

## TC21 合金片层组织特征对其断裂韧性的影响

党 薇<sup>1</sup>, 薛祥义<sup>1</sup>, 李金山<sup>1</sup>, 胡 锐<sup>1</sup>, 朱知寿<sup>2</sup>, 张丰收<sup>3</sup>, 周 廉<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 北京航空材料研究院, 北京 100095;

3. 西部超导材料科技有限公司, 西安 710021)

**摘 要:** 研究 TC21 合金经  $\beta$  相区固溶并慢速冷却后的片层组织特征(晶界  $\alpha$  层厚度、 $\alpha$  片层宽度、 $\alpha$  集束尺寸)及断裂韧度随冷却速率的变化规律, 探讨片层组织特征与断裂韧度的关系。结果表明: 随着冷却速率的增大, TC21 合金  $\alpha$  片层集束、 $\alpha$  片层厚度及晶界  $\alpha$  层宽度均减小。在本文实验测试尺度范围内,  $\alpha$  片层宽度、 $\alpha$  片层集束尺寸及晶界  $\alpha$  层厚度的增大均可提高合金的断裂韧性。

**关键词:** TC21 钛合金; 片层组织特征; 断裂韧度

中图分类号: TG 146

文献标志码: A

## Influence of lamellar microstructure feature on fracture toughness of TC21 alloy

DANG Wei<sup>1</sup>, XUE Xiang-yi<sup>1</sup>, LI Jin-shan<sup>1</sup>, HU Rui<sup>1</sup>, ZHU Zhi-shou<sup>2</sup>, ZHANG Feng-shou<sup>3</sup>, ZHOU Lian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China;

3. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to analyze the relationship between lamellar microstructure feature (thickness of  $\alpha$  laths, width of  $\alpha$  lath at grain boundary and  $\alpha$  colony size) and fracture toughness, the microstructures and fracture toughness of TC21 alloy cooled from  $\beta$  phase field with different slow rates were investigated. The results show that  $\alpha$  colony size together with  $\alpha$  laths thickness and width of  $\alpha$  lath at grain boundary is decreased with increasing cooling rates, leading to the decrease of fracture toughness. It is positive for fracture toughness to decrease width of  $\alpha$  lath at grain boundary,  $\alpha$  laths thickness and  $\alpha$  colony size.

**Key words:** TC21 alloy; lamellar microstructure feature; fracture toughness

TC21 合金是我国自主研发的一种新型高强、高韧钛合金, 名义成分为 Ti-6Al-2Sn-2Zr-3Mo-1Cr-2Nb, 典型力学性能:  $\sigma_b=1\ 100\ \text{MPa}$ ,  $\sigma_{0.2}=1\ 000\ \text{MPa}$ ,  $\delta=8\%$ ,  $\psi=15\%$ ,  $K_{IC}=70\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,  $E=115\ \text{GPa}$ ,  $da/dN$  为  $8\times 10^{-5}\sim 9\times 10^{-5}\ \text{mm/cycle}^{[1-3]}$ 。该合金满足损伤容限设计的要求, 最适合于制造各类结构锻件及零部件, 在航空航天工业和民用行业中已获得实际应用, 特别是在飞机

结构中要求高强、高韧、损伤容限和可焊的重要零部件<sup>[4]</sup>。目前, 国内外主要以采用  $\beta$  工艺( $\beta$  热处理或  $\beta$  热变形)等方法来改善现有合金的损伤容限性能, 与传统的  $\alpha+\beta$  热处理工艺相比, 其主要优点在于  $\beta$  热处理工艺获得的片层  $\alpha$  组织取代了  $\alpha+\beta$  热处理的等轴或双态组织, 而片层组织的断裂韧性和蠕变抗力较高, 最有利于发挥合金的损伤容限特性<sup>[5]</sup>。因此, 研究 TC21

合金片层组织特征( $\alpha$ 片层厚度、 $\alpha$ 片层集束尺寸和晶界 $\alpha$ 层宽度)对其损伤容限性能的影响有重要意义。本文作者研究 TC21 合金经  $\beta$  相变点以上固溶,以不同冷却速率冷却到室温形成的片层组织特征变化对断裂韧性的影响,分析各组织特征对裂纹扩展的作用。

## 1 实验

实验用材料为经3次真空自耗电弧熔炼后,进行开坯、锻造、精锻的 $\phi 90$  mm棒材,该合金的相变点为 $(965\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 。从棒材上取样,按国家标准 GB/4161—84 进行平面应变断裂韧性  $K_{\text{IC}}$  测试,试样为标准的三点弯曲试样,  $B=a=16$  mm,  $W=32$  mm,  $S=128$  mm, 裂纹取向为 C-R 方向,组织特征测试试样尺寸为  $d10$  mm $\times 6$  mm。热处理制度为  $1\,000^{\circ}\text{C}$  固溶 1 h 后,分别以 1、3、5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  速率冷却到室温。

热处理后的试样经过粗磨、细磨及粗抛、细抛制成金相试样,腐蚀剂为 HF、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  的混合液,其体积比为 1:2:5,用 JEOLJSM-5610LV 型扫描电镜观察显微组织。用扫描电镜观察断裂韧性试样断口形貌,并用 OLYMPUS/PMG3 型光学显微镜观察裂纹扩展路径。

$\alpha$  片层厚度、片层集束尺寸、晶界  $\alpha$  层厚度等组织特征的测量参考文献[6]和[7],用 photoshop7.0 调整扫描照片的对比度,用 Fovea Pro4.0 测量组织特征参数。

## 2 结果与分析

TC21 合金自 $\beta$ 相区( $1\,000^{\circ}\text{C}$ )慢速冷却到室温形成的典型片层组织如图1所示。随着冷却速率的变化,形成的 $\alpha$ 片层组织特征,包括 $\alpha$ 片层厚度、晶界 $\alpha$ 层宽度、 $\alpha$ 集束尺寸均发生了较有规律的变化,如图2所示。由图2可看出,随着冷却速率的增大, $\alpha$ 片层厚度与晶界 $\alpha$ 层厚度均减小,与冷却速率基本符合线性关系。然而,当冷却速率为 1~3  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  时,集束尺寸的减小速率随冷却速率的增大而增大;当冷却速率为 3~5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  时,集束尺寸减小得较缓慢。

TC21 合金经  $1\,000^{\circ}\text{C}$  固溶并以不同冷却速率冷却后的断裂韧性测试结果如图3所示。由图3可以看出,随着冷却速率的增大,平面应力断裂韧性( $K_{\text{IC}}$ )有所

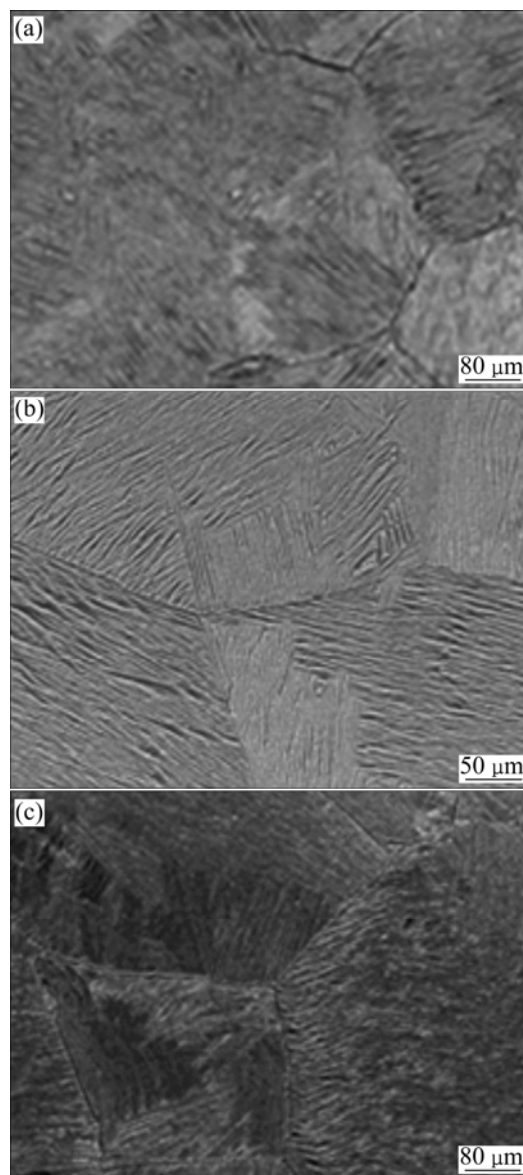


图1 TC21 合金在  $1\,000^{\circ}\text{C}$  固溶后以不同速率冷却到室温的显微组织

**Fig.1** Microstructures of TC21 alloys cooled at different rates from  $1\,000^{\circ}\text{C}$ : (a)  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ; (b)  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ; (c)  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

减小。虽然固溶冷却速率不同,TC21 合金的  $K_{\text{IC}}$  值有差别,但是从各试样断口形貌上分析,断裂机理相同,因此以  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的冷却速率为例进行断口分析(见图4)。由图4可知,合金的断口形貌呈延性沿晶韧窝断裂特征,沿晶分离面在粗大的 $\beta$ 晶粒上;在断口的高倍形貌下,可以看到有撕裂棱,韧窝变形也较大,且在断面上有为数不多的较深的断裂刻面,这是断裂沿着不同位向的刻面发生而形成的,也体现了片状组织沿着弱晶体学位向发生断裂的典型特征<sup>[8]</sup>。

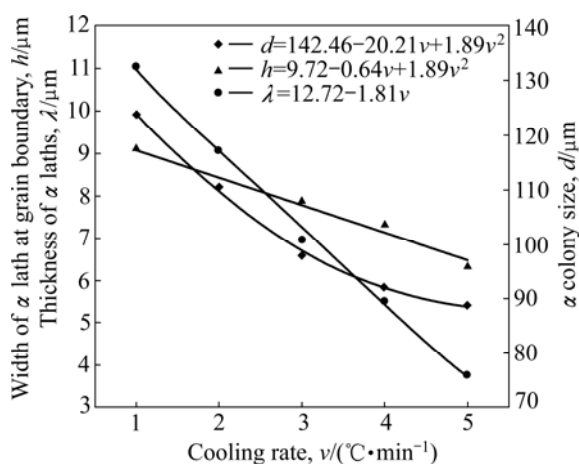


图2 冷却速率对片层组织特征的影响

**Fig.2** Effects of cooling rates on lamellar microstructure features

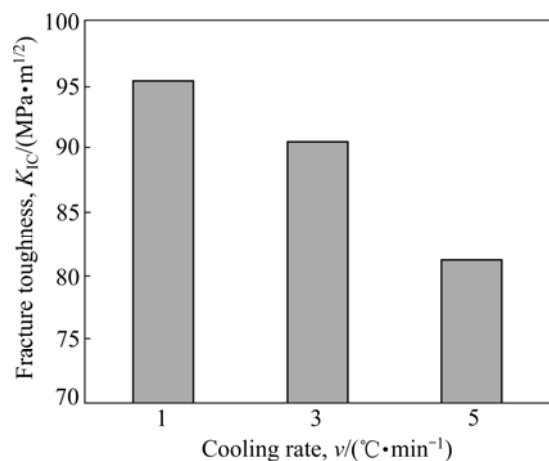


图3 平面应力断裂韧性测试结果

**Fig.3** Measurement results of fracture toughness

图5所示为在断裂韧性测试过程中TC21钛合金的裂纹扩展路径。由图5可以看出,裂纹主要沿晶界发生大的转向,如箭头A所示;当裂纹扩展到 $\alpha$ 片层集束处,扩展路径沿片层集束边界出现较小的曲折,或者向平行于集束方向偏转,如箭头B所示。可见, $\alpha$ 片层集束尺寸、 $\alpha$ 片层宽度、晶界 $\alpha$ 片层宽度是控制TC21合金断裂韧性的重要显微组织特征参数,三者对断裂韧度的影响如表1所列。由表1可以看出,随着 $\alpha$ 片层集束的增大,断裂韧度逐渐增大。集束尺寸是影响性能的最主要显微组织特征参数,因为其决定有效滑移长度,集束边界是阻止滑移的主要屏障,当裂纹遇到不同集束时,由于不同集束的位向不同,在应力的作用下,使裂纹前沿的另一集束中 $\alpha/\beta$ 界面发生剧烈的塑性变形,这样可使片层组织的断裂韧度增高,降低裂纹扩展速率<sup>[9]</sup>。

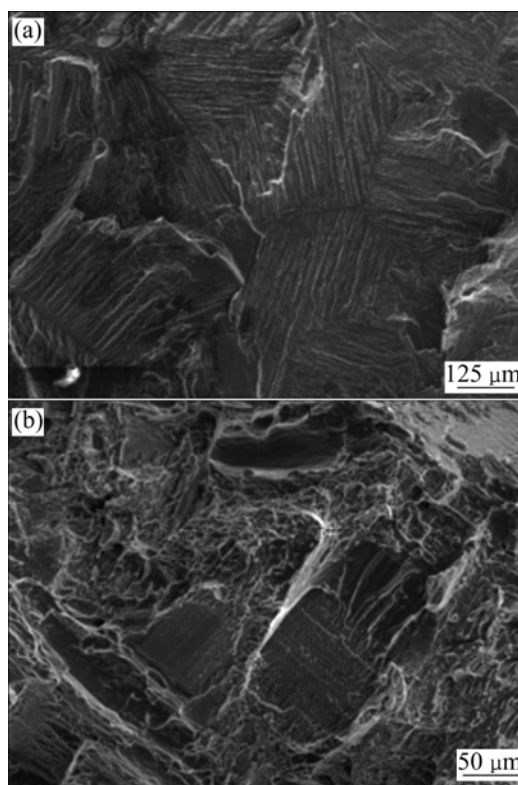


图4 以1 °C/min 冷速冷却到室温的试样断口形貌

**Fig.4** Fracture morphology of specimen cooled at 1 °C/min



图5 TC21 合金在断裂韧性测试中裂纹扩展路径

**Fig.5** Cracks extending routes of TC21 alloy during fracture toughness tests

表1 TC21合金的片层组织特征与断裂韧性的关系

Table 1 Relationships between lamellar microstructure feature and fracture toughness of TC21 alloy

| 晶界 $\alpha$ 层<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | $\alpha$ 片层宽度/<br>$\mu\text{m}$ | $\alpha$ 片层集束<br>尺寸/ $\mu\text{m}$ | 断裂韧度<br>$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ |
|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 6.34                               | 3.79                            | 88.8                               | 81.2                                             |
| 7.89                               | 6.96                            | 98.0                               | 90.5                                             |
| 9.12                               | 11.06                           | 123.8                              | 95.5                                             |

随着 $\alpha$ 片层宽度的增加,断裂韧度增大。断裂过程包括空洞在裂纹尖端的形成及空洞连接汇入主裂纹的过程<sup>[10]</sup>。片层宽度是决定合金断裂韧性的的重要因素,空洞在 $\alpha$ 片层与转变 $\beta$ 之间的界面上形成,而这个过程是受 $\alpha$ 片层宽度控制的,宽 $\alpha$ 片层裂纹尖端的空洞形成所需要的应力强度要大于细 $\alpha$ 片层裂纹尖端的空洞形成需要的应力强度。若 $\alpha$ 片层断裂所需的能量大于绕过 $\alpha$ 集束的能量,裂纹会向集束方向偏转<sup>[11]</sup>。随着 $\alpha$ 片层宽度的增大,也可以有效阻止裂纹直线扩展,发生较大的偏转,消耗较多能量。

随着晶界 $\alpha$ 层厚度的增大,断裂韧度增大。相关研究<sup>[11-14]</sup>表明,裂纹越过晶界 $\alpha$ 相时,方向发生改变。因此,裂纹扩展路径曲折,增加裂纹的总长度,断裂所需的能量较多;裂纹穿越晶界 $\alpha$ 相时,裂纹数目也会增多,由于裂纹分叉使裂纹尖端的应力场相对松弛,在裂纹扩展过程中吸收的较多能量,从而使裂纹扩展速率降低,断裂韧度增高。赖祖涵<sup>[14]</sup>以及GREENFIELD和MARGOLIN<sup>[15]</sup>认为,裂纹在晶界 $\alpha$ 层扩展的过程是与裂纹接触的 $\alpha$ 相中的应力是否降低到自由 $\alpha$ 相中的流变应力大小以致裂纹尖端区域 $\alpha$ 相中产生塑性流变相关的。基体中的裂纹扩展到晶界,与裂纹接触的 $\alpha$ 相中的应力要比在此之前受周围 $\beta$ 相约束时的有所降低。当应力降到自由 $\alpha$ 相中的流变应力大小时,裂尖区 $\alpha$ 相中产生塑性流变,使裂纹向 $\alpha$ 相中扩展,并延伸至晶界 $\alpha$ 层另一侧的 $\alpha/\beta$ 交界面。晶界 $\alpha$ 越宽,此过程消耗能量越多,且晶界 $\alpha$ 相中位错塞积可使相邻的 $\beta$ 相发生塑性变形而消耗能量,断裂韧性将随着 $\alpha$ 厚度的增加而提高。

### 3 结论

1) TC21合金经 $\beta$ 相区固溶并以1~5 °C/min冷却到室温时,随着冷却速率的增大,TC21合金 $\alpha$ 片层厚度及晶界 $\alpha$ 层宽度均减小,与冷却速率基本符合线性关系;集束尺寸随冷却速率的增大而减小的趋势呈

二次关系;随着冷却速率的增大,断裂韧度有所减小,在80~95 MPa·m<sup>1/2</sup>范围内变化。

2) 在本实验测试尺度范围内, $\alpha$ 片层厚度、 $\alpha$ 片层集束尺寸和晶界 $\alpha$ 层宽度的增大均可提高合金的断裂韧性。

### REFERENCES

- [1] 赵永庆,曲恒磊,冯亮. 高强高韧损伤容限型钛合金 TC21 研制[J]. 钛工业进展, 2004, 21(1): 22-24.  
ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei, FENG Liang. Research on high strength, high toughness and high damage-tolerant titanium alloy-TC21 [J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21(1): 22-24.
- [2] 张颖楠,赵永庆,曲恒磊. 热处理对 TC21 合金显微组织和室温拉伸性能的影响[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 34-38.  
ZHANG Ying-nan, ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei. Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of TC21 alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 34-38.
- [3] 曲恒磊,赵永庆,朱知寿. 一种高强韧钛合金及其加工方法: CN03105961 [P]. 2003-04-06.  
QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, ZHU Zhi-shou. One high strength and high toughness titanium alloy and its processing method: CN03105961 [P]. 2003-04-06.
- [4] 熊柏青,惠松晓. 损伤容限钛合金研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(3): 130-136.  
XIONG Bai-qing, HUI Song-xiao. Research progress of damage-tolerant titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(3): 130-136.
- [5] FILIP R, KUBIAK K, ZIAJA W, SIENIAWSKI J. The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133: 84-89.
- [6] SEARLES T, TILEY J. Rapid characterization of titanium microstructural features for specific modelling of mechanical properties [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16: 60-69.
- [7] TILEY J, SEARLES T. Quantification of microstructural features in  $\alpha/\beta$  titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 372: 191-198.
- [8] 马少俊. TC4-DT 和 TC21 钛合金损伤容限行为的宏微观研究 [D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2005.  
MA Shao-jun. Macroscopic and microcosmic analyses of damage tolerance properties for TC4-DT and TC21 alloys [D]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautical Materials, 2005.
- [9] 陶春虎. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 15-18.

- TAO Chun-hu. Failure and prevention of aeronautical titanium alloy [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 15–18.
- [10] RICHARDS N L. Quantitative evaluation of fracture toughness–microstructural relationships in alpha-beta titanium alloys [J]. JMEPEG, 2004, 13: 218–225.
- [11] RICHARDS N L, BARNBY J T. The relationship between fracture toughness and microstructure in Alpha-Beta titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1976, 26: 221–229.
- [12] LÜTJERING G, WILLIAMS J C. Titanium [M]. 2nd ed. Springer-Verlag, 2007: 203.
- [13] HORIYA T, KISHI T. Relationship between fracture toughness and crack extension resistance curves (R curves) for Ti-6Al-4V alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29: 781–789.
- [14] 赖祖涵.  $\alpha$ - $\beta$  型钛合金的断裂韧性[C]//钛科学与工程. 北京: 原子能出版社, 1987: 14–21.
- LAI Zu-han. Fracture toughness of  $\alpha$ - $\beta$  titanium alloys [C]//Titanium Science and Engineering. Beijing: Atomic Energy Press, 1987: 14–21.
- [15] GREENFIELD M A, MARGOLIN H. The interrelationship of fracture toughness and microstructure in a Ti-5.25Al-5.5V-0.9Fe-0.5Cu alloy [J]. Metallurgical Transactions, 1971, 2: 841–847.

(编辑 杨 华)