

# 水冷温度对 TC4 钛合金组织演变的影响<sup>\*</sup>

康少圃, 李 壮, 于欢欢, 于 涛, 李朝华

(沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 沈阳 110136)

**[摘要]** 水冷温度影响 TC4 钛合金的组织形态与力学性能的变化。TC4 钛合金固溶后缓慢冷却到 3 种不同温度。水冷后组织形态与力学性能的变化结果表明: 当由 900℃ 开始水冷时,  $\alpha$  相在晶界形核, 原始的  $\beta$  晶粒出现; 当温度继续降低达 700℃ 然后再水冷时, 析出  $\alpha$  相相对均匀细小, 试样抗拉强度和硬度分别达到了最高值 867MPa 和 HV<sub>5</sub>218; 随着冷却温度的继续下降,  $\beta$  相逐渐析出  $\alpha$  相, 水冷温度越低,  $\alpha$  相呈现为粗大的片层状, 试样强度和硬度降低。

**关键词:** TC4 钛合金; 水冷温度; 相; 力学性能

## Effects of Water Cooling Temperature on the Microstructural Evolution of TC4 Alloy

KANG Shaopu, LI Zhuang, YU Huanhuan, YU Tao, LI Zhaohua

(College of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**[ABSTRACT]** Water cooling temperature affects morphologies and mechanical properties of TC4 alloy. TC4 alloy was water cooled from 3 different temperatures after solution treating. The results show that the original  $\beta$ -grain and  $\alpha$ -phase were observed when the specimens were water cooled at 900℃ after solid solution. A uniformly fine-grained structure of  $\alpha$ -phase was observed when the specimens were water cooled at 700℃. The tensile strength and hardness of specimens exhibited the maximum value (867MPa and HV<sub>5</sub>218), respectively. More  $\alpha$ -phases were precipitated from  $\beta$ -phases with decreasing water cooling temperature. The tensile strength and hardnesses of the specimens decreased due to coarse lamellar  $\alpha$ -phase.

**Keywords:** TC4 alloy; Water cooling temperature; Phases; Mechanical properties

**DOI:**10.16080/j.issn 1671-833x.2017.1/2.103

钛合金在现代先进的航空和航天结构中已发展成为重要的结构材料, 钛合金结构选材的用量呈现了迅速上升的趋势<sup>[1]</sup>。TC4 钛合金比强度高, 是一种中等强度的  $\alpha$ - $\beta$  型两相钛合金, 具有优越的塑性和韧性, 是航空工业的首选材料<sup>[2]</sup>。钛合金的力学性能对显微组织变化较为敏感<sup>[3]</sup>, 热处理工艺影响其组织形态。新一代航空航天飞行器正在向着高速化、大型化、结构复杂化以及提高燃油效率等方向发展, 航空、航天等高强度高韧性部位所用的钛合金结构件要求的强度都较高。近年来, 国内主要侧重于固溶-时效工艺对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响等方面做了一些试验工作, 而对于不同的热机械处理制度下 TC4 钛合金的组织特征控制及性能优化的研究还比较少。作者采用以适当速度升温、保温后慢冷到 3 种温度水冷的方法, 对 TC4 钛合金组织演变与力学性能变化进行研究, 以便获得性能优良的钛合金零部件。

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家 863 科研项目(2015AA03A501); 东北大学国家重点实验室开放课题(12SYS05)。

## 1 试验方法

表 1 列出了 TC4 钛合金中各元素的含量。18 个退火后的 TC4 钛合金坯料经数控线切割机床切割成正方体试样与标准拉伸试样, 然后被置入电阻炉(SX-14-14)中加热, 最后被冷至 3 种不同温度后水冷(图 1)。金相试样所用腐蚀剂为 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=1:3:5。TC4 钛合金组织演变采用金相显微镜(Olympus-BX51)和扫描电镜(FEI)来观测。用维式硬度计(HV-50A)分析试样的硬度。在 INSTRON 4206 电子机械试验机上进行拉伸试验。

表1 TC4钛合金的成分(质量分数) %

Ti	Fe	H	C	N	O	V	Al
余量	0.047	0.006	0.052	0.009	0.187	3.83	5.71

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同温度水冷对力学性能的影响

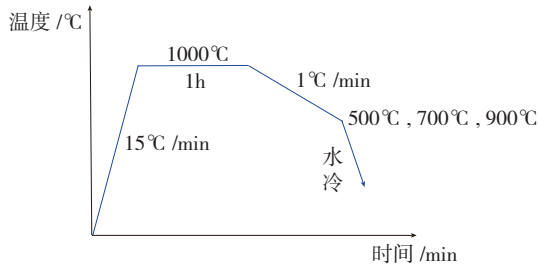


图1 热处理工艺曲线

Fig.1 Heat treatment processing curve

试样 1000℃固溶后冷至 3 种不同温度取出水冷所获硬度如表 2 所示,力学性能如表 3 所示。

由表 2 可见,试样的硬度慢冷至 900℃水冷后达到 HV<sub>5</sub>209,当冷却温度继续降低至 700℃水冷后硬度增高,达到最高(HV<sub>5</sub>218)。而冷却温度继续降低之后,硬度又转为下降,在 500℃水冷后硬度达最低(HV<sub>5</sub>186)。试样慢冷到 3 种温度水冷,硬度呈现出先上升然后再下降的变化趋势。

表2 不同水冷温度下试样的硬度值

温度 /℃	900	700	500
HV <sub>5</sub>	209	218	186

表3 不同水冷温度下试样的力学性能

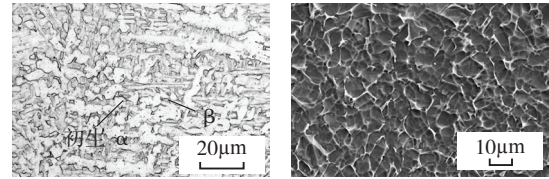
水冷温度 /℃	抗拉强度 R <sub>m</sub> / MPa	屈服强度 R <sub>p0.2</sub> / MPa	伸出率 A / %
900	851	763	13
700	867	778	12
500	833	756	14

表 3 中,试样抗拉强度在 700℃水冷后达最高为 867MPa,随后在 500℃水冷后降至 833MPa 的最低值;伸出率则呈相反的趋势。

## 2.2 不同温度水冷时的组织演变

试样经固溶后缓慢冷却,在不同的温度水冷时,性能发生变化。首先,强度、硬度值升高,在 700℃时水冷强度、硬度最高;随后,强度、硬度又随水冷温度的降低而下降。图 2~4 给出了 TC4 钛合金慢冷至 900℃、700℃和 500℃时的组织变化。

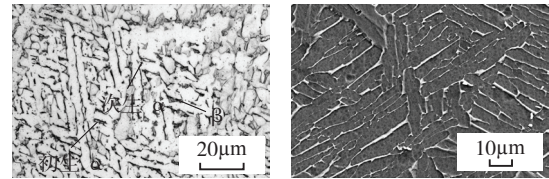
图 2 中,原始 β 晶粒在慢冷到 900℃水冷时分布较多,而 α 相相对很少。在慢冷到 700℃水冷时,转变 β 以及等轴 α 呈现出来,晶界细密,晶粒均匀细小,如图 3 所示。在慢冷到 500℃水冷时,可以看到试样组织转变为粗大的片层 α 相和少量 β 相。扫描电镜(SEM)照片中白色发亮的部分为 β 相,灰黑色部分为 α 相<sup>[4]</sup>,如图 4 所示。



(a) 光学显微组织 (b) 扫描电镜组织

图2 900℃水冷的显微组织

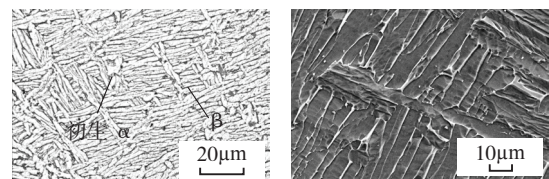
Fig.2 Microstructures of TC4 alloy after water cooling at 900°C



(a) 光学显微组织 (b) 扫描电镜组织

图3 700℃水冷的显微组织

Fig.3 Microstructures of TC4 alloy after water cooling at 700°C



(a) 光学显微组织 (b) 扫描电镜组织

图4 500℃水冷的显微组织

Fig.4 Microstructures of TC4 alloy after water cooling at 500°C

## 2.3 结果与讨论

TC4 钛合金的组织形态与性能随固溶后缓慢冷却取出水冷时水冷温度的变化而变化。表 2 中可见,在 700℃,试样抗拉强度和硬度分别达到了最高值 867MPa 和 HV<sub>5</sub>218。TC4 钛合金高温保温后采用以适当速率冷却,在两相区 α 相在晶界形核,向晶内生长,晶粒内没有形核<sup>[5]</sup>,此时试样显微组织表现为最均匀的状态<sup>[6]</sup>。α 相和 β 相的含量与形态影响 TC4 的性能,甚至改变了 TC4 合金中 α 组织和 β 组织的强度<sup>[7]</sup>,同时对其冲压成形性能产生影响。文献[8]指出:细小的晶界 α 相和次生 α 相增多时,合金强度增高,但伸长率相对降低;当 β 转变组织的增多和原始 β 晶粒尺寸的增大,材料的强度和断面收缩率升高,而晶界 α 相和二次 α 相的宽度对力学性能的影响却呈相反趋势。试样在 700℃水冷时,析出相对均匀细小的 α 相导致相界增多,一旦相界成为位错滑移障碍,强度得到提高<sup>[9]</sup>。当温度继续降低到 700℃以下时,等轴晶组织出现了,转变 β 相也随之析出。由于转变 β 相的产生,强度、硬度开始下降。

组织的变化均在缓慢冷却过程中发生<sup>[10]</sup>。在 3 种不同温度水冷,在这一过程中发生 β → α + β,过冷度小时,在晶界首先形核、长大,变成网状晶界 α 相<sup>[11]</sup>。因此,当慢冷达 900℃时,少量 α 片层在晶界形核、析

出,并向晶内生长处于主导地位。通过 SEM 照片可见,  $\beta$  相组织形态发生变化,随着冷却温度降低,  $\alpha$  相含量进一步增加,新析出的  $\alpha$  相与原先存在的  $\alpha$  相的位向不同,这种在晶内形核析出的  $\alpha$  相与残余  $\beta$  相混合并存形成转变态  $\beta$  相。当慢冷至 700℃时,  $\alpha$  相在晶界形核,同时这种  $\alpha$  片层向晶内生长,全片层组织出现,针状  $\alpha$  相在晶界处形成了;而当慢冷至 500℃时,这种  $\alpha$  相增多,同时,转变  $\beta$  相和初生等轴  $\alpha$  相形成。因此,当 TC4 钛合金缓慢冷却至两相区较高温度时,主要发生  $\alpha$  相在晶界形核并析出;当冷却到两相区低温区时,  $\alpha$  片层由晶界向晶内长大并增多,呈现出粗大的片层状。晶界  $\alpha$  相含量的减少和原始  $\beta$  晶粒尺寸的降低有助于塑性的提高<sup>[8]</sup>,在 500℃水冷温度时强度、硬度降低至最低值。

针对某些特殊用途,如 TC4 合金在不同工艺下进行各种零部件成形时,过高的硬度无疑会降低其成形性能。然而,在我国未来新型飞机的设计,要求高的比强度,以实现更大的减重效果。如果钛合金具有更高的强度、断裂韧性和更好的焊接性能,将可以适用于制造起落架用大型锻件,实现不同加载方式下工作的起落架承力部件的重量减轻和寿命提高<sup>[12]</sup>。此外,一旦钛合金强度足够高,还可用于加工防弹装甲板,在时效状态下具有高的强度和断裂韧性,成为航空工业大型结构件的理想材料。因此,本文针对普遍使用的 TC4 钛合金,通过水冷温度对其组织演变的作用分析,研究其力学性能的变化,具有重要的实际意义。

### 3 结论

(1) 水冷温度影响 TC4 钛合金的组织形态与力学性能的变化。TC4 钛合金固溶后,冷却到不同温度取出水冷,当缓慢冷却至 900℃然后再水冷时,  $\alpha$  相在晶界处伴随着原始的  $\beta$  晶粒形核;当温度继续降至 700℃时,获得转变  $\beta$  以及等轴  $\alpha$  组织;而当温度下降到 500℃时,少量  $\beta$  相以及粗大的片层  $\alpha$  相组织呈现出来。

(2) TC4 钛合金 700℃开始水冷时,试样抗拉强度和硬度分别达到了最高值 867MPa 和 HV<sub>5</sub>218,这是由于此时相对细小均匀的  $\alpha$  相在晶界形核,同时  $\alpha$  片层向晶内生长所造成的。

(3) 随着水冷温度的继续下降,  $\beta$  相逐渐析出  $\alpha$  相,水冷温度越低,  $\alpha$  相呈现为粗大的片层状,在 500℃水冷时性能降低至最低值。

### 参考文献

[1] 梁海. 钛热交换器的真空钎焊[J]. 航空制造技术, 2015(17): 124-126.

LIANG Hai. Vacuum brazing of titanium heat exchangers[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(17): 124-126.

[2] CAO X, KABIR A S H, WANJARA P. Global and local mechanical properties of autogenously laser welded Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical & Materials Transactions Part A, 2014, 45(3):1258-1272.

[3] 王恒强, 高建新, 王兵, 等. TC4 合金热变形特性及变形参数对组织和性能的影响[J]. 航空制造技术, 2013(16):146-149.

WANG Hengqiang, GAO Jianxin, WANG Bing, et al. Influence of TC4 alloy deformation characteristics and parameters on microstructure and mechanical property[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(16): 146-149.

[4] 唐荻, 王进, 江海涛, 等. 热轧态 TC4 合金不同热处理后的组织变化及硬度[J]. 金属热处理, 2012, 37(3):29-32.

TANG Di, WANG Jin, JIANG Haitao, et al. Microstructure and hardness of the hot rolled TC4 alloy under different heat treatments[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(3):29-32.

[5] 党薇, 薛祥义, 寇宏超, 等. TC21 钛合金慢速冷却过程中的相组成及组织演化[J]. 航空材料学报, 2010, 30(3): 21-23.

DANG Wei, XUE Xiangyi, KOU Hongchao, et al. Phase and microstructure of TC21 titanium alloy during slow cooling[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(3): 21-23.

[6] XU X Y, NASH G L, PHILIP N. Sintering mechanisms of blended Ti-6Al-4V powder from diffusion path analysis[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(3):994-1008.

[7] OBASI G C, BIROSCA S, PRAKASH D G L, et al. The influence of rolling temperature on texture evolution and variant selection during  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  phase transformation in Ti-6Al-4V[J]. Acta Mater, 2012, 60: 6013-6024.

[8] PENG X A, GUO H Z, SHI Z F, et al. Microstructure characterization and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy after thermomechanical treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24: 682-689.

[9] 彭小娜, 郭鸿镇, 石志峰, 等. 近等温变形量对 TC4-DT 钛合金组织参数和拉伸性能的影响[J]. 航空材料学报, 2013(33): 18-24.

PENG Xiaona, GUO Hongzhen, SHI Zhifeng, et al. Effects of near-isothermal deformation amounts on microstructure parameters and tensile properties of TC4-DT titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013(33): 18-24.

[10] TEIXEIRA J D C, APPOLAIRE B, AEBY G E, et al. Transformation kinetics and microstructures of Ti17 titanium alloy during continuous cooling[J]. Materials Science and Engineering A, 448 (1-2): 135-145.

[11] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及其应用[M]. 北京: 北京化学工业出版社, 2005.

ZHANG Xiyan, ZHAO Yongqing, BAI Chenguang. Titanium alloy and its application[M]. Beijing: Beijing Chemical Industry Publishing Company, 2005.

[12] 赵红霞, 虞文军. 航空用高强度 BT22 钛合金的研发和应用[J]. 航空制造技术, 2010(1): 85-90.

ZHAO Hongxia, YU Wenjun. Development and application of high strength titanium alloy BT22 in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(1): 85-90.

通讯作者: 李壮, 教授, 研究方向为金属材料组织与性能, 材料加工工艺, 钛合金变形机制与工艺, E-mail: lizhuang20047@163.com.

(责编 大漠)