

# TC4-DT 钛合金片层组织疲劳裂纹扩展速率

郭 萍<sup>1</sup>, 赵永庆<sup>1</sup>, 曾卫东<sup>2</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 钛合金不同片层结构的疲劳裂纹扩展速率。试验通过几种不同的热处理工艺获得不同的片层组织结构参数, 深入研究了片层组织结构参数对疲劳裂纹扩展速率的影响规律, 并对裂纹扩展断口进行分析。结果表明: 双重处理空冷条件获得细片层组织较炉冷条件获得粗片层组织具有较高的疲劳裂纹扩展阻力; 多重热处理由于获得的次生  $\alpha$  片层, 导致不同阶段裂纹扩展机理与双重处理的不同。在相同的第一重处理条件下, 多重处理在中速扩展区的裂纹扩展速率较双重处理的高。由于次生  $\alpha$  片层组织具有较好的变形协调性, 加快裂纹的扩展, 因此具有较双重空冷处理较高的疲劳裂纹扩展速率。

**关键词:** TC4-DT 钛合金; 片层组织; 疲劳裂纹扩展速率; 疲劳裂纹扩展断口

**中图分类号:** TG146.2\*3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2016)11-2937-05

人们对疲劳裂纹扩展的研究始于 20 世纪 40 年代, 其研究内容主要分为疲劳裂纹扩展的宏观规律和微观机理, 宏观规律则是研究疲劳裂纹扩展速率表达式以及影响裂纹扩展速率的因素; 微观机理则是讨论在循环载荷下裂纹如何扩展<sup>[1-5]</sup>。TC4-DT 钛合金是一种中强高损伤容限型两相钛合金, 在航空及航天结构件制造中有着巨大的应用前景。目前人们对钛合金的疲劳裂纹扩展速率已经进行了大量的研究, 但已有关于钛合金疲劳裂纹扩展速率的研究主要集中在外部因素的影响, 如应力比、载荷频率、取样方向及尺寸等<sup>[6-8]</sup>, 而关于内部组织结构参数对裂纹扩展速率的研究相对较少。众多的研究表明, 钛合金的片层组织具有较高的损伤容限性能, 即具有较高的断裂韧性和较低的裂纹扩展速率。因此, 本研究重点讨论了 TC4-DT 钛合金不同片层组织结构参数对裂纹扩展速率的影响, 并结合断口形貌及裂纹扩展路径进行了分析。

## 1 实 验

采用的原材料为经 2 次真空自耗电极电弧炉熔炼获得的 TC4-DT 钛合金铸锭, 铸锭首先经  $\beta$  区开坯锻造, 最终在两相区锻造获得等轴组织, 如图 1 所示, 主要由大量的等轴  $\alpha$  相和部分保留的  $\beta$  相组成。材料的化学成分(质量分数, %)为 6.08Al, 4.19V, 0.11O, 0.005N,

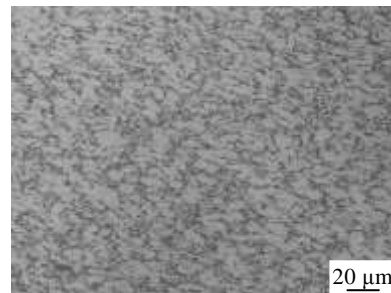


图 1 实验用 TC4-DT 合金的原始组织

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

0.009C, 0.06Fe, 0.002H, 余量为 Ti。采用金相法测试 TC4-DT 合金的相变点为  $(980 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,  $da/dN$  取样方向均为  $T-L$  向。片层组织由  $\beta$  相区固溶处理得到, 热处理后去除氧化皮, 加工成厚度为 12.5 mm 的紧凑拉伸疲劳裂纹扩展试样, 疲劳裂纹扩展速率的测试在 MTS-810 疲劳试验机上完成, 频率  $f=15\text{ Hz}$ , 应力比  $R=0.1$ , 控制最大载荷为 5 kN。采用 OLYMPUSPMG3 光学显微镜和 GMS6460 扫描电镜分别对试样显微组织和断口形貌进行了观察与分析。

为了获得不同的片层结构, 试样首先采用双重热处理, 即在  $1000^\circ\text{C}$  进行处理保温 1 h 后分别采用空冷和炉冷的冷却方式, 以获得不同的片层厚度, 随后在

收稿日期: 2015-11-05

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, 高级工程师, 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86250729, E-mail: gp8440086@163.com

550℃保温 4 h 空冷进行时效处理。其次采用多重热处理, 即首先在 1000 °C 保温 1 h 后空冷处理, 其次在相变点以下 900 和 930 °C 保温 1 h 进行空冷或炉冷处理, 最终在 550 °C 保温 4 h 空冷进行时效。比较不同热处理组织的疲劳裂纹扩展速率, 并通过断口进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 片层厚度对疲劳裂纹扩展速率的影响

图 2 为在  $\beta$  相区 1000 °C 进行处理保温 1 h 后分别采用空冷和炉冷获得的显微组织, 对比相变点以上温度处理 2 种冷却方式获得显微组织的差别可以发现, 采用空冷获得的片层  $\alpha$  厚度较小, 平均厚度约为 3  $\mu\text{m}$  (图 2a), 而炉冷由于保温时间的延长获得的片层  $\alpha$  厚度较大, 平均尺寸约为 7  $\mu\text{m}$  (图 2b)。

图 3 为 2 种片层厚度对应的疲劳裂纹扩展速率曲线。从图 3 可以看出, 不同的片层厚度对裂纹扩展的第 1 阶段和第 3 阶段影响较大, 而对第 2 阶段的影响较小。当  $\Delta K \leq 28 \text{ MPa m}^{1/2}$ , 炉冷条件下较粗的片层尺寸较空冷条件下较细的片层尺寸具有更高的裂纹扩展速率, 说明空冷条件下的细片层组织具有更高的疲劳裂纹扩展阻力。随着  $\Delta K$  的增大, 进入裂纹扩展的第 2 阶段, 两者的扩展速率趋于一致。当  $\Delta K \geq 35 \text{ MPa m}^{1/2}$  时, 二者的差距又开始增大。不同阶段组织对裂纹扩展速率差别的原因主要是由不同阶段裂纹扩展机制不同造成。在裂

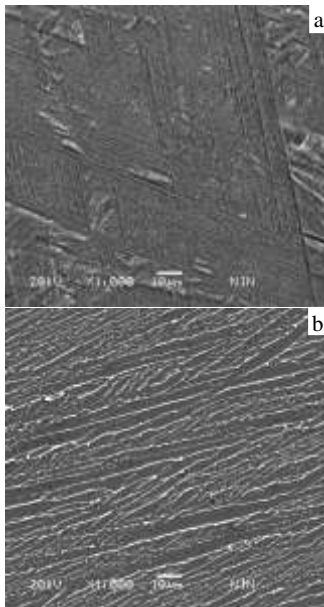


图 2  $\beta$  处理不同冷却方式获得的显微组织

Fig.2 Microstructures after solution treatment at 1000 °C with different cooling conditions: (a) air cooling, thin lamellar microstructure and (b) furnace cooling coarse lamellar microstructure

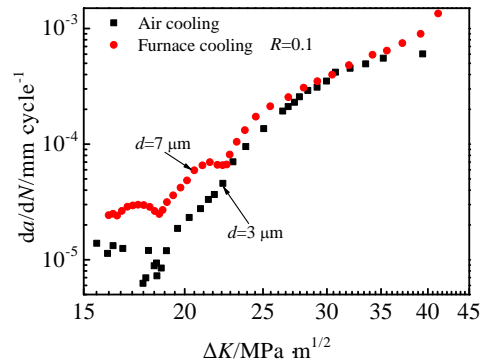


图 3 不同冷却方式下 TC4-DT 合金的疲劳裂纹扩展速率  
Fig.3 Fatigue crack growth rates at different cooling ways for TC4-DT alloy

纹扩展的入门槛区, 裂纹在附近的几个晶粒尺寸内扩展, 塑性区范围较小, 因此  $\beta$  晶内片层  $\alpha$  尺寸对裂纹扩展起主要作用, 裂纹扩展经过相同位移距离穿过粗片层的数量要比穿过细片层的数量少, 因此阻碍作用弱, 裂纹扩展速率高。较薄的片层  $\alpha$ , 裂纹扩展相同的距离穿过的片层数量越多, 扩展路径越易发生偏折, 因此裂纹扩展过程中路径越长, 扩展速率越低。随着  $\Delta K$  的进一步增大, 塑性区要跨越多个晶粒尺寸范围, 裂纹在经历一个循环周期内扩展的距离远大于组织中的片层厚度。因此, 片层厚度对裂纹扩展速率影响逐渐变弱, 导致在较高的  $\Delta K$  下, 不同厚度的片层组织疲劳裂纹扩展速率接近一致, 也就是裂纹扩展从微观组织敏感向不敏感过渡, 对应的断裂模式也从晶体学锯齿模式向辉纹模式转变。当  $\Delta K \geq 35 \text{ MPa m}^{1/2}$  后, 疲劳裂纹扩展速率远高于 Paris 区, 同时断裂模式的改变也大大提高了裂纹扩展速率对微观组织的敏感性。

从以上分析可以发现, 虽然在相变点以上相同温度处理, 由于冷却速率不同导致了晶粒尺寸接近但内部微观组织片层厚度不同, 裂纹在 2 种片层组织中扩展, 第 1 阶段主要受晶内片层厚度的影响, 而在裂纹扩展的第 2 阶段由于对组织的不敏感性导致了 2 种组织裂纹扩展速率接近。Li Shikai<sup>[9]</sup>等人对 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1VELI 合金的研究中获得了相同的结论, 但 V. Sinha<sup>[10]</sup>等人对 Ti-6Al-4V 的研究中认为, 炉冷条件同时具有较高的断裂韧性和较高的裂纹扩展阻力。为此试验进一步对 2 种组织的疲劳断口进行观察分析, 图 4 为 2 种片层厚度的组织在缺口根部的断口形貌。从图 4 中可以发现, 在循环应力条件下, 2 种片层厚度的组织在缺口根部均形成滑移带, 且随着循环次数的递增, 滑移带密度也逐渐增加, 空冷条件获得的细片层组织滑移带与加载方向成约 45°角, 炉冷条件受较厚片层的影响滑移带角度有偏

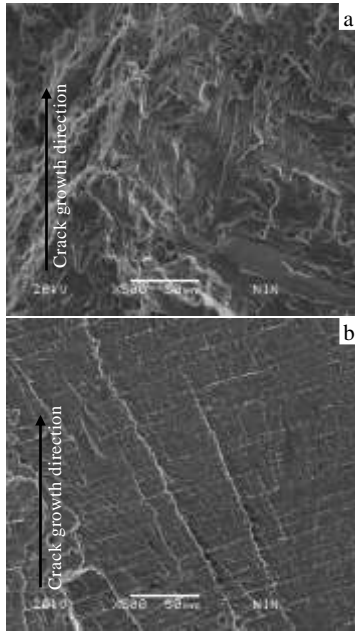


图 4 TC4-DT 片层组织近门槛区疲劳裂纹扩展的断口形貌  
Fig.4 Fractographs of fatigue cracks near threshold zone of lamellar microstructure for TC4-DT alloy: (a) thin lamellar microstructure and (b) coarse lamellar microstructure

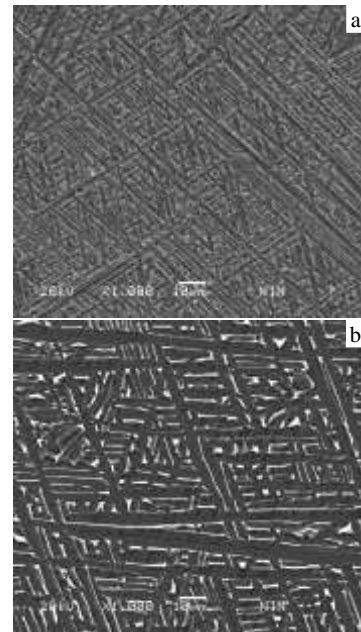


图 5 TC4-DT 多重热处理后的显微组织照片  
Fig.5 Microstructures of TC4-DT alloy after multi-heat treatment: (a) 1000 °C/1 h AC+900 °C/1 h AC+550 °C/4 h AC; (b) 1000 °C/1 h AC+930 °C/1 h FC+ 550 °C/4 h AC

离, 并且粗片层组织较细片层形成更多的滑移带, 二者产生滑移带的机理明显不同。粗片层组织中滑移带的形成与滑移带易于穿过  $\alpha/\beta$  相界和较大的束域尺寸有很大关系。显微结构特征影响裂纹的扩展, 2 种片层组织裂纹扩展行为的差异是由束域尺寸、方向及裂纹尖端组织协调的快慢程度所决定。粗片层组织中取向相似, 附近束域内的片层方向影响了裂纹早期的扩展行为。细片层组织由于束域尺寸较小, 并且取向随意, 更细的片层和取向的随意性延缓了裂纹的扩展速率。另外, 细片层组织有较大的裂纹形核抗力, 而粗片层易形成裂纹源加速裂纹扩展。因此, 细片层组织更能承受高循环的疲劳载荷。

2.2 多重处理对疲劳裂纹扩展速率的影响

图 5 为 2 种多重热处理制度获得的微观组织。从图 5 中可以看出, 经过多重热处理的组织中析出了更多的次生  $\alpha$  相, 但由于第二重热处理温度和冷却速率的不同导致了组织中不同的初生和次生  $\alpha$  相尺寸和数量, 第二重处理 930 °C 保温 1 h 炉冷 (图 5b) 后较第二重 900 °C 保温 1 h 空冷 (图 5a) 后的次生  $\alpha$  相的数量多, 并且次生  $\alpha$  片层较厚短, 初生  $\alpha$  片的厚度也增加。第二重热处理 900 °C 保温 1 h 空冷所获得次生  $\alpha$  片的厚度约为 3  $\mu\text{m}$ , 初生  $\alpha$  片的厚度约为 10  $\mu\text{m}$ 。

图 6 对比了多重处理后的片层组织与双重处理后片层组织应力比  $R=0.1$  时的疲劳裂纹扩展速率。可以

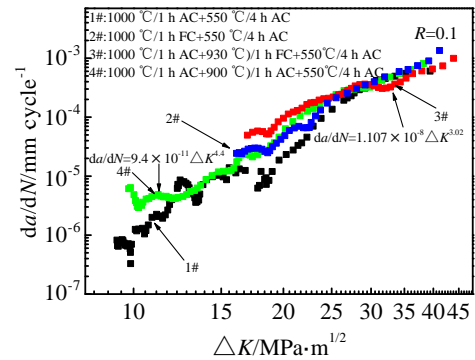


图 6 TC4-DT 合金不同片层结构的疲劳裂纹扩展速率  
Fig.6 Fatigue crack growth rates of TC4-DT alloy with different lamellar structures

发现在裂纹扩展开始阶段, 多重处理 (4#) 较双重处理 (1#) 有较高的裂纹扩展速率, 但随着  $\Delta K$  的增加, 在裂纹扩展的 I 区, 二者裂纹扩展速率接近一致。裂纹继续扩展, 应力强度因子范围  $\Delta K$  增大到 16  $\text{MPa m}^{1/2}$ , 裂纹扩展过渡到稳态区, 即裂纹扩展的第 II 阶段, 多重处理 (4#) 的扩展速率明显高于双重处理的 1# 试样。当  $\Delta K$  持续增大到 28  $\text{MPa m}^{1/2}$  时, 2 种组织对应的裂纹扩展速率接近一致。对比 2 种多重处理后的裂纹扩展速率发现, 稳态扩展区, 第二重处理在 930 °C 炉冷条件下 (3#) 的裂纹扩展速率明显高于第二重处理在 900 °C 空冷条件下 (4#) 的裂纹扩展速率, 随着裂纹

的持续扩展,同样在 $\Delta K$ 约为 $28 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时裂纹扩展速率重合。试验同时将多重处理中第二重为 $930 \text{ }^\circ\text{C}$ 炉冷条件(3#)的试样与双重处理炉冷后的试样(2#)裂纹扩展速率进行了对比,发现在稳态扩展区,多重处理的3#试样较双重处理的2#试样有较高的裂纹扩展速率,但随着裂纹的持续扩展,最终都趋于一致。从图6中还可以发现,在中速扩展区,双重热处理炉冷条件下(2#)的裂纹扩展速率和多重热处理中第二重处理为 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 空冷条件下(4#)的裂纹扩展速率接近,多重处理第二重处理在 $930 \text{ }^\circ\text{C}$ 炉冷条件下(3#)裂纹扩展速率最高,双重处理空冷条件下(1#)的裂纹扩展速率最低。但不论是双重热处理还是多重热处理获得的片层结构,从图6中可以看出,在较高的 $\Delta K$ 条件下,几种组织的裂纹扩展速率接近一致。图中也给出了不同曲线拟合的Paris方程,从方程中可以发现,对于同一种组织形态,裂纹扩展速率随着 $C$ 值的减小和指数 $m$ 的增加而减小。表1给出了不同热处理工艺下Paris方程中的 $C$ 和 $m$ 值,但具体之间的定量关系,需要通过更多试验进行验证。

显微组织的变化引起裂纹扩展机理的改变,给裂纹扩展速率也带来巨大变化。多重处理的4#试样,由于热处理过程导致的片层 $\alpha$ 增厚及次生 $\alpha$ 相的析出,其裂纹扩展机理与双重处理的1#试样不同。多重处理的4#试样由于片层 $\alpha$ 厚度较双重处理空冷的1#试样厚,在裂纹扩展的开始阶段,循环载荷作用下,由于粗片层的扩展阻力小导致其扩展速率高,但随着扩展的进行,由于4#试样中析出的细小的次生 $\alpha$ 相的阻碍作用,使4#试样的裂纹扩展速率有所降低,与双重处理的1#试样接近。因此在低速扩展区,4#试样的裂纹扩展速率受初生 $\alpha$ 片层和次生 $\alpha$ 相的综合作用,而1#试样的裂纹扩展速率主要受细片层 $\alpha$ 的影响。裂纹持续扩展,应力强度因子范围不断增大,进入稳态扩展区,由于4#试样的次生 $\alpha$ 相受高应力的作用不足以阻碍裂纹的扩展,因此裂纹扩展主要受片层 $\alpha$ 尺寸和晶粒尺寸的影响,由于第一重处理在 $\beta$ 区同一温度进行,

双重处理和多重处理的 $\beta$ 晶粒尺寸接近。因此,片层组织中的裂纹扩展主要受片层厚度的影响,较厚的片层组织其裂纹扩展速率高。对比多重热处理后的2种组织,第二重炉冷的3#试样较空冷的4#试样有高的裂纹扩展速率。双重炉冷2#试样和多重处理4#试样虽然在稳态扩展区裂纹扩展速率接近,但二者的扩展机理不同,2#试样中裂纹扩展主要受片层 $\alpha$ 厚度约束较多,4#试样的扩展路径主要受晶团及片层尺寸的影响。分析还发现,在稳态扩展区,双重处理炉冷的2#试样较多重处理的3#试样有较低的裂纹扩展速率,3#试验具有最高的裂纹扩展速率,因为一方面第二重处理的炉冷可使片层厚度增加,另一方面炉冷可增加次生 $\alpha$ 相的厚度,短粗的次生 $\alpha$ 相由于应变协调性好可促进裂纹的扩展。因此,3#试样扩展最快。

试验进一步分析了不同片层结构的断口形貌,图7为3种片层结构的稳态扩展区的断口形貌。在高倍电子显微镜下均可以看到,裂纹扩展过程中产生的疲劳条纹,这些疲劳条纹具有略成弯曲并且互相平行的沟槽花样,这是裂纹扩展过程中留下的微观痕迹。理论上每一条疲劳条纹为一次应力循环裂纹扩展的距离,并且裂纹的扩展方向与疲劳条纹成一定角度或垂直于条纹。但几种组织裂纹扩展的微观机制有一定的差别,图7a中可看到细小的疲劳条纹,说明裂纹扩展过程非常缓慢,还可以看到滑移带以及挤出脊和侵入沟,并且在附近还可发现有疲劳裂纹的产生,裂纹是多机制共同作用的结果(图7a),导致了更加粗糙的裂纹扩展面,因此其裂纹扩展速率较低。图7b为炉冷后的组织断口。可明显地看到,较厚的片层 $\alpha$ 结构以及扩展过程中产生的微裂纹,在交变应力作用下经过一定的应力循环后,金属表面的片层 $\alpha$ 间出现滑移带,在一个集束内滑移线在晶粒表面上形成了一些台阶,裂纹扩展需要减小能量,因此台阶跨度越来越小,最终与主裂纹汇合成一条裂纹。从炉冷后的断口形貌可以分析出,裂纹在扩展过程中主要在集束内部进行扩展,较空冷组织的断口相对光滑,因此有相对空冷组织高的裂纹扩展速率。图7c是三重处理的断口形貌,由于第二重处理是在 $930 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温1h炉冷后获得,因此组织中会析出许多次生 $\alpha$ 相,并且在炉冷的作用下次生 $\alpha$ 相厚度会增加,从断口形貌中能够明显的看出组织中的次生 $\alpha$ 片层,裂纹在扩展时会在片层间产生微裂纹,但是由于次生片层是在初生片层之间存在,尺寸较小,微裂纹较短,在交变应力及循环载荷的作用下导致滑移距离较小,因此能量消耗少,故产生了相对高的裂纹扩展速率。

表1 TC4-DT合金不同热处理工艺下对应Paris方程中的 $C$ 和 $m$ 值

Table 1  $C$  and  $m$  in Paris equation of TC4-DT alloy under different heat treatment processes

Heat treatment process	$C$	$m$
1000 $^\circ\text{C}/1 \text{ h AC}+550 \text{ }^\circ\text{C}/4 \text{ h AC}$	$1.085 \times 10^{-11}$	4.989
1000 $^\circ\text{C}/1 \text{ h FC}+550 \text{ }^\circ\text{C}/4 \text{ h AC}$	$5.486 \times 10^{-11}$	4.585
1000 $^\circ\text{C}/1 \text{ h AC}+900 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h AC}+550 \text{ }^\circ\text{C}/4 \text{ h AC}$	$9.403 \times 10^{-11}$	4.427
1000 $^\circ\text{C}/1 \text{ h AC}+930 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h FC}+550 \text{ }^\circ\text{C}/4 \text{ h AC}$	$1.107 \times 10^{-8}$	3.021

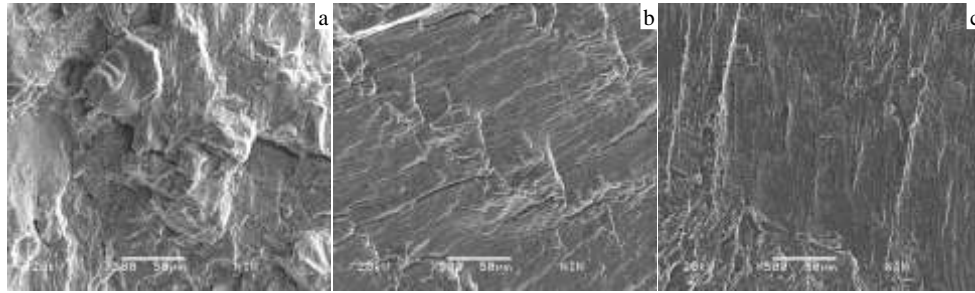


图 7 TC4-DT 合金不同片层结构的疲劳裂纹断面形貌

Fig.7 Fractographs of fatigue cracks with different lamellar microstructures for TC4-DT alloy: (a) 1000 °C/1 h AC+550 °C/4 h AC; (b) 1000 °C/1 h FC+550 °C/4 h AC; (c) 1000 °C/1 h AC+930 °C/1 h FC+550 °C/4 h AC

### 3 结 论

1) 片层组织中, 双重处理空冷条件获得细片层组织较炉冷条件获得粗片层组织具有较高的疲劳裂纹扩展阻力, 因为在循环载荷作用下, 裂纹扩展相同位移条件下通过厚片层的数量少, 所以阻碍作用较小。

2) 多重热处理由于获得的次生  $\alpha$  片层, 导致不同阶段裂纹扩展机理与双重处理的组织不同。在近门槛区, 裂纹扩展受初生  $\alpha$  片层和次生  $\alpha$  片层的共同作用, 与双重处理的细片层组织扩展速率接近。在中速扩展区的裂纹扩展速率受初生  $\alpha$  片层作用显著, 较粗的初生  $\alpha$  片层会加快裂纹扩展, 因此较双重处理空冷组织具有较高的裂纹扩展速率。

#### 参考文献 References

- [1] Zheng Xiulin(郑修麟), Wang Hong(王 泓), Yan Junhui(鄢君辉) et al. *Fatigue Theory and Engineering Application of Material* (材料疲劳理论与工程应用)[M]. Beijing: Science Press, 2013: 124
- [2] Richards C F, Lindley T C. *Engineer Fracture Mechanics*[J], 1972, 4: 952
- [3] Suresh S. *Fatigue of Materials*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 8
- [4] Zheng X L, Yan J H, Zhao K. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*[J], 1999, 32: 65
- [5] Kujawski D. *International Journal of Fatigue*[J], 2001, 23: 733
- [6] Yuen A. *Metallurgical Transactions*[J], 1974, 15(8): 1833
- [7] Yode G R, Cooley L A, Crooker T W. *Engineering Fracture Mechanics*[J], 1979, 11(4): 805
- [8] Li Hui(李 辉). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006
- [9] Li Shikai, Xiong Baiqing, Hui Songxiao et al. *Materials Characterization*[J], 2008, 59: 397
- [10] Sinha V, Soboyejo W O. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 319-321: 607

## Fatigue Crack Propagation Rate of Lamellar Microstructure for TC4-DT Titanium Alloy

Guo Ping<sup>1</sup>, Zhao Yongqing<sup>1</sup>, Zeng Weidong<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** The fatigue crack propagation rates of different lamellar microstructures in TC4-DT titanium alloy were studied. Different lamellar microstructures were obtained by different heat treatment processes, and the effect of lamellar microstructure parameters on fatigue crack growth rate was investigated. Results show that the thin lamellar microstructure by duplex treatment and air cooling possesses a higher fatigue crack propagation resistance than the coarse lamellar microstructure by furnace cooling. The crack propagation mechanism of multi-heat treatment is different from that of the duplex heat treatment, since the multi-heat treatment generates secondary  $\alpha$  lamellar. Under the same first heat treatment, the crack propagation rate in a mid-rate range by multi-heat treatment is higher than that by the duplex heat treatment. The secondary  $\alpha$  lamellar microstructure has good deformation compatibility, and accelerates the crack propagation; as a result, the multi-heat treatment causes a higher fatigue crack propagation rate than the duplex heat treatment+air cooling.

**Key words:** TC4-DT titanium alloy; lamellar microstructure; fatigue crack propagation rate; fractograph

Corresponding author: Zhao Yongqing, Ph. D., Professor, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86250729, E-mail: trc@c-nin.com