

热循环温度对 Ti-6Al-4V 合金组织和力学性能的影响

赵永庆¹, 李文鹏², 魏建峰²

(1. 西北有色金属研究院, 西安 710016;

2. 西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049)

摘 要: 采用 500~1 000 ℃ 热循环 20 次, 研究 Ti-6Al-4V(TC4)合金性能及微观组织的变化。结果表明: 随热循环温度的升高, TC4 合金强度先降低后升高; 低于 800 ℃ 时, TC4 合金塑性随热循环温度升高变化不大, 高于 800 ℃, 随热循环温度升高, TC4 合金塑性快速降低; 随温度升高, TC4 合金的晶粒明显长大, 温度高于 800 ℃ 时, TC4 合金中开始形成片层状组织, 至 1 000 ℃ 时, 合金组织几乎呈全片层状。

关键词: TC4 钛合金; 热循环; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG146.23

文献标志码: A

Effect of thermal cycling temperature on microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy

ZHAO Yong-qing¹, LI Wen-peng², WEI Jian-feng²

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The changes of microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy after thermal cycling 20 times from 500 ℃ to 1 000 ℃ were researched. The results show that the strength of Ti-6Al-4V alloy firstly reduces and then increases with the increase of cycling temperature. If the cycling temperature is lower than 800 ℃, its plasticity changes less with the temperature. While the temperature is higher than 800 ℃, its plasticity decreases fast. The grain size grows fast with increasing temperature. While the temperature is over 800 ℃, the lamellar microstructure forms, when the temperature reaches 1 000 ℃, the microstructure is almost lamellar one.

Key words: Ti-6Al-4V alloy; thermal cycling; mechanical properties; microstructures

材料构件在承受高温热循环作用时, 其性能会恶化, 寿命会降低^[1], 许多研究认为^[2-10]热循环温度是影响金属性能的重要因素之一。在高温热循环状况下工作的 Ti-6Al-4V(TC4)合金构件, 温度不仅影响其组织, 还可能导致其力学性能恶化。因此, 研究热循环温度对 TC4 合金组织和力学性能的影响, 对预测不同温度热循环下 TC4 合金部件的可靠性, 具有很强的理论价值和实际意义。本文作者从 TC4 的力学性能、组织变化两个方面对热循环温度的影响进行分析。

1 实验

实验所用 TC4 合金是西北有色金属研究院生产的直径为 10 mm 的棒材。按国家标准加工拉伸试样, 循环温度分别选为 500、650、800、900、1 000 ℃, 循环次数均为 20 次, 试样加热至循环温度后均保温 5 min, 出炉后空冷至室温, 测试 TC4 合金的室温拉伸

性能。采用 OLYMPUS GX71 光学显微镜和 JSM-2700 扫描电镜观察其微观组织。

2 结果与分析

2.1 TC4 合金的力学性能

表 1 所列为 TC4 合金经过不同温度热循环后的室温拉伸性能变化曲线。由表 1 可知,TC4 合金经过不同温度热循环后,屈服强度和抗拉强度变化趋势基本一致,伸长率和面缩率变化趋势也基本相同;当循环温度低于 800 时,合金的强度随循环温度的升高逐渐降低;当温度由 500 升至 800 时,TC4 合金的屈服强度由 995 MPa 降至 832 MPa,抗拉强度由 1 065 MPa 降至 948 MPa;当温度超过 800 时,合金的强度随循环温度升高又略有恢复。同样,合金的塑性变化也可以 800 为界,温度低于 800 时,合金的塑性随温度的变化几乎不变(伸长率约为 15%),该现象表明在 500~800 区间,合金的塑性对温度变化不敏感;而温度超过 800 时,随热循环温度升高,合金的塑性下降较快;1 000 时,其伸长率仅为 1.3%。

表 1 Ti-6Al-4V 合金不同温度循环后拉伸试样力学性能

Table 1 Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy after different temperature thermal cycling

Temperature/	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ϕ /%
500	1 080	1 000	16.0	42.0
650	1 000	945	15.0	41.0
800	950	820	15.5	42.0
900	955	850	10.0	18.0
1 000	950	845	3.0	1.5

2.2 拉伸断口形貌

图 1 所示为 TC4 合金经 500 和 1 000 热循环后的室温拉伸断口形貌。由图 1 可知,经 500 热循环后断口的纤维区、放射区和剪切唇区特征明显,断口由大小均匀、密度很高的韧窝组成(见图 1(a)和(b)),表明合金在此温度下热循环表现出塑性断裂特征。经 800 热循环后,断口以纤维区为主,纤维区边缘有明显的裂纹和撕裂棱,表明材料在拉伸过程中经过较大塑性变形。微观断口观察发现,断裂时产生大量细小的韧窝,并伴随着三叉型撕裂痕。900 热循环后,断口几乎全被放射区占据,断口表面比较平坦,边缘

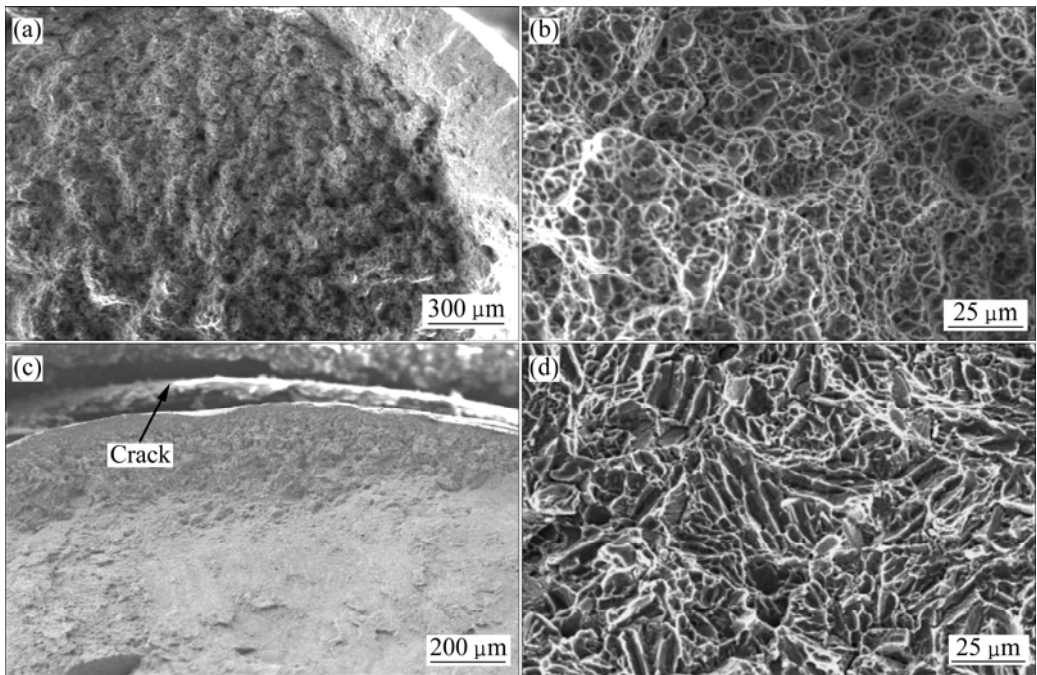


图 1 不同温度热循环 TC4 合金室温拉伸断口

Fig.1 Tensile fractographs of Ti-6Al-4V alloy after different temperatures thermal cycling: (a) 500 , macro-image; (b) 500 , micro-image; (c) 1 000 , maco-image; (d) 1 000 , micro-image

区存在清晰的撕裂棱和正断台阶;其微观断口由韧窝区和沿晶解理区组成,断口表面韧窝密度较小,深度较浅,沿晶解理区附近存在明显的裂纹,可能是由于韧窝区和沿晶解理区变形不协调所导致的。经 1 000

热循环后,发生典型的沿晶解理断裂,宏观断口表面较为光滑,视场内全由放射区占据,断口边部可以观察到氧化层和基体间形成的裂纹;大量长条状沿晶解理痕迹存在于断口中,解理条纹交错排列。

对比不同温度时的断口形貌可以发现,随着温度的升高,TC4 合金热循环后,室温拉伸断口中纤维区相对面积逐渐减小,温度低于 800 时,微观断口为典型塑性韧窝断口,高于 800 时,微观断口形貌中出现明显解理条纹、且解理区所占比例随热循环温度升高而增大;1 000 热循环后,室温拉伸断口形貌几乎全为解理区(见图 1(c)和(d))。结果表明,热循环温度低于 800 时,温度的升高对 TC4 合金断裂机制影响不大,均为塑性韧窝断裂,热循环温度由 800 升高至 1 000 时,TC4 合金室温拉伸断裂机制发生由韧窝 → 解理+韧窝混合 → 完全解理断裂的转变。

2.3 微观组织

图 2 所示为 TC4 合金经不同温度热循环后的金相

组织。由图 2 可看出,经 500 热循环后,组织中 β 相以长轴状分布于 α 基体中;当热循环温度低于 800

时,随温度的升高,组织中黑色的 β 相逐渐减少,同时 α 晶粒有所长大;当温度为 800 时,组织中 β 相含量最少, β 相不连续分布于 α 晶粒周围;当热循环温度为 900 时,组织中 β 相以片状和 α 相间分布,组织由长轴 α 区和 $\alpha+\beta$ 片层区组成, $\alpha+\beta$ 片层组织和 α 相的含量相当;当热循环温度达到 1 000 时,组织中 α 和 β 相均呈片状,长度达 50 μm 以上,形成片层状 $\alpha+\beta$ 网篮组织。

为了更清楚地分析 α 、 β 相形貌特征,对不同温度热循环后的试样进行 SEM 观察,其结果如图 3 所示。由图 3 可看出,经过 500 热循环后,组织中 α 晶粒为长轴形, β 相近乎连续分布于 α 晶粒周围,部分大块表面呈现出片层状;经过 650 和 800 热循环后组织中 α 晶粒形状较 500 时的更加圆整规则,呈现等轴状;经 800 热循环后, β 相在 α 晶界的连续性较 650 时的差;TC4 合金经过 1 000 热循环后,整个组织中分布着大量的长条状 $\alpha+\beta$, α 和 β 片层厚度均小于 0.5 μm 。

观察 TC4 微观组织的变化发现,晶粒尺寸随温度升高出现长大现象。图 4 所示为 TC4 合金经 800 热

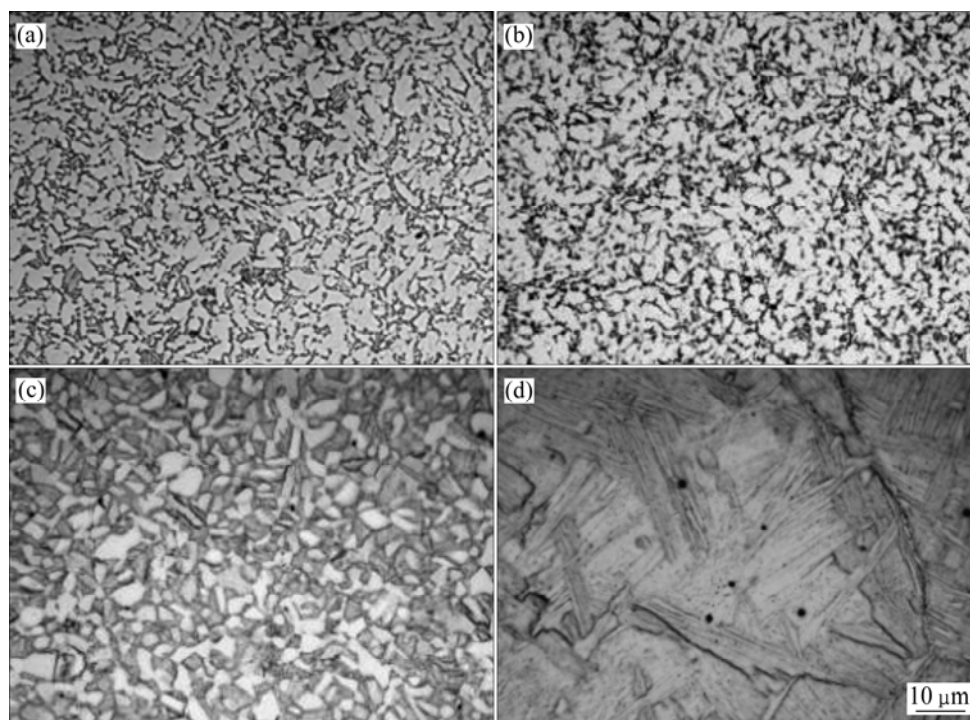


图 2 不同温度热循环后 TC4 合金的金相组织

Fig.2 OM images of Ti-6Al-4V alloy after different thermal cycling temperatures: (a) Original structure; (b) 500 °C; (c) 900 °C; (d) 1 000 °C

循环后的组织照片。由图 4 可看出,经热循环后,TC4 合金 α 晶界处 β 消失, α 晶粒相互合并长大。晶粒的长大主要以晶粒合并长大机制实现(见图 5)。

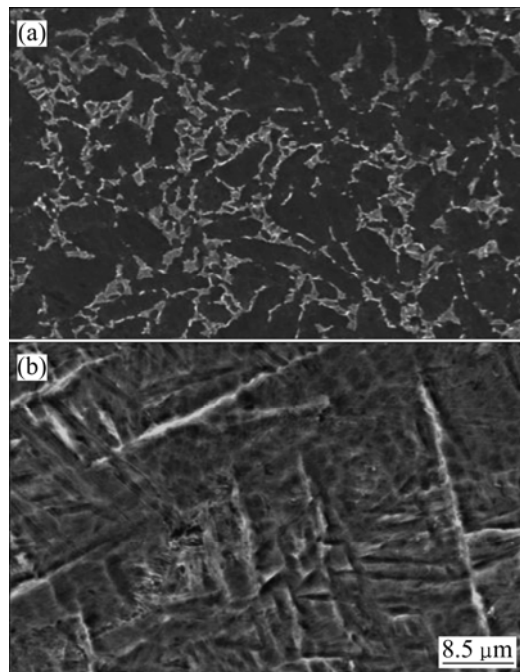


图 3 不同温度热循环后 TC4 合金的 SEM 像

Fig.3 SEM images of Ti-6Al-4V alloy after different thermal cycling temperatures: (a) 500 °C; (b) 1000 °C

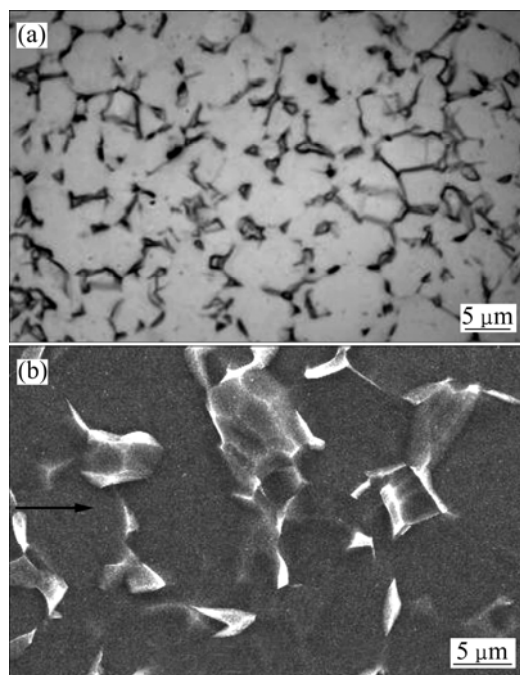


图 4 800 °C 热循环后 TC4 合金晶粒长大的形貌

Fig.4 Morphologies showing grain growth after thermal cycling at 800 °C

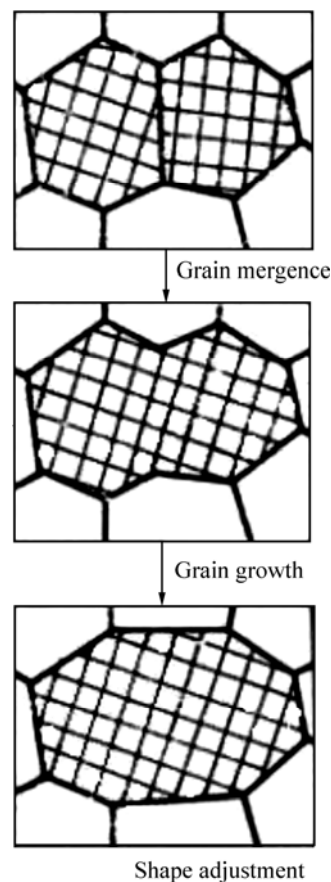


图 5 晶粒合并长大示意图

Fig.5 Sketch diagram of grain growth

3 结论

1) 采用 500~1000 °C 热循环时,随热循环温度升高,TC4 合金强度先降低后升高;低于 800 °C 时,TC4 合金塑性随热循环温度升高变化不大;高于 800 °C 时,随热循环温度升高,TC4 塑性快速降低。

2) 随温度升高,TC4 合金发生明显的晶粒长大现象,温度高于 800 °C 时,TC4 开始有片层状组织形成,达到 1000 °C 时,组织几乎呈全片层状。

REFERENCES

- [1] 武维新, 张楠. 典型飞行事故调查与分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 169-172.
WU Wei-xin, ZHANG Nan. Investigation and analysis for typical fly accident[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2008: 169-172.
- [2] 傅恒志. 未来航空发动机材料面临的挑战与发展趋势[J]. 航空材料学报, 1998, 18(4): 52-60.

- FU Heng-zhi. Change and developing trend for future aero-engines[J]. Journal of Aero Materials, 1998, 18(4): 52–60.
- [3] URBINA C, DELAFLOR S, FERRANDO F. Effect of thermal cycling on the thermomechanical behavior of NiTi shape memory alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 501: 197–206.
- [4] 徐文娟, 操光辉, 吴申庆. 金属基复合材料的热循环行为[J]. 材料科学与工程, 1999, 17(1): 39–42.
- XU Wen-juan, CHAO Guang-hui, WU Shen-qing. Thermal cycling behavior of metal matrix composites[J]. Materials Science and Engineering, 1999, 17(1): 39–42.
- [5] HUANG B. Effects of the coating system and interfacial region thickness on the thermal residual stresses in SiC_f/Ti-6Al-4V composites[J]. Materials and Design, 2009, 30: 718–722.
- [6] 宋志坤, 谢基龙, 张励忠, 等. 铸钢轮材料在 700 ~20 热循环下断裂机制分析[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 141–144.
- SONG Zhi-kun, XIE Ji-long, ZHANG Li-zhong, et al. Fracture mechanism of thermal cycling from 700 to 20 for casting steel[J]. Journal of Railway, 2007, 29(2): 141–144.
- [7] GULERYUZ H, CIMENOGLU H. Oxidation of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 472: 241–246.
- [8] 贾新云, 刘培英, 陶冶, 等. 钛合金的高温氧化及防护[J]. 航空工程与维修, 2004, 4: 19–21.
- JIA Xin-yun, LIU Pei-ying, TAO Ye, et al. High temperature oxidation and protection for titanium alloys[J]. Aero Engineering and Reparation, 2004, 4: 19–21.
- [9] 张春艳, 伍光凤, 田中青. TC4 合金热氧化行为的研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(16): 36–38.
- ZHANG Chun-yan, WU Guang-feng, TIAN Zhong-qing. Research on thermal oxidation of TC4 alloy[J]. Heat Processing Technology, 2007, 36(16): 36–38.
- [10] 金泰来, 魏建锋, 顾兆林, 赵永庆. TC4 合金特高温氧化行为的研究[J]. 钛工业进展, 2005, 22(4): 19–22.
- JIN Tai-lai, WEI Jian-feng, GU Zhao-lin, ZHAO Yong-qing. Extra-high temperature oxidation behavior of TC4 alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(4): 19–22.

(编辑 龙怀中)