

# TC11 钛合金在疲劳-蠕变交互作用下的形变特征及位错结构

周煜

(浙江大学贮氢研究室,杭州,310027)

庞韵虹 周义刚

(西北工业大学材料系,西安,710072)

## CYCLIC DEFORMATION AND DISLOCATION OF TC11 TITANIUM ALLOY UNDER FATIGUE-CREEP INTERACTION

Zhou Yu

(Research Lab. of Hydrogen Storage, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Pang Yunhong, Zhou Yigang

(Department of Material Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

**摘要** 研究了经常规、近 $\beta$ 和 $\beta$ 锻造工艺所获得的具有等轴、双态和网篮3种显微组织的TC11钛合金在疲劳-蠕变交互作用下的形变特性及位错结构。发现不同显微组织或同一组织内部的初生 $\alpha$ 和条状 $\alpha$ 具有的层错能不同是形成不同位错亚结构的根本原因。

**关键词** 疲劳试验-蠕变分析, 循环-变形, 位错

**中图分类号** V252.2, TG146.23, O346.2

**Abstract** The characteristics of cyclic deformation and dislocation of TC11 titanium with equiaxed, duplex and basketweaver microstructures are studied. It is found that different microstructures have different dislocations and the curves of  $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$  of equiaxed and basketweaver microstructures have a zigzag shape. Analyses show that the nature of microstructures' effect on the characteristics of deformation and dislocation of TC11 titanium alloy under fatigue-creep interaction is that different microstructures or primary and platelet  $\alpha$  phases in the same microstructure have different fault energy; the higher the fault energy, the easier the dislocation's recovery, and that dislocation recovery and pile-up again at the same process make the curves of  $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$  become zigzag.

**Key words** fatigue tests-creep analysis, cycles-deformation, dislocation (materials).

一般认为,等轴 $\alpha$ 和转变 $\beta$ 组织的含量、分布以及形态的变化所引起的位错滑移可逆性的差异是影响钛合金交互作用特性的因素<sup>[1]</sup>,但未从微观上进行更细致的分析。本文采用常规、近 $\beta$ <sup>[2]</sup>和 $\beta$ 3种锻造工艺获得3种显微组织<sup>[3]</sup>,借助TEM观察和循环过程中的应变测量方法,着重研究了锻造工艺或组织影响钛合金循环变形和位错结构的本质。

1991年11月5日收到,1993年4月9日收到修改稿

## 1 材料与试验方法

试验用 TC11 钛合金的化学成份 (wt%): Al 6.63, Mo 3.42, Zr 1.65, Si 0.28, Fe 0.005 6, C 0.013, N 0.007, O 0.139, H 0.000 5, Ti 余。经常规、近  $\beta$  和  $\beta$  锻造工艺锻成某型发动机压气机盘, 始锻温度依次为:  $T_{\beta}-50^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\beta}+10^{\circ}\text{C}$ , 锻造比约 30%, 配以双重退火处理:  $950^{\circ}\text{C}$ , 1 h/a. c. +  $950^{\circ}\text{C}$ , 1 h/a. c. +  $530^{\circ}\text{C}$ , 6 h/a. c., 获得等轴、双态和网篮 3 种组织<sup>[3]</sup>, 等轴初生  $\alpha$  相对含量分别为 50%、15% 和 0。

观察疲劳-蠕变交互作用后的 TEM 位错结构。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和循环次数 $N$ 的关系

等轴和网篮组织的  $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$  曲线见图 1。两者具有相似的变化趋势; 应力增大,  $\dot{\epsilon}$  增

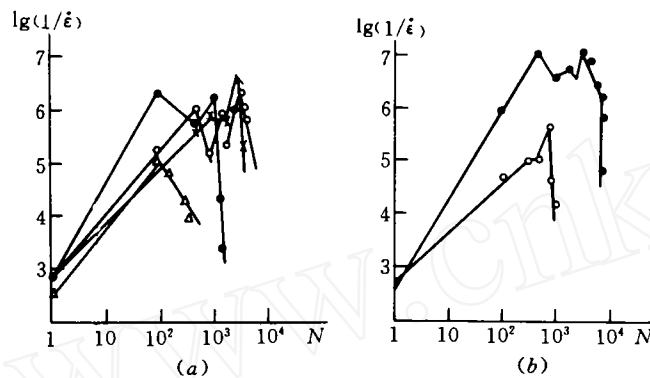


图 1 不同显微组织的  $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$  曲线

(a) 等轴组织

(b) 网篮组织

$\sigma_{\max}/\text{MPa}$   $\Delta$ -686,  $\circ$ -568,  $\times$ -490,  $\circ$ -459;  $\sigma_{\max}/\text{MPa}$   $\circ$ -715,  $\circ$ -549

加。在循环起始阶段, 应变速率  $\dot{\epsilon}$  随  $N$  增加单调降低直至第一次出现最低值, 呈线性硬化阶段。此后, 随  $N$  增加,  $\dot{\epsilon}$  值上下波动, 其  $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$  曲线呈锯齿状, 而且循环应力越小,  $\dot{\epsilon}$  随  $N$  波动的频率越高, 锯齿波数越多。对比图 1(a) 和图 1(b) 可发现, 这种波动现象不仅受循环应力影响, 而且与显微组织有关。网篮组织的  $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$  曲线较等轴组织的曲线更易出现锯齿波现象, 在  $\sigma_{\max}=549\text{MPa}$  时, 网篮组织曲线上的锯齿波数比等轴组织在  $\sigma_{\max}=490\text{MPa}$  时的还要多, 而且在  $\sigma_{\max}=715\text{MPa}$  这样高的应力下, 网篮组织的  $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$  曲线上还有明显锯齿波存在, 这在等轴和双态组织中是不可能的。由位错动力学理论<sup>[4]</sup>应变速率与可动位错密度成正比, 因此  $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$  曲线上存在锯齿波现象表明: 在交互作用过程中, 可动位错密度也是波动变化的。而拉伸保载过程中的位错回复是使可动位错密度增加的最主要原因<sup>[4,5]</sup>。由此  $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$  曲线存在锯齿波现象是由于交互作用过程中, 位错的回复和在应力作用下重新塞积两个过程彼此消长的结果。

www.cnki.net

www.cnki.net

着拉伸保载时间的增加或加载频率降低,位错回复对疲劳-蠕变交互作用下的形变特性乃至断裂寿命的影响会更显著。网篮组织因具有高的层错能,位错易回复,则其寿命将会高于另外两种组织,并且保载时间越长,3种组织的寿命差别越大。试验结果已证实了这点。例如: $\Delta t = \infty, \sigma_{\max} = 715\text{MPa}$ 时,网篮组织的寿命为26h,等轴组织0.08h,前者是后者的325倍,双态组织12.6h。相反地,当加载频率很高或试验温度较低时,位错回复对寿命的影响较小甚至可忽略,此时,寿命的长短与位错滑移的可逆性有关,网篮组织的滑移可逆性最差,其寿命必定最短。例如: $T = 500^\circ\text{C}, \Delta t = 0, f = 83\text{Hz}, R = -1, \sigma_{\max} = 470\text{MPa}$ 时,等轴组织的 $N_f$ 为 $1.05 \times 10^7$ 次,双态组织 $3.0 \times 10^7$ 次,远高于网篮组织的 $1.03 \times 10^6$ 次。充分证明,显微组织对TC11钛合金在疲劳-蠕变交互作用下的形变乃至断裂寿命的影响不仅仅在于等轴初生 $\alpha$ 和转变 $\beta$ 组织的含量、分布及形态的变化所引起的位错滑移可逆性的差异,更应考虑因锻造和加热过程中所引起的层错能的不同,进而导致位错回复性能的差异对交互作用特性的影响,拉伸保载时间愈长或加载频率愈低,其影响愈显著。

#### 4 结 论

(1)不同显微组织或同一显微组织内部的等轴初生 $\alpha$ 和转变 $\beta$ 具有不同的层错能是使TC11钛合金在疲劳-蠕变交互作用过程中产生不同位错结构乃至断裂寿命的主要原因。

(2) $\lg(1/\dot{\epsilon})-N$ 曲线呈锯齿波状是位错回复和在循环应力作用下塞积两个过程彼此消长的结果;网篮组织的层错能最高,其应变曲线的波动性最明显。

#### 参 考 文 献

- 1 Kim H M, Paris H G, Williams J C. Monotonic and cyclic deformation behavior of  $\alpha$ -phase Ti-Al alloys. Titanium'80. Proceedings of the fourth international conference on Titanium, Kyoto Japan, 1980: 1825—1828
- 2 周义刚,张宝昌. 钛合金近 $\beta$ 锻造研究. 航空学报, 1989; 10(1): A60—A66
- 3 周煜,周义刚,俞汉清. TC11钛合金在疲劳-蠕变交互作用下的解理断裂研究. 金属学报, 1992; 28(3): A132—A135
- 4 Hull D, Bacon D J. Introduction to dislocation, 3rd Edition. Oxford: Pergamon Press, 1984: 210—310
- 5 刘国勋. 金属学原理. 北京:冶金工业出版社, 1981: 250—300
- 6 夏月波,王中光,杜秀魁. 不锈钢在循环形变中的Bauschinger效应及其位错结构. 金属学报, 1988; (4): A211—A227