

片层厚度对损伤容限型 TC21 合金裂纹扩展速率的影响

Effect of Lamellar Thickness on Fatigue Crack Growth
Rate of TC21 Alloy of Damage Tolerance

李 辉^{1,2}, 曲恒磊^{1,2}, 赵永庆^{1,2}, 冯 亮², 曾卫东¹

(1 西北工业大学, 西安 710072; 2 西北有色金属研究院, 西安 710016)

LI Hui^{1,2}, QU Heng-lei^{1,2}, ZHAO Yong-qing^{1,2},

FENG Liang², ZENG Wei-dong¹ (1 Northwest Polytechnical University,

Xi'an 710072, China; 2 Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

摘要: 分别采用 $\alpha+\beta$ 锻造和 β 锻造方式制备了 TC21 合金 $\phi 90\text{mm}$ 棒材, 研究了两种加工方式下同规格棒材的裂纹扩展速率, 分析了粗细两种片层结构对裂纹扩展速率的影响。结果表明: β 锻造获得了细片层组织结构, 具有较低的疲劳裂纹扩展速率; $\alpha+\beta$ 锻造得到粗片层组织结构, 裂纹扩展速率较快。疲劳裂纹扩展速率随着组织片层厚度的增加而加快。在疲劳裂纹稳态扩展区, 裂纹以条带循环机制向前扩展, 同时能看到许多疲劳条纹。

关键词: TC21; 棒材; 裂纹扩展

中图分类号: TG 146 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006) 04-0021-03

Abstract: The bars of TC21 alloy with a diameter of 90mm were produced by $\alpha+\beta$ and β processing. Under the same conditions, fatigue crack growth rate of bars produced by two different processing technics were investigated. Fatigue crack growth rate with fine and coarse lamellar structure were characterized. The results showed that material structure influenced the magnitude of crack propagation, microstructure with fine lamellar structure produced by β processing technic had a lower fatigue crack growth rate compared with the coarse lamellar structure produced by $\alpha+\beta$ processing technic, with the increasing of lamellar thickness, fatigue crack growth rate accelerated. In the stationary state growth region, fatigue crack grew ahead in the form of striation mechanism, many fatigue striations were observed by scanning electronic microscopy at the meantime.

Key words: TC21; bars; crack growth behaviour

TC21 合金是国内自行研制的一种结构用高强高韧钛合金^[1], 采用淬火金相法测定合金相变点为 $(955 \pm 10)^\circ\text{C}$ ^[2]。该合金在优化热处理制度下, $R_m \geq 1100\text{MPa}$, $\delta \geq 8\%$, $K_{IC} \geq 70\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 在 $\Delta K = 11\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时, 裂纹扩展速率 da/dN 达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ mm/cycle 级, 具有良好的强度、塑性、断裂韧性、裂纹扩展速率的匹配, 是一种很有发展前景的高强、高韧、损伤容限型结构用钛合金。本研究采用 β 区锻造和 $\alpha+\beta$ 区上部温度 ($T_\beta - 30^\circ\text{C}$) 锻造制备了 TC21 合金 $\phi 90\text{mm}$ 棒材, 研究了不同加工工艺下得到的粗细两种片层组织的疲劳裂纹扩展速率。通过研究, 总结高强高韧 TC21 合金疲劳裂纹扩展的一般规律和影响因素, 获得最佳热加工、热处理工艺等参数, 为高强高韧 TC21 合金能成功应用于战斗机、实现战斗机减重的目标提供理论基础和工程参考^[3]。

1 实验材料与研究方法

采用真空自耗电弧炉进行多次熔炼, 制得 TC21 合金 $\phi 350\text{mm}$ 成品锭。在 1600t 水压机上完成铸锭的开坯锻造及中间锻造, 最后在 3t 空气锤上完成 $\alpha+\beta$ 上部温度 ($T_\beta - 30^\circ\text{C}$) 终锻和 β 终锻的工艺实验, 制得 $\phi 90\text{mm}$ 规格的实验棒材, 从棒材上取样进行裂纹扩展速率测试, 试样为标准 C(T) 试样, 尺寸为 $50\text{mm} \times 48\text{mm} \times 10\text{mm}$, 厚度 $B = 10\text{mm}$ 。裂纹取向为 $G-R$ 方向。热处理制度为 $850^\circ\text{C}/1\text{h AC} + 600^\circ\text{C}/4\text{h AC}$, 热处理在箱式电阻炉中进行 (控温精度 $\pm 5^\circ\text{C}$)。疲劳裂纹扩展速率实验依照 GB/T 6398-2000 标准, 在岛津 EH F-100KN 疲劳试验机上完成, 频率 $f = 20\text{Hz}$, 应力比 $R = 0.1$, 载荷范围为 $400 \sim 4000\text{N}$ 。运用 OLYMPUS PM G3 光学金相显微镜对 TC21 合金组织进行

了观察与分析。

2 实验结果与分析

2.1 组织观察

图 1 为 β 区锻造工艺下的金相组织。可以看出, β 区锻造后, 得到细片层组织结构, 在 β 基体上析出针状 α 相, 由原始 β 晶粒和晶内 α/β 片层组成。原始 β 晶粒以 α 相为晶界, 平均尺寸为 0.4mm 。晶内针状 α 条长短不一, 取向混乱, 交错排列, 取向相同的束域不明显, α 片层厚度在 $0.5\sim 1.2\text{mm}$ 之间。图 2 为 $\alpha+\beta$ 区上部温度 ($T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$) 锻造工艺下的金相组织。 $\alpha+\beta$ 区上部温度 ($T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$) 锻造空冷得到粗片层结构, 模糊可见原始 β 晶粒的痕迹, 尺寸约为 0.6mm 。个别晶内束域明显, 尺寸约为 $10\sim 100\mu\text{m}$, α 片层厚度在 $1.25\sim 2.80\mu\text{m}$ 之间。两种不同锻造工艺下得到的片层组织结构, 同一束域的 α/β 片层之间遵循一定的柏氏矢量关系^[4]: $\{110\}_{\beta} \parallel \{0001\}_{\alpha}$, $1120_{\alpha} \parallel 111_{\beta}$ 和 $\{1010\}_{\alpha} \parallel \{112\}_{\beta}$, $111_{\beta} \parallel 1120_{\alpha}$ 。

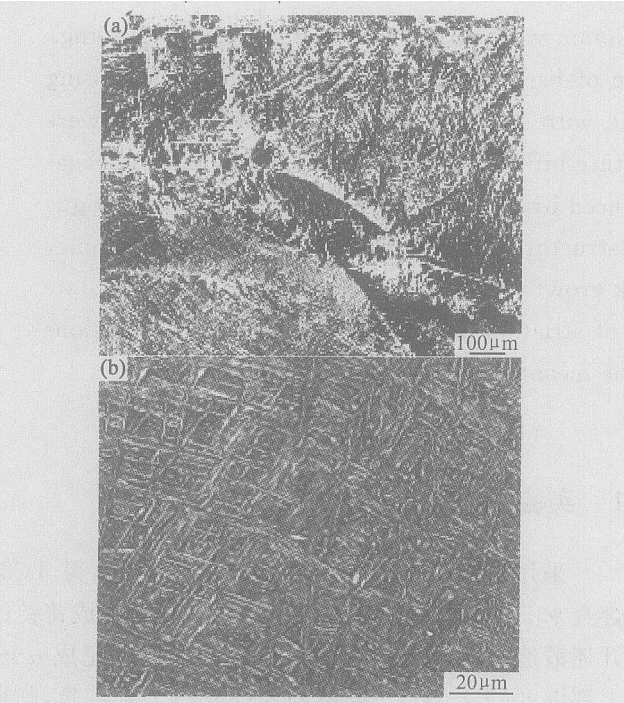


图 1 β 区锻造棒材的光学金相组织
(a) 魏氏组织 β 晶粒; (b) 细片层结构

Fig. 1 Optical microstructure forged in β zone (a) β grain in Widmanstatten structure; (b) fine lamellar structure

2.2 裂纹扩展速率

图 3 为 β 区和 $\alpha+\beta$ 区锻造棒材 ΔK - da/dN 曲线。可以看出, β 区锻造的裂纹扩展速率明显低于 $\alpha+\beta$ 区锻造。在 $\Delta K = 11\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时, β 区锻造的棒材裂纹扩展速率达到 $7\times 10^{-6}\sim 9\times 10^{-6}\text{mm/cycle}$ 级; 而 $\alpha+\beta$ 区锻造棒材裂纹扩展速率 $1\times 10^{-5}\sim 2\times 10^{-5}\text{mm/cy-}$

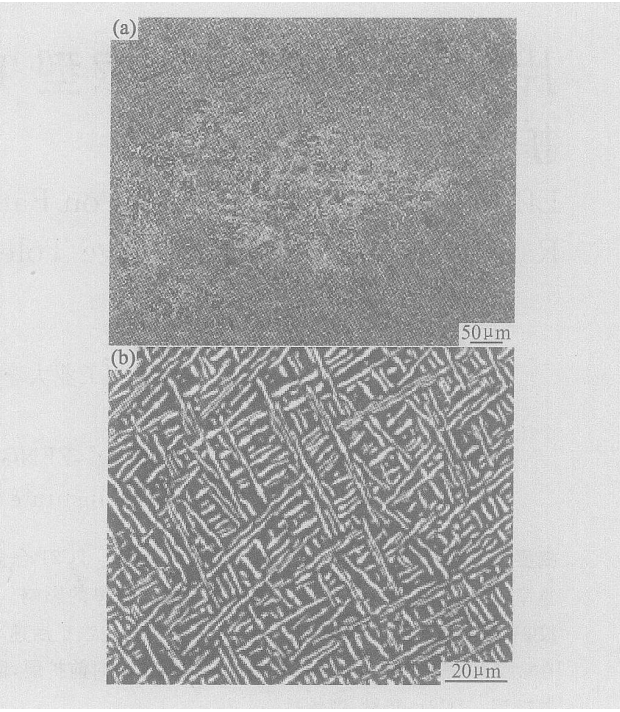


图 2 $\alpha+\beta$ 区锻造棒材的光学金相组织
(a) 网篮组织; (b) 粗片层结构

Fig. 2 Optical microstructure forged in $\alpha+\beta$ zone

(a) net basket structure; (b) coarse lamellar structure

cle 级。在相同频率、应力比条件下, da/dN 主要是由合金组织特性(包括束域尺寸、方向)所决定。两种片层结构的不同特征影响了 da/dN 的大小。在本实验所给定的条件下, 裂纹扩展速率随着片层尺寸的减小而降低。细片层组织结构具有较细的片层尺寸和任意取向不断改变裂纹走向, 增加了裂纹扩展的曲折性^[5], 降低了裂纹长大速率。这种裂纹扩展速率的降低被解释为是由于裂纹扩展的组织依赖模式所决定的, 与结晶位向分歧有关^[6]。

从图 3 还可以看出, 裂纹扩展速率随着应力强度因子的增加出现一定的波动台阶, 这主要是受裂纹扩展路径影响所致。

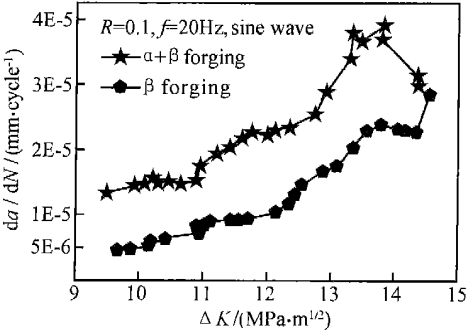


图 3 β 区和 $\alpha+\beta$ 区锻造棒材 ΔK - da/dN 曲线
Fig. 3 ΔK - da/dN curves of bars produced by β and $\alpha+\beta$ forging

2.3 断口分析

图 4 为 β 区锻造下裂纹稳态扩展区的断口 SEM 照片。从图 4a 可以看出, 断口上有许多平行排列的“沟槽”, 这可能与片层组织中的束域相对应。同时也出现了许多二次裂纹, 说明裂纹在片层结构中扩展时, 尖端应力较大, 裂纹在向前扩展的同时, 也向垂直于主裂纹扩展的方向延伸, 形成二次裂纹, 释放应力。从而增加了裂纹扩展的曲折性, 降低了裂纹扩展速率。断口上能看到疲劳条纹(见图 4b), 说明在稳态扩展区, 裂纹主要以条带机制向前扩展^[7]。图 5 为 $\alpha + \beta$ 区锻造下裂纹稳态扩展区的断口 SEM 照片, 可以看到一些较深的“沟槽”, 但看不到明显的二次裂纹(见图 5a)。裂纹在稳态区同样是以条带机制向前扩展, 可见疲劳条纹(见图 5b)。

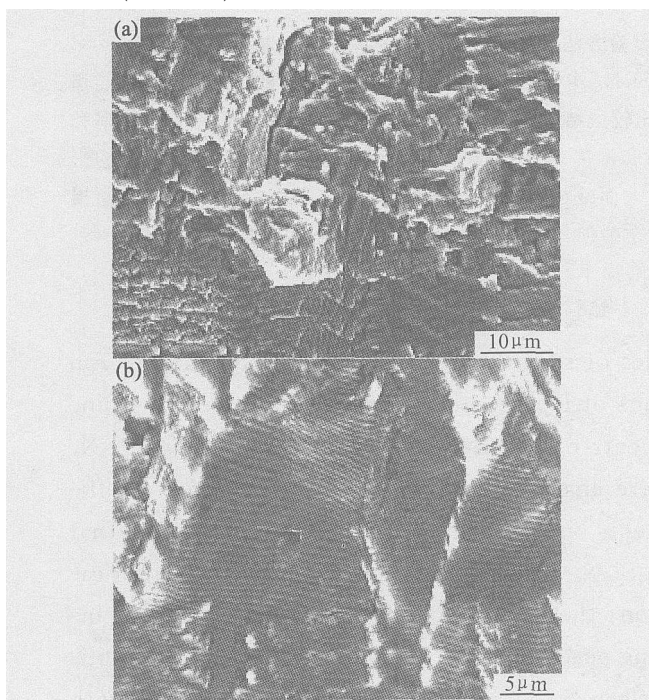


图 4 β 区锻造下裂纹稳态扩展区的断口 SEM 照片

(a) 二次裂纹; (b) 疲劳条纹

Fig. 4 SEM fracture photographs of stationary extended zone of bar forged in β zone

(a) secondary crack; (b) fatigue strip

3 结论

(1) 本实验给定的条件下, 裂纹扩展速率随着片层尺寸的减小而降低。 β 区锻造裂纹扩展速率较低主要是由于获得较细的片层组织结构。

(2) 裂纹在细片层组织中扩展时, 尖端有较大的应力, 通过产生多且深的二次裂纹来释放能量。而在粗片层组织中扩展时未能看见二次裂纹。

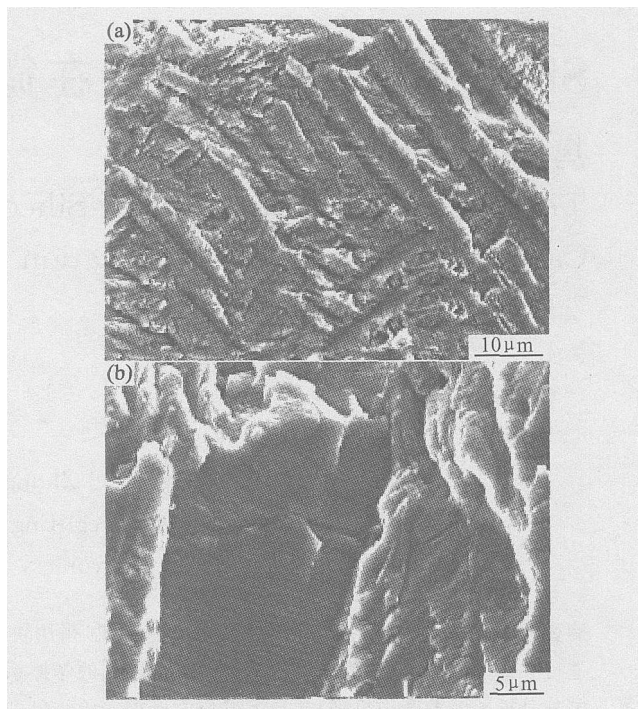


图 5 $\alpha + \beta$ 区锻造裂纹稳态扩展区的断口 SEM 照片

(a) 解理面和沟槽; (b) 疲劳条纹

Fig. 5 SEM fracture photographs of stationary extended zone of bar forged in $\alpha + \beta$ zone

(a) cleavage plane and groove; (b) fatigue strip

(3) 两种加工方式下, 裂纹在稳态区都是以条带机制向前扩展, 可见疲劳条纹。

参考文献

- [1] 赵永庆, 曲恒磊. 高强高韧损伤容限型 TC21 合金研制[J]. 钛工业进展, 2004, 21(1): 22-24.
- [2] 曲恒磊, 周廉, 周义刚. 强韧钛合金相变温度的确定[A]. 中国科协第二界博士生年会论文集[C]. 北京: 中国科技出版社, 2004.
- [3] 曹春晓. 选材判据的变化与损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(增刊): 4-11.
- [4] WELSCH G, WEISS I, EYLON D, et al. Advances in the science and technology of titanium alloy processing[J]. The Minerals, Metals and Materials Society, 1997, 10: 169-172.
- [5] 周义刚, 曾卫东, 李晓芹. 钛合金高温强化机理[J]. 金属学报, 1999, 35(1): 45-48.
- [6] JIN O, MALLS. Effects of microstructure on short crack growth behavior of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si alloy materials[J]. Science and Engineering, 2003, (359) A: 356-367.
- [7] 郑修麟. 材料的力学性能[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996. 121-125.

收稿日期: 2005-03-18; 修订日期: 2005-10-04

作者简介: 李辉(1973-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为钛合金研制与开发, 联系地址: 西北有色金属研究院钛所(710016)。