能, ρ 为第二相粒子的密度, R 为气体常数, T 为绝对温度。可见,第二相粒子的半径 r 愈小,其在基体中的溶解度 C_r 就愈大。由此,在高温条件下,初生 α 相板条尖角处的部位(曲率半径小)溶解度大,与之相接触的基体中就含有较高的 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,与之相接触的基体含有较低的 α 相稳定元素浓度,这样,在初生 α 相板条界面附近的基体中就存在浓度差,则必然会引起扩散,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 2(c)所示的块状 α 相。从图 2(d)可以看出,组织中含有大小不一的初生 α 相板条,其产生的原因在于,初生 α 相板条的大小不一,则由于其溶解度不同,将在基体内形成浓度梯度。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,结果导致小尺寸初生 α 相板条溶解,大尺寸初生 α 相板条长大。从图 2(d)可以看到初生 α 相板条断裂现象,这是因为初生 α 相板条各部位的曲率半径 r_c 不同,其溶解度也不同。 r_c 较小的初生 α 相板条部位将溶解, r_c 较大的初生 α 相板条部位将长大,这将使初生 α 相板条

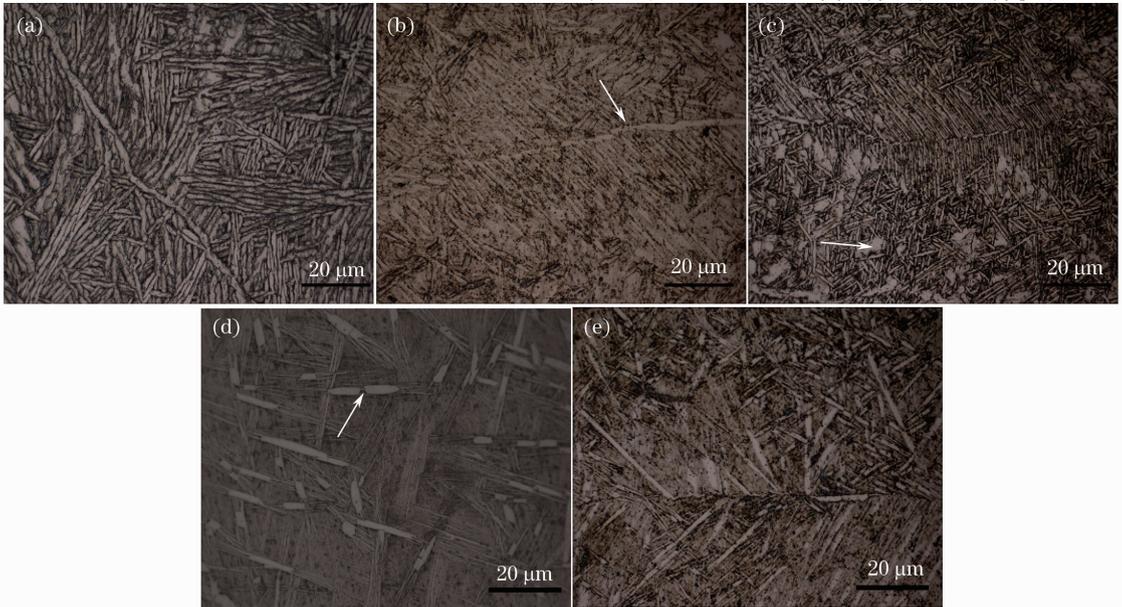


图 2 激光快速成形 TA15 钛合金经不同温度退火后的显微组织:(a) 720 °C/1 h;(b) 940 °C/1 h;(c) 955 °C/1 h;(d) 970 °C/1 h;(e) 1000 °C/1 h。(b)~(d)中的箭头分别表示初生 β 晶界、块状 α 相板条、 α 板条断裂

Fig. 2 Microstructures of LRF TA15 titanium alloy annealed at (a) 720 °C/1 h, AC; (b) 940 °C/1 h, AC; (c) 955 °C/1 h, AC; (d) 970 °C/1 h, AC; (e) 1000 °C/1 h, AC. arrows in Figs. 2(b)~(d) show grain boundary of primary β columnar grain, blocky α phase and the breakage of α lath, respectively

发生断裂。

3.2 力学性能

退火温度对激光快速成形 TA15 钛合金试样的室温拉伸力学性能如表 1 所示,可以看出,经 720 °C 退火/空冷以及 940 °C、955 °C $\alpha+\beta$ 两相区退火/空冷处理后,激光快速成形 TA15 钛合金试样的拉伸力学性能达到甚至超过 TA15 钛合金锻件退火拉伸力学性能标准(技术条件:11-CL-059B-2001)。继续升高退火温度,经 970 °C、1000 °C $\alpha+\beta$ 两相区退火/空冷退火处理后,激光快速成形 TA15 钛合金试样拉伸力学性能明显下降,显然低于 TA15 钛合金锻件退火拉伸力学性能标准,且随着退火温度的升高,其性能下降的幅度变大。如图 3(b)、(c) 所示,

随着退火温度升高,初生 α 相板条体积分数逐渐减少,而当退火温度为 970 °C、1000 °C 时,从图 3(d)、(e) 可以看出,初生 α 相板条体积分数明显大幅度减少,同时,其退火组织变得明显不均匀。而 β 转变组织,一方面,随着退火温度升高,其体积分数增加;另一方面,其形貌由板条状(β) [图 3(b)] \rightarrow 层片状($\alpha+\beta$) [图 3(c)] \rightarrow 细层片状或针状($\alpha+\beta$) [图 3(d)、(e)] 转变。由于拉伸时, β 转变组织中的 α/β 界面上容易产生空洞,并使片层组织中的空洞在较低的应变下扩展到临界尺寸,引起塑性下降^[15]。由图 3 可知,高温退火后, β 转变组织中的 α/β 界面面积大幅增加,拉伸时,产生 α/β 界面空洞的几率相应也大幅增加,从而将导致塑性的显著下降。而其拉

表 1 激光快速成形 TA15 钛合金不同温度退火后的室温拉伸性能及与锻件退火态室温拉伸性能对比

Table 1 Room temperature tensile properties of LRF TA15 alloy annealed at different temperatures and comparison with that of wrought and annealed TA15 alloy

State of TA15 alloy	Sampling direction	Yield strength /MPa	Ultimate strength /MPa	Elongation /%
LRF and annealed at 720 °C for 1 h, AC	Buildup direction	951.3	1041.2	13.2
LRF and annealed at 940 °C for 1 h, AC	Buildup direction	1056.5	1245.7	15.6
LRF and annealed at 955 °C for 1 h, AC	Buildup direction	1023.8	1087.9	12.5
LRF and annealed at 970 °C for 1 h, AC	Buildup direction	890.6	910.4	6.1
LRF and annealed at 1000 °C for 1 h, AC	Buildup direction	836.8	870.5	5.8
Wrought and annealed (11-CL-059B-2001)	Transverse direction	≥ 855	930~1130	≥ 8
Wrought and annealed (11-CL-059B-2001)	Longitudinal direction	≥ 855	930~1130	≥ 10

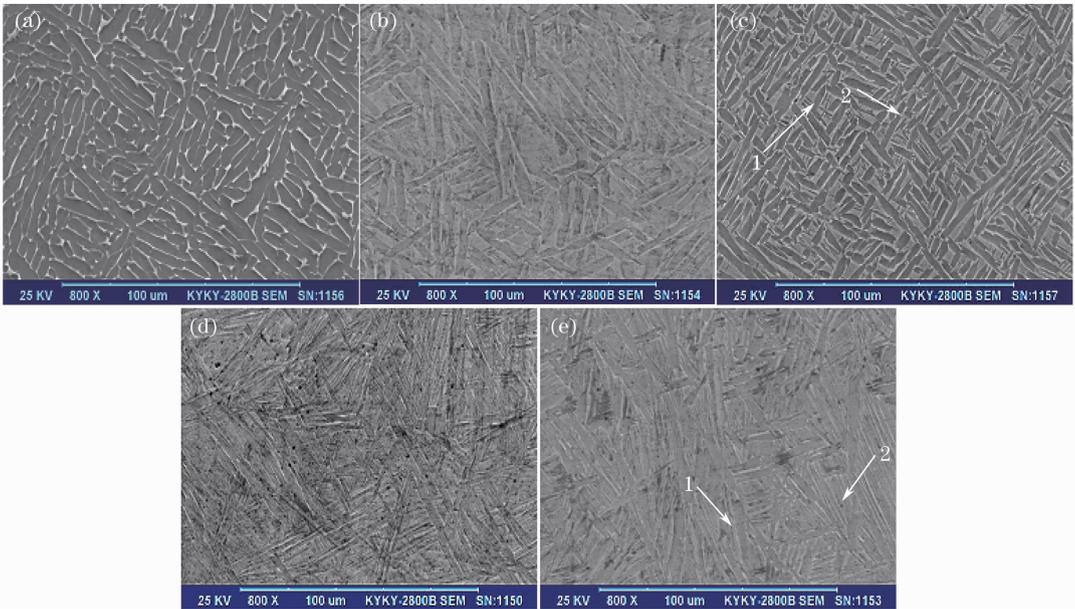


图 3 激光快速成形 TA15 合金经不同温度退火后的 SEM 照片: (a) 720 °C/1 h; (b) 940 °C/1 h; (c) 955 °C/1 h; (d) 970 °C/1 h; (e) 1000 °C/1 h。(c)、(e) 中箭头 1、2 分别表示初生 α 板条和 β 相位转变

Fig. 3 SEM photos of LRF TA15 titanium alloy annealed at (a) 720 °C/1 h, AC; (b) 940 °C/1 h, AC; (c) at 955 °C/1 h, AC; (d) 970 °C/1 h, AC; (e) 1000 °C/1 h, AC. arrows 1 and 2 in Figs. 3(c), (e) show primary α lath and transformed β phase, respectively

伸强度的下降,则可能与初生 α 相板条体积分数减少及退火后的不均匀组织相关。由此可见,将激光快速成形 TA15 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(长宽比),是获得具有优异拉伸力学性能的激光快速成形 TA15 钛合金的组织基础。

图 4 为激光快速成形 TA15 钛合金经不同温度退火热处理后的室温拉伸断口形貌。从图 4(a)~(c)可以看出,经 720 °C/1 h、空冷,940 °C/1 h、空冷

及 955 °C/1 h、空热处理后,TA15 钛合金拉伸断口由大量韧窝组成,表明其室温拉伸断裂为韧性断裂,这与表 1 中所列的室温拉伸性能相符。如图 4(d)、(e)所示,经 970 °C/1 h、空冷和 1000 °C/1 h、空热处理后,TA15 钛合金拉伸断口为典型的准解理断裂,拉伸断口由平滑断裂小平面和少量韧窝组成。如表 1 所示,这两种热处理状态下的 TA15 钛合金的室温拉伸性能,其屈服、抗拉强度及延伸率均小于 TA15 钛合金锻造退火态的拉伸力学性能。

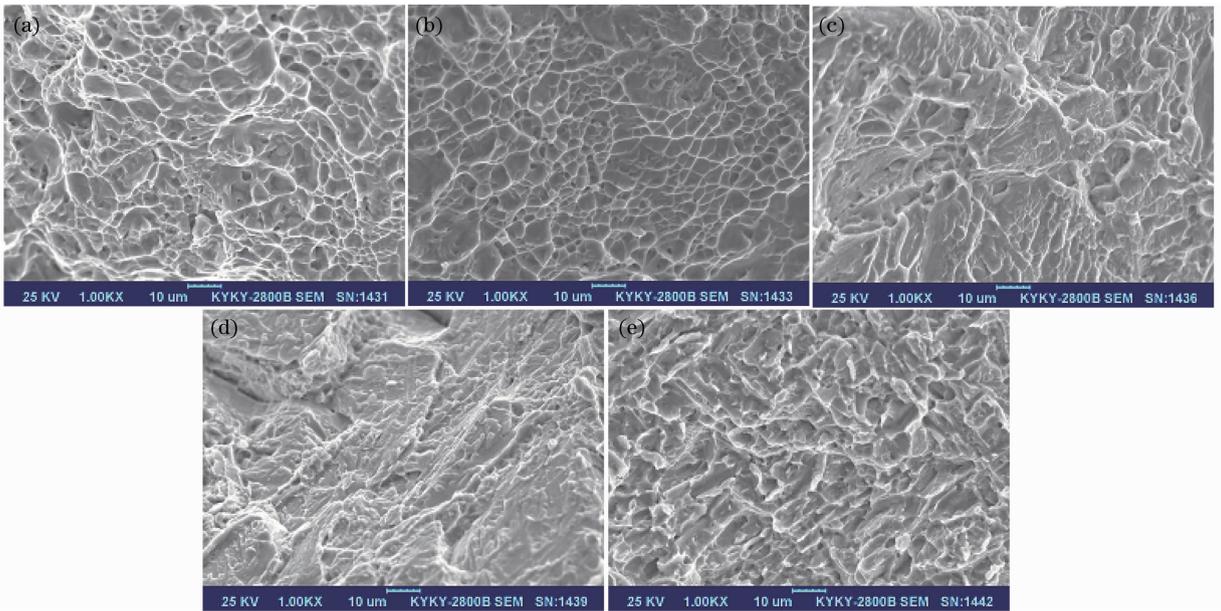


图 4 激光快速成形 TA15 钛合金经不同温度退火后室温拉伸断口形貌:(a) 720 °C/1 h; (b) 940 °C/1 h; (c) 955 °C/1 h; (d) 970 °C/1 h; (e) 1000 °C/1 h

Fig. 4 Fractographs of LRF TA15 titanium alloy of tensile test at room temperature annealed at (a) 720 °C/1 h, AC; (b) 940 °C/1 h, AC; (c) 955 °C/1 h, AC; (d) 970 °C/1 h, AC; (e) 1000 °C/1 h, AC

4 结 论

1) 激光快速成形 TA15 钛合金的组织,随着退火温度升高,粗大 β 晶内的初生 α 相板条体积分数减少,而初生 α 相板条间 β 转变组织体积分数增加,且 β 转变组织形貌由板条状(β) \rightarrow 层片状($\alpha+\beta$) \rightarrow 细层片状($\alpha+\beta$) 逐渐转变;

2) 退火温度对激光快速成形 TA15 钛合金室温拉伸力学性能有显著影响,退火温度为 940 °C 时,退火激光快速成形 TA15 钛合金所测室温拉伸力学性能最优,而当退火温度大于等于 970 °C,其室温拉伸力学性能降低,拉伸断口 SEM 照片表明,室温拉伸断裂为脆性断裂。

参 考 文 献

- 1 Editing Committee of Practical Handbook of Engineering Materials. Practical Handbook of Engineering Materials (second edition). Volume 4, Titanium Alloy and Copper Alloy [S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2002. 74
《工程材料实用手册》编辑委员会,工程材料使用手册(第二版)第 4 卷,钛合金铜合金[S]. 北京:中国标准出版社,2002. 74
- 2 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. 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
- 3 Wu Xiaoyu, Lin Xin, Lü Xiaowei *et al.*. Study on microstructure and mechanical properties of laser solid forming 17-4 PH stainless steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0203005
吴晓瑜,林 鑫,吕晓卫等. 激光立体成形 17-4PH 不锈钢组织性能研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0203005

- 4 J. Li, H. M. Wang. Microstructure and mechanical properties of rapid directionally solidified Ni-base superalloy Rene_41 by laser melting deposition manufacturing[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, **527**(18-19): 4823~4829
- 5 Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3204~3209
王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3204~3209
- 6 Wang Huaming, Li An, Zhang Lingyun. Mechanical properties of titanium alloys TA15 fabricated by laser melting deposition manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, (7): 26~29
王华明, 李安, 张凌云. 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金的力学性能[J]. *航空制造技术*, 2008, (7): 26~29
- 7 Wang Yaoning, Ma Hongzhou, Guo Zhiju *et al.*. Effects of heat treatment on microstructure and properties of BT-20 alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2007, **36**(12): 52~54
王耀宁, 马红周, 郭志军等. 热处理对 BT-20 钛合金组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2007, **36**(12): 52~54
- 8 Li Shikai, Xiong Baiqing, Hui Songxiao. Effect of heat-treatment on microstructure and properties of TA15 alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, **29**(6): 82~85
李士凯, 熊柏青, 惠松骁. 热处理制度对 TA15 合金组织与性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2008, **29**(6): 82~85
- 9 Hou Yanrong, Lai Yunjin, Du Yuxuan. Effect of heat treatment process on impact property of TA15 alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2011, **40**(2): 182~183
侯艳荣, 赖运金, 杜予暉. 热处理对 TA15 钛合金棒材冲击性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2011, **40**(2): 182~183
- 10 Wang Yuhui, Li Yan, Zhang Wangfeng *et al.*. Heat treatment behavior of TA15 titanium alloy with different deformation degrees[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, **20**(S1): S641~S646
王玉会, 李艳, 张旺峰等. 不同变形量 TA15 钛合金的热处理行为[J]. *中国有色金属学报*, 2010, **20**(S1): S641~S646
- 11 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
- 12 Yuan Hong, Fang Yanli, Wang Huaming. Influence of heat treatment on microstructure and compressive property of laser melting deposited TA15 titanium alloy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 746~750
袁红, 方艳丽, 王华明. 热处理对激光熔化沉积 TA15 钛合金组织及压缩性能的影响[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 746~750
- 13 Zhang Xiaohong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Effects of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloys by laser solid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, **40**(1): 142~147
张小红, 林鑫, 陈静等. 热处理对激光立体成形 TA15 合金组织及力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, **40**: 142~147
- 14 Xu Zhou, Zhao Liancheng. Principles of Metal Solid-State Phase Changes[M]. Beijing: Science Press, 2004. 135
徐洲, 赵连城. 金属固态相变原理[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 135
- 15 G. Lutjering. 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

栏目编辑: 宋梅梅