

激光烧结/等温锻造 TC17 粉末钛合金的组织与性能

赵张龙, 郭鸿镇, 姚泽坤, 张霜银, 林鑫, 黄卫东

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 采用激光烧结(LS)+等温锻造复合工艺制备出优质粉末 TC17 钛合金材料, 并研究了工艺过程对合金组织性能的影响。结果表明: 激光烧结后的 TC17 合金微观组织主要由粗大 β 柱状晶粒组成; 经相变点上、下等温锻造及热处理后, 激光烧结的魏氏组织能够被有效地破碎, 显微组织主要由条状和细小等轴 α 相组成; 仅经相变点以下等温锻造及热处理后, 合金组织主要由细小等轴 α 相组成, 但由于变形不均, 仍存在有少量的原始 β 晶粒边界。经过等温锻造、热处理后, 激光烧结合金的室温强度变化不大, 但塑性大大提高, 强度和塑性得到了良好地匹配。

关键词: 粉末钛合金; 激光烧结; 等温锻造; 显微组织; 力学性能

中图法分类号: TF124.3; TG319

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)06-1104-04

发展钛合金复杂构件近净成形工艺是节约原材料、缩短制造周期的有效途径, 近年来发展的钛合金粉末激光烧结(LS)工艺引起了国内外的广泛关注^[1~5]。但是由于激光烧结获得的是凝固态组织, 对于要求高密度、高性能的重要航空产品, 有必要再结合最终的锻造变形进行研究^[6~8]。

等温锻造(IF)是一种新型的钛合金近净成形工艺, 能够大大减小变形抗力, 显著增强金属流动性, 并可使锻件变形均匀, 获得更优异的微观组织与力学性能。对激光烧结后的预制坯进行等温锻造, 不仅能够改变原凝固态组织, 并且还能够闭合激光烧结中可能存在的残余孔隙, 从而提高粉末合金的力学性能。

本实验选取具有高强度、高韧性、高淬透性的 TC17 钛合金作为研究对象, 目的是将激光烧结和等温锻造工艺进行有机的结合, 探讨钛合金近净成形新工艺, 降低航空产品成本, 改善钛合金关键构件的组织与性能。

1 实验

本研究采用氩气雾化法制备 TC17 合金球形粉末, 粉末粒度为 100 μm , 化学成分及粒度分布如表 1、表 2 所示。除氧含量稍微超过铸锻合金的标准要求外, 其它各项都符合要求。激光烧结采用设备为 5 kW 的

CO₂ 激光器, 试验中采用单道多层熔覆方式制备试样, 激光烧结工艺参数如表 3 所示。激光烧结后的试样尺寸为 60 mm×30 mm×30 mm, 测定的合金相变点温度为 890 $^{\circ}\text{C}$ 。

等温锻造设备为 630 t 可控应变速率压力机。采用自制的 K403 高温合金模具和电阻式模具加热装置, 对激光烧结试样进行两种方案的等温锻造: 1050 $^{\circ}\text{C}$ +870 $^{\circ}\text{C}$ 的高低温锻造(方案 1)和仅在相变点以下进行 870 $^{\circ}\text{C}$ 的锻造(方案 2), 每种方案的总变形量>50%, 锻造前对烧结合金进行 650 $^{\circ}\text{C}$ 退火 1 h 处理。对激光烧结后及等温锻造后的试样均进行 800 $^{\circ}\text{C}$, 4 h, WQ+635 $^{\circ}\text{C}$, 8 h, AC 的固溶时效标准热处理, 并观察和测定组织性能的变化情况。

2 结果与分析

2.1 激光烧结后合金的特征

图 1 所示为激光烧结粉末 TC17 合金经过固溶时效(SA)后的组织照片。可以看到原始 β 晶粒较粗大, 晶界上析出了清晰完整的细条状 α 相, 晶内细条状 α 相呈平行的束状排列, 表明经激光烧结后形成了细片状的魏氏组织。另外, 组织中存在贯穿多个熔覆层的粗大 β 柱状晶(图 1 下部分), 并且这种柱状晶在接近

表 1 粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of the powder ($\omega/\%$)

Element	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	H	O	Ti
Powder	5.23	1.97	1.80	4.06	4.04	0.01	0.14	Bal.
XJ/BS-1995	4.5~5.5	1.6~2.4	1.6~2.4	3.5~4.5	3.5~4.5	0.0125	0.08~0.13	Bal.

收稿日期: 2008-12-12

作者简介: 赵张龙, 男, 博士, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88493744, E-mail: zhaozhanglong000@sohu.com

表 2 粉末的粒度分布

Particle size/ μm	0~50	50~60	60~80	80~104
Proportion/%	10	13	31	46

表 3 激光烧结工艺参数

Laser power/kW	Laser spot diameters/mm	Powder feeding rate/ $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	Scanning speed/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	Overlap ratio/%	Increment of axis-Z/mm
2.0~2.7	3	3~10	2~10	30~50	0.3~0.5

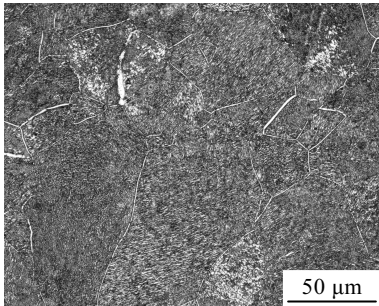


图 1 经激光烧结、固溶时效后合金的微观组织

Fig.1 Microstructure of LS-ed and SA-ed alloy

烧结结束的时候向等轴晶转变(图 1 上部分)。这种组织与文献[4,5]中观察到的现象类似,其原因是在熔池下部,温度梯度很大,熔池热量将朝基体方向散失,因此晶粒向上呈柱状晶生长,熔池上部,热量可以通过熔池表层空气散失,导致冷却速率增大,进而出现柱状晶向等轴晶的转变。

激光烧结后合金经过不同热处理后的性能(图 5)在塑性上并没有很大的变化,这可能与合金中氧含量较高有关,因合金在激光烧结过程中氧含量增加到 0.16%,也有可能与合金中存在的孔隙缺陷及组织形态有关。采用排水法测定合金烧结后的相对密度达到 99.2%,说明烧结工艺参数控制较合适。但是在 650 °C 退火 1 h 后的微观组织的晶粒内部仍能够观察到极少量的细小球形孔隙(图 2),组织中晶粒边界清晰,晶粒粗大,因此有必要进行进一步锻造以提高合金的性能。

2.2 等温锻造后合金微观组织的变化

等温锻造方案 1,首先在相变点以上(1050 °C)对激光烧结的粉末合金(组织状态见图 2)进行初始锻造,充分发挥合金在相变点以上的良好塑性,降低变形抗力,细化原始 β 晶粒,闭合激光烧结时可能残留的孔隙。然后再在相变点以下(870 °C)进行锻造,目的是改变魏氏组织获得所需要的组织和性能。粉末合金在 870 °C 的锻态微观组织如图 3a 所示。可以看出,原始基体中存在的细小孔隙缺陷消失,原始粗大 β 晶粒已

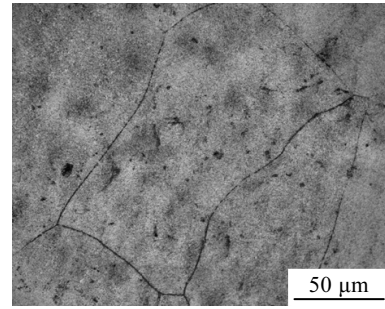


图 2 激光烧结经退火后的微观组织

Fig.2 Microstructure of LS-ed and annealed alloy

经被破碎,晶界破断或消失,组织中有不少长条状初生 α 相产生,合金的相对密度经测定已提高至 99.8%。再经过 870 °C + 635 °C 固溶时效后,微观组织如图 3b 所示。微观组织主要由比例较多的条状 α 相和细小的等轴 α 相组成,等轴 α 相尺寸为 1~2 μm 。图 3b 中的条状 α 相还可以通过降低单相区变形温度和加大两相区变形程度进一步得到细化和球化。

方案 2,合金直接在相变点以下(870 °C)进行等温锻造,经固溶时效后,其微观组织如图 4 所示。微观组织主要是由细小的等轴 α 相均匀分布在 β 基体上组成(图 4a),等轴 α 相的尺寸非常细小,直径小于或约为 1 μm 。但是由于未经过 β 单相区均匀化变形,并且两相区变形程度不够大,变形过程存在不均匀现象,

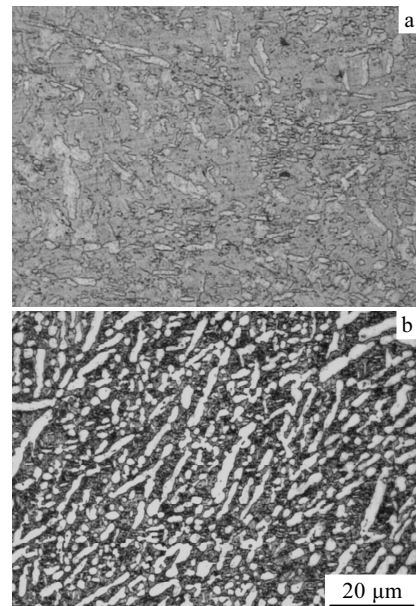


图 3 经 1050 °C+870 °C 等温锻后(a)及固溶时效后(b)的微观组织

Fig.3 Microstructure of IF-ed at 1050 °C+870 °C (a) and SA-ed (b) alloy

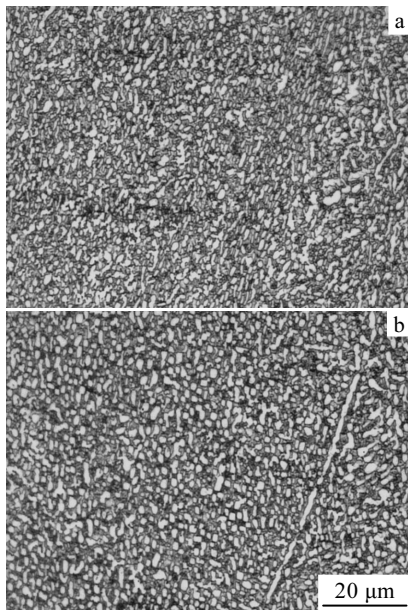


图 4 经 870 °C 等温锻及固溶时效后的微观组织

Fig.4 Microstructure of IF-ed at 870 °C (a) and SA-ed (b) alloys

组织中存在有少量的未被破碎的原始 β 晶粒边界(图 4b), 这需要进一步增大变形量或改变变形方式才能得到均匀细小的等轴组织。

2.3 等温锻造对力学性能的影响

图 5 为粉末 TC17 合金经激光烧结, 等温锻造和热处理后的室温拉伸性能变化情况。从图中可以看出,

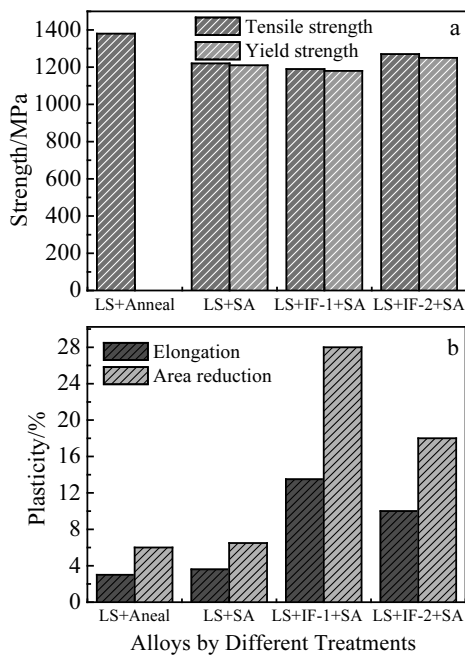


图 5 激光烧结和等温锻造后粉末的 TC17 合金室温拉伸性能

Fig.5 Tensile properties of LS-ed and IF-ed alloy: (a) strength and (b) plasticity

粉末 TC17 合金经过烧结、650 °C, 1 h 退火后, 抗拉强度很高, 但是塑性很低。合金经烧结和 800 °C, 4 h, WQ+635 °C, 8 h, AC 的标准热处理后, 强度有所下降, 塑性提高不大。经过 1050 °C+870 °C 等温锻造及标准热处理后, 合金的强度基本保持不变, 但塑性却大大提高, 达到了强度与塑性的良好匹配。因合金的氧含量在等温锻造过程中没有发生变化, 因此合金性能的提高主要在于合金内部缺陷的消除及组织形态的改变。经过 870 °C 等温锻造及标准热处理后, 合金的强度相对烧结后的合金稍微有提高, 塑性也明显提高, 但塑性不如 1050 °C+870 °C 锻造后的合金。这主要是因为低温锻造时激光烧结合金中残留孔隙的焊合效果较差。

3 结 论

1) 激光烧结的粉末 TC17 钛合金的组织主要是粗大的柱状 β 晶粒, 随着冷却速度的增加, 在靠近熔池上部熔覆层处, 合金组织由柱状晶逐渐向等轴晶转变。

2) 等温锻造能够有效地破碎激光烧结形成的魏氏组织, 使合金的组织得到细化。经相变点上、下高低温等温锻造及标准热处理后, 合金组织主要由长条状和细小等轴 α 相组成; 直接进行相变点以下等温锻造并进行标准热处理后, 合金组织主要为细小的等轴 α 相, 由于低温变形的不均匀性, 合金中仍存在少量的原始 β 晶粒边界。

3) 经等温锻造及标准热处理以后, 激光烧结合金的室温塑性得到了很大提高, 强度基本保持不变, 获得了强度和塑性的良好匹配。

参考文献 References

[1] Kozo Osakada, Masanori Shiomi. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2006, 46: 1188

[2] Suman Das, Marti V C Kumar. *Surface & Coatings Technology*[J], 2006, 201: 3174

[3] Srivastava D, Chang I T H, Loretto M H. *Intermetallics*[J], 2001, 9: 1003

[4] Zhang Shuangyin(张霜银), Lin Xin(林 鑫), Chen Jing(陈 静) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(10): 1839

[5] Zan Lin(管 林), Chen Jing(陈 静), Lin Xin(林 鑫) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(4): 612

[6] Roush E D, Kobryn P A, Semiatin S L. *Scripta Materialia*[J], 2001, 45: 717

[7] Semiatin S L, Kobryn P A, Roush E D. *Metallurgical and*

Materials Transaction A[J], 2001, 32A: 1801

Acta Metallurgica Sinica(金属学报) [J], 2006, 42(4): 361

[8] Lin Xin(林 鑫), Yang Haiou(杨海欧), Chen Jing(陈 静) *et al.*

Microstructures and Properties of TC17 Powder Metallurgy Titanium Alloy Prepared by Laser Sintering/Isothermal Forging

Zhao Zhanglong, Guo Hongzhen, Yao Zekun, Zhang Shuangyin, Lin Xin, Huang Weidong
(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The laser sintering + isothermal forging technology was used to prepare excellent powder metallurgy TC17 titanium alloy, and the influence of technology on the microstructure and properties was investigated. The results indicated that the microstructure of laser sintered TC17 titanium alloy was comprised of coarse columnar β grains. After isothermal forging up and below β transus, followed by heat treatment, laser sintered Widmanstätten structure was broken effectively, and transformed into plate, fine and equiaxed α phase. Only adopting isothermal forging below β transus and heat treatment, the microstructure consisted mainly of fine and equiaxed α phase, but little amount of primary β grain boundary was still remained owing to uniform deformation. After isothermal forging and heat treatment, the plasticity of the alloy at room temperature was increased obviously with little change of the strength, resulting in excellent match between strength and plasticity.

Key words: powder metallurgy titanium alloy; laser sintering; isothermal forging; microstructure; mechanical properties

Biography: Zhao Zhanglong, Ph. D., School of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88493744, E-mail: zhaozhanglong000@sohu.com