

⑤ 559-563

铝疲劳过程

第47卷第4期 1998年4月  
1000-3290/98/47(4)/0559-05物理学报  
ACTA PHYSICA SINICAVol. 47, No. 4, April, 1998  
©1998 Chin. Phys. Soc.

超声衰减 循环应变 波形

# 循环应变波形对铝疲劳过程中 超声衰减的影响

王静 方前锋<sup>√</sup> 朱震刚

(中国科学院固体物理研究所内耗与固体缺陷开放实验室, 合肥 230031)

(1997年9月12日收到)

TQ113.255

研究了高纯多晶铝在三角和正弦两种波形的应变控制下的疲劳过程中的超声衰减. 结果表明, 在小应变振幅下, 影响超声衰减变化地主要是位错与点缺陷间的相互作用, 波形的变化能改变点缺陷的分布, 因而影响超声衰减的变化; 而在大应变振幅下, 位错大量增殖, 对超声衰减变化起主导作用的是位错与位错间的相互作用, 波形对位错增殖和位错间相互作用影响甚小.

PACC: 0710; 8170; 6170L; 4630

## 1 引言

金属疲劳的研究虽然已有一百多年的历史, 但关于疲劳过程中微观机制的研究还很不充分. 可以肯定的是, 在疲劳早期, 形变的微观机制主要是位错及其组态的运动和演化. 测量疲劳过程中的超声衰减随循环周数及应变的变化可以探知疲劳过程中位错运动规律, 十分有助于了解疲劳早期形变的微观机制<sup>[1]</sup>. 其原理是: 在给试样加一低周循环应力的同时, 让一振幅很小的超声波穿过试样, 测量其透射波. 实验表明, 超声波在固体中传播时, 其振幅按  $e^{-\alpha x}$  规律衰减, 衰减系数  $\alpha$  简称超声衰减, 它非常灵敏地依赖于固体中的微观缺陷状态. Gremaud 等<sup>[1]</sup>研究了多晶铝小应力振幅压卸疲劳过程中的超声衰减, 发现每一应力循环中超声衰减随应力的变化曲线  $\Delta\alpha-\sigma$  的形状及演化强烈地依赖于由低频应力波激活的位错运动及位错与点缺陷的交互作用机制, 故称之为“超声签码”. 他们用 K-G-L 弦模型<sup>[2]</sup>解释了这些签码的形成. Vincent<sup>[3]</sup>和 Fei<sup>[4]</sup>等测量了三角波控制下的疲劳过程中的超声衰减, 但关于波形对不同应变振幅下的疲劳过程中的超声衰减的影响还未进行详细研究. 为此, 我们测量了大、小应变振幅下, 两种波形控制下的疲劳过程中的超声衰减.

## 2 实验

试样原材料由抚顺铝厂提供, 成分为 99.999wt% Al, 初始状态为冷拔棒状, 经车加工成形, 试样有效尺寸直径为 9 mm, 长度为 40 mm, 两端各有直径为 12 mm, 长度为 15 mm 的夹头部分. 试样经 450 °C 退火 3 h, 晶粒尺寸大约为 2—3 mm.

疲劳实验是在疲劳内耗仪<sup>[5]</sup>上进行, 实验中保持总应变恒定, 拉压循环的交变载荷的波形为三角波和正弦波, 循环变形的周期为 4s, 每周采 512 个数据. 超声衰减测量所用的超声波是沿着拉压轴向传播的纵波, 采用脉冲式发射, 频率为 15 MHz. 超声衰减  $\Delta\alpha$  是疲劳过程中所测的超声衰减值  $\alpha_t$  与拉压实验前所测的超声衰减值  $\alpha_0$  之差, 由下面公式计算得到:

$$\Delta\alpha = \alpha_t - \alpha_0 = \frac{20}{t_{12}} \log \frac{A_0}{A_t} \quad (\text{dB}/\mu\text{s}).$$

这里  $t_{12}$  是超声波在试样中传播所需的时间, 约为 11  $\mu\text{s}$ ,  $A_0$ ,  $A_t$  分别为实验前和实验过程中透射波的振幅. 所有实验都是在室温下做的.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 小应变振幅下的超声签名( $\Delta\alpha$ - $\epsilon$ 曲线)

图 1 是在振幅  $\epsilon = 50 \times 10^{-6}$ , 波形为三角波的应变控制下, 疲劳过程中的超声签名. 疲劳开始时, 超声签名为一“蝴蝶”状曲线(见图 1(a)). 经过一定圈数, 达到一个平衡态, 此时的超声签名即稳态超声签名, 为一两端向上翘的水平线(见图 1(b)). 图 2 是在振幅

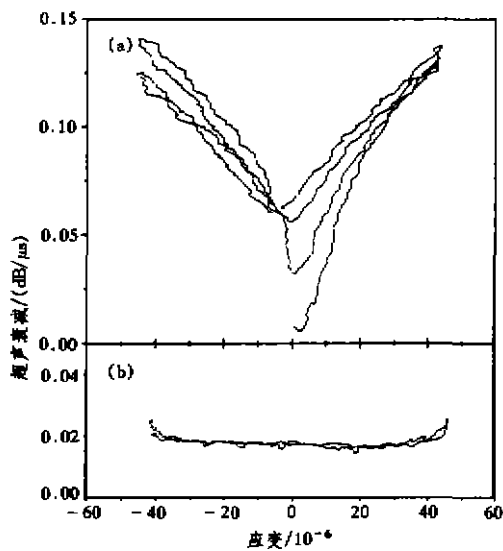


图 1 在振幅  $\epsilon = 50 \times 10^{-6}$ , 波形为三角波的应变控制下, 疲劳过程中的超声签名 (a) 为疲劳开始时; (b) 为循环到 4000 圈

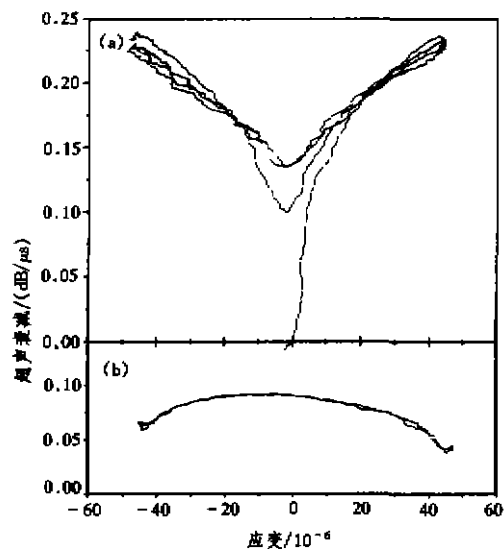


图 2 在振幅  $\epsilon = 50 \times 10^{-6}$ , 波形为正弦波的应变控制下, 疲劳过程中的超声签名 (a) 为疲劳开始时; (b) 为循环到 4000 圈

$\epsilon = 50 \times 10^{-6}$ , 波形为正弦波的应变控制下, 疲劳过程中的超声签名. 疲劳开始时, 基本上与三角波一样, 超声签名也为一“蝴蝶”状曲线(见图 2(a)), 达到稳态时超声签名是“弓”

形(见图 2(b)), 两端向下, 中间向上凸, 这与三角波下的情况完全不同. 比较图 1 与图 2 可以看出, 小应变振幅下, 波形对疲劳开始的超声签码的形状没什么影响, 而对稳态签码有很明显的影响.

小应变振幅下( $\epsilon < 100 \times 10^{-6}$ ), 疲劳过程中没有明显的位错增殖<sup>[4]</sup>, 因此影响超声衰减  $\Delta\alpha$  变化的主要因素是点缺陷与位错间的相互作用. 所有试样经过了相同的加工过程和热处理, 具有相同的初始态, 故在两种波形的应变控制下, 疲劳开始时的超声签码基本相同. 在应变振幅  $\epsilon = 50 \times 10^{-6}$  的交变作用下, 位错在其平衡位置往复运动, 而点缺陷在室温下无法跟随位错的运动. Gremaud 等<sup>[1]</sup>认为, 经过足够长的时间, 点缺陷会在由位错产生的平均力场的作用下在位错线上及其附近重新分布. 位错线上的点缺陷对于引起超声衰减的位错弦振动来说, 可以看作强钉扎点, 其线密度  $c$  反比于位错线长度  $L$ , 即  $c \sim 1/L$ <sup>[6]</sup>. 根据“G-L”模型,  $\Delta\alpha \sim L^4$ , 故  $\Delta\alpha \sim c^{-4}$ . 下面我们讨论在两种波形的应变控制下的疲劳过程中点缺陷在位错应力场中的分布.

假设  $x = 0$  处有一个刃位错, 周围是点缺陷气团, 浓度为  $c_{im}$ , 根据位错理论,

$$c_{im} = c_0 \exp(U/kT) = c_0 \exp\left(\frac{U_0}{kT(1+x^2/b^2)}\right). \quad (1)$$

这里  $k$  是常数,  $T$  是绝对温度,  $U$  是位错与点缺陷的相互作用能,  $U_0$  为一常数,  $b$  是位错的 Burgers 矢量, 在铝中大约为  $3 \times 10^{-8}$  cm, 从(1)式中可以看出,  $c_{im}$  在  $x = 0$  处最大, 随着  $x$  增大而迅速减小. 当施加一低周应力后, 位错将在  $-s_0$  到  $s_0$  的范围内运动,  $s_0$  的大小由应变振幅决定. 在循环开始的几周,  $\Delta\alpha \sim c_{im}^{-4}$ , 在  $x = 0$  处最小, 随着  $x$  增大而迅速增大. 超声签码为一“蝴蝶”状. 经过足够多的圈数, 点缺陷浓度将变为  $c_{ave}$ , 它由点缺陷与运动位错或它的平均力场之间的相互作用能  $U_{ave}$  决定,

$$U_{ave} = \frac{1}{P} \int_0^P \frac{U_0}{1+(x-s)^2/b^2} dt. \quad (2)$$

在正弦波应变  $s = s_0 \sin(2\pi t/P)$  和三角波应变

$$s = \begin{cases} 4s_0 t/P & 0 \leq t \leq P/4; \\ -4s_0(t/P - 1/2) & \text{若 } P/4 \leq t \leq 3P/4; \\ 4s_0(t/P - 1) & 3P/4 \leq t \leq P \end{cases} \quad (3)$$

控制下的疲劳中, 归一化的相互作用能  $U_n = U_{ave}/U_0$  作为  $x/s_0$  的函数如图 3 所示(其中  $s_0$  取值  $50b$ ). 可见, 两种波形下的  $U_n$  完全不同. 三角波应变下, 在  $x = 0$  处  $U_n$  没有明显的极大值, 向应变绝对值最大处过渡的中间部分,  $U_n$  保持一较平稳的值, 到达应变绝对值最大处,  $U_n$  快速下降. 由于  $c_{ave} \sim \exp\left(\frac{U_{ave}}{kT}\right)$ , 因此超声签码是两端向上翘的水平线, 如图 1(b). 正弦波应变下,  $U_n$  在  $x = 0$  附近较小, 两端  $x \approx \pm s_0$  处各有一极大值. 相应地稳态超声签码则是中间较大, 两端极小, 如图 2(b).

### 3.2 大应变振幅下的超声签码( $\Delta\alpha$ - $\epsilon$ 曲线)

图 4 和图 5 是振幅  $\epsilon = 400 \times 10^{-6}$ , 波形分别为三角波和正弦波的应变控制下, 疲劳过程中的超声签码. 疲劳开始时, 超声签码都为逐渐上升的曲线(图 4(a)和图 5(a)), 经

过一定圈数的循环达到稳态时,两种波形下的超声衰减都是在应变绝对值最大处较小,在应变大约为  $\pm 200 \times 10^{-6}$  处出现一极大值(图 4(b)和图 5(b)).可见,两种波形控制下的超声衰减形状基本相同,即波形对大应变振幅下的疲劳过程中的超声衰减影响非常小.

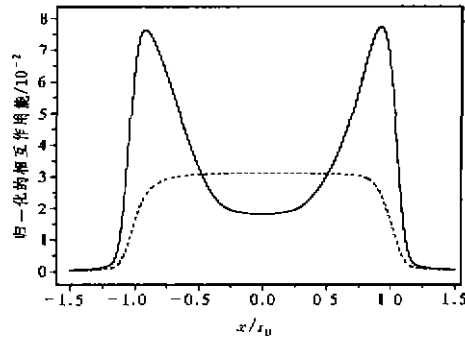


图 3 归一化相互作用能  $U_0$  作为  $x/s_0$  的函数曲线 实线为正弦波;虚线为三角波

大应变振幅下,疲劳过程中位错大量增殖,并且位错作长距离的运动且速度较快,点缺陷来不及跟上位错的运动<sup>[4]</sup>.另外,位错组态在交变应力作用下,从原始退火态的网络

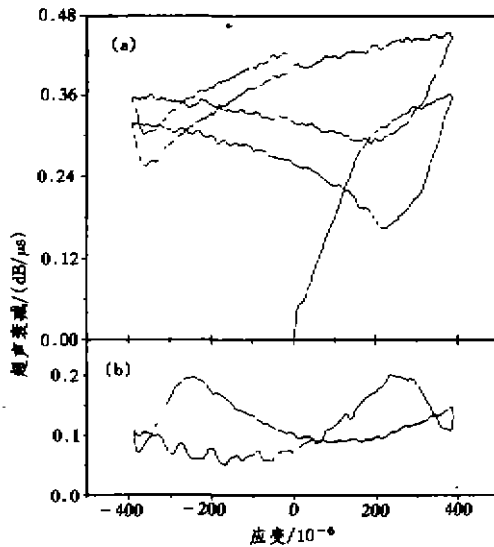


图 4 在振幅  $\epsilon = 400 \times 10^{-6}$ , 波形为三角波的应变控制下,疲劳过程中的超声衰减 (a)为疲劳开始时; (b)为循环到 4000 圈

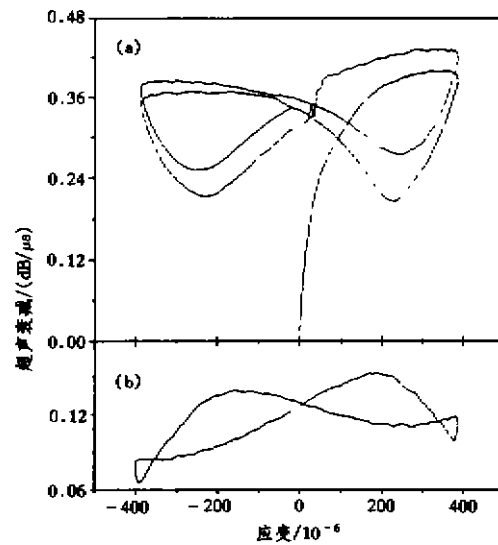


图 5 在振幅  $\epsilon = 400 \times 10^{-6}$ , 波形为正弦波的应变控制下,疲劳过程中的超声衰减 (a)为疲劳开始时; (b)循环到 4000 圈

结构逐渐演化成胞状结构,也说明位错交割和相互作用非常强烈.在这种情况下,位错与点缺陷间的相互作用和位错与位错间的交互作用相比,可以忽略不计.决定超声衰减大小的位错密度和平均长度,主要由位错增殖和交割所控制,而这与应力、应变波形关系不大.

因此,疲劳开始时和稳态时,两种签码都十分相似。

## 4 结 论

1. 小应变振幅下,波形对稳态超声签码有明显的影响,这归于点缺陷在运动位错平均力场中的重新分布。

2. 大应变振幅下,波形对位错增殖和位错间的相互作用影响不大,两种波形下的超声签码基本相同。

- [1] G. Gremaud, M. Bujard and W. Benoit, *J. Appl. Phys.*, **61**(1987), 1795.
- [2] A. Granato and K. Lucke, *J. Appl. Phys.*, **27**(1956), 583.
- [3] A. Vincent, A. Hamel, J. Chicois and R. Fougères, *J. de Phys.*, **46**(1985), C10-321.
- [4] G. T. Fei and Z. G. Zhu, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **140**(1993), 119.
- [5] Z. G. Zhu, X. Zhou and G. T. Fei, *Chin. J. Sci. Instrum.*, **9**(1988), 396 (in Chinese).
- [6] Y. Hiki, T. Kosugi, K. Mizuno and T. Kino, *Point Defects and Defect Interactions in Metals*, eds. Jun-ichi Takamura, Masao Koyama and Micio Kiritani (University of Tokyo Press, Tokyo, 1982), p. 753.

## INFLUENCE OF THE CYCLIC STRAIN WAVEFORM ON THE ULTRASONIC ATTENUATION DURING THE FATIGUE PROCESS OF ALUMINIUM

WANG JING FANG QIAN-FENG ZHU ZHEN-GANG

(Laboratory of Internal Friction and Defects in Solids,  
Institute of Solid State Physics, Academia Sinica, Hefei 230031)

(Received 12 September 1997)

### ABSTRACT

The ultrasonic attenuation  $\Delta\alpha$  has been measured during the fatigue process of aluminium which is controlled by the total strain with a triangular or a sinusoidal waveform. The results indicate that the waveform has an influence on the  $\Delta\alpha$ - $\epsilon$  curve at low strain amplitude, but has little influence at high strain amplitude. At low strain amplitude, the major reason causing the variation of  $\Delta\alpha$  is the interaction between dislocations and point defects, and the waveform can change the re-distribution of point defects at the average stress field of the vibrating dislocation segments, as a result, the stable  $\Delta\alpha$ - $\epsilon$  curves for the two kinds of waveform are different. At high strain amplitude, dislocation multiplication occurs, the interaction between dislocation segments is dominant, and the waveform cannot influence the dislocation multiplication and the interaction between dislocation segments.

PACC: 0710; 8170; 6170L; 4630