

LY12 铝合金疲劳损伤的非线性超声检测

颜丙生, 张士雄

(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450007)

摘要: 针对 LY12 铝合金材料的早期疲劳损伤问题, 研究发展了一套可靠的超声非线性系数测量实验系统, 利用该系统离线测量了 LY12 铝合金疲劳试件的超声非线性系数。实验结果表明, 在未达到 60% 左右疲劳寿命时, 超声非线性系数对 LY12 铝合金材料的早期疲劳损伤有很高的灵敏度。同时利用浸蚀法观察了 LY12 硬铝疲劳试件的位错密度变化, 超声非线性系数和位错密度随疲劳周次的变化近似一致, 表明超声非线性效应与晶体中的位错有关, 超声非线性系数可以表征晶体材料内部位错的变化, 进而预测金属材料的疲劳寿命。

关键词: 非线性超声; LY12 铝合金; 疲劳; 微观观察

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2012.02.017

中图分类号: TB551

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2012)02-0093-06

LY12 硬铝合金是航空宇航工业中广泛应用的合金材料之一, 具有较高的强度和韧性, 不容易断裂, 是硬铝中用量最大的铝合金材料。通常被用来制作飞机、火箭的蒙皮、壁板和隔框、翼肋, 是代替钢材的最佳材料。但是, 铝合金的突出弱点是其疲劳强度对应力集中比较敏感, 且随着硬度的提高, 这一敏感程度增大。而航空铝合金在实际使用过程中, 由于工作环境复杂, 一些部件容易出现疲劳裂纹和损伤, 这对于飞机等关键构件的安全服役造成了极大威胁^[1]。因此, 对于 LY12 铝合金超声波无损检测技术的研究也就具有重要意义。

超声无损检测技术利用波的时程、声速和衰减等物理参数已经可以对疲劳试件中的宏观裂纹进行有效的检测和评估^[2]。但是, 上述线性物理参数对金属材料早期疲劳并不敏感^[3]。近期相关实验研究表明金属材料的早期疲劳损伤与超声波的非线性效应密切相关^[4~9]。在金属材料的早期疲劳损伤阶段, 由于位错和滑移带等微观缺陷的存在, 当单一频率的超声波在金属材料内部传播时会使波形发生畸变, 从而产生高次谐波。因此, 通过对这些高次谐波的检测, 可以对材料和结构的早期疲劳损伤做出有效的无损检测和评估。

尽管非线性超声无损检测技术具有广阔的应用前景, 但仍然没有成功地应用于工程实际, 目前国内外的研究主要集中在非线性超声宏观检测方面。本工作根据 LY12 铝合金的材料特性, 发展了一套可靠的超声非线性系数测量实验系统, 利用该系统进行了材料疲劳非线性超声检测实验, 并结合微观实验, 研究了材料超声非线性特性与位错密度之间的关系。

1 超声非线性系数

一般来说, 固体介质都具有非线性特征, 比如微结构缺陷引起的非线性特征等, 固体介质的非线性特征一般通过高阶弹性常数来描述。单一频率正弦超声波在固体介质中传播时将产生非线性相互作用, 从而产生高次谐波, 为了有效反应这一特点, Cantrell, Breazeal 等人^[9,10]建立了固体介质内的非线性超声波波动方程。对方程求解后可以得到材料的非线性系数 β 为:

$$\beta = 8 \left(\frac{A_2}{A_1^2} \right) \frac{1}{k^2 x} \quad (1)$$

式中 k 为波数, 与声波频率和波速有关, x 为声波传播距离。当声波频率和超声波传播距离一定时, 由式(1)可知, 测量出基波和二次谐波幅值 A_1 和 A_2 的值, 就可确定材料的超声非线性系数。

金属作为一种晶体, 其疲劳损伤与晶体中位错的运动存在密切的关系, 周期性疲劳载荷的作用下, 金属材料内部的位错密度、位错弦长、位错组态和滑移带等微观结构将发生变化, 从而使超声非线性系

收稿日期: 2011-08-05; 修订日期: 2011-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(10802027); 河南工业大学高层次人才基金(2011BS047)

作者简介: 颜丙生(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为新材料和结构的超声无损检测新技术, (E-mail) yanbingsheng@163.com。

数有较显著的改变^[11]。因此超声非线性系数 β 可用作描述介质非线性的量化指标,特别是对材料的早期疲劳寿命预测将具有重要的实际意义。

在本实验中,为了研究方便,采用 $\beta = A_2/A_1^2$ 来表征超声非线性系数的变化情况。显然,它与材料的绝对非线性系数成正比^[12]。

2 实验系统与测量方法

图1所示为超声非线性系数测量系统。系统主要包括信号发生器33220A、功率放大器AG1016、MTS810材料疲劳试验机、高能低通滤波器、衰减器、传感器、示波器、计算机以及被测试件和夹具。

整个实验系统采用透射法测量基波和二次谐波的幅值。信号发生器产生的单频正弦波经放大、滤波后,驱动固定于被测试件一端的压电传感器,向试件中输入单频超声波。位于试件另一端的压电传感器将采集传来的包含有高频成分的超声波信号,然后对采集到的信号进行FFT变换,最终得到基波和二次谐波的幅值,进而确定非线性系数的值。

采用美国RETIC公司的高能低通滤波器来滤除功率放大器射频门产生的高频干扰。衰减器把从滤波器引出的一路信号衰减后作为监测信号输入示波器,通过监测信号可以控制输入发射传感器信号的幅值。一对中心频率分别为5MHz和10MHz的Panametrics窄带PZT超声探头作为发射和接收传感器。由于进行非线性测量时,激励信号幅值较大,普通耦合剂容易挥发,采用比较稳定的锂基黄油作为耦合剂。一个特殊的夹具来保证检测时探头和试件之间的充分和稳定的耦合,同时保持发射传感器和接收传感器在同一轴线上,以免能量损失。

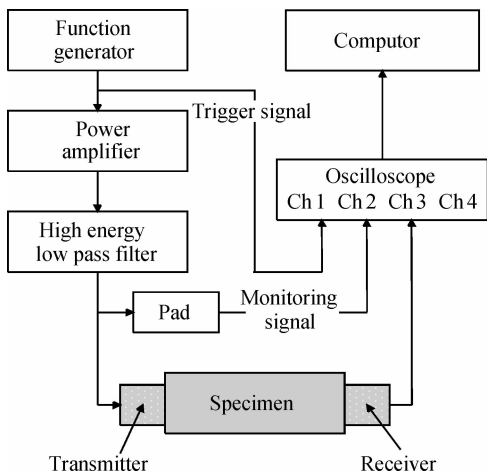


图1 实验系统示意图

Fig.1 The layout of experimental system

3 LY12 硬铝材料性质和试件设计制作

LY12硬铝合金密度为 2790kg/m^3 ,弹性模量 $E = 73\text{GPa}$,泊松比 $\nu = 0.32$ 。根据GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》,通过三根标准的狗骨试件拉伸试验得到的LY12硬铝合金屈服强度为390MPa,抗拉强度为532MPa,纵波波速为6485m/s。

图2为试件尺寸示意图,为圆棒形,试件分为A、B两组,A组为未进行疲劳加载的原始试件,共一根。B组共13根,分别在疲劳试验机上作循环周期为500,1100,1700,2300,2900,3500,4100,4700,5300,6000,6600,7200和8100周次的低周拉-压疲劳,加载应力取屈服强度的 $\pm 60\%$ ($\pm 234\text{MPa}$), $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1$,加载频率为10Hz。试件卸载后沿切割线截取长40mm,直径14mm的有效应变部分,对切割下的试件表面特别是安装传感器的试件两端进行仔细的抛光打磨。

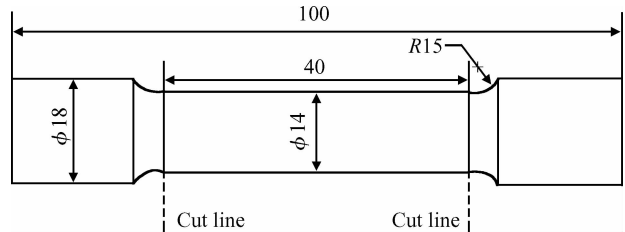


图2 试件尺寸示意图

Fig.2 Dimensions of specimen

4 实验结果与分析

4.1 实验信号

对加载到5300周的试件进行非线性超声检测,激励信号为频率5MHz的单一频率正弦波,为了减少仪器和随机因素产生的高频谐波干扰,取试件在超声波传播方向所能容纳的不与接收信号重叠的最大周期数作为正弦脉冲串信号周期数。根据超声波在LY12铝合金上传播的距离和波速,本实验选用激励信号周期数为32个。

图3a为接收到的时域信号。进行FFT变换后,在频率为5MHz的基频位置上可以得到基波幅值 A_1 ,如图3b中实线所示,基波对应图中左边坐标;在频率为10MHz的倍频位置上可得到二次谐波幅值 A_2 ,如图3b中虚线所示,二次谐波对应图中右边坐标。由于基波和二次谐波幅值相差较大,为了方便观察,采用不同的纵坐标尺度。

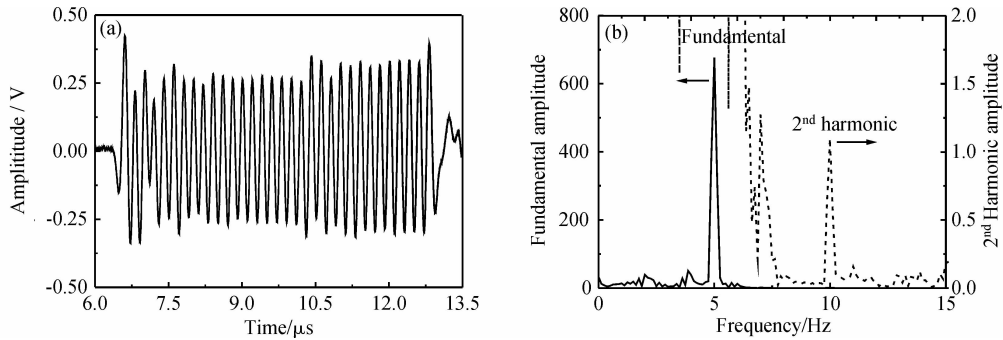


图3 实验信号 (a) 接收时域信号;(b)基波和二次谐波幅值

Fig.3 Experimental signals (a) received time domain signals;(b) fundamental and 2nd harmonic amplitude

4.2 实验结果

利用上述实验系统和实验方法对 A 组和 B 组试件进行了超声非线性系数的实验测量。 β_0 为 A 组未疲劳试件的超声非线性系数, β 为疲劳到不同程度下的 B 组试件的超声非线性系数, 用 β/β_0 对超声非线性系数进行归一化。用疲劳寿命的百分比, 即试件不同循环加载周次与疲劳寿命的比值来表示疲劳损伤的程度。

图 4 为归一化后的超声非线性系数与疲劳寿命百分比的关系。从图中可以看出, 随着试件疲劳程度加深, 归一化后的超声非线性系数整体呈增长趋势。LY12 铝合金的超声非线性系数与疲劳寿命百分比的关系可以分为两个阶段, 第一阶段在疲劳寿命约 60% 之前, 超声非线性系数随疲劳周次的增加明显单调增加。第二阶段在疲劳寿命约 60% 之后, 超声非线性系数出现较大波动。实验结果表明, 对于 LY12 铝合金, 表征材料早期疲劳损伤的非线性超声特征参数超声非线性系数非常敏感, 金属材料超声非线性系数与疲劳寿命之间的关系可以用来表征材料的早期疲劳过程, 如果事先对某种材料零部件的超声非线性系数进行标定, 则有望利用非线性超声无损检测技术来定期离线检测在役零部件的疲劳程度。

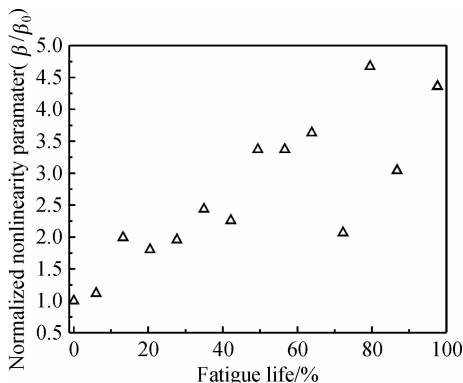


图4 归一化后的超声非线性系数与疲劳寿命百分比的关系

Fig.4 Normalized nonlinearity parameters versus the percentage of fatigue life

5 LY12 铝合金疲劳试件的微观验证

5.1 微观观察方法与试样

Cantrell 等人提出的位错理论模型认为材料的超声非线性效应来源于超声波与位错等微观缺陷的相互作用^[13], 位错密度、位错弦长和位错偶间距的变化会相应引起特征参数超声非线性系数的变化。位错是一种原子尺寸的微缺陷, 目前, 在研究位错的密度、分布和组态以及运动和交互作用过程中, 常常应用光学、电子和场离子显微镜及 X 射线技术对位错进行观察。为了从材料微观结构上对非线性超声检测结果进行验证, 研究超声非线性系数与其对应位错密度的变化关系, 选用浸蚀法观察原始状态和不同疲劳周次时 LY12 铝合金的位错密度变化。

浸蚀法是利用位错蚀坑显示晶体表面位错露头的一种光学观察方法。试样加工分为切割、镶嵌、打磨、抛光、浸蚀和观察等几个步骤。切割时选取不同疲劳试件相同的位置和晶面。浸蚀液成分为 1% HF + 1.5% HCl + 2.5% HNO₃ + 95% H₂O。为了保证实验条件的一致, 浸蚀时间统一为 60s。图 5 所示为镶嵌后的微观试样, 实验中发现横截面存在大量的位错蚀坑并有明显的晶界。纵截面中有明显拉长的晶界, 观察面中的位错较少。因此, 统一选择横截面作为观察面。

使用 KEYENCE VHX-600 光学数字显微镜对制作好的 LY12 疲劳试样进行光学观察, 微观观察的目的是要比较不同疲劳程度试件的位错密度, 必须尽可能地使观察条件一致来保证对比的准确性。观察条件包括观察面、放大倍数, 场强和偏光等。

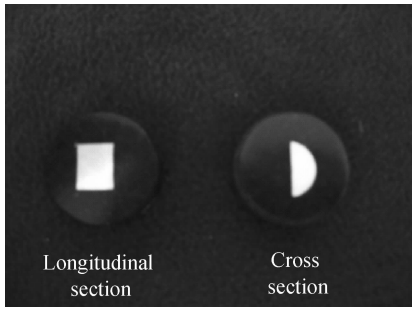


图5 微观观察试样

Fig. 5 The specimen of optical microstructures

5.2 微观观察结果

在尽量保证实验条件一致的情况下,利用上述实验仪器和微观观察方法分别对不同疲劳周次的LY12硬铝试样进行了观察,使用偏光所得的结果如图6所示。

图6为LY12硬铝不同疲劳周次时试样的光学显微图。位错蚀坑的形状与晶体表面的晶面有关,对于立方晶系的晶体,位错蚀坑在观察面为 $\{111\}$ 的晶面,呈正三角形漏斗状,所以可以判定图中所显示的规则正三角蚀坑为位错蚀坑。从图中可以看出,

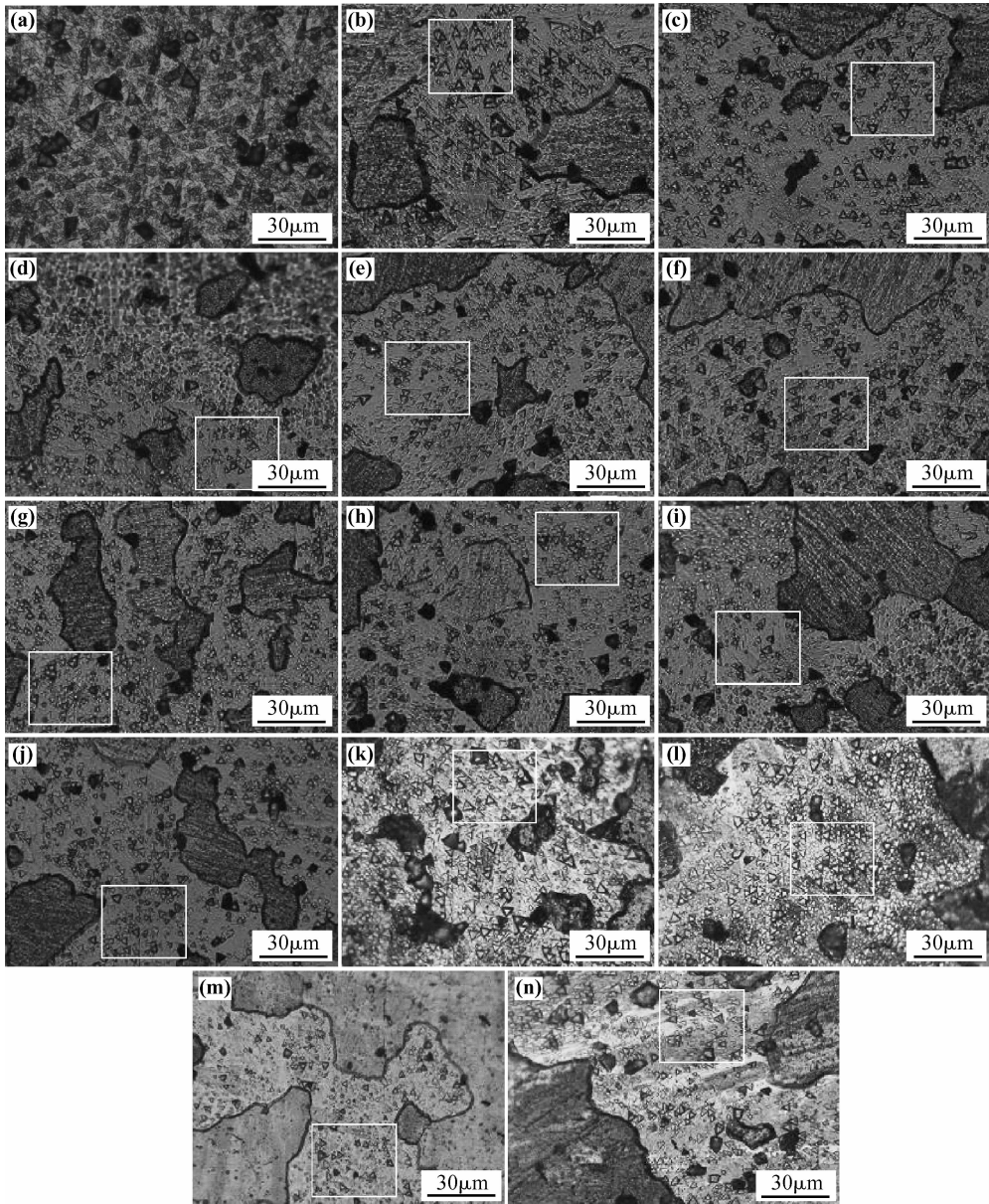


图6 不同疲劳周次试样的光学显微图 (a)原始;(b)500周;(c)1100周;(d)1700周;(e)2300周;(f)2900周;(g)3500周;(h)4100周;(i)4700周;(j)5300周;(k)6000周;(l)6600周;(m)7200周;(n)8100周;

Fig. 6 Optical observation results of different fatigued cycles specimens (a)original; (b)500 cycles; (c)1100 cycles; (d)1700 cycles; (e)2300 cycles; (f)2900 cycles; (g)3500 cycles; (h)4100 cycles; (i)4700 cycles; (j)5300 cycles; (k)6000 cycles; (l)6600 cycles; (m)7200 cycles; (n)8100 cycles;

除原始试样外,在疲劳的不同阶段均明显存在规则的三角形位错蚀坑,且呈有规律的均匀分布。通过对位错蚀坑的统计可以获得位错密度的变化,从而用来验证非线性超声实验结果,并有望进一步建立超声非线性系数的变化与微观结构变化之间的关系。

5.3 微观观察结果分析

位错是晶体中的线缺陷,单位体积晶体中所含位错线的总长度称为位错密度。若将位错线视为彼此平行的直线,他们从晶体的一面均延至另一面,则位错密度便等于穿过单位截面积的位错线头数,即:

$$\rho = \frac{n}{A} \quad (2)$$

式中 ρ 为位错密度, A 为晶体的截面积, n 为 A 面积内位错线头数。

对于本实验,要统计计算不同疲劳周次试样的位错密度,可以分两步进行:(1)在每个试样显微图上选定合适的、相同的计算面积。由于每个试样显微图中的位错蚀坑分布都不是绝对均匀,所以尽量选取位错蚀坑清晰,分布均匀的区域作为统计区域。图6中白色方框所框部分为位错蚀坑统计区域。(2)数出每个试样显微图中统计区域内的位错蚀坑个数。由于在同一显微图中统计区域内的位错蚀坑大小不一,深浅不同,所以在统计位错蚀坑个数时,统一选取边界清晰、完整、均匀,在同一图中大小相等的位错蚀坑。由于每幅图的统计区域相同,可以直接采用位错头数的变化来表示位错密度的变化。

图7为位错密度和超声非线性系数与疲劳寿命百分比的关系,图中上三角符号所在曲线为LY12硬铝疲劳试件的超声非线性系数与疲劳寿命百分比关系曲线图,对应图中左边坐标。下三角符号所在曲线为LY12硬铝疲劳试件的位错密度与疲劳寿命

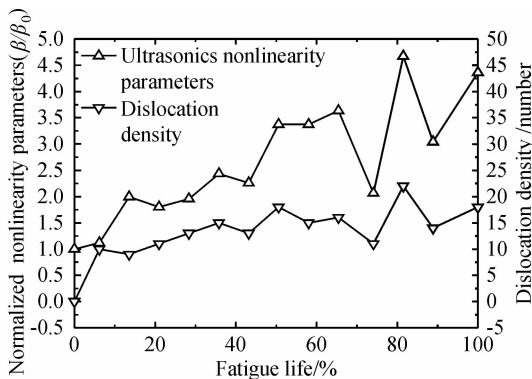


图7 位错密度和超声非线性系数与疲劳寿命百分比的关系

Fig. 7 The relationship of dislocation density and ultrasonics nonlinearity parameters with percentage of fatigue life

百分比关系曲线图,对应图中右边坐标。从图中可以看出,两条曲线的整体趋势相似,表明超声非线性系数的变化与位错密度的变化是一致的。

超声非线性系数随疲劳周次增加整体呈增长趋势,但并非单调增加,特别是对于6000周次和6600周次试件,超声非线性系数出现明显骤变,微观观察结果的位错密度也显示了相对应的变化,更进一步表明超声非线性效应与晶体中的位错有关,超声非线性系数可以表征晶体材料内部位错的变化,进而预测材料的力学性能退化程度。

另外,图中位错密度的变化与超声非线性系数的变化并不完全一致,比如500周次试件的超声非线性系数较小,但位错密度却比较大。这可能主要是由以下两方面原因造成的:(1)微观观察实验时,每次观察的光强、角度、打磨和腐蚀等实验条件尽可能地保证一致,但不可能做到绝对的一致。特别是腐蚀液的浓度,打磨的标准较难控制。(2)实验时只是假定材料内部位错分布是均匀的,但实际存在分布集中现象,虽然截取的是每个试件的同一部位,但机加工和观察区域的选择均存在无法避免的偏差。

6 结论

(1) 研究发展了一套利用PZT压电传感器离线测量超声非线性系数的实验系统。利用该系统测量了LY12硬铝合金疲劳试件的超声非线性系数,实验结果表明,超声非线性系数对材料早期疲劳损伤非常敏感。

(2) 采用浸蚀法观察了LY12硬铝合金疲劳退化试件的内部位错密度变化,超声非线性系数和位错密度随疲劳周次的变化近似一致,表明超声非线性效应与晶体中的位错有关,超声非线性系数可以表征晶体材料内部位错的变化,进而预测金属材料的疲劳寿命。

参考文献:

- [1] 高桂丽,李大勇,董静薇. 铝合金薄板疲劳裂纹的非线性声学特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 71-76.
- [2] SZILARD J, Ultrasonic testing: non-conventional testing techniques[M]. Nork: John Wiley & Sons Ltd, 1982.
- [3] NAGY P B. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization[J]. Ultrasonics, 1998, 36: 375-381.

- [4] JHANG Kyung-Young. Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: a review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009, 10(1):123 – 135.
- [5] CANTRELL J H, YOST W T. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures [J]. Int J Fatigue, 2001, 23: S487 – S490.
- [6] BUCK O, ALERS G A. Nonlinear acoustic properties of structural materials a review [C]//THOMPSON O, CHIMENTI De, Review of progress in QNDE. New York: Plenum Press B, 1990:1677 – 1681.
- [7] KIM J Y, JACOBS L J, QU J, *et al.* Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic waves [J]. Journal of the Acoustic Society of America, 2006, 120(3): 1266 – 1273.
- [8] SHUI Guo-shuang, KIM Jim-Yeon, QU Jian-min, *et al.* A new technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using Rayleigh waves [J]. NDT&E International, 2008, 41(1):326 – 329.
- [9] 吴斌, 颜丙生, 何存富, 等. AZ31 镁合金早期力学性能退化非线性超声检测 [J]. 航空材料学报, 2011, 31(1): 82 – 88.
- [10] BREAZEALE M A, JACOB P. Determination of third order elastic constants from ultrasonic harmonic generation measurements[J]. Physical Acoustics, 1984, 17:1 – 60.
- [11] YOST W T, CANTRELL J H. Materials characterization using acoustic nonlinearity parameters and harmonic generation[J]. Rev QNDE, 1990, 9B:1669 – 1676.
- [12] 税国双, 汪越胜, QU Jianmin, 等. 利用直接激发 Rayleigh 表面波的方法测量材料的声学非线性系数 [J]. 声学学报, 2008, 33(4):378 – 384.
- [13] CANTRELL J H. Substructural organization, dislocation plasticity and harmonic generation in cyclically stressed wavy slip metals [J]. Proc R Soc Lond (A), 2004: 316 – 322.

Using Nonlinear Ultrasonic Test for Fatigue Damage of LY12 Aluminum Alloy

YAN Bing-sheng, ZHANG Shi-xiong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, ZhengZhou 450007, China)

Abstract: For the problem of the LY12 aluminum early fatigue damage, a robust experimental procedure was researched. Using this system, the ultrasonic nonlinearity parameters of LY12 aluminum fatigue samples were measured. The experimental results show that there is a significant increase in β linked to aluminum fatigue damage, before the fatigue life of 60%. Meanwhile, dislocation density change of LY12 aluminum fatigue samples is observed using erosion method, and the changes of nonlinearity parameter and dislocation density with fatigue cycles are consistent. Macro-mechanics, nonlinear ultrasonic testing and microscopic observation results show that ultrasonic nonlinearity parameters as the bridge between micro and macro can characterize the early fatigue damage, and predict fatigue life of metallic material.

Key words: nonlinear ultrasonic; LY12 aluminum; fatigue damage; observation of microstructure