

# 显微组织对近 $\alpha$ 钛合金 BT-20 疲劳裂纹扩展的影响

郭庆清<sup>1</sup>, 王佳亮<sup>2</sup>, 吴永红<sup>3</sup>, 姜永正<sup>4</sup>

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南科技大学 海洋矿产资源探采  
装备与技术湖南省工程实验室, 湖南 湘潭 411201; 3. 通号轨道车辆有限公司, 湖南 长沙 410100;  
4. 湖南科技大学 湖南省机械设备健康维护重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘 要:** 通过显微镜及电子背散射衍射试验对近  $\alpha$  钛合金 BT-20 的篮网、双态和魏氏组织微观结构及晶粒尺寸进行测定, 并采用拉伸与疲劳裂纹扩展试验进行力学性能以及裂纹扩展研究, 讨论微观组织对裂纹扩展速率、路径和断口形貌的影响。结果表明, 双态组织的强度和延伸率最好, 魏氏组织最差; 双态组织的断口为解理断裂, 裂纹碰到大尺寸初生  $\alpha$  晶粒时发生穿晶失效, 形态呈直线状, 从而具有较高的扩展速率; 篮网和魏氏组织的断口形式为沿相界断裂, 裂纹扩展路径在通过  $\alpha$  晶粒集束边界时改变方向, 路径呈曲线状, 扩展速率相对较低, 从而具有较好的耐裂纹性能。

**关 键 词:** BT-20; 近  $\alpha$  钛合金; 疲劳裂纹扩展; 显微组织; 断口形貌

**中图分类号:** TF 777.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)03-0345-05

## Influence of Microstructure on the Fatigue Crack Growth in Near- $\alpha$ Ti Alloy BT-20

GUO Qing-qing<sup>1</sup>, WANG Jia-liang<sup>2</sup>, WU Yong-hong<sup>3</sup>, JIANG Yong-zheng<sup>4</sup>

(1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Equipment and Technology for Oceanic Mineral Resource, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. CRSC Railway Vehicles Co., Ltd., Changsha 410100, China; 4. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China. Corresponding author: JIANG Yong-zheng, E-mail: jiangyz186@126.com)

**Abstract:** The lamellar, bimodal, acicular microstructures and grain morphology of BT-20 near- $\alpha$  Ti alloy were observed by optical microscopy and electron backscatter diffraction. Tensile and fatigue crack growth tests were carried out to analyze the mechanical property and the influence of microstructures on fatigue crack growth rate, path and fractography. The results showed that the bimodal microstructure has the highest strength and best ductility, and acicular microstructure exhibits the lowest strength and poor ductility. The fractography of bimodal microstructure is cleavage fracture. The transgranular fracture happens when crack encounters the large primary  $\alpha$  grain, which results in a relatively straight profile of the crack and explains the higher crack growth rate. The fractography of the lamellar and acicular microstructures is intergranular fracture. The crack path changes direction when encounters boundaries of two colonies of  $\alpha$  grains, which results in tortuosity of the crack, lower crack growth rate and a better crack growth resistance.

**Key words:** BT-20; near- $\alpha$  Ti alloy; fatigue crack growth; microstructure; fractography

俄系 BT-20 是一种近  $\alpha$  钛合金, 具有密度小、比强度高、耐腐蚀及耐高低温性能好等优良性

能, 在航空航天领域应用非常广泛。BT-20 经常应用于超音速战机的主体构件的制造, 该构件一

般由板材或者锻件焊接组成,在服役期间承受巨幅波动的载荷,在恶劣工况下容易产生疲劳裂纹.一旦疲劳裂纹迅速扩展,将对飞行器的正常工作产生严重后果,因此研究 BT-20 的疲劳特性以及裂纹扩展行为十分重要.目前针对 BT-20 疲劳性能研究主要集中在关于不同的轧制方向对裂纹扩展速率的影响<sup>[1-2]</sup>,而有关研究表明,载荷比<sup>[3-5]</sup>、微观组织<sup>[6-8]</sup>以及环境因素<sup>[9-10]</sup>会对钛合金的疲劳裂纹扩展行为产生重要影响,因此本文着重从微观组织的角度对 BT-20 的力学性能及疲劳裂纹扩展行为进行研究.BT-20 的微观组织结构主要受合金成分、加工变形工艺和热处理工艺<sup>[11]</sup>的影响,根据这些条件会生成篮网、双态和魏氏三种不同类型和不同尺寸的显微组织.本文通过三种不同的加工工艺分别制得拥有篮网、双态和魏氏三种不同类型组织的试样,采用光学显微镜及电子背散射衍射试验对三种试样的微观结构及晶粒尺寸进行了观测,并通拉伸试验与疲劳裂纹扩展试验对这三种组织进行了测试分析,讨论了它们对力学性能以及疲劳裂纹扩展速率、路径以及断口形貌的具体影响.

1 微观结构及晶粒尺寸

BT-20 的成分为 Ti-6Al-2Zr-1.5Mo-1.5V,本文研究的 BT-20 试件的具体化学成分

如表 1 所示.试件中的篮网、双态及魏氏组织是分别通过轧制、锻造和焊接制造得到.通过光学显微镜分别对轧制、锻造和焊接得到的试件进行组织观察,三种不同试件的微观组织及对应电子背散射衍射(EBSD)图如图 1 所示.通过轧制得到的组织主要为篮网组织:原始  $\beta$  晶粒沿轧制方向被拉长,篮网  $\alpha$  集束的分布为随机分布,没有方向性,微观组织如图 1a 所示.对应的 EBSD 图见图 1d;同一个集束内的每个  $\alpha$  片条的分布方向大致相同.锻件的微观组织主要为双态组织,如图 1b 所示:包含初生  $\alpha$  晶粒(亮)和转变  $\beta$  组织(暗).双态组织对应的 EBSD 图如图 1e 所示:初生  $\alpha$  晶粒(亮)和转变  $\beta$  组织的尺寸相近,其中转变  $\beta$  组织由析出的条状  $\alpha$  和条状  $\alpha$  之间的残余  $\beta$  组成,还能看到较大的原始  $\beta$  晶粒.魏氏组织由 2 块具有篮网组织的试件焊接得到,熔融区包括位于焊缝顶部的尺寸较大呈柱状的原始  $\beta$  晶粒,以及在底部的等轴原始  $\beta$  晶粒.原始  $\beta$  晶粒由于迅速冷却形成片状的马氏体  $\alpha$  晶粒,如图 1c 所示.焊接区组织的 EBSD 图如图 1f 所示: $\alpha$  相呈集束状排列,每个集束内的  $\alpha$  晶粒具有相似的特性.

表 1 BT-20 试样的化学组成(质量分数)

Table 1 Chemical composition of BT-20 alloy %

Al	Zr	Mo	V	Fe	C	Si	O	N	Ti
6.8	2.1	1.4	1.6	0.11	0.1	0.15	0.15	0.05	其余

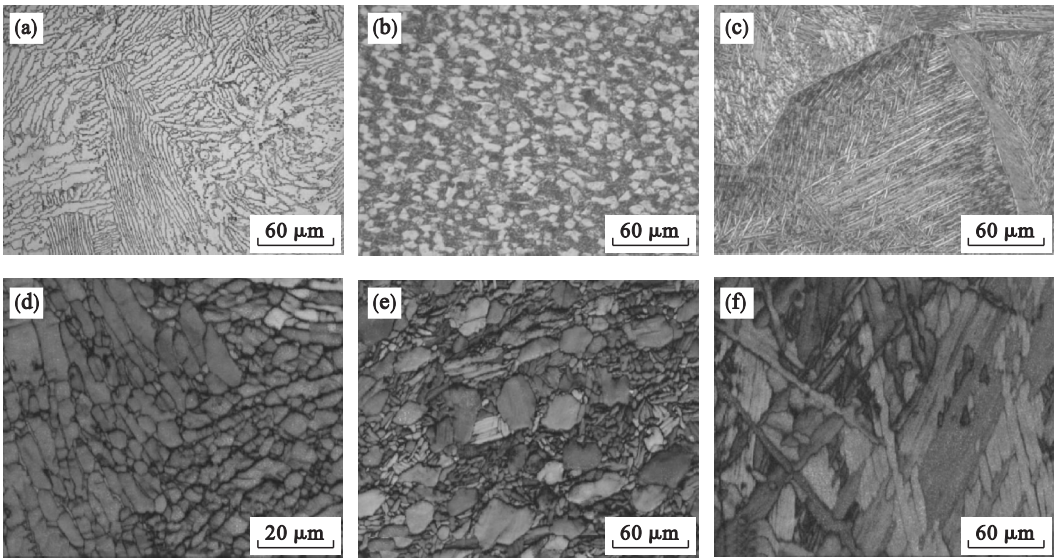


图 1 三种组织形态及 EBSD 图

Fig. 1 Three microstructures and EBSD maps

(a)—篮网组织;(b)—双态组织;(c)—魏氏组织;(d)—篮网组织 EBSD 图;  
(e)—双态组织 EBSD 图;(f)—魏氏组织 EBSD 图.

三种不同组织的晶粒尺寸平均值见表 2. 由表 2 可知,篮网组织中的集束尺寸最大,为

45  $\mu\text{m}$ ;但是篮网集束中板条厚度仅约为 4.3  $\mu\text{m}$ ,魏氏组织中板条的平均厚度约为 3.4  $\mu\text{m}$ . 双态组织中初生  $\alpha$  晶粒的平均尺寸约为 6.9  $\mu\text{m}$ ,其转变  $\beta$  组织由析出的条状  $\alpha$  和条状  $\alpha$  之间的残余  $\beta$

组成,转变  $\beta$  组织的平均尺寸约为 8.7  $\mu\text{m}$ ,但是转变  $\beta$  组织中  $\alpha$  片条的平均厚度仅仅约为 1.9  $\mu\text{m}$ .

表 2 三种微观结构的平均尺寸  
Table 2 Average size of three microstructures

微观结构	组织类型	平均尺寸/ $\mu\text{m}$
篮网	板条厚度/集束尺寸	4.3/44.8
双态	转变 $\beta$ 组织中的 $\alpha$ 条厚度/初生 $\alpha$ 晶粒/转变 $\beta$ 组织	1.9/6.9/8.7
魏氏	板条厚度	3.4

## 2 试 验

### 2.1 拉伸试验

将具有三种不同微观组织的材质制成拉伸试样,试样为棒材,试验按照国标 GB/T 228—2002 进行,拉伸测试在室温下进行,控制拉伸应变速率为  $10^{-3}\text{s}^{-1}$ . 拉伸得到三种材料的工程应力与应变曲线如图 2 所示. 图 2 中三种试样的屈服强度分别为:双态组织屈服强度为 938 MPa,篮网组织为 910 MPa,魏氏组织为 866 MPa;双态组织延伸率为 17%,篮网组织延伸率为 14%,魏氏组织延伸率为 6%,这说明双态组织的强度和延伸率最好,其次是篮网组织,焊接件的强度和延伸率最差.

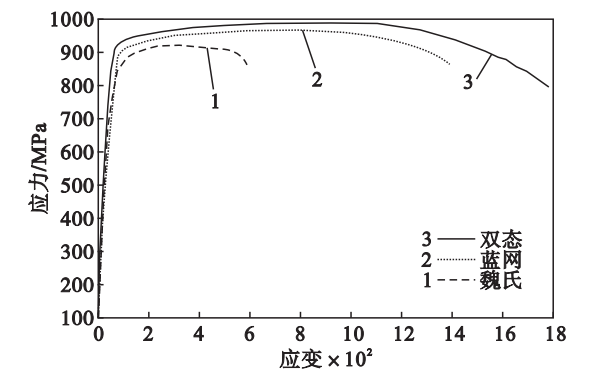


图 2 三种组织的应力-应变关系曲线  
Fig. 2 Stress-strain curves of three microstructures

### 2.2 疲劳裂纹扩展试验

裂纹扩展试验按国标 GB/T 6398—2000 进行,采用紧凑拉伸 CT 型试样. 试样宽 50 mm,厚 12.5 mm,初始切口长度为 15 mm. 测试设备采用谐振疲劳试验机,应力比  $R$  为 0.3,加载频率为 90 Hz.

图 3 为三种不同组织的试件测得的  $da/dN$  随应力强度因子范围  $\Delta K$  变化曲线,三种组织的疲劳裂纹扩展速率曲线均遵循 Paris 裂纹扩展模式,其中双态组织裂纹扩展速率最高,而魏氏组织

与篮网组织的曲线几乎重合. 通过计算得到三种组织应力强度因子幅值门槛值  $\Delta K_{th}$ ,其中魏氏组织的  $\Delta K_{th}$  最高,而双态组织的  $\Delta K_{th}$  最低,双态组织的  $\Delta K_{th}$  为 4.1  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ,篮网组织为 6.0  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ,魏氏组织为 6.5  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ .

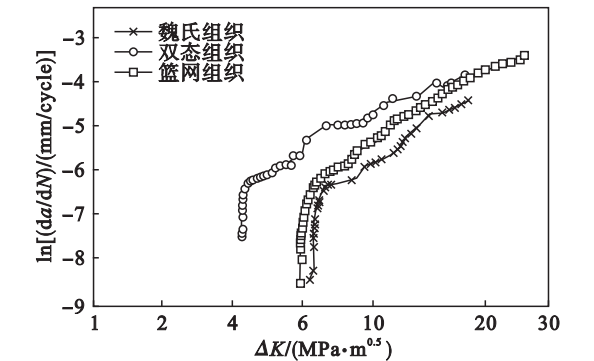


图 3 疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子幅值  $\Delta K$  的关系对数图  
Fig. 3 Log-log plots of the crack growth rate  $da/dN$  vs. the applied stress intensity factor range  $\Delta K$

## 3 裂纹扩展路径和断口

### 3.1 裂纹扩展路径

CT 形试样表面的裂纹形态采用光学显微镜进行检测,图 4a ~ 图 4d 分别显示篮网、双态和魏氏组织的裂纹形态:裂纹在篮网组织中扩展时在篮网集束内部沿直线扩展,但是在 2 个篮网集束之间明显改变方向,如图 4a 中的箭头所示. 对于双态组织而言,裂纹扩展方向受微观组织的影响不大,在通过初生  $\alpha$  晶粒和转变  $\beta$  组织时裂缝方向均没有发生明显的改变,如图 4b 所示. 对于具有魏氏组织的焊接试样而言,原始晶粒对裂纹扩展的方向没有任何影响(见图 4c). 但是对更小尺寸的片条状  $\alpha$  晶粒进行观察,可以发现这些片条状  $\alpha$  晶粒在原始  $\beta$  晶粒基体上的方向分布是随机的,且这些小尺寸片条状  $\alpha$  晶粒对裂纹扩展路径的影响与篮网组织中的扩展方向类似:在集束



的交界处裂纹扩展方向发生了变化,导致裂纹显得有些曲折,见图 4d.

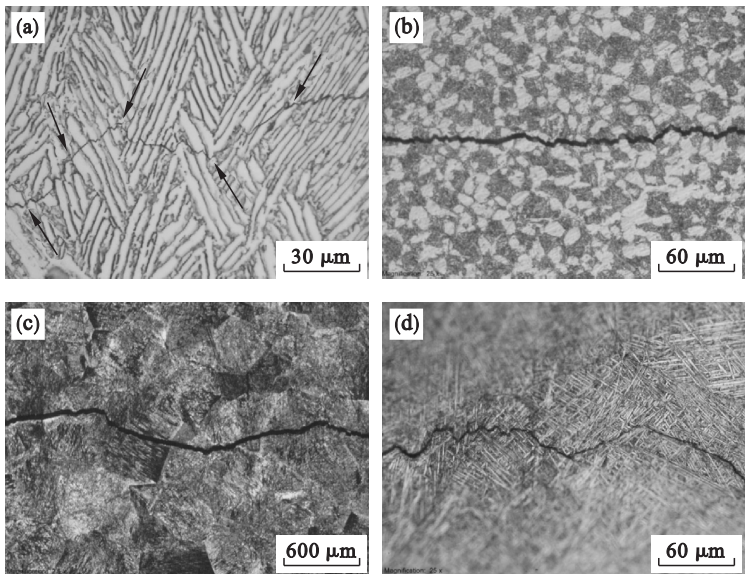


图 4 裂纹扩展路径  
Fig. 4 Crack growth path

(a)—篮网组织的弯曲路径;(b)—双态组织中的直裂纹;  
(c)—焊件的裂纹扩展通过原始晶粒;(d)—焊件的裂纹扩展通过魏氏晶粒.

3.2 断口形貌

试样的裂纹表面通过扫描电镜检测,断口如图 5 所示. 篮网组织的断口如图 5a 所示,显示在集束内呈现疲劳条带形貌. 图 5b 显示篮网组织裂纹扩展时,裂纹倾向于沿  $\alpha$  晶粒集束断开而不是沿单个的晶粒断开,其中仅极少数区域显示断裂面为小刻面,其他区域均显示层断裂面,为方便观察,有着相似断口的片状晶粒群采用平行线划定

在裂纹表面上. 双态组织的断口显示为解理断裂,如图 5c 所示;疲劳裂纹在通过大尺寸初生  $\alpha$  晶粒形成了平整的小刻面;而在通过转变  $\beta$  组织时,裂纹沿小尺寸的  $\alpha$  片条与残余  $\beta$  之间的相界断裂. 图 5d 为魏氏组织的断口形貌,显示裂纹表面分布有很多没断裂的  $\alpha$  片条. 这表示裂纹扩展通过片状  $\alpha$  时发生沿  $\alpha$  片条的边界断裂,而非穿晶断裂.

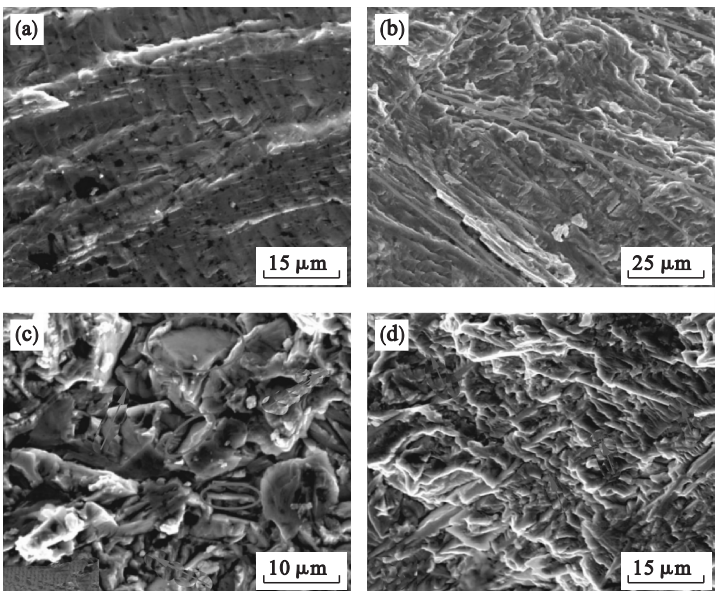


图 5 断口形貌  
Fig. 5 The fractograqhy profile

(a)—篮网组织的疲劳条带;(b)—篮网组织中的片条集束;  
(c)—双态组织的断口形貌;(d)—魏氏组织的断口形貌.

## 4 讨 论

本文研究了三种常见的组织:篮网、魏氏和双态组织对 BT-20 疲劳裂纹扩展行为的影响. 测试结果表明三种组织之中双态组织的疲劳裂纹扩展速度最高且应力强度因子门槛值最低,篮网和魏氏组织的疲劳裂纹扩展速率相差不大,且它们的应力强度因子门槛值比双态组织要高,这与三种组织的断口形貌有密切联系. 双态组织的断口形貌(图 5c)主要为  $\alpha$  晶间断裂形成的小刻面,这是典型的解理断裂. 篮网组织断口呈疲劳条带状(图 5b),魏氏组织断口表面存大量未失效的  $\alpha$  晶粒(图 5d),这说明篮网组织和魏氏组织断口以沿小尺寸  $\alpha$  片条的边界断裂为主. 通常来说断口为解理断裂的裂纹比沿相界断裂的裂纹扩展更快,这导致双态组织具有较快的裂纹扩展速率.

双态组织的断口显示仍有小尺寸  $\alpha$  晶粒并未发生失效(图 5c),这说明双态组织中裂纹扩展碰到小尺寸  $\alpha$  片条时(尺寸平均值为 $1.9\ \mu\text{m}$ ),裂纹会从  $\alpha$  片条的边界面通过,而非发生穿晶;而双态组织中的裂纹扩展碰到大尺寸的初生  $\alpha$  晶粒,它将发生穿晶,这会导致裂纹形态相对较直(图 4b). 魏氏组织中  $\alpha$  片条的尺寸较小(平均尺寸 $3.4\ \mu\text{m}$ ),按理说裂纹扩展的速度应该较快,然而由于魏氏组织  $\alpha$  晶粒以集束的形式存在,裂纹扩展路径受集束的边界影响而不受单独  $\alpha$  晶粒影响,裂纹扩展在集束交界处发生偏转,这导致裂纹路径表现为曲折性,如图 4d 所示,这种裂纹路径偏转导致魏氏组织具有更好的耐裂纹性能. 篮网组织是由相似方向的  $\alpha$  晶粒集束组成,裂纹扩展显示了相似的特点,在集束交界处,裂纹发生偏转,导致裂纹路径表现为曲折性,这种裂纹路径偏转导致篮网组织具有良好的耐裂纹性能.

## 5 结 论

1) 双态组织的试样具有较高强度和较好的延展性,而魏氏组织的强度和延伸率最差.

2) 魏氏组织与篮网组织的裂纹扩展速率较低,其中魏氏组织的应力强度因子幅值门槛值  $\Delta K_{th}$  最高,对于承受变载荷的构件应该优先选择具有魏氏组织的材料以提高构件的耐疲劳性能,而双态组织裂纹扩展速率最高,应力强度因子幅值门槛值  $\Delta K_{th}$  最低,对于承受变载荷的构件应该尽量避免采用.

3) 双态组织疲劳裂纹扩展速率高的主要原因为裂纹扩展路径碰到大尺寸的初生  $\alpha$  晶粒时发生穿晶断裂,而篮网和魏氏组织中的小尺寸  $\alpha$  晶粒以集束形式存在,裂纹扩展路径在通过  $\alpha$  晶粒集束边界时会改变方向,发生沿界相断裂,从而使得篮网组织和魏氏组织的裂纹扩展速率相对较低.

### 参考文献:

- [1] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys [M]. Berlin: Wiley-VCH Gmb H & Co. KGaA, 2003.
- [2] Anne N, Jie X. An assessment of the instability of Ti and its alloys in acidic environments at elevated temperature [J]. *Journal of Light Metals*, 2001, 1(2): 119–126.
- [3] Caton M J, John R, Porter W J, et al. Stress ratio effects on small fatigue crack growth in Ti-6Al-4V [J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 38: 36–45.
- [4] Jones R, Farahmand B, Rodopoulos C A. Fatigue crack growth discrepancies with stress ratio [J]. *Theory Application of Fracture Mechanisms*, 2009, 51: 1–10.
- [5] Boyce B L, Ritchie R O. Effect of load ratio and maximum stress intensity on the fatigue threshold in Ti6Al4V [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68: 129–135.
- [6] Pilchak A L. Fatigue crack growth rates in alpha titanium: faceted vs. striation growth [J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68: 277–286.
- [7] Oguma H, Nakamura T. The effect of microstructure on very high cycle fatigue properties in Ti-6Al-4V [J]. *Scripta Materialia*, 2010, 63: 32–40.
- [8] 马英杰, 李晋炜, 雷家峰, 等. 显微组织对 TC4ELI 合金疲劳裂纹扩展路径及扩展速率的影响 [J]. *金属学报*, 2010, 46(9): 1086–1092.  
(Ma Ying-jie, Li Jin-wei, Lei Jia-feng, et al. Influence of microstructure on fatigue crack propagating path and crack growth rates in TC4ELI alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(9): 1086–1092.)
- [9] 黄新跃, 张仕朝, 鲁原, 等. TC11 和 TC4 钛合金室温/400℃疲劳裂纹扩展特性研究 [J]. *航空材料学报*, 2011, 31(5): 82–85.  
(Huang Xin-yue, Zhang Shi-chao, Lu Yuan, et al. Investigation on fatigue crack propagation behavior of TC11 and TC4 Ti alloys at room temperature and 400℃ [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(5): 82–85.)
- [10] Ding J, Hall R, Byrne J. Effects of stress ratio and temperature on fatigue crack growth in a Ti-6Al-4V alloy [J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27 (10/11/12): 1551–1558.
- [11] 赵永庆, 洪权, 葛鹏. 钛及钛合金金相图谱 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.  
(Zhao Yong-qing, Hong Quan, Ge Peng. Ti and Ti alloy metallograph [M]. Changsha: Central South University Press, 2010.)