

钛合金 β 晶粒生长规律及晶粒尺寸对 损伤容限性能的影响

马英杰, 刘建荣, 雷家峰, 刘羽寅, 杨 锐

(中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 分别对 $\alpha+\beta$ 两相区及 β 单相区锻造的 TC4 合金在相变点以上温度保温, 然后对不同温度条件下原始 β 晶粒尺寸进行统计, 并测试了几种不同晶粒尺寸下的疲劳裂纹扩展速率及断裂韧性。晶粒尺寸统计结果显示: 原始 β 晶粒尺寸不仅与热处理温度和时间有关, 也与锻造工艺有关。原始 β 晶粒尺寸与保温时间呈指数关系; 在 1 h 条件下原始 β 晶粒尺寸并不总是随温度的升高一直增大, 在某个温度范围内有一极值; 锻造工艺不同, 原始 β 晶粒尺寸波动也不同。从晶粒生长的热力学及动力学两方面对上述现象进行了分析。力学性能结果显示晶粒尺寸对裂纹扩展速率及断裂韧性均有影响, 并对影响机理进行了分析。

关键词: 钛合金; TC4 合金; 热处理; β 晶粒生长; 损伤容限性能

中图法分类号: TG 146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)06-0976-06

钛合金的力学性能与其显微组织有着密切的联系, 其中原始 β 晶粒尺寸对钛合金的力学性能有很大影响, 且晶粒尺寸也能影响 α 晶团尺寸、 α 片厚度等参数^[1], 从而影响材料力学性能。损伤容限钛合金通常选取 β 区热加工或 β 区热处理的热工艺, 了解不同工艺下 β 晶粒生长规律及晶粒尺寸对合金力学性能尤其是损伤容限性能的影响, 对于发展高损伤容限钛合金具有重要意义。人们在晶粒生长方面已进行了很多研究, 其中 P. G. Shewmon 和 R. E. Reed-Hill 等人较早便对晶粒生长的动力学进行了分析^[2,3], 据文献[4~6]报道, 在 β 区热处理时晶粒的大小随温度及保温时间的增加而增大。文献[5,7]指出 β 晶粒的大小与热加工工艺、加热速率等因素有关。文献[8]对晶界在晶粒生长中所起的作用进行了阐述, 文献[9]还对短时热处理条件下晶粒的生长进行了观察。本实验对 2 种原始显微组织的 TC4 合金原始 β 晶粒生长规律进行了研究, 综合考察了锻造工艺、短时热处理以及保温时间对 β 晶粒尺寸的影响, 并对晶粒尺寸对疲劳裂纹扩展速率及断裂韧性的影响进行了研究。

1 实 验

实验所用材料为 TC4 钛合金。实验选取了 2 种锻造工艺的合金, 分别记为 A 类试样和 B 类试样。A 类

试样的锻造工艺为: $\phi 220 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的坯料首先在 β 区开坯, 而后在相变点以下 20~30 °C 锻造成 $\phi 85 \text{ mm}$ 的圆柱。B 类试样的锻造工艺为: $\phi 220 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的坯料首先在 β 区开坯, 而后在相变点以上 20~25 °C 锻造成 $\phi 85 \text{ mm}$ 的圆柱。图 1a 和图 1b 分别为 A 类和 B 类试样的原始组织照片。可以看出 A 类试样为等轴组织, 而 B 类试样为具有一定晶团尺寸且晶界被破碎的片层组织。本实验中 β 晶粒尺寸采用网格法测定, 具体方法如下: 在光学显微镜下拍摄多张金相照片, 用网格法测出每个视场下所包含的 β 晶粒的面积, 然后将不同形状的 β 晶粒等效成一个直径为 d 的圆, 晶粒尺寸就用等效直径 d 来表征, 并由此计算出平均晶粒尺寸。

$$d_i = \sqrt{4A_i/\pi} = \sqrt{1.27A_i} \quad (1)$$

$$\bar{d} = \sum_i d_i / n \quad (2)$$

式中, d_i 为第 i 个 β 晶粒的等效直径, A_i 为第 i 个 β 晶粒的实测面积, $\bar{d}$ 为某热处理制度下的平均晶粒尺寸, n 为统计的 β 晶粒数。为了解 β 晶粒尺寸的均匀性, 还对每个热处理条件下晶粒尺寸在 $d_i = \bar{d} \pm 40\%\bar{d}$ 范围内的数量占统计晶粒总数的比例进行了统计, 本文中这

个比例定义为参数 $\omega = \frac{\text{晶粒度在 } \bar{d} \pm 40\% \bar{d} \text{ 范围内的数目}}{\text{所统计的晶粒总数}}$, ω 越

收稿日期: 2008-06-21

作者简介: 马英杰, 男, 1981 年生, 博士生, 中国科学院金属研究所钛合金研究部, 辽宁 沈阳 110016, 电话: 024-23971962, E-mail: yjma@imr.ac.cn

大, 所得到的晶粒尺寸越均匀。疲劳裂纹扩展速率试样采用 $B=12.5$ mm 的紧凑拉伸试样, 平面应变断裂韧性采用 $B=35$ mm 的 C(T) 试样。

2 结果及分析

2.1 β 晶粒生长规律研究

β 晶粒的长大分为再结晶形核和粗化两个阶段。再结晶形核阶段中, β 晶粒首先在残留 β 相、晶界、位错等处形核, 形核后逐渐依靠消耗周围的 α 相长大, 该阶段中 β 晶粒长大的热力学动力是 α 相和 β 相的自由能之差 $\Delta G_{\alpha\beta}$, 直到 α 相完全转变成 β 相。相转变完成后 β 晶粒通过减小总界面能长大, 这一阶段的热力学动力是界面能的减小。当从动力学角度考虑晶粒长大时, 温度便成为极其重要的影响因素。温度越高原子的扩散速度越快, 晶粒长大速度越快。热力学和动力学因素同时作用于 β 晶粒长大的整个过程。这里综合讨论晶粒生长过程中的热力学及动力学因素, 对不同条件下的 β 晶粒生长现象进行分析。

2.1.1 短时热处理条件下 β 晶粒尺寸

图 2 为 A 类和 B 类试样分别在 1000、1060、1120、1220、1300 °C 保温 2 min 得到的 β 晶粒尺寸变化曲线。可以看出随着温度的升高, β 晶粒的尺寸逐渐增大。并且在 1000 °C 至 1120 °C 温度区间内, B 类试样得到的晶粒尺寸比 A 类试样的大。图 3 为 1000 °C 短时(2 min)热处理后 2 类试样得到的晶粒形态, B 类试样的晶粒尺寸约为 A 类试样的 2 倍, 且 B 类试样整个视场内晶粒尺寸较均匀。保温温度在 1120 °C 以上时 2 类试样得到的晶粒尺寸差别较小。 β 相长大速度对短时热处理后得到的晶粒尺寸有很大影响。根据相变热力学, 热处理过程中 α 相转变为 β 相的相变驱动力是两相的化学自由能之差 $\Delta G_{\alpha\beta}$ 。相转变过程中原子不断地跨越界面由 α 相扩散至 β 相, 而 β 相中也有原子反向扩散到 α 相中, 但二者的频率不同, 其差值便促使 β 相的长大^[10]。 β 相的长大速率(u)可表示为

$$u=b(v_{\alpha\beta}-v_{\beta\alpha})=bv\exp(-Q/KT) \quad (3)$$

式中, $v_{\alpha\beta}$ 为原子从 α 相跨越相界面跳越到 β 相的频率, $v_{\beta\alpha}$ 为原子从 β 相跳向 α 相的频率, Q 为原子扩散激活能, K 为常数, T 为热处理温度。由式(3)看出, 当温度升高时, 原子扩散速度加快, β 相的长大速度也加快, 形成的 β 晶粒也就越大。温度低于 1120 °C 时, 相同温度下 A 类试样和 B 类试样得到的晶粒尺寸不同是由于二者再结晶方式不同, 观察发现 A 类试样主要在残余 β 相或最大变形畸变处再结晶形核, 而 B 类试样通常会以晶团为单位形成 β 晶粒, 由于晶团尺寸较大, 因此短时热处理后 B 类试样的 β 晶粒尺寸较大。

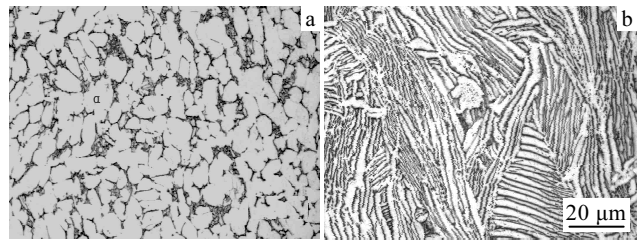


图 1 采用 2 种锻造工艺的显微组织

Fig.1 Microstructures of sample A (a) and sample B (b)

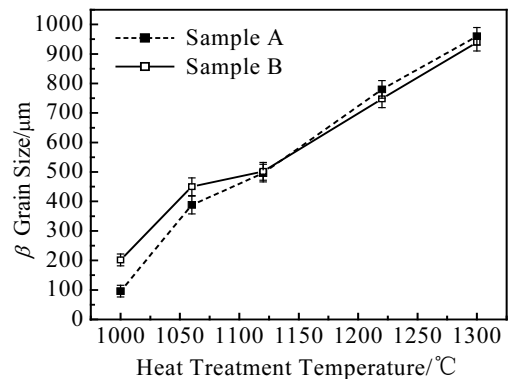


图 2 不同温度下保温 2 min 得到的 β 晶粒尺寸

Fig.2 The β grain size under 2 min-solution at different temperatures

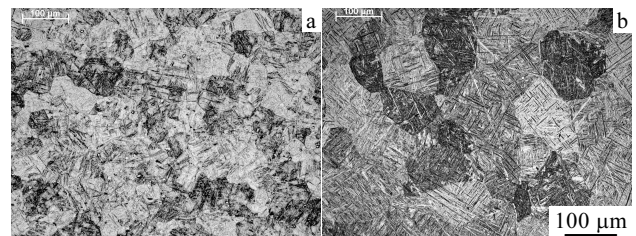


图 3 1000 °C 短时(2 min)保温后得到的 β 晶粒形态

Fig.3 Microstructures of (a) sample A and (b) sample B under 2 min-solution at 1000 °C

图 4 反映了短时热处理后 β 晶粒尺寸的均匀性, 保温温度低于 1120 °C 时, B 类试样 ω 值明显高于 A 类试样, 在此温度区间内 B 类试样晶粒尺寸更为均匀, 并且随温度升高, 两类试样 ω 均增大, 表现出均匀化趋势; 保温温度高于 1120 °C 时, 二者均匀性基本相同, 并且随温度升高, ω 变化不大。低于 1120 °C 的晶粒尺寸均匀性的差别是由于 A 类试样的热变形温度低于 B 类试样, 从而 A 类试样变形相对不均匀, 再结晶形核会优先在塑性变形引起的最大畸变处发生^[11], 优先形核点将在竞争很小的环境中快速生长, 造成短时热处理后 A 类试样晶粒尺寸的不均匀, 随着热处理温度升高, 再结晶形核点增多, 相邻形核点将互相制约对方

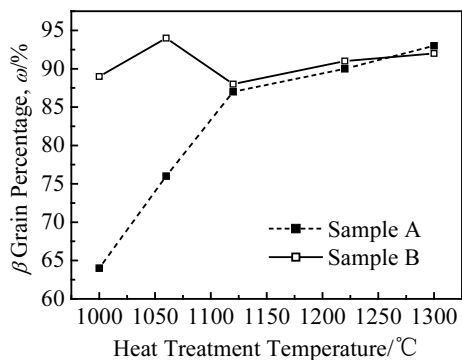


图 4 不同温度保温 2 min 后, 晶粒尺寸在平均晶粒度 $\pm 40\%$ 以内的晶粒分数

Fig.4 The percentage of prior β grains sizes of which are at the range of average size $\pm 40\%$ after 2 min-solution

的生长, 组织变形不均匀逐渐被减弱, 从而晶粒尺寸均匀性提高。B 类试样则变形相对较均匀, 形核位置也较均匀, 短时热处理后得到的晶粒尺寸差别不大。结合图 2 与图 4 可以发现: 在 1120 $^{\circ}\text{C}$ 以下短时间热处理时, 2 种热加工工艺下晶粒尺寸及其均匀性均有较大差别; 而温度超过 1120 $^{\circ}\text{C}$ 以后, 二者晶粒的大小及其均匀性基本相同。

2.1.2 不同温度下保温 1 h 得到的 β 晶粒尺寸

图 5 为 A 类和 B 类试样在不同温度下保温 1 h 后的 β 晶粒尺寸。2 类试样在保温温度低于 1200 $^{\circ}\text{C}$ 时晶粒尺寸随热处理温度升高均变化缓慢, 特别是在 1000 ~ 1120 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 晶粒尺寸并不是随着温度的升高而增大, 而是在 1060 $^{\circ}\text{C}$ 附近有起伏: 对于 A 类试样, 随着温度的升高晶粒尺寸先增加后减小; 对于 B 类试样, 晶粒尺寸则是先减小后增大, 文献[12]也曾报道了类似的起伏现象, 但并没有作出理论分析。保温温度超过 1200 $^{\circ}\text{C}$ 后, 2 类试样的晶粒尺寸随着热处理温度的升高均迅速增大。

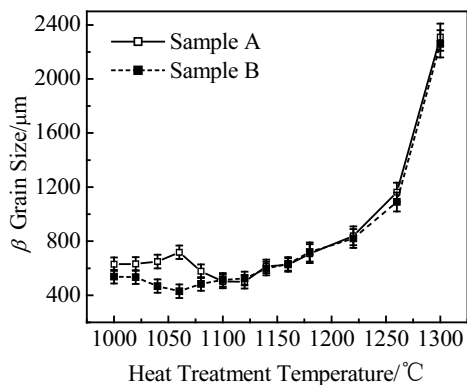


图 5 不同温度下保温 1 h 后的 β 晶粒尺寸

Fig.5 Sizes of prior β grain at different solution temperatures for 1 h

相变完成后继续保温时, β 晶粒便会粗化长大。由于 β 相的总量不再变化, 只能通过降低界面能, 即减少界面总量来实现晶粒的生长。晶粒粗化是通过原子的扩散进行的, 而扩散的驱动力是扩散方向上存在化学位梯度, 假设形成的晶粒均为球形, 其半径为 r , 原子在球形晶粒中的化学位 μ 为^[13]

$$\mu = (G_v + G_e) + 2\Omega/r \quad (4)$$

其中, Ω 为摩尔体积; G_v 为单位体积的化学自由能; G_e 为单位体积的弹性应变能。显然, 在 $\Omega(G_v + G_e)$ 不变的情况下, 原子在晶粒中的化学位只与晶粒的半径有关, 半径越小, μ 越大, 晶粒越不稳定。因此, 原子总是从小晶粒向大晶粒扩散, 造成大晶粒不断长大, 小晶粒不断减小。如果相邻的 2 个晶粒大小相当, 则 2 个晶粒生长过程中会互相竞争, 均不容易长大; 如果相邻 2 个晶粒大小相差比较大, 便会造成大晶粒迅速长大, 小晶粒减小, 直至消失。

由此可见, 晶粒生长粗化与晶粒尺寸的均匀性紧密相关: 尺寸均匀, 长大的动力小, 晶粒不容易长大; 相反, 晶粒就容易长大。应用该理论可以很好地解释本实验中的实验现象: 在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 保温 2 min 后, B 类试样的晶粒尺寸是 A 类试样的 2 倍(图 2), 但保温 1 h 后, A 类试样的晶粒尺寸反而比 B 类试样大很多(图 5)。这是由于在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 短时间(2 min)保温后, A 类试样的晶粒大小不均匀, ω 值为 60%, 较大晶粒的周围为小晶粒(图 3a), 继续保温处理时这些大晶粒会吞并周围的小晶粒而迅速生长; 而在 B 类试样热处理 2 min 生成的晶粒尺寸较均匀(图 3b), ω 值为 90%, 相邻晶粒在生长中相互竞争, 生长速度受到限制。可以看出 A 类试样的晶粒长大驱动力比 B 类试样大, 长大速度更快。

β 晶粒的生长主要受 2 种因素的控制: 热力学因素和动力学因素, 其中热力学因素为总的界面能减少, 即大晶粒生长小晶粒减小; 动力学因素则为温度, 温度越高, 原子扩散速度越快, 越有利于晶粒生长。2 种因素共同作用于晶粒生长的全过程, 在某一阶段其中的一个因素可能成为主要控制因素, 在另一个阶段则可能转变为次要因素。A 类试样在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 热处理 1 h 后晶粒尺寸大于 B 类试样, 就是在同样的动力学条件下热力学条件不同造成的。

图 5 中晶粒尺寸在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 至 1120 $^{\circ}\text{C}$ 区间内随保温温度变化出现的波动, 也可以由短时保温(2 min)后晶粒的均匀性来解释。短时间(2 min)热处理后 A 类试样晶粒均匀程度随温度的升高而增加(图 4), 晶粒长大的热力学影响因素减弱, 但随着温度升高, 扩散速度加快, 受到热力学和动力学因素的同时作用, β 晶粒

的尺寸在某一点处产生 1 个极值, 图 5 中这个极值点在 1060 °C 附近, 由于从 1000 °C 到 1060 °C 晶粒尺寸均匀性提高 10%, 热力学影响因素变化不大, 因此 1060 °C 处为极大值点, 随着温度继续升高晶粒均匀性的增加使得晶粒尺寸减小。B 类试样在短时(2 min)保温后的晶粒均匀程度是先增大, 在 1060 °C 附近达到最大, 然后保持不变, 所以随着温度升高晶粒长大热力学影响因素减弱, 热处理 1 h 后晶粒尺寸也随温度升高减小, 到 1060 °C 左右达到最小, 而后由于温度升高, 原子扩散速度提高晶粒尺寸增大。

热处理温度超过 1120 °C 以后, 短时热处理得到晶粒的均匀性基本保持不变, 温度控制的动力学因素在晶粒生长过程中起主导作用, 随着原子扩散速度的提高, 晶粒迅速长大(图 5)。热处理温度低于 1120 °C 时, 1 h 热处理后 2 种热加工工艺 β 晶粒的尺寸有较大差别; 超过 1120 °C 以后, 2 种热加工工艺下的晶粒尺寸基本相同。

另外实验测得 3.5 mm 板材在 1000 °C 热处理 1 h 后得到的晶粒尺寸为 280 μm , 大小为相同热处理制度下 A 类试样的 45%, B 类试样的 50%。这也反映出热加工工艺及变形量不同对 β 晶粒的生长的影响, 变形量越大再结晶形核点越多, 晶粒生长过程中越受到相邻晶粒的限制, 所得到的晶粒越小。

2.1.3 β 晶粒随固溶时间的生长规律

图 6 为不同热处理时间和温度下 A 类和 B 类试样的 β 晶粒尺寸的变化情况。可以看出, 在热处理的开始阶段 β 晶粒生长迅速, 而后随着时间的增加, 增长速度降低, 2 h 后晶粒尺寸变化很小。文献[4]从理论上推导出 β 晶粒的尺寸和时间的关系式:

$$D^n - D_0^n = Kt \exp(-Q/RT) \quad (5)$$

式中, D 和 D_0 分别代表晶粒的最终大小和初始大小; t 表示加热的时间; n 代表 β 晶粒的生长系数, n 越大表示晶粒生长速度越慢; R 为气体常数; T 为绝对温度; Q 表示原子的扩散激活能; K 为常数。晶粒尺寸和热处理时间大致符合指数增长关系, 可见实际得出的 β 晶粒随时间的生长规律较好地符合了理论推导结果。

2.2 晶粒尺寸对断裂韧性及裂纹扩展速率的影响

实验对 2 种晶粒尺寸差异较大的组织进行了平面应变断裂韧性及疲劳裂纹扩展速率测试, 分别为 1000 °C 固溶 30 min 而后 550 °C 时效处理 4 h 得到的晶粒尺寸约为 450 μm 组织, 以及 1300 °C 固溶 1 h 后 550 °C 时效处理 4 h 得到的晶粒尺寸约为 2 mm 组织。表 2 列出了 2 种晶粒尺寸下的拉伸性能及断裂韧性值, 断裂韧性测试结果为 K_{Ic} 。可见晶粒较小时材料具有较高

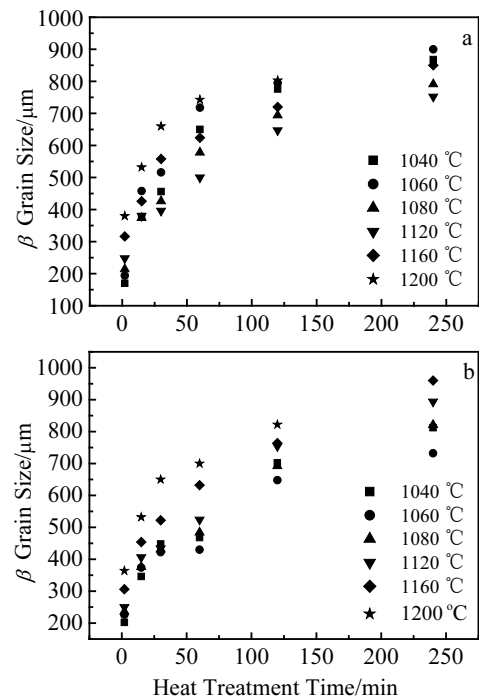


图 6 2 类试样 β 晶粒尺寸随热处理温度及时间的变化

Fig.6 The β -grain size under different solution temperatures vs heat treatment time of sample A (a) and sample B (b)

的抗拉伸强度及塑性, 符合赫尔—配奇关系, 但同时断裂韧性值低于具有较大晶粒时的组织。该结果说明晶粒尺寸对断裂韧性试样裂纹尖端塑性区断裂行为具有影响, 并且作者认为晶粒尺寸较大时裂纹尖端塑性区尺寸较大是造成断裂韧性较高的根本原因。

疲劳裂纹扩展速率测试结果如图 7 所示。可以看出 2 种晶粒尺寸下, 疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 相同, 均为 9.4 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 随着应力强度因子范围 ΔK 增大, 2 种显微组织 da/dN 差距逐渐显现。在 $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \leq \Delta K \leq 40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 范围内, 1300 °C 固溶得到的粗大晶粒组织裂纹扩展速率小于 1000 °C 固溶得到的具有较小晶粒组织。这是由于 ΔK 在门槛值附近时, 裂纹尖端塑性区尺寸较小, 均小于晶粒尺寸, 此时晶粒尺寸的差异对塑性区尺寸的差异影响较小, 裂纹前端扩展环境差异较小, 从而在塑性区尺寸较小时 2 种晶粒尺寸的疲劳裂纹扩展速率差别较小。随着 ΔK 增大, 塑性区尺寸增加, 塑性区与晶粒的交互作用逐渐明显, 由于塑性区尺寸对疲劳裂纹扩展具有强烈的影响^[4], 造成随着 ΔK 增大晶粒尺寸的差异对裂纹扩展的影响逐渐增大。

图 8 是 2 种晶粒尺寸下疲劳裂纹扩展路径波动幅度。由图 8 可看出疲劳裂纹在 1300 °C 得到的大晶粒组

表 2 2 种晶粒尺寸试样的拉伸性能及断裂韧性
Table 2 Mechanical properties for the sample of two different grain size

Heat treatment	Grain size/ μm	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\psi/\%$	$K_{Ic}/\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
1000 $^{\circ}\text{C}$, 30 min AC+550 $^{\circ}\text{C}$, 4 h AC	450	890	820	9.1	22	100
1300 $^{\circ}\text{C}$, 1 h AC +550 $^{\circ}\text{C}$, 4 h AC	2000	850	784	8.2	13.3	116

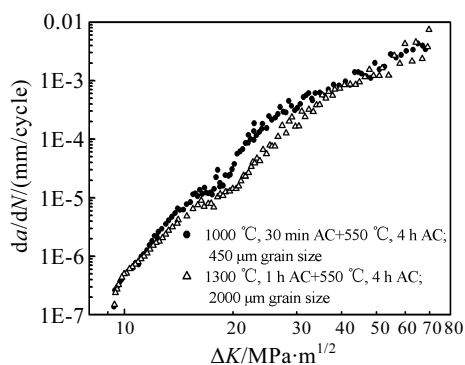


图 7 2 种 β 晶粒尺寸下疲劳裂纹扩展速率比较

Fig.7 Fatigue crack growth rates for two types of β grain sizes

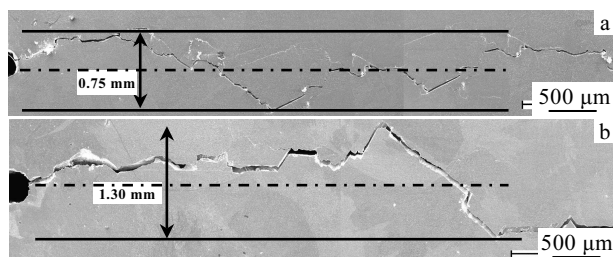


图 8 2 种晶粒尺寸试样的疲劳裂纹扩展路径波动幅度

Fig.8 Fatigue crack fluctuation range for the sample of two types of grain sizes: (a) fluctuation 0.75 mm for 450 μm grain size obtained from 1000 $^{\circ}\text{C}$ solution and (b) fluctuation 1.30 mm for 2 mm grain size obtained from 1300 $^{\circ}\text{C}$ solution

织中扩展路径波动范围较大(8b), 从而降低了沿与远场拉伸垂直方向上的疲劳裂纹扩展速率。当 $\Delta K > 40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时, 裂纹扩展速率达到 10^{-3} mm/cycle , 显微组织对裂纹扩展速率没有影响。

3 结 论

1) 在相变点以上短时间 (2 min) 热处理, A 类和 B 类试样 β 晶粒尺寸均随着热处理温度的升高而增加, 但 2 类试样得到的晶粒尺寸及其均匀性在 1000~1120 $^{\circ}\text{C}$ 热处理温度区间内均有差别。

2) 在相变点以上保温 1 h, β 晶粒尺寸并不是单一地随着温度的升高而增大, 而是在一段较低温度范围内有波动, 这一现象与热处理初期形成的晶粒尺寸均匀性和热处理温度较低有关, 是热力学因素和动力学因素共同作用的结果。

3) 不同温度下 β 晶粒尺寸随保温时间而变化, 二者呈现指数关系, 符合已有理论推导结果。

4) β 晶粒的生长受到热加工工艺、再结晶形核、保温温度及时间综合因素的影响, 热处理温度较低时 (低于 1120 $^{\circ}\text{C}$), 热加工工艺的影响较明显, 超过一定温度后热处理温度成为影响晶粒生长的主要因素。

5) 粗大的 β 晶粒有助于提高材料断裂韧性值及抗疲劳裂纹扩展能力, 且晶粒尺寸不同对裂纹尖端塑性区的影响也不同。

参考文献 References

- [1] Ma Yingjie(马英杰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(Suppl.3): 19
- [2] Shewmon P G. *Transformations in Metals*[M]. New York: [s.n.], 1969: 116
- [3] Reed-Hill R E. *Physical Metallurgy Principles*[M]. New York: [s.n.], 1973: 298
- [4] Gil F J et al. *Mater Sci Eng*[J], 2000, A283: 17
- [5] Semiatin S L et al. *Mater Sci Eng*[J], 2001, A299: 225
- [6] Semiatin S L et al. *Scripta Metallur Materialia*[J], 1994, 30: 951
- [7] Bolisowa E A ed. Translated by Chen Shiqing (陈石卿). *Metallography of Titanium Alloys*(钛合金金相学)[M]. Beijing: Defense Industrial Press, 1986: 235
- [8] Boswell E et al. *Titanium'95: Science and Technology*[C]. [S. I.]: AIME, 1995: 2446
- [9] Semiatin S L et al. *Acta Mater*[J], 1996, 44: 1979
- [10] Sun Zhenyan(孙振岩). *Diffusion and Phase Transformation in Metal*(合金中的扩散与相变)[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2002: 119
- [11] Gelilik S S ed. Translated by Tong Jianmin(仝健民). *Recrystallization in Metal and Alloys*(金属和合金的再结晶)[M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 29
- [12] Ivashishin O M et al. *Mater Sci Eng*[J], 2002, A332: 343
- [13] Pan Jinsheng(潘金生). *Foundation of Material Science*(材料科学基础)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 583
- [14] Suresh S ed. Translated by Wang Zhongguang (王中光) et al. *Fatigue of Materials*(材料的疲劳)[M]. Beijing: Defense Industrial Press, 1999: 237

β -Grain Growth and Influence of Its Grain Size on Damage-Tolerance Property in Titanium Alloy

Ma Yingjie, Liu Jianrong, Lei Jiafeng, Liu Yuyin, Yang Rui

(Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The purpose of the present study is to know the influences of thermo-mechanical processing and heat-treatment on the prior β -grain size of TC4 titanium alloy, and the influence of grain size on damage-tolerance properties is also discussed. The average β -grain sizes under different thermo-mechanical processing and solution treatment conditions were measured. Noticeable difference of β -grain growth behavior was found between $\alpha+\beta$ forged and β forged TC4 alloy under the same heat-treatment conditions. The exponential relationship between β -grain size and solution time was presented. The results show that β -grain size does not always increase with increasing of solution-treatment temperature; a limit value of the grain size will appear in certain temperature region. For different forging process, the fluctuation of the prior β -grain size is different. This phenomenon is discussed in terms of grain growth thermodynamics and kinetics laws. Damage-tolerance properties results show that grain size has noticeable influence on fatigue crack growth rate and fracture toughness property.

Key words: titanium alloys; TC4 alloy; heat-treatment; β -grain growth; damage-tolerance property

Biography: Ma Yingjie, Candidate for Ph. D., Research Laboratory of Titanium Alloy, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, Tel: 0086-24-23971962, E-mail: yjma@imr.ac.cn