

高载荷条件下 TC17 钛合金常规低周疲劳和保载疲劳损伤行为

郭萍, 潘浩, 贾国玉, 侯红苗

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 研究了高应力水平下不同加载波形对 TC17 钛合金疲劳损伤的影响。结果表明, 对于在峰值应力下保载 120 s 的加载波形, TC17 钛合金的保载疲劳寿命低于无保载加载波形试验的寿命; 在相同的保载疲劳条件下, 片层组织的保载疲劳敏感性低于等轴组织。断口分析表明, 保载疲劳试样裂纹源出现在样品表面和亚表面处, 常规低周疲劳试样裂纹源出现在试样表面处, 保载疲劳断口附近小平面较常规低周疲劳断口平坦, 保载条件并未从根本上改变断裂模式。

关键词: TC17 钛合金; 高载荷条件; 保载疲劳; 损伤行为; 断口分析

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)01-0301-05

航空发动机对材料性能的要求苛刻, 发动机用钛合金部件在服役过程中会受到疲劳载荷的作用, 故改善疲劳性能, 提高飞行器的安全性、可靠性和耐久性, 可以避免发生飞行事故^[1,2]。因此对这些重要部件的疲劳寿命进行准确预测是保证航空飞行器飞行安全的关键。钛合金存在低周保载疲劳断裂问题。低周保载疲劳 (low cycle dwell fatigue, LCDF) 是指在峰值应力条件下保持一段时间的梯形波疲劳, 与普通低周疲劳 (low cycle fatigue, LCF, 三角波或正弦波) 相比, 保载疲劳更接近于飞行器实际飞行载荷谱。在相同应力条件下, LCDF 与 LCF 相比疲劳寿命显著降低的现象称为保载效应 (dwell effect)。

目前研究中, 多采用屈服强度的 85%~95% 作为保载疲劳的峰值应力进行保载疲劳性能测试^[2-4]。然而在较低的保载载荷条件下进行测试需要花费较长的时间及较高的成本, 提高保载载荷应力不但可以缩短测试周期并节约测试成本, 还能在一定程度上表征材料在实际服役过程中由于超载荷使用、设计不合理等因素引起的局部高应力条件下材料失效演变过程^[5]。Ti6242 合金由于存在较高的保载疲劳敏感效应, 其应用受到限制。设计人员针对工程应用, 急需选择一种对保载不敏感的新合金来满足设计的需求。TC17 是一种高强、高韧和高淬透性的富 β 型两相钛合金, 该合金可以提供高于 Ti-6Al-4V 和 Ti6242 合金 10%~20% 的抗拉强度, 属于一种中温高强钛合金, 是航空发动机压气机的重要选用材料之一,

主要用作气轮发动机零件, 如风扇盘和压气机盘件^[6]。因此本研究针对 TC17 合金, 采用较高的保载载荷 (应力) 进行常规低周疲劳和保载疲劳测试, 评估高载荷条件下 TC17 钛合金的保载疲劳敏感性, 对比不同加载条件下的疲劳断口特征, 为高应力条件下 TC17 的保载疲劳行为提供技术支撑, 并研究了不同加载波形对 TC17 钛合金 2 种显微组织疲劳损伤行为的影响。

1 实验

实验所用的合金为 TC17 钛合金, 名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo, 合金相变点 T_{β} 为 890 ± 5 °C。实验材料取自直径为 350 mm 的 TC17 钛合金锻棒, 沿径向取拉伸试样和低周疲劳试样。分别进行在相变点以下温度 800 °C 保温 2 h 固溶水冷, 随后在 630 °C 保温 8 h 空冷时效和相变点以上温度 910 °C 保温 1.5 h 水冷的 2 种热处理。拉伸试样为 $\phi 5$ mm \times M10 mm 圆棒, 疲劳试样为 $\phi 6$ mm \times M12 mm 圆棒。拉伸试验设备为 Instron1195 电子万能试验机, 低周疲劳试验设备为 EHF-EV200K2-070-1A 电液伺服疲劳试验机。分别采用 OlympusMG3 光学显微镜和 GMS6460 扫描电子显微镜对试样显微组织和疲劳断口进行观察与分析。

疲劳试验采用应力控制, 在室温条件下进行, 2 种加载波形如图 1 所示。一种为常规低周疲劳试验, 三角波形加载 (图 1a), 加载和卸载时间均为 1 s; 另一种加载方式如图 1b 所示, 加载和卸载时间均为 1 s, 在峰

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 陕西省重点研发一般项目 (2019GY-162)

作者简介: 郭萍, 女, 1978 年生, 博士, 教授, 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86250729, E-mail: gp8440086@163.com

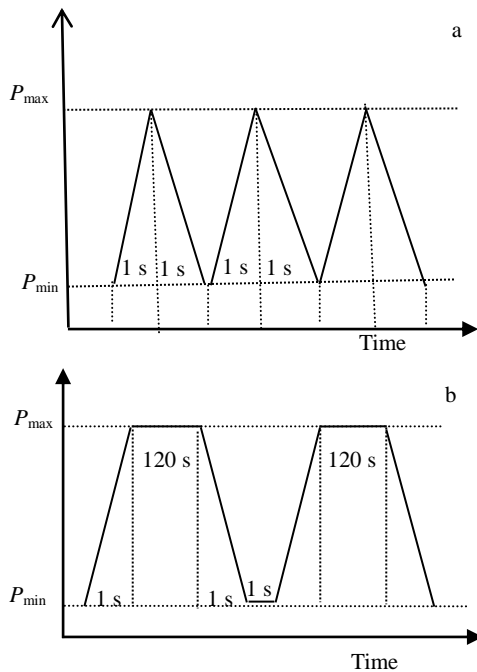


图 1 低周疲劳试验的三角波形和保载梯形波形加载方式

Fig.1 Triangular wave for low-cycle fatigue test (a) and trapezoidal wave for dwell fatigue test (b)

值应力保持 120 s。峰值应力分别取 $0.90\sigma_{p0.2}$, $0.93\sigma_{p0.2}$, $0.97\sigma_{p0.2}$, 试验过程通过计算机采集数据, 最后通过数据处理得到疲劳寿命。

2 结果与分析

2.1 微观组织

图 2 所示为 TC17 合金经 2 种工艺热处理的显微组织照片, 图 2a 为 $\alpha+\beta$ 两相区固溶时效处理的组织, 图 2b 为 β 相区处理的组织。由图 2a 可以看出, 经过两相区固溶时效的显微组织表现为典型的等轴组织, 由等轴 α 相+ β 转变组织构成, 而图 2b 表现为典型的由 β 相区处理的片层组织, 可以看出清晰的 β 晶界。

2.2 疲劳性能

实验对比分析了 TC17 合金大规格棒材等轴组织和片层组织的常规低周疲劳性能和保载疲劳性能。其中等轴组织和片层组织的屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ 分别为 1100 和 729 MPa。对等轴组织的试样进行了峰值应力为 $0.90\sigma_{p0.2}$ 、 $0.93\sigma_{p0.2}$ 、 $0.97\sigma_{p0.2}$ 的保载疲劳试验, 并选取较高的峰值应力 $0.97\sigma_{p0.2}$ 进行了低周疲劳试验。对片层组织的试样分别进行了峰值应力为 $0.97\sigma_{p0.2}$ 的低周疲劳和保载疲劳试验, 表 1 列出了 2 种组织的试样不同加载条件下的疲劳寿命。从表中看出, 当载荷应力 P_{max} 依次为 $0.90\sigma_{p0.2}$, $0.93\sigma_{p0.2}$ 和 $0.97\sigma_{p0.2}$ 时, 等轴组织的保载疲劳寿命分别为 3397、3276 和 2282 周次, 而在相同载荷应力 $0.97\sigma_{p0.2}$ 条件下, 等轴

组织的低周无保载疲劳寿命为 5750 次。片层组织在载荷应力为 $0.97\sigma_{p0.2}$ 的条件下, 保载疲劳寿命为 2422 周次, 而相同应力条件下的低周无保载疲劳寿命为 4403 周次。实验表明, 随着峰值应力的提高, 合金保载疲劳寿命下降。相同应力条件的保载疲劳寿命较低周无保载疲劳寿命低, 这种现象在其他高温合金中也出现过^[7-9]。表 1 也同时对比了 2 种组织试样在相同条件下的保载疲劳敏感性。保载疲劳敏感性 (保载效应) 通常用以下公式来表示:

$$\text{Life debit} = \frac{N^{\text{LCF}}}{N^{\text{LCDF}}} \quad (1)$$

式中, Life debit 为保载疲劳敏感性, N^{LCF} 为低周疲劳寿命, N^{LCDF} 为低周保载疲劳寿命。

从分析结果可以看出, 本实验中 TC17 钛合金等轴组织的保载疲劳敏感性为 2.52, 片层组织的保载疲劳敏感性为 1.82, 片层组织的保载疲劳敏感性较低。研究人员针对组织结构特征对部分钛合金的保载疲劳敏感性影响进行了相关研究, 揭示了不同钛合金显微组织对保载疲劳敏感性的影响规律^[10,11], 表明了钛合金保载疲劳敏感性与组织结构参数及尺寸分布等相关。Liu 等人^[12,13]对 Ti60 合金的双态组织进行了研究, 认为保载疲劳敏感性会随着初生 α 相体积分数的变化。研究也表明^[14], 钛合金的保载疲劳敏感性与合金微结构有很强

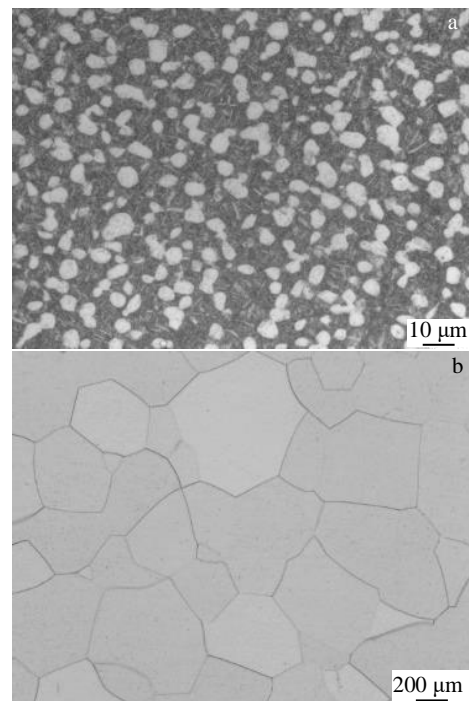


图 2 TC17 合金在 $\alpha+\beta$ 两相区热处理和 β 相区热处理后的组织
Fig.2 Microstructures of TC17 alloy after heat treatment in $\alpha+\beta$ zone (a) and β zone (b)

表 1 2 种组织的 TC17 钛合金不同加载条件下的疲劳寿命及保载疲劳敏感性

Table 1 Fatigue life and dwell fatigue sensitivity of TC17 alloy with two kinds of microstructures under different loading conditions

Microstructure of sample	Load stress	Test condition	N_f /cycle	N^{LCF}/N^{LCDF}	State
Equiaxed	$0.90\sigma_{p0.2}$	Dwell: 120 s	3397	-	Unbroken
Equiaxed	$0.93\sigma_{p0.2}$	Dwell: 120 s	3276	-	Broken
Equiaxed	$0.97\sigma_{p0.2}$	Dwell: 120 s	2282	-	Broken
Equiaxed	$0.97\sigma_{p0.2}$	Dwell: 0 s	5750	2.52	Broken
Lamellar	$0.97\sigma_{p0.2}$	Dwell: 120 s	2422	-	Broken
Lamellar	$0.97\sigma_{p0.2}$	Dwell: 0 s	4403	1.82	Broken

的相关性。对比其他已经研究的合金，在较高的载荷应力条件下，TC17 合金等轴组织和片层组织均具有较低的保载疲劳敏感性，并且片层组织的保载疲劳敏感性较等轴组织的低，TC17 较低的保载疲劳敏感性与材料的弱织构有一定关系。

2.3 断口分析

实验首先分析了等轴组织试样在不同峰值应力加载条件下的保载疲劳断口形貌，图 3 给出了峰值应力分别为 $0.90\sigma_{p0.2}$ ， $0.93\sigma_{p0.2}$ ， $0.97\sigma_{p0.2}$ 时保载疲劳断口裂纹源附近的形貌。从图 3 可以发现，在较低的峰值应力条件下，裂纹源附近存在较大范围的裂纹小平面，利于变形的晶粒在疲劳载荷作用下得到均衡的发展（图 3a）。与疲劳加载方向接近垂直的 α 相参与变形并沿基面分离，形成微小的裂纹后扩展、搭接，进一步形成大裂纹导致材料失效。由于较高的峰值应力可促进应变累积，加速了裂纹源晶界处的位错运动及应力重新分配，从而导致裂纹源附近解理面的形成。随着疲劳峰值应力增大，参与可变形的晶粒增加，微裂纹从裂纹源附近最有利变形的晶粒萌生、扩展并发生搭接，形成大裂纹导致材料发生失效，在图中表现为随着峰值应力增加，相同区域的疲劳裂纹更加明显。进一步增大峰值应力，其他

位向晶粒在高载荷应力的作用下也会参与变形，进一步加速裂纹扩展。同时还发现，随着峰值应力增大，保载疲劳断口裂纹源附近疲劳条纹间距变宽，裂纹扩展加快，在高载荷保载条件下，裂纹会快速扩展进入瞬断区导致失效。

利用扫描电镜进一步分析了不同加载波形的 TC17 钛合金的断口特征。图 4 为室温条件下的等轴组织试样在 $0.97\sigma_{p0.2}$ 峰值应力下低周疲劳和保载疲劳的断口形貌。从图 4 中可以看出，在相同载荷的应力条件下，等轴组织的常规低周疲劳断口裂纹源出现在试样表面处，如图 4a 所示，而保载疲劳断口的裂纹源在试样的表面和亚表面处均有出现，如图 4e 所示。由于在载荷的作用下发生位错的堆积或位错间相互作用，引起了表面的准解理断裂，从而形成了许多准解理小平面，因此 2 种加载方式裂纹源附近均出现了许多准解理小平面，如图 4b，4f。其区别表现在保载疲劳断口小平面密度高于常规低周疲劳断口，低周疲劳断口源区附近小平面起伏大，表现为更加粗糙的表面断裂特征（图 4b），保载疲劳断口附近的小平面整体比较平坦（图 4f）。保载疲劳断口裂纹源附近的小平面较低周疲劳裂纹源附近小平面的亮，这主要与应力轴与小平面的倾斜角度有关^[15]。随着加载的

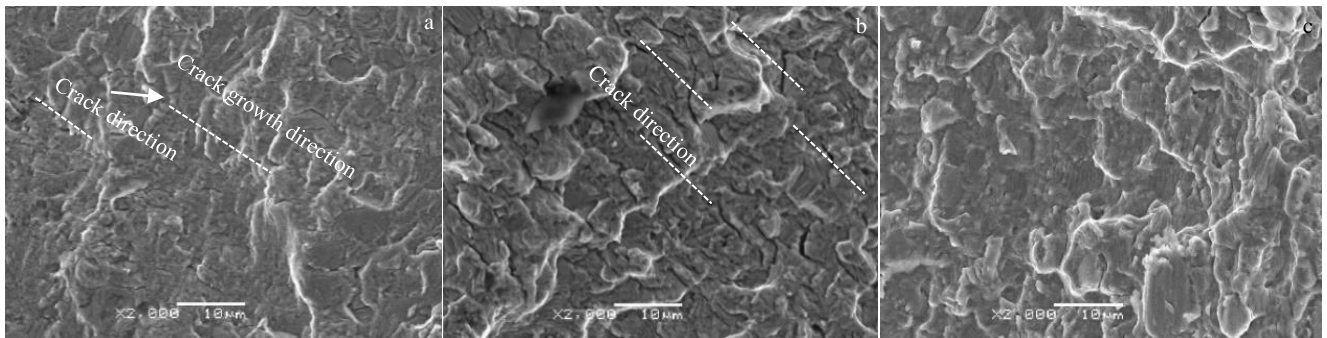


图 3 等轴组织试样在不同峰值应力下的保载疲劳断口形貌

Fig.3 Dwell fatigue fracture morphologies of equiaxed structure samples under different peak stresses: (a) $0.90\sigma_{p0.2}$, (b) $0.93\sigma_{p0.2}$, and (c) $0.97\sigma_{p0.2}$

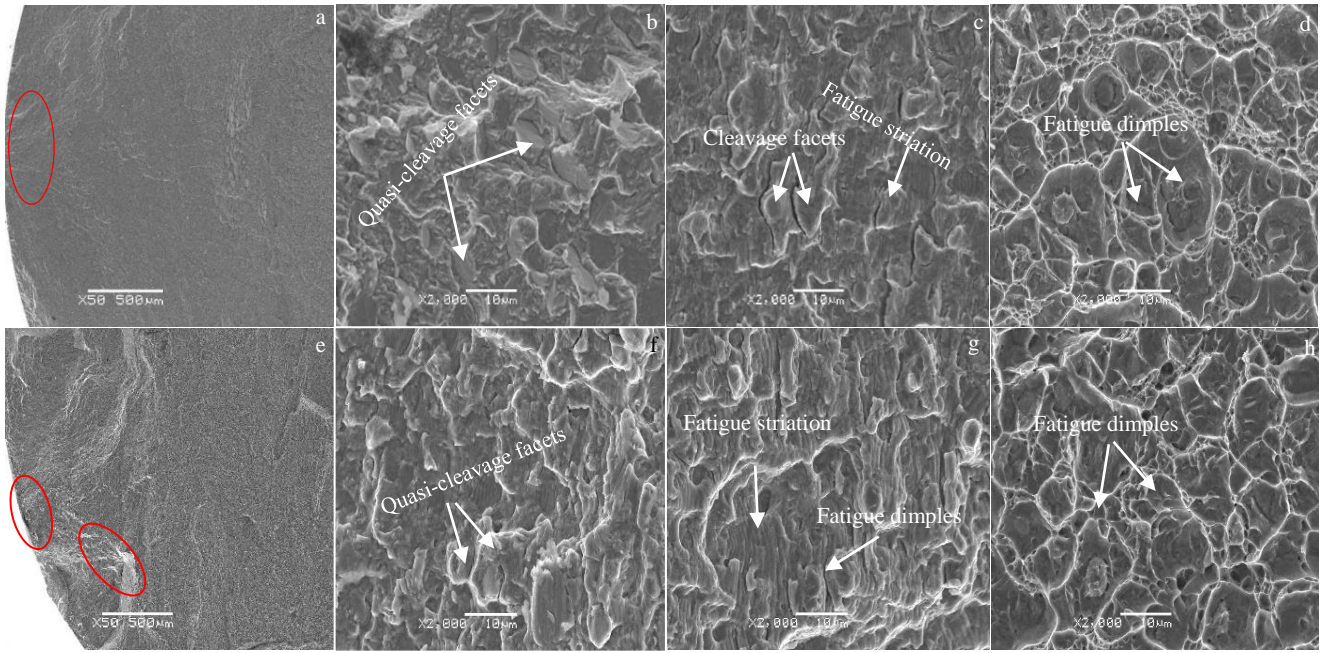


图 4 等轴组织试样的低周疲劳(LCF)和保载疲劳(LCDF)断口形貌

Fig.4 Fracture morphologies of low cycle fatigue (a~d) and dwell fatigue (e~h) for the samples with equiaxed microstructures under peak stress of $0.97\sigma_{p0.2}$

进行, 裂纹通过解理进一步扩展, 从解理转变成条纹模式 (图 4c, 4g), 保载使得断口疲劳条纹间距变宽, 还可见到更多的蠕变空洞及明显的二次裂纹特征, 最终发展成为疲劳韧窝导致材料失效 (图 4d, 4h), 比较 2 种加载模式, 120 s 的保载并未从根本上改变断裂模式, 但相同

应力条件下的保载疲劳较低周疲劳缩短了材料的寿命。

图 5 进一步分析了在 $0.97\sigma_{p0.2}$ 峰值应力下片层组织 TC17 钛合金的疲劳断口形貌。从图 5 中可以看出, 片层组织试样常规低周疲劳裂纹源产生于样品的自由表面 (图 5a), 保载疲劳试样的裂纹源在亚表面处萌生, 裂

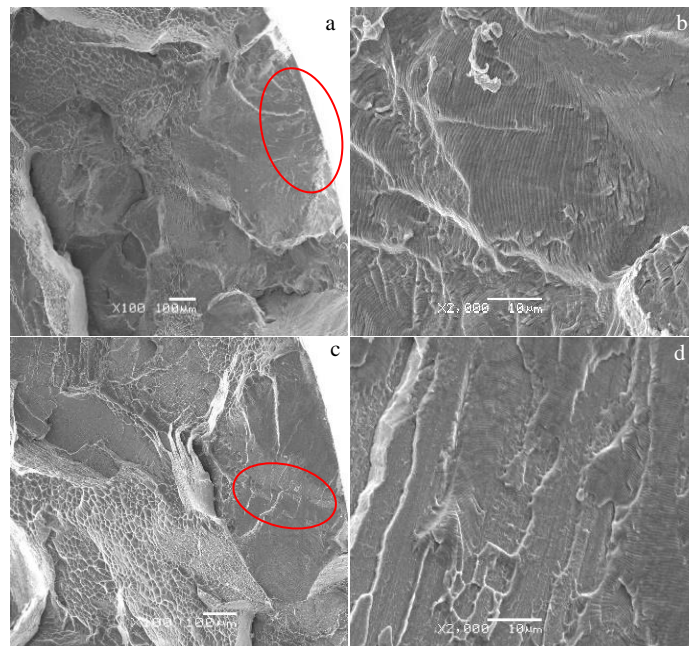


图 5 片层组织试样的低周疲劳(LCF)和保载疲劳(LCDF)断口形貌

Fig.5 Fracture morphologies of low cycle fatigue (a, b) and dwell fatigue (c, d) for the samples with lamellar microstructures under peak stress of $0.97\sigma_{p0.2}$

纹萌生区域较小, 可观察到裂纹早期扩展在断口上产生的台阶(图 5c)。片层组织的 2 种加载方式的疲劳断口均观察到准解理断裂方式, 裂纹源区存在准解理小平面, 源区较为平坦。在高应力载荷条件下, 裂纹扩展较快, 裂纹源的萌生与裂纹扩展发生在较小的范围之内。与等轴组织相同, 保载条件下, 片层组织的疲劳条纹间距较常规低周疲劳条纹间距宽(图 5b, 5d), 保载条件缩短了试样的寿命。

3 结 论

1) 随着峰值应力的提高, TC17 钛合金保载疲劳寿命下降。相同应力条件的保载疲劳寿命低于常规低周疲劳寿命, 片层组织的保载疲劳敏感性低于等轴组织。

2) 较高的峰值应力可促进应变累积, 加速了裂纹源晶界处的位错运动及应力的重新分配, 在保载疲劳应力的作用下促进准解理面的形成, 加速裂纹的扩展。

3) 在相同载荷的应力条件下, TC17 钛合金等轴组织的常规疲劳断口裂纹源出现在试样表面处, 而保载疲劳断口的裂纹源在试样的表面和亚表面处均有出现。保载条件并未从根本上改变断裂模式, 均通过准解理特征断裂。

参考文献 References

- [1] Huang Xu(黄旭), LI Zhenxi(李臻熙), Huang Hao(黄浩). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2011, 30(6): 21
- [2] Yang L N, Liu J R, Tan J *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2014, 30(7): 706
- [3] Kirane K, Ghosh S. *International Journal of Fatigue*[J], 2008,

30(12): 2127

- [4] Toubal L, Bocher P, Moreau A. *International Journal of Fatigue*[J], 2009, 31(3): 601
- [5] Zhang Mingda(张明达), Cao Jingxia(曹京霞), Sui Nan(隋楠) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2019, 39(1): 55
- [6] Yang Lina(杨丽娜), Liu Jianrong(刘建荣), Chen Zhiyong(陈志勇) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(1): 487
- [7] Sinha V, Mills M J, Williams J C. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2004, 35(10): 3141
- [8] Tympe P O, Lindley T C, Saunders E A *et al. Acta Materialia*[J], 2016, 103: 77
- [9] Lefrance P, Sarrazin-Baudoux C, Doquet V. *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structure*[J], 2006, 83: 171
- [10] Whaeed S, Zheng Z B, Balint D S *et al. Acta Materialia*[J], 2019, 162: 136
- [11] Shi Donggang(史栋刚), Xu Xiaoyan(徐小严), Wu Yu(吴雨) *et al. Materials China*(中国材料进展)[J], 2019, 38(7): 722
- [12] Liu J R, Yang L N, Wang Q J *et al. Proceedings of the 13th World Conference on Titanium*[C]. San Diego: The Minerals Metals Society, 2016: 955
- [13] McBagonluri F, Akpan E, Mercer C *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 405: 111
- [14] Pilchak A L. *Scripta Materialia*[J], 2014, 74: 68
- [15] Qiu Jianke(邱建科), Xi Guoqiang(席国强), Ma Yingjie(马英杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(S1): 124

Damage Behavior of Conventional Low Cycle Fatigue and Dwell Fatigue of TC17 Titanium Alloy Under High Load

Guo Ping, Pan Hao, Jia Guoyu, Hou Hongmiao

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

Abstract: Effect of different loading waveform on fatigue damage of TC17 titanium alloy under the high stress level was researched. The results show that the dwell fatigue life under the peak stress and dwell loading time of 120 s is lower than low cycle fatigue life for TC17 titanium alloy. Under the condition of the same high load dwell fatigue, the fatigue sensitivity of lamellar structure is lower than that of the equiaxed structure. Fracture analysis shows that the crack source of dwell fatigue appears on the surface and sub-surface of the sample, while that of low cycle fatigue appears on the surface of the sample. The fracture surface of dwell fatigue is flatter than that of the conventional low cycle fatigue, and the fracture mode does not change fundamentally under the dwell loading condition.

Key words: TC17 titanium alloy; high load condition; dwell fatigue; damage behavior; fracture analysis

Corresponding author: Guo Ping, Ph. D., Professor, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86250729, E-mail: gp8440086@163.com