

# TC6 钛合金加热和冷却过程中的相转变研究

陈 勋, 范群波, 杨学文

(北京理工大学, 北京 100081)

**摘 要:** 采用迅速水冷保留高温组织状态的方法, 研究 TC6 钛合金在两相区加热和冷却过程中的相转变。结果表明: 在加热过程中, 次生  $\alpha$  相会在 700~850 °C 时优先固溶, 初生  $\alpha$  相在 900 °C 时才会固溶, 能谱分析结果表明, 初生  $\alpha$  相中 Al 元素浓度高于次生  $\alpha$  相中 Al 元素浓度, 因此初生  $\alpha$  相在高温下更加稳定。在冷却过程中初生  $\alpha$  相优先长大, 而次生  $\alpha$  相由于是通过形核长大, 表现为在较低温度段才开始析出, 且次生  $\alpha$  相析出会降低初生  $\alpha$  相的长大速度; 进一步研究发现, 冷却过程中次生  $\alpha$  相析出温度会随着保温温度的降低而逐渐降低。

**关键词:** TC6 钛合金; 相转变; 显微组织

**中图分类号:** TG166.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2012)12-2123-04

TC6 钛合金是 Ti-Al-Mo-Cr-Fe-Si 系的  $\alpha+\beta$  型两相热强钛合金,  $\alpha/\beta$  转变温度在 960~1000 °C 之间。该合金除具有普通钛合金比强度高、抗腐蚀性好等优点外, 还具有良好的塑性和冲击韧性, 可在 400~450 °C 下长时间工作, 主要用作航空发动机叶片、转动件及紧固件等<sup>[1]</sup>。

TC6 钛合金的显微组织对其力学性能的影响十分显著, 初生  $\alpha$  相尺寸及比例、次生  $\alpha$  相形貌、 $\beta$  相比例等均会影响合金的性能。近年来, 许多学者通过热处理方法调控 TC6 钛合金的组织形貌来提高其力学性能<sup>[2,3]</sup>, 却忽视了对热处理过程中各相之间相互转变过程的研究。本实验通过迅速水冷保留的高温组织状态研究 TC6 钛合金在加热和冷却过程中的相转变过程。

## 1 实 验

本研究所用 TC6 钛合金由宝鸡有色金属加工厂提供, 成分如表 1 所示。图 1 为其原始供货态显微组织 SEM 照片, 其中暗灰色区域为初生  $\alpha$  相, 灰白色区域为  $\beta$  相,  $\beta$  相中细小针状的暗灰色区域为次生  $\alpha$  相。试验所用材料为直径 10 mm, 长 10 mm 的棒材。

加热过程中相转变研究试验: 将试样放入箱式电阻炉中, 分别随炉加热到 700, 750, 800, 850, 900 °C, 保温 15 min 后水冷。

表 1 TC6 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical constitution of TC6 titanium alloy ( $\omega/\%$ )

Element	Al	Cr	Mo	Fe	Si	Ti
Content	6	1.5	2.5	0.5	0.3	Bal.

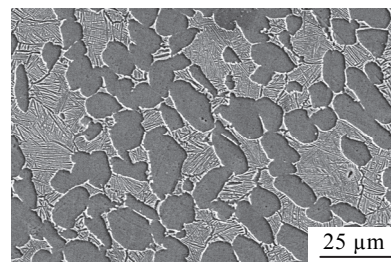


图 1 原始 TC6 钛合金显微组织

Fig.1 Microstructure of as-received TC6 titanium alloy

冷却过程中相转变研究试验: (1) 将试样加热至 900 °C, 保温 15 min 后随炉分别冷却至 800, 750, 710 和 650 °C, 再水冷。(2) 将试样加热至 850 °C, 保温 15 min 后随炉分别冷却至 720, 680 和 620 °C, 再水冷。(3) 将试样加热至 800 °C, 保温 15 min 后随炉分别冷却至 700, 650 和 600 °C, 再水冷。

热处理后选用试样中间部分制备金相试样, 显微组织观察分别在光学显微镜和带有能谱分析的 S4800 冷场发射扫描电子显微镜上进行。利用定量金相检测与分析软件(捷达 801)统计各种显微组织中相比比例, 统计方法为: 统计初生  $\alpha$  相时选取不同区域低倍(100 $\times$ )显微组织照片 10 张, 取平均值; 统计次生  $\alpha$  相时选取不同区域高倍(5000 $\times$ ) $\beta$  基体显微组织照片 10 张, 取平均值, 统计误差为  $\pm 1\%$ 。

## 2 结果与讨论

收稿日期: 2011-12-03

作者简介: 陈 勋, 男, 1987 年生, 硕士, 北京理工大学材料科学与工程学院; 通讯作者: 范群波, 副教授, 电话: 010-68911144, E-mail: fanqunbo@bit.edu.cn

## 2.1 加热过程中相转变

图2为随炉升温至700, 750, 800, 850, 900 °C, 并在该温度保温15 min后水冷保留的高温状态下显微组织, 其中 $\alpha_p$ 、 $\alpha_s$ 和 $\beta$ 分别表示初生 $\alpha$ 相、次生 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相。由图2a~2e可知, 随着保温温度升高,  $\beta$ 基体内次生 $\alpha$ 相的相比比例逐渐降低,  $\beta$ 相相比比例逐渐升高; 在两相区较低温度(850 °C及以下), 如图2a、2b、2c和2d所示, 初生 $\alpha$ 相相比比例基本不变, 而在两相区较高温900 °C时, 如图2e所示,  $\beta$ 基体内已经没有次生 $\alpha$ 相, 初生 $\alpha$ 相颗粒细化, 初生 $\alpha$ 相相比比例显著降低; 这说明在升温阶段,  $\alpha$ 相的固溶分为两个阶段, 在较低温度段,  $\beta$ 基体内次生 $\alpha$ 相优先固溶, 等轴状初生 $\alpha$ 相在较高温段才会固溶。图3为通过能谱分析获得的TC6钛合金原始组织初生 $\alpha$ 相及次生 $\alpha$ 相中Al元素浓度, 由图可知初生 $\alpha$ 相中Al元素的浓度(10%~12%)远高于次生 $\alpha$ 相中Al元素的浓度(5%~7%), Al元素是TC6钛合金中最主要的 $\alpha$ 相稳定元素, Al元素浓度高的初生 $\alpha$ 相较Al元素浓度低的次生 $\alpha$ 相更稳定<sup>[4]</sup>。

## 2.2 冷却过程中相转变

图4为TC6钛合金在900 °C保温15 min后分别随炉冷却至800, 750, 710 和 650 °C后, 迅速水冷至室温获得的显微组织照片。由图2e和图4a可知, 从

900 °C冷却至800 °C过程中初生 $\alpha$ 相明显长大; 如图4b所示, 从750 °C水冷组织中 $\alpha/\beta$ 界面及 $\beta$ 基体内析出了少量呈细小针状的次生 $\alpha$ 相, 但初生 $\alpha$ 相颗粒尺寸没有明显增加; 在较低温度如图4c和4d所示, 710 和 650 °C水冷组织中 $\alpha/\beta$ 界面处次生 $\alpha$ 相会向 $\beta$ 基体内生长,  $\beta$ 基体内次生 $\alpha$ 相逐渐长大, 次生 $\alpha$ 相相比比例逐渐提高。在冷却过程中, 等轴状初生 $\alpha$ 相优先长大, 在较低温度下 $\beta$ 基体内才会析出针状次生 $\alpha$ 相, 这是因为初生 $\alpha$ 相长大是通过元素扩散使 $\alpha/\beta$ 界面发生迁移来实现的, 而次生 $\alpha$ 相是通过形核长大需要一定的过冷度。由图4b可知, 从900 °C随炉冷却过程中, 次生 $\alpha$ 相约在750 °C时析出。由图5所示, 次生 $\alpha$ 相析出前自900 °C冷却至800 °C的过程中, 初生 $\alpha$ 相的长大速度较快, 相比比例显著增加, 图中虚线表示未析出次生 $\alpha$ 相时初生 $\alpha$ 相相比比例的增加趋势; 次生 $\alpha$ 相析出后自750 °C冷却至650 °C的过程中, 初生 $\alpha$ 相的长大速度降低, 相比比例增加速率明显降低。次生 $\alpha$ 相的析出会抑制初生 $\alpha$ 相的长大, 这主要是因为次生 $\alpha$ 相的析出会显著降低 $\beta$ 基体中溶质原子的过饱和度从而降低初生 $\alpha$ 相的长大速度, 而且 $\beta$ 基体中析出的次生 $\alpha$ 相会阻塞初生 $\alpha$ 相的长大<sup>[5]</sup>。

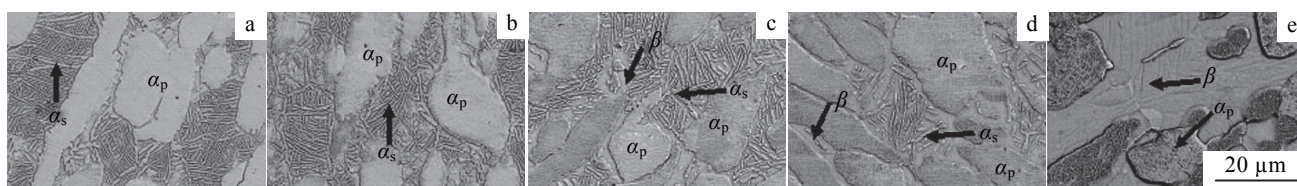


图2 不同保温温度水冷的显微组织

Fig.2 Water cooled microstructures at different holding temperatures: (a) 700 °C, (b) 750 °C, (c) 800 °C, (d) 850 °C, and (e) 900 °C

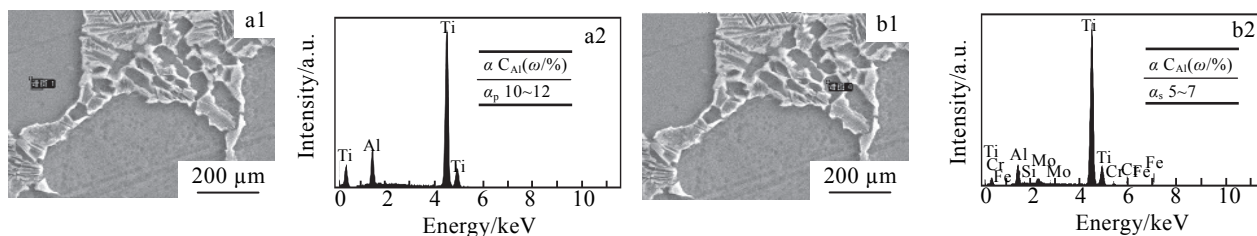


图3 初生 $\alpha$ 相及次生 $\alpha$ 相中Al元素浓度

Fig.3 Al element concentration in primary (a) and secondary (b)  $\alpha$  phase

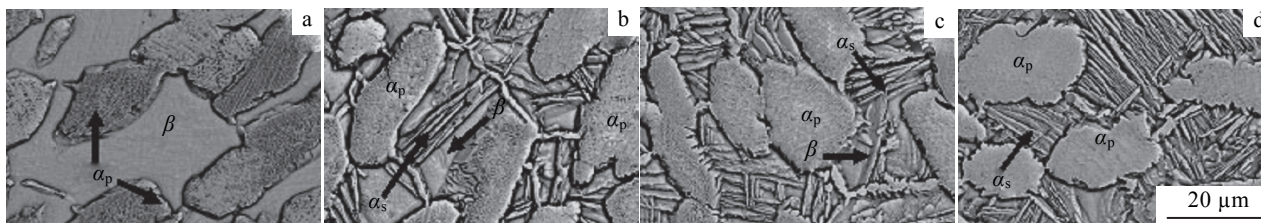


图4 从900 °C炉冷到不同温度后水冷的显微组织

Fig.4 Water cooled microstructures after cooling from 900 °C down to different temperatures: (a) 800 °C, (b) 750 °C, (c) 710 °C, and (d) 650 °C



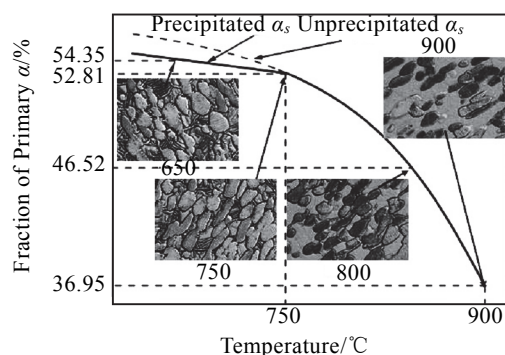
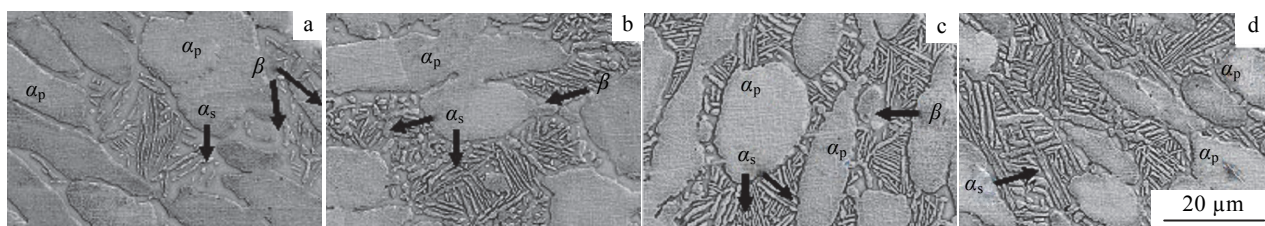
图 5 次生  $\alpha$  相析出对初生  $\alpha$  相长大速度的影响Fig.5 Effects of the formation of secondary  $\alpha$  on the growth of primary  $\alpha$ 

图 6 从 850 °C 炉冷到不同温度后水冷的显微组织

Fig.6 Water cooled microstructures after cooling from 850 °C down to different temperatures: (a) 850 °C, (b) 720 °C, (c) 680 °C, and (d) 620 °C

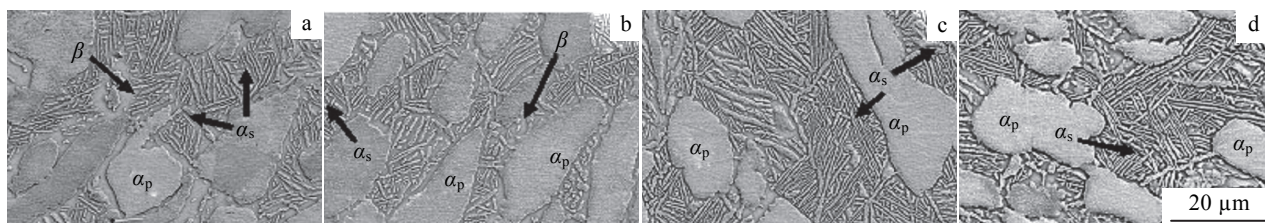


图 7 从 800 °C 炉冷到不同温度后水冷的显微组织

Fig.7 Water cooled microstructures after cooling from 800 °C down to different temperatures: (a) 800 °C, (b) 700 °C, (c) 650 °C, and (d) 600 °C

### 3 结 论

1) 加热过程中,  $\alpha$  相的固溶分为两个阶段, 在 700~850 °C 时,  $\beta$  基体内次生  $\alpha$  相优先固溶, 等轴状初生  $\alpha$  相在 900 °C 才会固溶, 这是因为初生  $\alpha$  相中 Al 元素的浓度(10%~12%)远高于次生  $\alpha$  相中 Al 元素的浓度(5%~7%), Al 元素浓度高的初生  $\alpha$  相较 Al 元素浓度低的次生  $\alpha$  相在高温下更稳定。

2) 在冷却过程中, 等轴状初生  $\alpha$  相优先长大, 在较低温度下  $\beta$  基体内会析出针状次生  $\alpha$  相, 这是因为初生  $\alpha$  相长大是通过元素扩散使  $\alpha/\beta$  界面发生迁移来实现的, 而次生  $\alpha$  相是通过形核长大需要一定的过冷

度。图 6 和图 7 分别为 TC6 钛合金在 850 和 800 °C 保温 15 min 后随炉冷却至不同温度后, 迅速水冷至室温获得的显微组织照片。由图 6b 和 7b 可知, 自 850 和 800 °C 随炉冷却过程中, 次生  $\alpha$  相析出温度分别约为 720 和 700 °C, 次生  $\alpha$  相析出后会逐渐长大, 次生  $\alpha$  相比例逐渐升高, 如图 6c、图 6d 和图 7c、图 7d 所示。

Glavicic<sup>[6]</sup>等大多数学者认为  $\beta$  基体中次生  $\alpha$  相的析出为均匀形核并通过扩散控制长大。固相中均匀形核时, 母相在达到临界过冷度之前形核率基本为零, 达到临界过冷度以下形核率才会快速增加, 要达到临界过冷度需扩散到相对平衡态较低的温度下, 即在保温温度以下才会开始析出, 因此随着保温温度的降低, 次生  $\alpha$  相的析出温度也逐渐降低。

度。次生  $\alpha$  相的析出会显著降低  $\beta$  基体中溶质原子的过饱和度从而降低初生  $\alpha$  相的长大速度。

3) 从 900, 850, 800 °C 随炉冷却过程中, 次生  $\alpha$  相的析出温度分别约为 750, 720, 700 °C, 次生  $\alpha$  相的析出温度随保温温度的降低而降低。

### 参考文献 References

- [1] Xiong Aiming(熊爱明), Chen Shenghui(陈胜晖). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(6): 447
- [2] Liu Xingxing(刘星星), Yan Biao(严彪). *Metal of Shanghai*(上海金属)[J], 2008, 30(1): 12

- [3] Chen Youhong(陈由红), Wang Shuyun(王淑云), Sun Xing(孙兴). *New Technology and new Process*(新技术新工艺)[J], 2009, 12: 124
- [4] Shawn. *Thermal and Microstructure Modeling of Metal Deposition Processes with Application to Ti-6Al-4V*[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004
- [5] Semiatin S L. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2003, 34: 2377
- [6] Glavicic M G, Miller J D, Semiatin S L. *Scripta Materialia*[J], 2006, 54: 281

## Phase Transformation in TC6 Titanium Alloy during Heating and Cooling

Chen Xun, Fan Qunbo, Yang Xuewen

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** By means of rapid water cooling to retain the microstructure state at high temperature, the phase transformation in TC6 titanium alloy during heating and cooling processes within the two phase field was investigated. The results show that with increasing the temperature during the heating process, the secondary  $\alpha$  dissolves within a range of temperature between 700 and 850 °C but the primary  $\alpha$  dissolves at 900 °C. The results of energy spectrum analysis show that Al element concentration in primary  $\alpha$  is higher than that in secondary  $\alpha$ , that is to say, primary  $\alpha$  is more stable than secondary  $\alpha$  at high temperature. During the cooling process, the primary  $\alpha$  grows up preferentially at a higher temperature, while due to the formation of secondary  $\alpha$  through nucleation and growth, it precipitates at a relatively lower temperature, and the secondary  $\alpha$  precipitates can slow down the growth of the primary  $\alpha$ . Furthermore, with reducing the holding temperature, the precipitation temperature of secondary  $\alpha$  gradually decreases.

**Key words:** TC6 titanium alloy; phase transformation; microstructure

Corresponding author: Chen Xun, Master, School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China; Fan Qunbo, Associate Professor, Tel: 0086-10-68911144, E-mail: fanqunbo@bit.edu.cn