

# TC4-DT 合金通过三重热处理得到的三态组织

张贵华, 董洪波, 朱深亮, 刘 诚, 余新平

(南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

**摘 要:** 研究了钛合金 TC4-DT 在高温热变形后进行的三重热处理对微观组织的影响。结果表明: 三重热处理工艺中第一重温度与第二重温度影响着合金组织中的等轴  $\alpha$  相的含量, 伴随着第一重温度与第二重温度的升高, 等轴  $\alpha$  相含量逐渐减少; 将高温变形后的组织通过 940℃/1 h, WQ+920℃/1 h, WQ+820℃/1.5 h, AC 热处理可以得到三态组织, 其中约含 20% 等轴  $\alpha$ 、50%~60% 条状  $\alpha$  构成的网篮和  $\beta$  转变基体; 且条状  $\alpha$  相构成的网篮中, 一次次生条状  $\alpha$  相间还含有更细小二次次生条状  $\alpha$  相, 这种组织具有较小的纵横比, 各  $\alpha$  集束交错排列, 细化了组织。

**关键词:** TC4-DT 钛合金; 三态组织; 三重热处理

中图分类号: TG166.5; TG156.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)09-2454-04

近年来, 针对钛合金的研究已经不仅仅局限在单一的塑性或者损伤容限性能性能的框架里, 如何得到综合性能优良的组织成为了比较热门的话题。周义刚等人<sup>[1]</sup>针对钛合金进行高温热化处理后, 得到了约含 20% 等轴  $\alpha$ 、50%~60% 条状  $\alpha$  构成的网篮和  $\beta$  转变基体组成的三态组织, 这种结构不仅丰富和发展了国际上钛合金已有的 4 种组织类型(等轴、双态、网篮和片层), 而且将等轴和网篮组织的性能优势集于一身, 由此带来的力学性能超过了国内外相关技术的性能水平——能在不降低塑性, 不丧失热稳定性的条件下, 提高材料的高温性能、低周疲劳性能和断裂韧性, 在改善性能的同时提高了使用温度。孙志超等人<sup>[2]</sup>在研究中提出将钛合金放在两相区锻造, 以改善钛合金的初始组织, 得到含有等轴  $\alpha$  的等轴或双态组织, 而后通过后续的热处理工艺得到三态组织, 这为钛合金锻件获得三态组织提供了一种有效的工艺参考。国内在 TC4-DT 合金组织的研究还局限在钛合金的常见 4 类组织, 如何利用合适的工艺方法, 在 TC4-DT 合金得到三态组织, 这是本研究主要探索的方向。

本实验以高温变形后 TC4-DT 合金为基础, 进行三重热处理, 找出 TC4-DT 合金的组织在各个热处理工艺因素影响下的变化规律, 以获得三态组织, 丰富 TC4-DT 合金的组织类型, 为 TC4-DT 钛合金锻件获得高强、高韧和损伤容限优良的综合性能奠定基础。

## 1 实 验

收稿日期: 2015-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(51164029)

作者简介: 张贵华, 男, 1987 年生, 硕士生, 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83863032, E-mail: 453903787@qq.com

实验材料为由真空自耗熔炼的 TC4-DT 合金铸锭加工成的棒料。通过金相法测出合金的相变点为 970±5℃。拉伸试验采用标距为 15 mm, 直径为 5 mm 的标准试样。首先经过两相区 950℃ 拉伸变形 60%, 冷却方式为水冷, 将合金切割成大小相等数段进行三重热处理。

采用箱式电阻炉(精度控制在±1℃), 分别对 TC4-DT 钛合金进行三重热处理(如表 1)。热处理后的试样经过粗磨、细磨、细抛制成金相试样, 腐蚀剂配比为 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=1:3:27, 将金相试样腐蚀、洗净、风干后用 XJP-6A 光学显微镜(OM)和 Quanta200 扫描电镜(SEM)观察显微组织, 通过金相检验软件分析显微组织。

## 2 结果及讨论

### 2.1 高温变形后的组织

图 1 为合金高温变形后的组织。从图 1 可以看出, 两相区 950℃ 拉伸变形 60% 后经过水冷得到的初态组

表 1 热处理工艺方法

Table 1 Heat treatment process methods	
Numerical order	Heat treatment
HT1	940℃/1 h, WQ+920℃/1 h, WQ+820℃/1.5 h, AC
HT2	940℃/1 h, WQ+760℃/4 h, AC
HT3	960℃/1 h, WQ+920℃/1 h, WQ+820℃/1.5 h, AC
HT4	940℃/1 h, WQ+880℃/1 h, WQ+820℃/1.5 h, AC

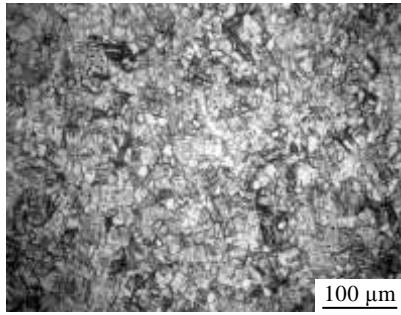


图1 TC4-DT 合金经过高温变形后的组织

Fig.1 Microstructure of TC4-DT alloy after thermal deformation

织为含有 60%左右的球状  $\alpha$  相与针状马氏体  $\alpha'$  相所组成的双态组织。高温形变中使材料处于高能态的加工态, 产生稳定的点阵扭曲或较高缺陷密度, 并在随后的热处理过程中加以利用, 使材料的强度和塑性的结合较好<sup>[3]</sup>, 为后面的热处理提供组织基础。

## 2.2 热处理对组织形态的影响

### 2.2.1 TC4-DT 合金三态组织

HT1 热处理方案是 940 °C/1 h, WQ+880 °C/1 h, WQ+820 °C/1.5 h, AC, 得到了由约含 20%等轴  $\alpha$ 、50%~60%条状  $\alpha$  构成的网篮和  $\beta$  转变基体组成的三态组织(如图 2a)。等轴  $\alpha$  大小在 10  $\mu\text{m}$  左右。由于约 20%等轴  $\alpha$  相晶粒存在, 其可以起到变形协调的作用, 且  $\beta$  转变相中的片状  $\alpha$  相, 降低了等轴  $\alpha$  相间的平均自由程, 使滑移带间距减小, 位错线分布均匀、细密, 没有局部位错严重塞积现象, 推迟了空洞的形核和发展, 因而显示稍高的塑性, 同时保持了足够的强度<sup>[4]</sup>。结构中通过热处理获得了 60%由位向不同的  $\alpha$  集束相互平行或者交织在一起而形成的网篮组织, 这种网篮组织有助于提高材料的断裂韧性和疲劳裂纹扩展抗力<sup>[5-8]</sup>。

如图 2b 中的 SEM 照片, 条状  $\alpha$  清晰明显, 相互错乱交织在一起, 亮色部分为  $\beta$  相。条状  $\alpha$  相主要是由亚稳态  $\beta$  相转化而来, 在较长的一次次生  $\alpha$  相间还交织分布着细小的二次次生  $\alpha$  相。较厚的一次次生片层厚度在 2  $\mu\text{m}$  左右, 较薄的二次次生片层厚度在 0.5  $\mu\text{m}$  左右。这可能是由于第一重热处理经过水淬产生的高温保留组织, 通过第二重热处理会伴随着一部分不稳定相马氏体及亚稳态  $\beta$  相的分解<sup>[9,10]</sup>, 生成部分一次次生条状  $\alpha$  相。在接下来的第三重热处理过程中, 亚稳定相继续分解, 产生二次次生条状  $\alpha$  相。此时一次次生条状  $\alpha$  相会阻碍二次次生条状  $\alpha$  的生长, 使得二次次生条状  $\alpha$  相交错的穿插其中。各  $\alpha$  集束交错排列, 并具有较小的纵横比。

### 2.2.2 三重热处理与常规固溶时效处理的比较

HT2 热处理工艺为常规的固溶时效处理。固溶温

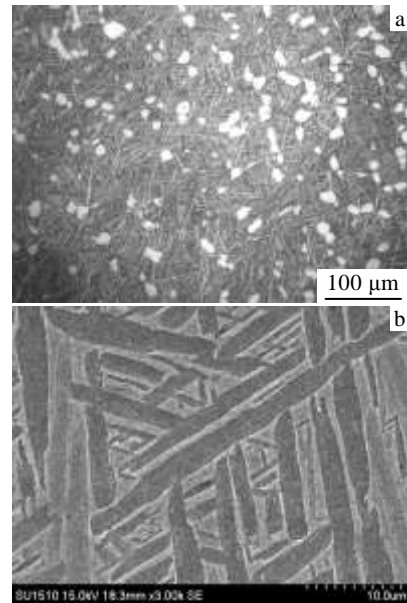


图2 TC4-DT 合金经过 HT1 热处理工艺后的组织

Fig.2 Microstructures of TC4-DT alloy after the heat treatment

HT1: (a) OM micrograph and (b) SEM micrograph

度和 HT1 热处理工艺的第一重温度相同, 时效温度放在 760 °C 保温 4 h, 得到等轴  $\alpha$  相与条状集束均匀分布的双态组织, 其中等轴  $\alpha$  相含量在 35%左右, 在晶界处还有条状  $\alpha$  生成(如图 3)。

与常规固溶时效对比, HT1 热处理工艺的第一重的温度与 HT2 热处理工艺的固溶温度相同, 得到的显微组织形态中, 等轴组织的含量明显少于常规固溶时效得到的组织(如图 2a)。这是由于三重热处理经历了两重高温固溶, 在经历第二重热处理时, 等轴  $\alpha$  相会继续向  $\beta$  转变, 导致等轴相的减少。

### 2.2.3 第一重热处理温度对组织的影响

HT3 热处理工艺条件为 960 °C/1 h, WQ+920 °C/1 h, WQ+820 °C/1.5 h, AC, 显微组织中等轴相完全消失, 为全条状  $\alpha$  相交织在一起的网篮组织, 较大片层

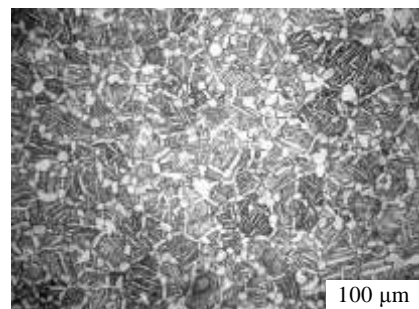


图 3 TC4-DT 合金经过 HT2 热处理工艺后的组织

Fig.3 Microstructure of TC4-DT alloy after the heat treatment HT2 的厚度在 4  $\mu\text{m}$  左右,长度在 5 到 120  $\mu\text{m}$  不等(如图 4)。

与 HT1 热处理工艺相比, HT3 热处理工艺第一重温度提高 20  $^{\circ}\text{C}$ , 在相变点以下 15  $^{\circ}\text{C}$ , 第二重和第三重温度相同, 但两者组织差别大。这是由于当第一重热处理温度升高并接近相变点时, 绝大多数  $\alpha$  相转变为  $\beta$  相; 合金水淬后, 高温形成的过饱和固溶体发生马氏体相变, 经过第三重时效处理时, 由前两重热处理过程中得到的马氏体与高温保留的亚稳定  $\beta$  相发生分解, 析出次生条状  $\alpha$  相, 这些条状  $\alpha$  相交织在一起组成了片层组织。

### 2.2.4 第二重热处理温度对组织的影响

HT4 热处理工艺条件为 940  $^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ , WQ+880  $^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ , WQ+820  $^{\circ}\text{C}/1.5\text{ h}$ , AC, 与 HT1 热处理工艺相比, 第二重热处理温度为 880  $^{\circ}\text{C}$ , 其它条件相同。等轴  $\alpha$  的含量在 40% 左右, 与条状  $\alpha$  相构成了双态组织(如图 5)。

在不同的第二重温度情况下, HT4 热处理工艺所得到的初生  $\alpha$  相比 HT1 热处理工艺得到的要多 15% 左右, 而且两个晶粒间有合并长大的现象。这是由于在经过了第一重热处理后, 在经过第二重热处理时, 等轴  $\alpha$  相将在高温下继续向  $\beta$  相转变。若第二重温度降

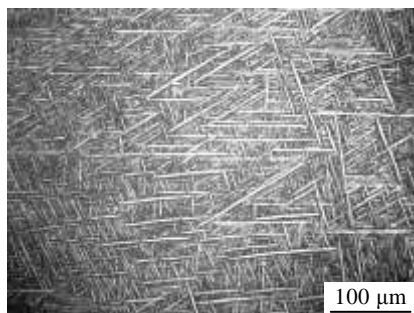


图 4 TC4-DT 合金经过 HT3 热处理工艺后的组织

Fig.4 Microstructure of TC4-DT alloy after the heat treatment HT3

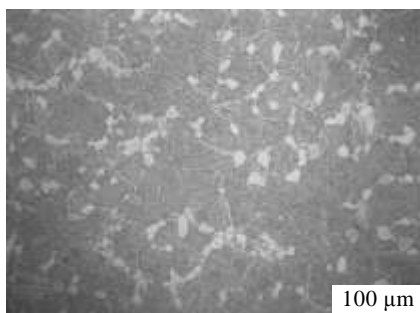


图 5 TC4-DT 合金经过 HT4 热处理工艺后的组织

Fig.5 Microstructure of TC4-DT alloy after the heat treatment HT4

低, 等轴  $\alpha$  相向  $\beta$  相转变相应减少, 因此 HT4 热处理工艺最终得到的等轴  $\alpha$  相含量多于 HT1 热处理工艺。

## 3 结 论

1) 通过 HT1 热处理可以得到由约含 20% 等轴  $\alpha$ 、50%~60% 条状  $\alpha$  构成的网篮和  $\beta$  转变基体组成的三态组织。

2) 在 HT1 条件下得到的显微组织中, 等轴  $\alpha$  相有利于提高合金的塑性和强度; 网篮组织有助于提高材料的断裂韧性和疲劳裂纹扩展抗力, 而且网篮组织中一次次生条状  $\alpha$  相间还含有更细小的二次次生条状  $\alpha$  相, 各  $\alpha$  集束交错排列, 具有较小的纵横比, 细化了组织。

3) 伴随第一重或者第二重温度的升高, 都会使得等轴  $\alpha$  减少; 当热处理工艺为 HT4 时, 得到双态组织; 热处理工艺为 HT3 时, 得到了全片层  $\alpha$  组成的网篮组织。

## 参考文献 References

- [1] Zhou Yigang(周义刚), Zeng Weidong(曾卫东), Yu Hanqing(俞汉清). *Engineering Science*(中国工程科学)[J], 2001, 3(5): 61
- [2] Sun Zhichao(孙志超), Cao Xin(曹欣), Yang He(杨合) et al. *China Patent*(中国专利), CN201210273255.6[P], 2012
- [3] Hui Songxiao(惠松晓), Wang Xizhe(王希哲), Zhang Zhu(张翥) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(SI): 84
- [4] Ye Hongchuan(叶红川), Zhang Xuehua(张雪华), Qu Henglei(曲恒磊) et al. *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2011, 36: 2
- [5] Yoder G R, Cooley L A, Boyer R R. *Microstructure Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Rate in Titanium Alloys*[M]. Denver: ATMS-AIME, 1987: 209
- [6] Zhang Wangfeng(张旺峰), Li Xingwu(李兴无), Ma Jimin(马济民) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2006, 26(3): 313
- [7] Wang Gang(王刚), Xu Dongsheng(徐东生), Yang Rui(杨锐). *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2009, 58(S): 347
- [8] Li S K, Xing B Q, Hui S X et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 460-461: 140
- [9] Deng Anhua(邓安华). *Shanghai Nonferrous Metals*(上海有色

- 金属)[J], 1999, 20(4): 195
- [10] Zhao Yongqing(赵永庆), Hong Quan(洪权), Ge Peng(葛鹏). *Titanium and Titanium Alloy Metallographic Atlas*(钛及钛合金金相图谱)[M]. Changsha: Central South University Press, 2011: 3

## Tri-modal Structure of TC4-DT Alloy through Triple Heat Treatment

Zhang Guihua, Dong Hongbo, Zhu Shengliang, Liu Cheng, Yu Xinping  
(Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The effect of triple heat treatment on microstructure of TC4-DT titanium alloy was studied after thermal deformation at high temperature. It is shown that the first temperature and the second temperature in the triple heat treatment influence the amount of  $\alpha$  phase in alloy microstructure; moreover, with the increasing of the first temperature and the second temperature, equiaxed  $\alpha$  phase gradually decreases. The tri-modal structure which results from 940 °C/1 h, WQ+920 °C/1 h, WQ+820 °C/1.5 h, AC, consists of about 20% equiaxed  $\alpha$ , 50%~60% basketweave composed of strip  $\alpha$  and transformed  $\beta$  matrix. Furthermore, there are smaller secondary strip  $\alpha$  among first strip  $\alpha$  in the basketweave composed of strip  $\alpha$ . The microstructure has a smaller aspect ratio and  $\alpha$  staggered clusters, refining the microstructure.

**Key words:** TC4-DT titanium alloy; tri-modal structure; triple heat treatment

---

Corresponding author: Dong Hongbo, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863032, E-mail: donghbo@nchu.edu.cn