

# 两相区热处理对 TC4-DT 钛合金断裂韧性的影响

郭 萍<sup>1</sup>, 赵永庆<sup>1</sup>, 曾卫东<sup>2</sup>, 洪 权<sup>1</sup>, 毛小南<sup>1</sup>, 贾蔚菊<sup>1</sup>, 张永强<sup>1</sup>

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 主要讨论了 TC4-DT 钛合金中初生  $\alpha$  相的形态和数量对合金断裂韧性的影响。试验通过相变点以下不同温度的热处理获得不同的微观组织, 分析组织中  $\alpha$  相的形态和数量对合金断裂韧性的影响规律。结果表明: 两相区不同温度热处理, 随着固溶温度升高, 初生  $\alpha$  相含量降低, 晶粒尺寸变化不大, 次生  $\alpha$  相含量增加, 长宽比增加, 断裂韧性增加。相变点以下炉冷处理, 显微组织比同条件处理的空冷组织的初生  $\alpha$  相晶粒尺寸增大, 片层  $\alpha$  相厚度增加, 合金的断裂韧性明显提高, 并通过裂纹扩展断口进行了断裂机理分析。

**关键词:** TC4-DT 钛合金; 热处理; 断裂韧性; 断口分析

中图法分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)04-1221-05

随着断裂力学理论在航空航天领域中应用程度的不断提高, 材料的断裂韧性也逐渐成为考核材料能否满足结构设计的重要指标之一<sup>[1-5]</sup>。作为材料的一个重要力学性能指标, 平面应变断裂韧性  $K_{IC}$  表征了材料在包含有裂纹体时的断裂抗力, 是一种重要的损伤容限性能, 能够决定关键构件的寿命, 因此被广泛应用于工程材料的抗断裂设计中<sup>[6]</sup>。钛合金的断裂韧性强烈地依赖于显微组织结构参数, 众多试验研究已经表明: 片状组织具有良好的断裂韧性<sup>[7]</sup>, 因为裂纹在片状组织中扩展路径比在等轴组织中曲折, 从而导致裂纹总长度增加, 消耗能量增加, 因此断裂韧性提高。但又必须注意到的问题是, 目前很少有工程应用采用这种  $\beta$  处理或  $\beta$  加工, 因为通过  $\beta$  工艺获得的片状组织会导致拉伸塑性的明显降低, 对材料性能造成一定损失, 因此两相区的热处理仍然是工程应用的核心工艺, 研究两相区热处理工艺对合金断裂韧性的影响具有重要的工程应用价值。

## 1 实 验

本实验所选用的材料为 TC4-DT 钛合金棒材, 其化学成分列于表 1。采用金相法测试该合金的相变点为  $(980 \pm 5)^\circ\text{C}$ , 断裂韧性取样方向为 T-L 向, 试验过程合金采取相变点以下的热处理工艺, 热处理制度分别为在 910, 930, 955, 965, 975  $^\circ\text{C}$  保温 1 h 后空冷或炉冷, 接着在 550  $^\circ\text{C}$  保温 4 h 空冷进行时效处理。试样热处理后去除氧化皮加工成厚度  $B=25\text{ mm}$  的断

表 1 TC4-DT 合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of TC4-DT alloy  
(wt%)

| Al   | V    | O    | N     | C     | Fe   | H     | Ti   |
|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|
| 6.08 | 4.19 | 0.11 | 0.005 | 0.009 | 0.06 | 0.002 | Bal. |

裂韧性试样, 显微组织在 OlympusMG3 显微镜上完成, 采用 JMS-6460 扫描电镜对扩展断口进行了观察。

## 2 结果及讨论

### 2.1 固溶温度对合金显微组织的影响

图 1 给出了试验用合金的原始显微组织, 可见典型的等轴组织, 由大量的初生  $\alpha$  相及部分保留的  $\beta$  相组成, 其中初生  $\alpha$  相的平均直径约为 10  $\mu\text{m}$ 。

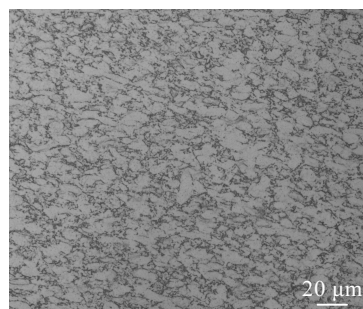


图 1 实验用 TC4-DT 合金的原始组织

Fig.1 Initial microstructure of TC4-DT alloy used in the experiment

收稿日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51471136); 中法国际合作项目 (2015DFA51430)

作者简介: 郭 萍, 女, 1978 年生, 博士, 教授, 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86250729, E-mail: gp8440086@163.com

图 2 为试样经过不同温度固溶时效处理后获得的显微组织。从图 2 可以看出,在两相区不同温度固溶处理并时效后,显微组织结构共同特征是由初生  $\alpha$  相、次生  $\alpha$  相和转变  $\beta$  相组成。不同温度热处理显微组织的变化主要表现为初生  $\alpha$  相与转变  $\beta$  相相对含量的变化。随着温度升高,部分  $\alpha$  相转变为  $\beta$  相,同时较高的温度处理会加快扩散的进程,已有的  $\alpha$  相在  $\alpha/\beta$  相界上依附于原来的  $\alpha$  相向  $\beta$  相内部通过扩散的方式消耗原有的  $\beta$  相来进行长大(图 3),初生  $\alpha$  相含量降低,图 4 也给出了固溶温度对组织中初生  $\alpha$  相含量的影响<sup>[8]</sup>。从图 2 中还可以看出:温度升高次生  $\alpha$  相含量增大,长宽比增加,次生  $\alpha$  相含量及尺寸的变化主

要是由于热力学作用下,在较高温度,  $\beta$  相转变充分,在时效过程中,次生  $\alpha$  相会在  $\beta$  晶界析出。从图 2 中还可以看出,固溶空冷处理后温度在 965  $^{\circ}\text{C}$  以下时,初生  $\alpha$  相的尺寸变化不大,直径约在 7  $\mu\text{m}$ ,而在接近相变点的 975  $^{\circ}\text{C}$  时,初生  $\alpha$  相尺寸明显减小,其直径约为 4  $\mu\text{m}$ ,并且在冷却过程中析出的次生  $\alpha$  片层也随着固溶温度的变化而变化,在相变点以下较低温度热处理时(图 2a, 2b),次生  $\alpha$  片层尺寸及分布较小,而在相变点以下较高温度(图 2e, 2f)处理,次生  $\alpha$  片层含量及尺寸明显增加,尤其在 975  $^{\circ}\text{C}$  处理,次生  $\alpha$  相以丛域形貌析出(图 2f),次生  $\alpha$  相的长宽比增加,图 5 给出了次生  $\alpha$  相长宽比随固溶温度的变化曲线。

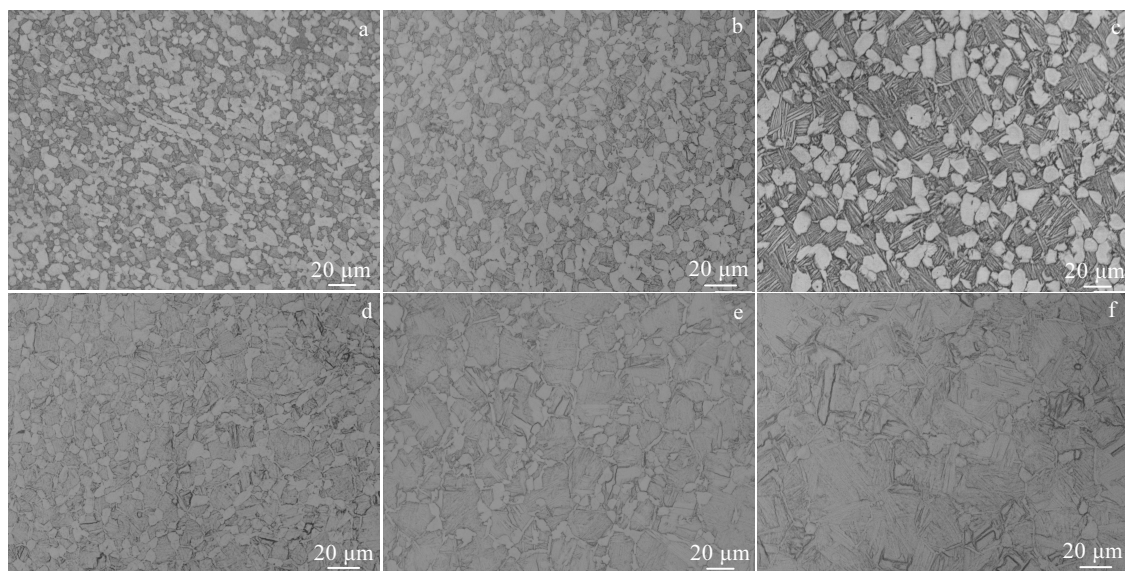


图 2 TC4-DT 钛合金不同温度固溶处理并时效后的显微组织

Fig.2 Microstructures of TC4-DT alloy after different solution treatments at different temperatures followed by aging: (a) 910  $^{\circ}\text{C}/1\text{ h AC}+550\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ h AC}$ , (b) 930  $^{\circ}\text{C}/1\text{ h AC}+550\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ h AC}$ , (c) 930  $^{\circ}\text{C}/1\text{ h FC}+550\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ h AC}$ , (d) 955  $^{\circ}\text{C}/1\text{ h AC}+550\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ h AC}$ , (e) 965  $^{\circ}\text{C}/1\text{ h AC}+550\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ h AC}$ , and (f) 975  $^{\circ}\text{C}/1\text{ h AC}+550\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ h AC}$

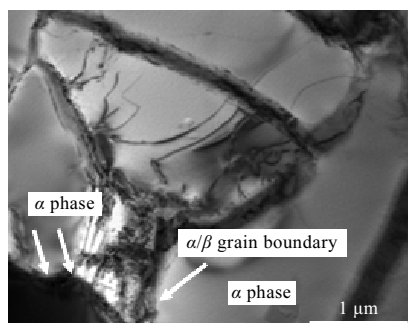


图 3  $\alpha$  相的扩散

Fig.3 Growth of  $\alpha$  phase by diffusion

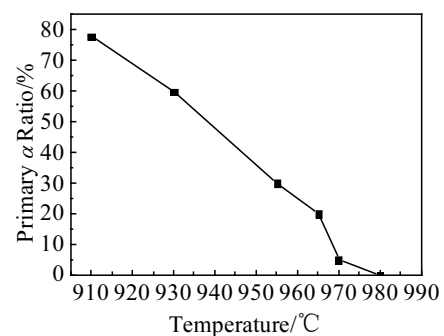
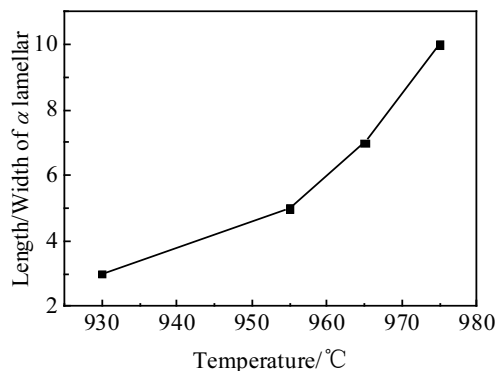


图 4 TC4-DT 合金热处理温度对初生  $\alpha$  相含量的影响

Fig.4 Effect of heat-treatment temperature on primary  $\alpha$  phase content of TC4-DT alloy

图5 TC4-DT 合金热处理温度对次生  $\alpha$  相长宽比的影响Fig.5 Effect of heat-treatment temperature on secondary  $\alpha$  phase length-width ratio of TC4-DT alloy

相变点以下温度热处理, 冷却速率对  $\alpha$  相的形态也会产生重要影响, 试验进一步比较了相同温度不同冷却速率处理后的显微组织, 图 2b 和图 2c 分别为相变点以下 930 °C 保温 1 h 后空冷和炉冷并时效后得到的显微组织。从图中可以发现炉冷后的组织结构与空冷条件下的相同, 由初生  $\alpha$  相、次生  $\alpha$  相以及转变  $\beta$  相组成, 其区别在于初生  $\alpha$  和次生  $\alpha$  相的形态和数量的变化。空冷条件下 (图 2b) 初生  $\alpha$  相含量较高, 约占总体积分数的 60%, 晶粒尺寸小, 次生  $\alpha$  相的含量小, 片层厚度较小; 而炉冷条件下 (图 2c), 初生  $\alpha$  相的含量降低, 约占总体积分数的 40%, 晶粒尺寸增大, 次生  $\alpha$  相的数量增大, 厚度增加。相变点以下固溶处理, 已存在的等轴  $\alpha$  相在冷却过程中主要以消耗周边的  $\beta$  相完成长大, 其中相变初期为扩散机制长大, 达到平衡后通过晶粒合并长大。空冷条件下, 由于冷却速率较快, 初生  $\alpha$  晶粒尺寸长大较小, 平均直径大约为 7  $\mu\text{m}$ ; 在炉冷状态下, 初生  $\alpha$  晶粒直径约为 10  $\mu\text{m}$ , 炉冷条件相当于延长保温时间, 会使毗邻的初生  $\alpha$  相晶粒发生合并长大。由于界面张力的作用导致细小等轴的  $\alpha$  相先于大等轴  $\alpha$  相转变为  $\beta$  相或者发生了如图 6 所示的晶粒的合并, 导致晶粒迅速长大。炉冷条件下由于冷却速率较慢, 次生  $\alpha$  片层得以完全析出并长大, 因此较空冷条件下含量明显增多, 并且片层厚度增加 (图 2c)。故相变点以下温度固溶处理, 较慢的冷却速率会引起  $\alpha$  相的粗化。文献[9]曾采用粗化理论分析了两相区固溶处理时, 炉冷条件下等轴  $\alpha$  相粗化的同时, 其尺寸分布更加均匀; 片层  $\alpha$  相厚度随着冷却速率的减小而增加, 并且含量也增加, 这与本实验得出的结果一致。

## 2.2 $\alpha$ 相对合金断裂韧性的影响

图 7 给出了两相区不同温度处理后对应的合金的

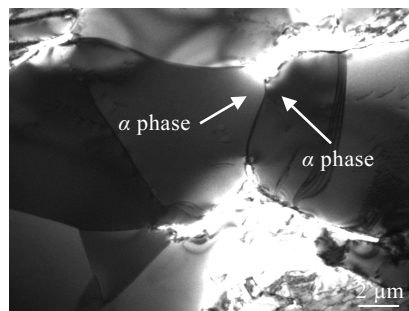
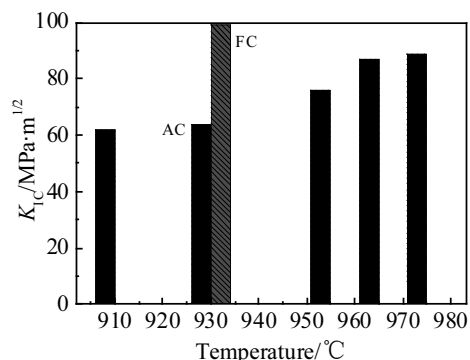
图6  $\alpha$  相的合并长大Fig.6 Growth of  $\alpha$  phase by combination

图7 固溶处理温度对 TC4-DT 合金断裂韧性的影响

Fig.7 Effects of solution temperature on fracture toughness of TC4-DT alloy

断裂韧性值。从上面分析可以发现, 固溶温度的升高会引起组织中初生  $\alpha$  相含量减少和次生  $\alpha$  相含量的增加, 结合图 7 发现, TC4-DT 合金断裂韧性随着初生  $\alpha$  相含量的增大和次生  $\alpha$  相含量的减小而减小, 即相变点下随着固溶温度的升高断裂韧性降低。

从图 2 分析中可以发现, 相变点以下较低温度热处理初生  $\alpha$  相的尺寸相差不大。断裂韧性数值取决于  $\alpha$  相含量的相对变化, 随着初生  $\alpha$  相的含量降低, 断裂韧性增加。相变点以下热处理过程同时还伴随着次生  $\alpha$  片的变化, 随着热处理温度的升高或保温时间的延长, 次生  $\alpha$  相的比例提高, 次生  $\alpha$  相的长宽比增加 (图 5), 逐渐由短片层转变为细长状 (图 2d~2f)。结合图 7 可以看出, 随着固溶温度的升高, 组织中次生  $\alpha$  相片层变长, 长宽比增加, 其对应的断裂韧性也在增加。因此两相区热处理获得的初生  $\alpha+\beta$  转变组织的断裂韧性还受次生  $\alpha$  相片层形貌的影响。首先固溶温度升高, 次生  $\alpha$  片层长度增加, 变形过程中的组织协调性变差, 表现为合金断裂韧性的降低; 其次, 固溶温度升高会使次生  $\alpha$  片层数量增多, 导致组织中的界面数量增加, 显微孔洞具有更多的形核位置, 使断裂

韧性的增加成为可能。

为了进一步分析两相区中组织结构参数对合金断裂韧性的影响,试验测试了合金在 930 °C 固溶炉冷并时效后的断裂韧性,测得其值为 98.8 MPa·m<sup>1/2</sup> (图 7 FC),实验结果发现虽然 930 °C 固溶炉冷条件下与 955 °C 处理的合金初生  $\alpha$  相的含量接近,但固溶炉冷条件下材料保持了较高的断裂韧性。结合图 2c 炉冷后的显微组织可以发现,炉冷后初生  $\alpha$  相尺寸部分增大,而且炉冷后次生  $\alpha$  片层数量较空冷后的片层明显增多,因此组织中的界面数量增加,使显微孔洞形核位置更多,从而使断裂韧性增加成为可能。另外炉冷后,次生  $\alpha$  片层厚度明显增加 (图 2c),固溶空冷条件下的次生  $\alpha$  相的厚度约为 1  $\mu\text{m}$ ,炉冷后片层厚度约为 4  $\mu\text{m}$ 。虽然初生  $\alpha$  相含量保持相对高的水平,但次生  $\alpha$  片层厚度的增加也会导致裂纹扩展路径更加曲折,棒状  $\alpha$  较等轴  $\alpha$  更容易使裂纹发生偏转从而消耗较多的能量。

Niinomi<sup>[10]</sup>等人通过研究也证实,材料的断裂韧性与初生  $\alpha$  相内部的平均自由程成正比 (如公式 1)。对于两相钛合金的断裂过程,初生  $\alpha$  相是裂纹萌生源及扩展的通道,初生  $\alpha$  相内部平均自由程由公式 2 给出。

$$K_{IC} \propto L_m \quad (1)$$

$$L_m = \frac{4R_0}{3f} (1-f) \quad (2)$$

式中,  $L_m$  代表  $\alpha$  相内部的平均自由程,  $f$  代表初生  $\alpha$  相的百分含量,  $R_0$  代表初生  $\alpha$  相半径。从公式 2 中可以看出,平均自由程与初生  $\alpha$  相半径成正比,而与初生  $\alpha$  相含量成反比关系。在初生  $\alpha$  相尺寸变化不大的情况下,初生  $\alpha$  相内部的平均自由程随其含量的增大而减小,因此材料的断裂韧性也会随初生  $\alpha$  相含量的增大而减小,与本试验所得的结果一致。根据公式 2 可以发现,晶粒尺寸的长大有助于平均自由程的长大,从而断裂韧性增加。因此作者认为使用公式 2 进行比较必须在相同的冷却方式下。

试验通过断口分析观察了裂纹在 2 种组织中的扩展路径,如图 8 所示。可以发现,在炉冷条件下,裂纹扩展既有绕着初生  $\alpha$  相扩展,也有直接切过  $\alpha$  相扩展 (图 8a),但裂纹通过片层  $\alpha$  相丛域时,根据片层  $\alpha$  丛域位向不同,裂纹扩展方向随着变化,如箭头所示,这是导致断裂韧性增高的一个原因。而对比空冷条件下的  $K_{IC}$  断口 (如图 8b),裂纹扩展路径的区别在于,裂纹在空冷组织中直接切过等轴  $\alpha$  扩展,在遇到片层  $\alpha$  丛域时裂纹直接穿过片层  $\alpha$  或丛域扩展,因为在空冷条件下,片层  $\alpha$  厚度及丛域较小,长度较短,裂纹穿过时,其界面力不足以阻碍裂纹使其发生偏转,因此具有相对小的裂纹扩展阻力,导致断裂韧性较低。

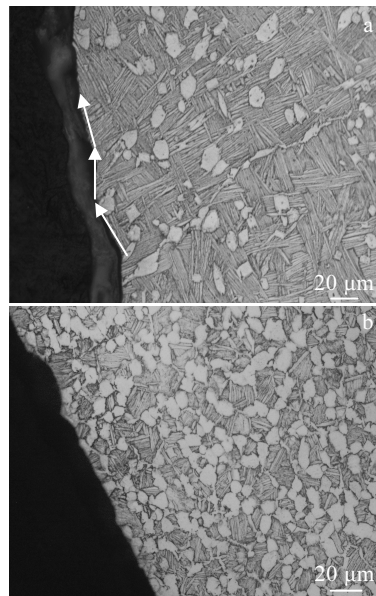


图 8 2 种组织中  $K_{IC}$  裂纹扩展路径

Fig.8 Crack propagation route for  $K_{IC}$  fractography obtained by heat-treatment at 930 °C/1 h +550 °C/4 h AC: (a) FC and (b) AC

另外,炉冷条件一定量的初生  $\alpha$  相和较厚的片层  $\alpha$  相保证了材料具有断裂韧性和延性的极佳组合。

资料[11]也曾报道再结晶退火产生的一种显微组织可使合金保持高的断裂韧性,该过程是把合金加热到低于转变温度 70 °C 左右保温一段时间,接着以较低的速度缓慢的冷却。这种组织大部分是连续初生  $\alpha$  相和次生  $\alpha$  相。初生  $\alpha$  相存在于较高温度下,在冷却时形成次生  $\alpha$  相的核心,这种组织提供了断裂韧性和延性的极佳组合。因此,除了初生  $\alpha$  相含量这一因素之外,次生  $\alpha$  相的尺寸也会影响合金的断裂韧性,同时可能还受其他内部因素的影响。

### 3 结 论

- 1) 随着相变点以下固溶温度的升高,初生  $\alpha$  相含量减小,次生  $\alpha$  相含量增加,并且次生  $\alpha$  相长宽比增大。
- 2) 等轴组织中,断裂韧性随初生  $\alpha$  相含量的增加和次生  $\alpha$  相含量的减少而降低。 $\alpha$  相晶粒尺寸的增加会导致断裂韧性提高,次生  $\alpha$  相含量增加,长宽比增大,合金断裂韧性提高。
- 3) 两相区处理,炉冷条件下较粗的片层  $\alpha$  相会增加裂纹扩展过程的曲折程度,导致断裂韧性提高。

#### 参考文献 References

- [1] Ma Yingjie(马英杰), Wang Dingchun(王鼎春), Wang Hongwu



- (王红武) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(S1): 414
- [2] Lütjering G. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 243(1-2): 32
- [3] Lütjering G. *Materials Science and Engineering A*[J], 1999, 263(2): 117
- [4] Filip R, Kubiak K, Ziaja W *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 133(1-2): 84
- [5] Li Shikai, Xiong Baiqiang, Hui Songxiao *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 460-461: 140
- [6] Zhang Yajun(张亚军), Lv Yifan(吕逸帆). *Development and Application of Materials*(材料开发与应用)[J], 2012, 27(2): 14
- [7] Mao Penling(毛彭龄). *Shanghai Steel & Iron Research*(上海钢研)[J], 1994(3): 51
- [8] Guo Ping(郭萍), Zhao Yongqing(赵永庆), Hong Quan(洪权) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(11): 2367
- [9] Semiatin S L, Lehner T M, Miller J D *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2007, 38(4): 910
- [10] Niinomi M, Kobayashi T, Sasaki S. *Materials Science and Engineering*[J], 1988, 100: 45
- [11] Liu Rui(刘睿), Hui Songxiao(惠松骁), Ye Wenjun(叶文君) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(10): 1799

## Effect of Heat Treatment in $\alpha+\beta$ Zone on Fracture Toughness of TC4-DT Titanium Alloy

Guo Ping<sup>1</sup>, Zhao Yongqing<sup>1</sup>, Zeng Weidong<sup>2</sup>, Hong Quan<sup>1</sup>, Mao Xiaonan<sup>1</sup>, Jia Weiju<sup>1</sup>, Zhang Yongqiang<sup>1</sup>

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

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Effect of morphology and quantity of the primary  $\alpha$  phase in TC4-DT titanium alloy on fracture toughness was discussed. Different  $\alpha$  phase contents were obtained by heat treatment below phase transition point. The results show that contents of primary  $\alpha$  phase drop with solution temperature increasing, and the size of grains changes little. The content of secondary  $\alpha$  phase increases, and length-width ratio increases with solution temperature increasing, which increases the fracture toughness. Compared with the alloy under air cooling, the alloy under furnace cooling exhibits larger primary  $\alpha$  phase, thicker lamellar  $\alpha$ , and much higher fracture toughness. Then the growth mechanism was analyzed through fracture.

**Key words:** TC4-DT titanium alloy; heat treatment; fracture toughness; fracture analysis

---

Corresponding author: Guo Ping, Ph. D., Professor, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86250729, E-mail: gp8440086@163.com