

加载波形对 Ti-60 合金疲劳损伤行为的影响

杨丽娜, 刘建荣, 陈志勇, 王清江, 杨 锐

(中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 研究了高应力水平下加载波形对 Ti-60 高温钛合金疲劳损伤行为的影响。结果发现: 对于在峰值应力处保载 2 min 的加载波形, 试样的疲劳寿命明显低于无保载的加载波形的试样的寿命; 在保载疲劳条件下, 单位循环周次内材料的疲劳变形明显增大。SEM 观察表明, 在保载波形下, 疲劳源出现在样品内部, 而无保载的加载波形下疲劳裂纹源于样品次表面。TEM 观察表明, 在两种疲劳加载条件下, 都有($\bar{1}011$)滑移系启动。

关键词: 高温钛合金; Ti-60 合金; 加载波形; 保载; 疲劳损伤

中图分类号: TF804.3

文献标志码: A

Effect of loading waveform on fatigue damage behavior of Ti-60 alloy

YANG Li-na, LIU Jian-rong, CHEN Zhi-yong, WANG Qing-jiang, YANG Rui

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

Abstract: The effect of loading waveform on fatigue damage behavior of Ti-60 alloys at high stress level was studied. The results show that, under the loading waveform with 2 min dwell at the peak stress, the fatigue life is shorter than that without dwell. The fatigue strain in a unit cycle under the dwell fatigue condition is obviously larger than that under the no-dwell fatigue condition. It is observed by SEM that, under the dwell fatigue condition, the fatigue crack originates from the interior of specimens, while under the no-dwell fatigue condition, the fatigue crack originates from the subsurface of specimens. TEM observation indicates that, under the two loading waveforms, ($\bar{1}011$) slip system is activated.

Key words: high-temperature titanium alloy; Ti-60 alloy; loading waveforms; dwell; fatigue damage

钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀、可焊等优点, 广泛应用在航空、航海、医药、化工、军工等领域。Ti-60 合金是中国科学院金属研究所采用电子浓度法设计的一种使用温度在 600 的近 α 型高温钛合金, 它兼具 α 型钛合金优异的蠕变性能和 $\alpha+\beta$ 型钛合金的高强度。该合金的综合性能不低于国外的 IMI834 合金, 将用于我国新型发动机叶片、轮盘等部位, 以提高航空发动机的推重比^[1]。

航空发动机对材料的要求苛刻, 它要求材料具有良好的室温性能、高温强度、蠕变性能、热稳定性、疲劳性能和断裂韧性等的匹配, 以保证材料的使用寿命和发动机的安全可靠。发动机用钛合金部件在服役过程中受到疲劳载荷的作用, 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^[2-5]。然而, 钛合金对疲劳试验条件十分敏感, 不同的加载方式对疲劳强度影响较大。本文作者研究了加载波形对不同显微组织 Ti-60 合金疲劳损伤行为的影响, 以了解疲劳加载方式对该合金损伤行为及机理的影响, 从而根据材料用途及疲劳载荷条件的不同, 选择合理的材料显微组织及热加工工艺, 以提高材料的使用安全。

1 实验

实验所用材料为 Ti-60 合金, 该合金属于 Ti-Al-Zr-

Mo-Si-Sn 系钛合金, 名义成分为 Ti-5.8Al-4.0Sn-3.5Zr-0.4Mo-0.4Si-0.4Nb-1.0Ta-0.05C。实验材料为钛合金锻件, 相变点为(1 045±5)。采用固溶+时效的双重热处理制度, 即先在高两相区(1 030) 固溶处理, 然后在 700 保温 2 h 后空冷。所用疲劳试样见图 1。

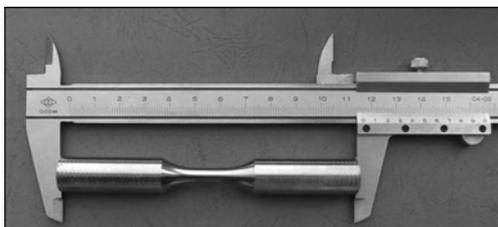


图 1 低周疲劳试样

Fig.1 Plain LCF specimen

所有疲劳实验均采用应力控制, 并在室温大气条件下进行。实验设备为 100 kN 液压伺服 MTS810 疲劳实验机。选择如图 2 所示的 2 种加载波形: 一种为一般低周疲劳实验所用的三角波(见图 2(a)波形 1), 加载和卸载时间均为 2 s, 为方便数据采集, 在峰值应力处保持 1 s; 另一种如图 2(b)所示波形 2, 在峰值应力处保持 2 min, 其它与波形 1 相同。轴向应变累积采用引伸计监测, 通过计算机自动采集数据。最后通过数据处理, 得到疲劳寿命、应变随时间的变化曲线。

采用 MEF4A 光学显微镜观察材料的显微组织, 采用了 HITACHIS-3400 扫描电镜观察断口形貌。透射

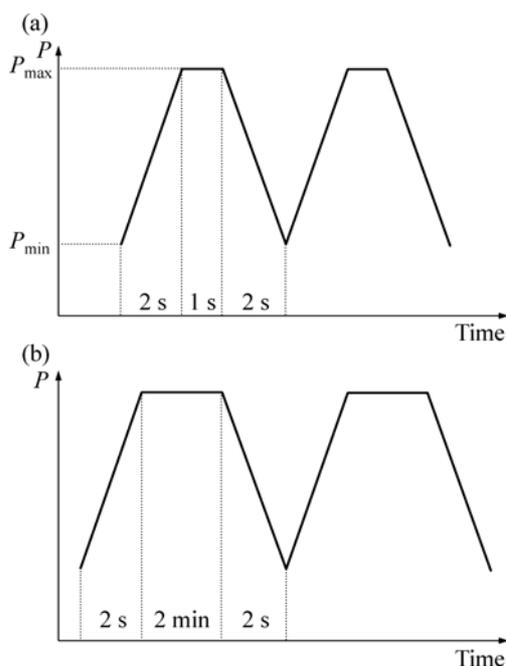


图 2 两种加载波形

Fig.2 Two waveforms utilized in present study

电镜分析试样选择在靠近断口附近, 以观察变形最剧烈区域的位错形貌。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 3 所示为在 1 030 固溶热处理后 Ti-60 合金锻件的显微组织。由图 3 可见, 合金为典型的双态组织, 白色等轴初生 α 相颗粒镶嵌在 β 转变组织基体内, 其体积分率约为 15%。

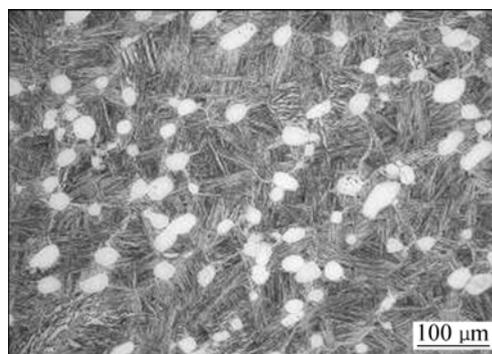


图 3 Ti-60 合金的显微组织

Fig.3 Microstructure of Ti-60 alloy billet

2.2 疲劳性能

在图 2 所示的两种加载波形条件下试样的疲劳性能见表 1。由表 1 可见, 在相同的峰值应力和应力比条件下, 采用波形 2 的加载方式, 试样的疲劳寿命比采用波形 1 的下降 2/3。可见试样在峰值应力处保拉 2 min 后, 会比在无保拉实验条件下的疲劳寿命明显降低。在其它高温钛合金如 IMI685^[6]、IMI829^[7] 和 IMI834^[8]中都出现过同样的现象。

表 1 Ti-60 合金的疲劳性能

Table 1 Fatigue properties of Ti-60 alloy

Waveform	Peak stress/MPa	Stress ratio	Cycles number
1	900	0.1	7509
2	900	0.1	2285

2.3 循环累积变形

图 4 所示为两种波形条件下的疲劳试样在疲劳实验过程中的循环累积变形。由图 4 可知, 在相同峰值应力下, 不同加载波形产生的循环累积变形量也不同。在相同循环周次下, 峰值应力处有 2 min 保拉的疲劳试样产生的变形明显比没有保拉的样品大。根据疲劳

损伤累积模型, 疲劳失效是材料损伤累积的结果, 单位循环周次内产生的损伤大, 达到材料可承受最大损伤的循环周次就少, 因此根据图 4 可以很好地解释表 1 中的实验现象。WOODFIELD 等^[9]认为, 造成保载条件下应变大量累积的原因是由相当于在峰值应力处施加 2 min 的蠕变作用造成的, 但相同应力条件下的蠕变实验结果似乎不支持该论述。因此波形 2 条件下单位循环周次变形大的原因尚需进行更深入的研究。

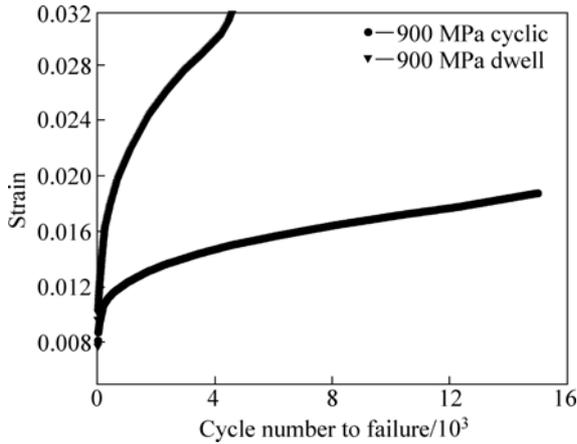


图 4 两种波形应变—循环周次曲线

Fig.4 Accumulation of cyclic strain under cyclic and dwell(2 min) loading in Ti-60

2.4 断口形貌

利用扫描电镜观察了两种不同加载波形的疲劳断口形貌(图 5 和 6)。图 5(a)所示为波形 1 条件下的疲劳断口形貌, 图 5(b)所示为波形 2 条件下的疲劳断口形貌。图 6 为图 5 中裂纹源区的放大。从图 5 可以看到, 在波形 1 条件下, 疲劳裂纹源于试样表面附近; 而波形 2 条件下, 裂纹萌生于样品内部。在两种波形条件下试样的裂纹源处都发现有平坦且明亮的疲劳小平面存在, 见图 5 和 6 中箭头所示。这些疲劳小平面的形成被认为与 α 相晶粒相对于主应力轴的晶体学取向有关^[8]。当滑移带在具有“软取向”的晶粒内形成后, 在具有“硬取向”的晶粒界面受阻, 由于位错塞积导致的应力增加, 使得具有“硬取向”的晶粒发生解理开裂, 是这种疲劳小平面形成的原因。

2.5 透射电镜位错观察

图 7 所示为 Ti-60 合金在不同加载波形下样品断口附近的透射电镜照片。由图 7 可以看出, 位错平行排列, 形成滑移带。这些滑移带可以通过相邻的 α 片层, 而不发生方向改变, 表明同一板条束内的 α 片层界面对滑移几乎没有阻碍作用, 同时也表明同一板条

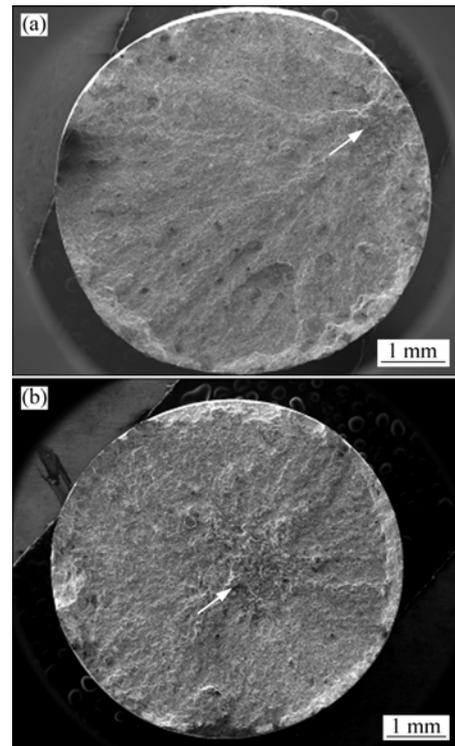


图 5 两种加载波形下试样的疲劳断口形貌

Fig.5 Optical micrographs of specimens under two loading waveforms: (a) Loading waveform 1; (b) Loading waveform 2

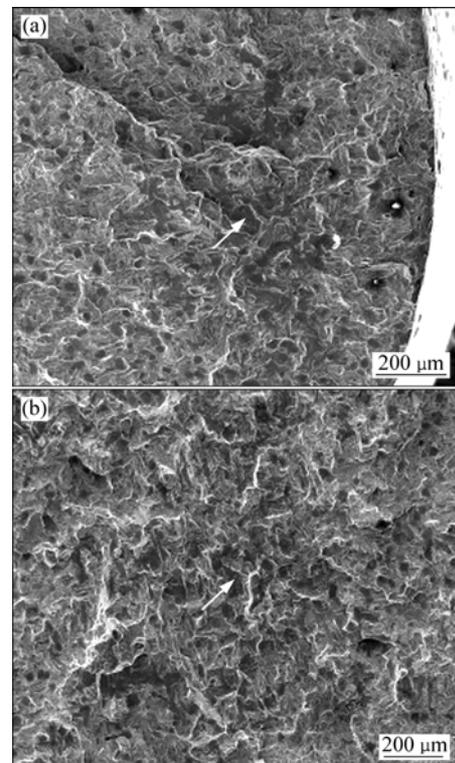


图 6 放大后的两种波形下得到的疲劳断口形貌

Fig.6 Enlarged optical micrographs of specimens under two loading waveforms: (a) Loading waveform 1; (b) Loading waveform 2

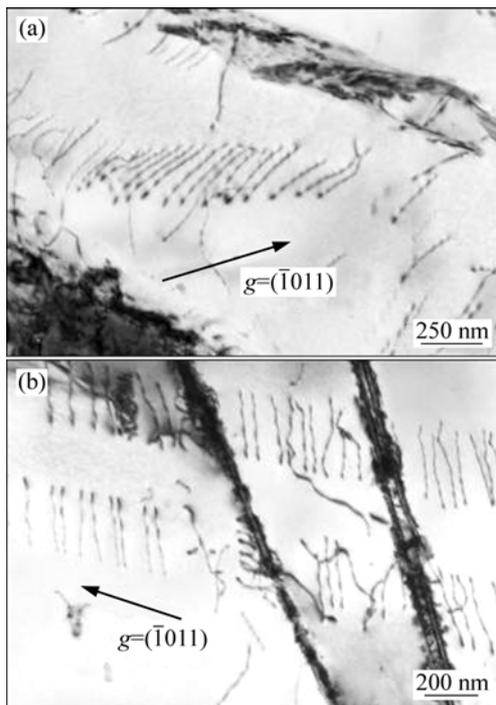


图7 Ti-60合金疲劳试样的TEM像

Fig.7 TEM images of dislocations found in Ti-60 fatigued specimens under different loading waveforms: (a) Loading waveform 1, (b) Loading waveform 2

束内的 α 片层具有相同的晶体学取向。密排六方结构的钛合金中有基面滑移、柱面滑移和锥面滑移3个滑移系，根据图7(a)和(b)给出的 g 矢量可以推断，两种疲劳波形条件下都有 $(\bar{1}011)$ 滑移系启动。

3 结论

1) 峰值应力处保载的疲劳条件下试样的疲劳寿命明显低于无保载疲劳条件下试样的疲劳寿命，单位周次内循环累积变形也明显高于无保载条件的。

2) 无保载疲劳条件下疲劳裂纹源于样品次表面，而在峰值应力处有保载2 min的疲劳条件下，疲劳裂纹源于样品内部，两种裂纹源处均有平坦明亮小平面存在。

3) 疲劳断口附近位错平行排列，两种疲劳波形条件下都启动了 $(\bar{1}011)$ 滑移系。

REFERENCES

- [1] 刘建荣, 朱绍祥, 石卫民, 杨慧丽, 王清江, 刘羽翼, 杨锐. 轧制工艺对Ti-60A棒材显微组织及拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(3): 283-286.
LIU Jian-rong, ZHU Shao-xiang, SHI Wei-min, YANG Hui-li, WANG Qing-jiang, LIU Yu-yin, YANG Rui. Effect of rolling process on microstructure and tensile properties of Ti-60A alloy bars[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(3): 283-286.
- [2] HINES J A, PETERS J O. Microcrack propagation in Ti-6Al-4V alloys[C]//Fatigue behavior of titanium alloys. Warrendal, Pennsylvania, US: TMS Titanium Committee, 1998, 10: 15-22.
- [3] THOMPSON A W. Relations between microstructure and fatigue properties of alpha-beta titanium alloys[C]//Fatigue behavior of titanium alloys. Warrendal, Pennsylvania, US: TMS Titanium Committee, 1998, 10: 23-30.
- [4] IVANOVA S G, COHEN F S, BIEDERMAN R R, SISSON R D. Role of microstructure in the mean stress dependence of fatigue strength in Ti-6Al-4V alloy[C]//Fatigue behavior of titanium alloys. Warrendal, Pennsylvania, US: TMS Titanium Committee, 1998, 10: 39-46.
- [5] PETERS J O, SAUER C. Nucleation and propagation of fatigue cracks in beta-titanium alloys[C]//Fatigue behavior of titanium alloys. Warrendal, Pennsylvania, US: TMS Titanium Committee, 1998, 10: 127-134.
- [6] BACHE M R. A review of dwell sensitive fatigue in titanium alloys: the role of microstructure, texture and operating conditions[C]//4th International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials. 2002, 9: 22-27.
- [7] WHITE J, LORETTO M H, SMALLMAN R E. The effect of dwell on low cycle fatigue in IMI829 (Ti5331S)[C]//Proc 5th Int Conf on Titanium. D.G.M., Oberursel, Germany, 1984: 2297-2304.
- [8] BACHE M R, COPE M, DAVIES H M, EVANS W J, HARRISON G. Dwell sensitive fatigue in a near alpha titanium alloy at ambient temperature[C]//9th International Conference in Fracture (ICF9). 1997: 351-358.
- [9] WOODFIELD A P, GORMANM D, SUTLIFF J A, CORDERMAN R R. Effect of microstructure on dwell fatigue behavior of Ti-6242[C]//Titanium'95-Science and Technology. Processings of the 8th World Conference on Titanium. Birmingham, UK, 1996: 1116-1123.

(编辑 袁赛前)