

文章编号: 1001-4888(2017)01-0057-06

TC21 钛合金显微组织对超长寿命疲劳行为的影响^{*}

郑逸超, 聂宝华, 宗尉萌, 张 崢, 赵子华

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 本文主要研究钛合金的网篮尺寸对于超声疲劳行为的影响。研究发现, 对于 TC21 钛合金, 高应力下疲劳裂纹萌生于试样表面; 低应力下疲劳裂纹萌生于试样亚表面。最大应力一循环次数(S-N)曲线显示, 在两段连续下降的曲线之间有一个表面萌生向内部萌生的转变平台。对于网篮尺寸为 $60\mu\text{m}$ 的钛合金, 转变平台对应的应力幅为 540MPa, 疲劳极限为 430MPa。网篮尺寸为 $40\mu\text{m}$ 的转变平台应力幅为 600MPa, 疲劳极限为 530MPa。分析得知网篮尺寸为 $60\mu\text{m}$ 的 TC21 钛合金疲劳性能低于网篮尺寸为 $40\mu\text{m}$ 的 TC21 钛合金。

关键词: 钛合金; 超声疲劳; 显微组织; 网篮尺寸

中图分类号: TG146.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-301

0 引言

TC21 钛合金是我国开发的新一代航空金属, 具有强度高、韧性好、综合力学性能优异等优点, 现已广泛应用于航空装备结构件, 例如飞机的机翼接头结构件、机身与起落架连接框、吊挂发动机接头等部位以及对强度及耐久性要求高的重要或关键承力部件^[1]。这些航空结构件在服役期间, 所承受的交变应力的循环次数高达 10^9 甚至 10^{12} 次, 其疲劳失效属于超高周疲劳失效, 基于传统疲劳极限的寿命预测方法已经不适用。因此, 很有必要对钛合金超长寿命疲劳行为进行研究。而且, 基于传统疲劳极限的寿命预测方法往往没有考虑材料的微观组织对超高周疲劳行为的影响, 因此, 从微观组织会对超高周疲劳性能产生影响的角度的角度, 研究 TC21 合金材料的超高周疲劳行为, 对于我国的航空航天结构件的高可靠性超长寿命设计具有重要的意义。中科院沈阳金属所的左景辉等^[2]研究了 Ti-6Al-4V 双态和网篮两种组织的钛合金的超声疲劳性能, 通过扫描电镜观察疲劳断口形貌, 发现高应力状态下疲劳裂纹从表面萌生, 低应力状态下疲劳裂纹从内部萌生。Mahajan 和 Margolin^[3]发现, 在 Ti-6246 合金中, 大的 α 晶粒更易萌生疲劳裂纹, 并推测与滑移长度增加有关。Boyer 等^[4]认为 $\alpha+\beta$ 钛合金的疲劳裂纹通常都是萌生在 α 相中。Bathias 等^[5]研究发现, 裂纹的萌生往往发生在微观区域 α_p 晶粒基底或线滑移处。此外, 疲劳变形尺度会有所不同, 这取决于微观结构和加工条件。以上这些研究都涉及到了材料的微观组织对疲劳性能的影响。但对于 TC21 合金, 暂时还没有见到这方面的研究。因此, 本论文主要探究 TC21 合金网篮尺寸对超高周疲劳性能的影响。

1 实验过程

1.1 实验材料

本论文所用的材料是 TC21 钛合金, 其化学成分如表 1 所示。

热处理状态为双重热处理: 900°C 保温 2h, 空冷; 600°C 保温 4h, 空冷。本文主要研究两种网篮尺寸

^{*} 收稿日期: 2016-08-15; 修回日期: 2016-09-30

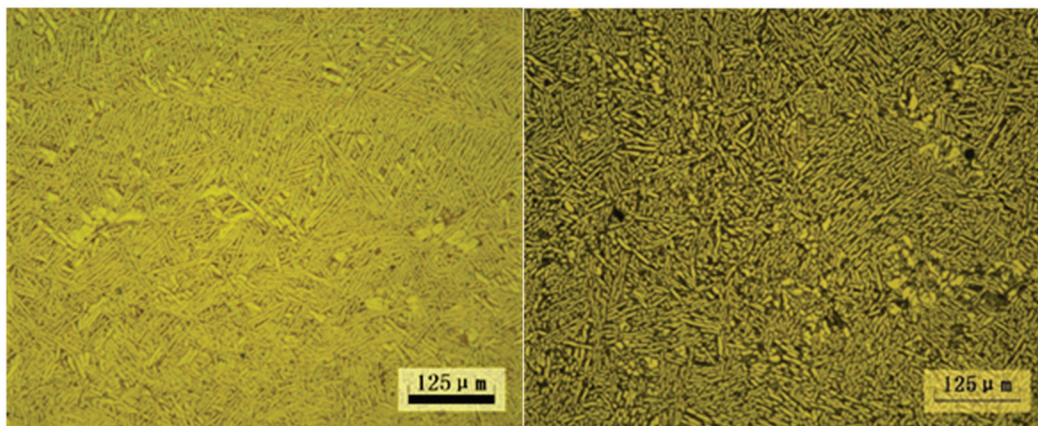
通讯作者: 赵子华(1979—), 博士, 副教授。主要研究领域: 失效分析与无损检测。Email: zhzh@buaa.edu.cn

(60 μm 与 40 μm)的 TC21 钛合金的超高周疲劳行为。两种网篮尺寸的 TC21 钛合金的显微组织如图 1 所示,抗拉强度分别为 1076MPa 与 1120MPa,屈服强度分别为 970MPa 与 1030MPa。由图 1 可知,TC21 钛合金为双片层组织的网篮结构,由 α 和 β 两相组成。显微组织中有较粗大的原始破碎的初生 α_p 相, α 相和 β 相相互交错,呈编织状。

表 1 化学成分

Tab. 1 Chemical component

Al	Zr	Mo	Cr	Nb	Sn	Ti
6.26	2.13	2.38	0.96	1.84	1.87	余量

(a) 网篮平均尺寸60 μm (b) 网篮平均尺寸40 μm 图 1 TC21 钛合金显微组织:(a) 网篮平均尺寸 60 μm ;(b) 网篮平均尺寸 40 μm Fig. 1 Microstructure of TC21 alloy: (a) the average basket size is 60 μm ; (b) the average basket size is 40 μm

1.2 疲劳试样表面处理

为了消除机械加工对材料疲劳性能的影响,对加工后的 TC21 钛合金的疲劳试样进行电解抛光处理。抛光液组成为甲醇 59%、正丁醇 35%、高氯酸 6%。试验条件:不锈钢做阴极,钛合金试样做阳极,液氮冷却电解液,温度控制在 -20°C 左右,电压 20~25V,抛光 30s。在电解抛光时,注意试样与阴极平行,并且采用一定速率的搅拌,使电解抛光更加均匀。

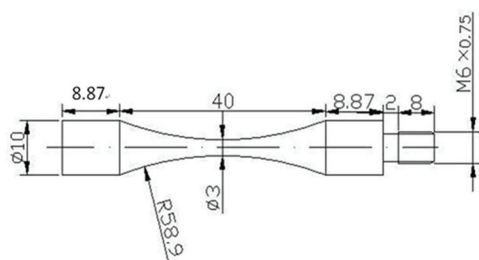


图 2 TC21 钛合金超声疲劳试样尺寸图

Fig. 2 The size of TC21 alloy ultrasonic fatigue specimen

为了适应不同材料疲劳性能的试验需要,并使试件能获得试验所需的应力(应变)值,超声疲劳试件通常设计成变截面圆柱形^[6]。为了缩短试样长度并加速疲劳试验,试样可以设计为沙漏型,这样可以使试样获得很高的应力放大系数,并使其中间横截面产生最大应力^[7]。经过计算,设计的超声试样尺寸如图 2 所示。

2 实验结果与分析

2.1 S—N 曲线分析

TC21 合金的超高周疲劳 S—N 曲线如图 3 所示。TC21 钛合金的 S—N 曲线呈现双台阶特征。疲

1.3 实验方法与试样设计

超声疲劳试验是基于压电致伸缩原理并利用高能超声波谐振技术,实现 20kHz 加载频率的疲劳试验。当疲劳试样裂纹萌生和扩展后,频率降低,超声激发器补偿以满足共振频率。一旦不能补偿,则认为发生疲劳断裂。而本次实验所采用的仪器是岛津 USF-2000 超声疲劳试验机,其主要技术指标为:实验频率 20kHz $\pm$ 300Hz,试样端面振幅 $\pm$ 50 μm ,试验载荷范围 100~1200MPa。

劳裂纹在高应力幅下萌生于试样表面,而在低应力幅下萌生于试样亚表面或者试样的内部。

对于网篮尺寸为 $60\mu\text{m}$ 的 TC21 钛合金,当疲劳寿命在 5×10^5 周次以下时,疲劳裂纹萌生于试样表面;在 $5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ 周次范围内,疲劳裂纹萌生于试样亚表面。在两段连续下降的 S—N 曲线之间有一个表面萌生向内部萌生的转变平台,平台应力对应的应力幅为 540MPa 。在 $2 \times 10^7 \sim 1 \times 10^9$ 周次寿命,存在亚表面萌生的疲劳极限,其值为 430MPa 。网篮尺寸为 $40\mu\text{m}$ 的 TC21 钛合金的疲劳寿命(S—N)曲线具有类似的规律,表面萌生向内部萌生的转变平台应力幅为 600MPa ,亚表面萌生的疲劳极限为 530MPa 。而且,网篮尺寸为 $60\mu\text{m}$ 的 TC21 钛合金在 $10^5 \sim 10^9$ 周次范围内疲劳性能低于网篮尺寸为 $40\mu\text{m}$ 的 TC21 钛合金,这表明细化 TC21 钛合金网篮尺寸,可以提高 TC21 钛合金超高周疲劳性能。

2.2 疲劳断口分析

TC21 钛合金(网篮尺寸 $60\mu\text{m}$) $\sigma=550\text{MPa}$, $N=2.37 \times 10^5$ 周次疲劳断口形貌如图 4 所示。疲劳裂纹呈试样表面单源起裂,疲劳裂纹扩展区的宏观特征为断面较平坦,且观察到明显的疲劳放射线特征。而在低应力幅下,疲劳裂纹萌生于试样亚表面(图 5 与图 6)。在裂纹源区观察到 α/β 片层微观特征,在 α 片层中存在明显的细晶粒特征。推测这与材料疲劳过程中的位错运动模式相关。钛合金的层错能较高,在疲劳过程中位错主要以波状滑移为主,容易形成胞状亚结构^[9]。这种胞状亚结构的断裂能量低于未形成胞状亚结构的能量,在循环载荷下,胞状亚结构发生转动,微裂纹从胞壁萌生^[8,10]。

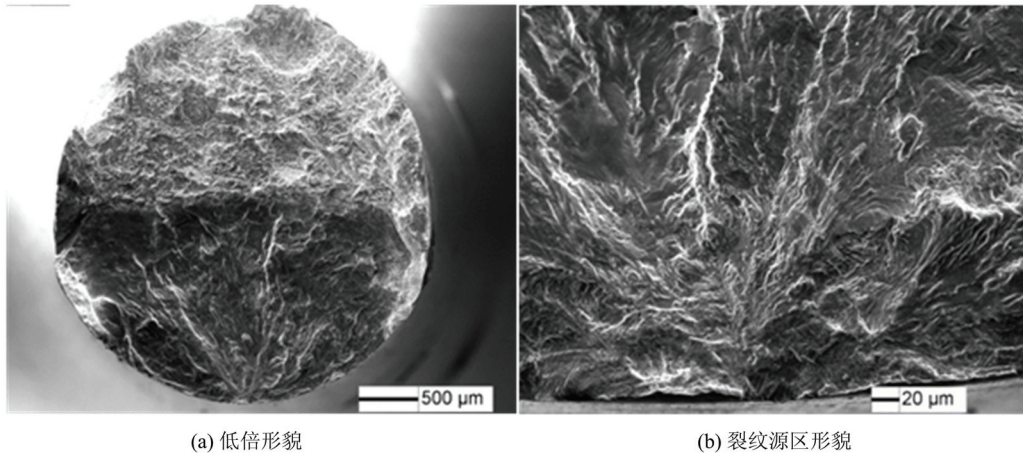


图 4 TC21 钛合金(网篮尺寸为 $60\mu\text{m}$) $\sigma=550\text{MPa}$, $N=2.37 \times 10^5$ 周次疲劳断口

Fig. 4 The fracture surface of TC21 alloy(basket size is $60\mu\text{m}$, $\sigma=550\text{MPa}$, $N=2.37 \times 10^5$)

网篮尺寸为 $40\mu\text{m}$ 的 TC21 钛合金超声疲劳断口观察表明,在高应力幅下,疲劳裂纹从试样表面萌生,且是多源起裂或单源起裂(图 7)。当应力幅降至 530MPa 时,疲劳裂纹萌生于试样亚表面,疲劳裂纹源区呈细晶粒特征,细晶粒区外的区域为疲劳裂纹扩展形貌,如图 8 所示。与 TC21 钛合金(网篮尺寸 $60\mu\text{m}$)超高周疲劳源区断口相比,细晶粒分布显微组织特征不是非常明显。这可能与 TC21 钛合金中网篮尺寸较短有关。

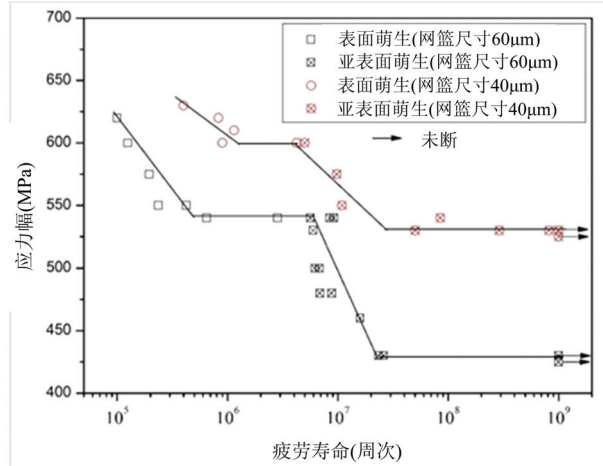


图 3 TC21 钛合金的超高周疲劳 S—N 曲线

Fig. 3 S—N curve of TC21 alloy ultrasonic test

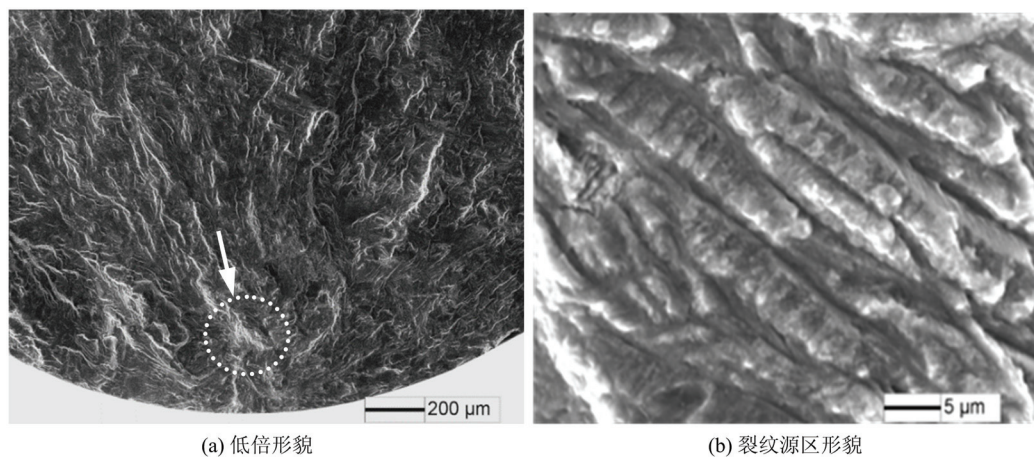


图 5 TC21 钛合金(网篮尺寸为 $60\mu\text{m}$) $\sigma=500\text{MPa}$, $N=6.66\times 10^6$ 周次疲劳断口

Fig. 5 The fracture surface of TC21 alloy(basket size is $60\mu\text{m}$, $\sigma=500\text{MPa}$, $N=6.66\times 10^6$)

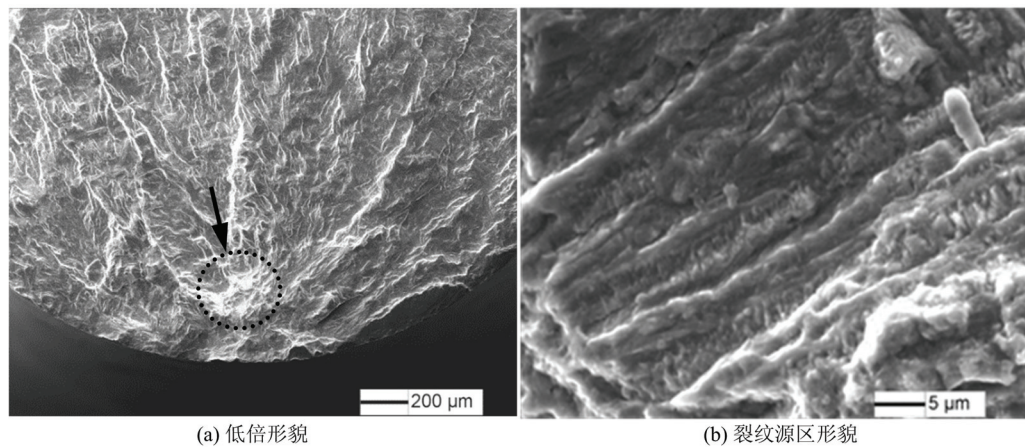


图 6 TC21 钛合金(网篮尺寸为 $60\mu\text{m}$) $\sigma=480\text{MPa}$, $N=6.86\times 10^6$ 周次疲劳断口

Fig. 6 The fracture surface of TC21 alloy(basket size is $60\mu\text{m}$, $\sigma=480\text{MPa}$, $N=6.86\times 10^6$)

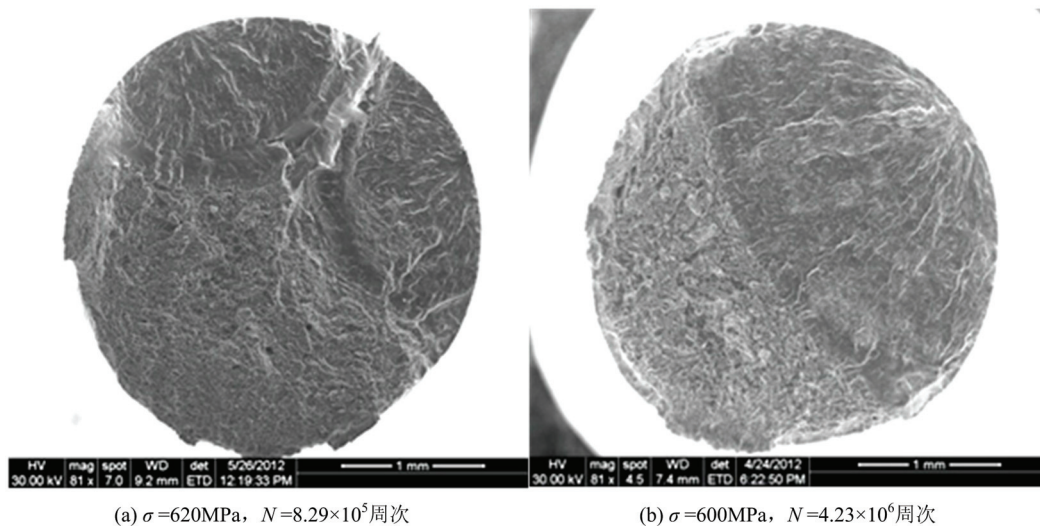


图 7 TC21 钛合金(网篮尺寸 $40\mu\text{m}$)疲劳低倍断口形貌

Fig. 7 The fracture surface of TC21 alloy(basket size is $40\mu\text{m}$)

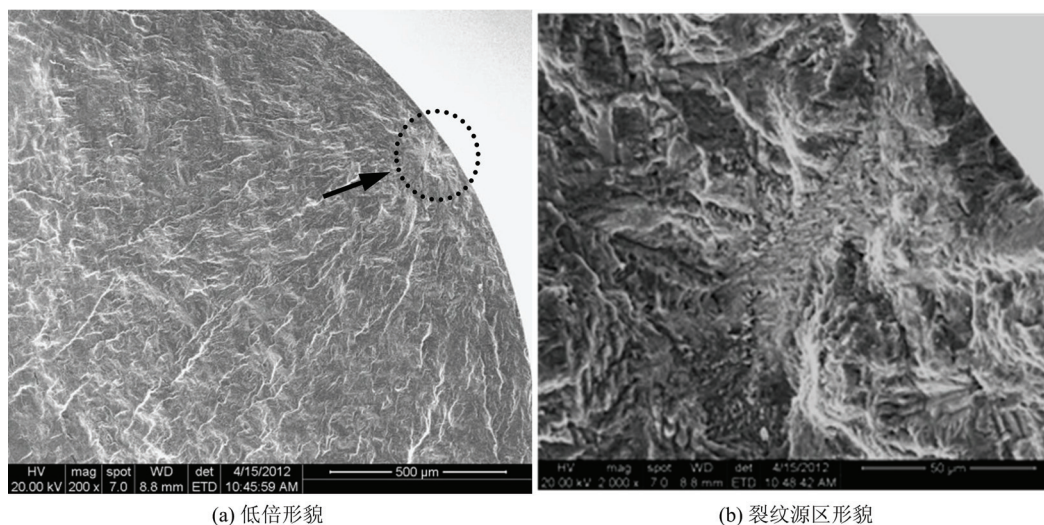


图8 TC21 钛合金(网篮尺寸 $40\mu\text{m}$) $\sigma=530\text{MPa}$, $N=2.91\times 10^8$ 周次疲劳断口

Fig. 8 The fracture surface of TC21 alloy(basket size is $40\mu\text{m}$, $\sigma=530\text{MPa}$, $N=2.91\times 10^8$)

3 结论

(1) TC21 钛合金在高应力幅下疲劳裂纹萌生于试样表面,低应力幅下疲劳裂纹萌生于试样亚表面或者内部。这表明疲劳裂纹表面向内部萌生的转移机制可能与疲劳过程中的表面损伤与内部损伤的竞争有关。这也与文献[8]的结论“在高应力幅下,材料内部应力集中得到释放,表面裂纹萌生是主要的;在低应力幅下,材料内部应力集中不能完全释放,内部裂纹萌生占据主导地位”相一致。

(2) 钛合金在超高周疲劳过程中会形成胞状亚结构,裂纹在胞壁处萌生,从而使断口呈现出细晶粒特征。

(3) 从 $S-N$ 曲线可以看出,细化 TC21 钛合金网篮尺寸,可以提升 TC21 钛合金超高周疲劳性能。细小的网篮尺寸可以获得更高的疲劳裂纹扩展门槛值。

参考文献:

- [1] 吴崇周, 李兴无, 黄旭, 等. TA15 钛合金疲劳裂纹扩展与显微组织的关系[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(12):2128—2131 (WU Chongzhou, LI Xingwu, HUANG Xu, et al. Relationship of fatigue crack propagation and microstructure for TA15 alloy[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2007, 36(12):2128—2131 (in Chinese))
- [2] Zuo J H, Wang Z G, Han E H. Effect of microstructure on ultra-high cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 473(1):147—152.
- [3] Mahajan Y, Margolin H. Deformation associated with surface cracks and alpha particles in an α - β titanium alloy [J]. Scripta Metallurgica, 1979, 13(6):451—456.
- [4] Boyer R R, Hall J. Microstructure-property relationships in titanium alloys-Critical review[C]. Titanium'92: Science and Technology, 1993:77—88.
- [5] Bathias C, El Alami K, Wu T Y. Influence of mean stress on Ti6Al4V fatigue crack growth at very high frequency[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 56(2):255—264.
- [6] 周承恩, 谢季佳, 洪友士. 超高周疲劳研究现状及展望[J]. 机械强度, 2004(5):257—259 (ZHOU Chengen, XIE Jijia, HONG Youshi. Retrospect and prospect of very high cycle fatigue[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004(5):257—259 (in Chinese))
- [7] Guan Xin, Meng Yanjun. Research and development on ultra high cycle fatigue[J]. Research on Iron & Steel, 2009, 37(1):58—62.
- [8] Shanyavskiy A A, Banov M D, Zakharova T P. Principles of physical mesomechanics of nanostructural fatigue of metals. Part II. Subsurface fracture of EP741 heat-resistant alloy [J]. Physical Mesomechanics, 2010, 13:143—

151.

- [9] 潘晓霞, 余勇, 陈裕泽, 等. 温度和应变速率对 FeCrNi 合金位错组态的影响[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(6): 65—68 (PAN Xiaoxia, YU Yong, CHEN Yuze, et al. Dislocation configuration of FeCrNi alloy at different temperature and strain rate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19(6):65—68 (in Chinese))
- [10] Shanyavskiy A A, Banov M D. The twisting mechanism of subsurface fatigue cracking in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1 Si alloy [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77:1896—1906.

On the Effect of Microscopic Structure on Super Long Life Fatigue Behavior of TC21 Titanium Alloy

ZHENG Yi-chao, NIE Bao-hua, ZONG Wei-meng, ZHANG Zheng, ZHAO Zi-hua

(School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper mainly studies the influence of titanium alloy basket size on ultrasonic fatigue behavior. Study reveals that for TC21 titanium alloy, fatigue cracks initiate at specimen surface under high stress, while under lower stress, fatigue cracks initiate at the subsurface of specimen. S—N curve indicates that there is a transition platform between two continuous descent curve sections, which reflects the transformation from the surface cracks to the interior cracks. For titanium alloy with basket size of $60\mu\text{m}$, the stress amplitude corresponding to the transition platform is 540MPa, and the fatigue limit is 430MPa; for titanium alloy with basket size of $40\mu\text{m}$, the stress amplitude corresponding to the transition platform is 600MPa, and the fatigue limit is 530MPa. Comparative analysis shows that the fatigue properties of TC21 titanium alloy with basket size of $60\mu\text{m}$ are lower than that of TC21 titanium alloy with basket size of $40\mu\text{m}$.

Keywords: Titanium alloy; ultrasonic fatigue; microscopic structure; basket size