DOI: 10.3901/JME.2013.04.020

非线性超声检测镁合金早期疲劳的试验研究*

颜丙生¹ 刘自然¹ 张跃春² 汤宝平¹

(1. 河南工业大学机电工程学院 郑州 450007;

2. 中国航空动力机械研究所 株洲 412002)

摘要: 为利用基于二次谐波的非线性超声方法检测镁合金材料的早期疲劳损伤, 建立超声非线性系数 β 的测试试验系统, 设计制作预设应力集中区的厚板镁合金疲劳试件, 并通过有限元法仿真应力集中区的有效性。对三个不同疲劳加载模式的镁合金试件进行非线性超声检测试验研究。结果表明, 在疲劳寿命的早期, 三个试件的超声非线性系数均随疲劳周数明显增加。同时, 测量其中一个试件在非应力集中区的超声非线性系数, 与应力集中区相比, 超声非线性系数变化幅度只有应力集中区的27%, 进一步表明超声非线性系数的变化来源于镁合金材料疲劳引起的微缺陷变化, 也证实试验的可靠性。另外, 波速和弹性常数的试验结果表明, 这两个线性参数对于镁合金材料的早期疲劳损伤不如超声非线性系数敏感。

关键词: 非线性超声 疲劳损伤 AZ31 镁合金 无损检测

中图分类号: TB551 TB534

Experimental Study of Early Fatigue Nonlinear Ultrasonic Detection in Magnesium Alloy

YAN Bingsheng¹ LIU Ziran¹ ZHANG Yuechun² TANG Baoping¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450007;

2. AVIC Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002)

Abstract: In order to monitor the early fatigue damage of AZ31 magnesium alloy by nonlinear ultrasonic basing on second harmonic, the measurement system of ultrasonic nonlinearity parameters is established. Thick plate fatigue specimens of magnesium alloy are designed, these specimens are pre-stress concentration area, and the effectiveness of stress concentration area is simulated by the finite element method. Ultrasonic nonlinearity parameters β of three magnesium specimens with different loading stress are measured, the experimental results show that there is a significant increase in β linked to fatigue degree in the early stages of fatigue life. Meanwhile, β of non-stress concentration area are measured to one specimen, the ultrasonic nonlinearity parameters magnitude is the 27% of stress concentration zone, and further show that the changes in β derive from the changes of micro-defect by magnesium alloy material fatigue, and also confirm the reliability of the experiment. In addition, the experimental results of the wave velocity and elastic constants show that the two linear parameters are not sensitive to early fatigue damage of the magnesium alloy material.

Key words: Nonlinear ultrasonic Fatigue damage AZ31 magnesium alloy Nondestructive testing

0 前言

疲劳断裂是金属零部件失效的主要原因, 常常突然发生, 且往往导致灾难性的灾害。据统计, 大约70%以上(有人认为90%)的机械零部件失效是由

疲劳断裂损坏所引起的。在外界持续疲劳载荷的作用下, 金属材料内部微结构变化表现为位错的萌生、增多和滑移, 驻留滑移带开裂, 微裂纹的萌生和发展, 直至宏观裂纹出现而断裂失效。对于设计良好的结构元件, 宏观裂纹出现前的阶段往往占据了结构材料整个疲劳寿命的80%~90%^[1]。因此, 发展材料和结构早期疲劳的无损检测手段就显得十分重要。

* 国家自然科学基金(10802027)和河南工业大学高层次人才基金(2011BS047)资助项目。20120705收到初稿, 20121215收到修改稿

目前比较成熟的超声无损检测技术主要针对的是材料或结构的宏观缺陷,比如对材料中孔及裂纹的发展阶段进行检测。这主要应用了波的时程、声速、衰减、阻抗等信息。但位错、驻留滑移带以及内部的微裂纹等损伤在材料中是分散的,并不存在某个声阻抗集中变化的缺陷引起超声波传播的反射和散射,而且这些损伤对超声的线性传播特性如衰减、声速等影响甚微,现有的试验手段很难准确测量。

声波动实际上是非线性的,只是在振幅较小的情况下可取线性的近似。随着声振动频率和强度的提高,非线性效应常不可避免,它表现为波形畸变、谐波发生、声饱和等。在近期的非线性声学研究中,人们发现材料性能退化与超声波透过材料传播的非线性效应密切相关。一系列的试验表明,材料力学性能退化总是伴随着某种形式的材料非线性力学行为,从而引起超声波传播的非线性,即高频谐波的产生^[2-7]。对多晶和单晶金属材料来说,它们所承受的疲劳循环周数与高频谐波之间存在紧密关系^[8]。

镁合金是一种绿色材料,性能优越,已广泛用于轻量化汽车行业、航空航天器和火箭导弹制造工业中,但镁合金构件抗疲劳性能较差^[9]。本文选用已经被广泛使用且配比成熟的 AZ31 镁合金作为研究对象,建立了超声非线性系数的测量试验系统,通过厚板镁合金疲劳试件的设计制作,研究了不同疲劳加载模式的镁合金非线性声学特性。同时,测量了镁合金疲劳试件的波速和弹性常数的变化。

1 超声非线性系数

实质上,固体介质都是非线性的,固体材料的许多性质直接地决定于其非线性性质,如有限振幅声波在固体中传播时会产生波形畸变和谐波滋生等非线性现象,这些非线性效应直接反映了固体弹性的非线性^[10]。由于固体介质的非线性,单一音频声波在固体材料中传播时将与其产生非线性相互作用,从而产生高次谐波。这些声非线性效应主要源自于固体介质的晶格非谐和性或位错、驻留滑移带和微裂纹等晶体缺陷^[11]。为了要定量地了解固体中非线性超声传播规律,BREAZEALE 等^[12]从连续介质出发,建立了固体介质内的一维纵波非线性波动方程,进而可以得到材料的非线性系数

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

根据式(1),对于给定的声波频率和样品长度,通过对基波和二次谐波幅值 A_1 和 A_2 的测量,就可以

确定材料的超声非线性系数。本文中,采用相对非线性系数 $\beta \sim A_2 / A_1^2$ 来表征超声非线性系数的变化情况^[13]。

超声非线性系数 β 反映了当声波穿过非线性材料时波形畸变的程度,可以作为描述介质非线性的量化指标。根据非线性系数的定义,材料的超声非线性系数与材料的高阶弹性常数有关,而高阶弹性常数与材料的微观结构、内部组分或微缺陷密切相关,反应了物质的动力学特征^[10]。金属材料在疲劳载荷的作用下,内部的位错、驻留滑移带和微裂纹等缺陷随之发生变化,从而使超声非线性系数有较显著的改变。因此,超声非线性系数可以表征由于外力引起的材料力学性能退化。

2 试件设计与测量方法

2.1 试件

试件材料采用变形镁合金 AZ31 棒材。图 1 所示为试件实物图,表面均经过仔细的打磨抛光。

图 1 镁合金试件实物图

试件总长为 150 mm,宽为 24 mm,厚为 7.5 mm,受力部分长为 50 mm。为了有效定位检测试件的疲劳损伤变化,利用半径为 157 mm 的圆弧在试件受力部分中心处预设应力集中区域。同时利用 Abaqus 有限元分析软件对应力集中区的有效性进行了仿真。图 2 为试件预设应力集中区的有限元仿真云纹图,从图 2 中可以看出,应力集中在试件的中间部分,试件设计合理。

图 2 试件预设应力集中区有限元仿真云纹图

2.2 试验系统与测量方法

图3、4所示分别为金属材料超声非线性系数在线测量试验系统实物图和系统框图。图3中引线所指为设计的夹具,利用此夹具将制作好的镁合金试件固定在MTS810材料试验机上进行疲劳加载,一定周数后停止加载,进行非线性超声检测试验,过程如下:信号发生器产生单频正弦脉冲串,由功率放大器放大1 000倍,再由高能低通滤波器滤除功率放大器射频门产生的高频干扰,然后输入到中心频率为5 MHz超声发射压电换能器(另一路信号经衰减器衰减后,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);单一频率的正弦脉冲串沿试件厚度方向传播,在传播的过程中,由于位错和滑移带等微缺陷的存在,超声波中会引入二次谐波;为了更好地获取频率为10 MHz的二次谐波,采用中心频率为发射传感器二倍的压电换能器收集含有谐波成分的信号。通过快速傅里叶变换,可以得到接收信号中的基波和二次谐波的幅值。然后重新对试件疲劳加载,重复上述步骤,直至试件疲劳断裂。

图3 疲劳试件的非线性超声检测试验系统实物图

图4 疲劳试件的非线性超声检测试验系统系统框图

所设计的夹具可以保证在线检测时探头和试件之间的充分耦合,也可以保持发射传感器和接收

传感器在同一轴线上,避免能量损失。

图5为激励和接收时域信号,实线为激励信号,对应图5中左边坐标,虚线为接收信号,对应图5中右边坐标。

图5 激励和接收时域信号

图6为接收信号的基波和二次谐波幅值。在频率为5 MHz的基频位置上可以得到基波幅值 A_1 ,对应图6中左边坐标;相比于基波,二次谐波非常小,为了清晰地观察二次谐波,对信号幅值坐标进行了放大。在10 MHz的二倍频位置上可以得到二次谐波幅值 A_2 ,如图6虚线所示,对应图6中右边坐标。

图6 基波和二次谐波幅值

3 镁合金疲劳加载的非线性超声检测

3.1 试件的疲劳加载模式及试验结果

疲劳试件共3根,分别为A、B和C,试件A和B分别在MTS810全自动材料疲劳试验机上进行拉压疲劳。疲劳加载频率10 Hz, $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$ 。为了观察不同疲劳周数对试验结果的影响,给试件A、B施加不同的加载应力。试件A加载应力取屈服极限的 $\pm 65\%$ (± 129 MPa),疲劳寿命为66 500周。试件B加载应力取屈服极限的 $\pm 60\%$ (± 119 MPa),疲劳寿命为113 200周。

试件C在疲劳试验机上进行拉-拉疲劳,疲劳加载频率10 Hz, $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$,加载应力为

18.9~189 MPa, 疲劳寿命为 43 600 周。所有试件的疲劳加载均为正弦交变应力。

首先测量未进行疲劳加载试件的非线性系数 β_0 , 然后每隔固定周数停止疲劳加载, 测量试件的非线性系数 β , 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 7 为镁合金试件疲劳损伤非线性超声检测结果。从图 7 中可以看出, 虽然三个试件的加载应力不同, 超声非线性系数随着疲劳周数增加而增加的整体趋势基本相同, 特别是疲劳早期近似于单调增加, 说明这些曲线可以表征材料早期疲劳损伤的某种规律, 超声非线性系数、镁合金试件内部微结构变化以及外加载荷之间存在某种必然的联系。每条曲线都可以分为两个阶段, 第一阶段在疲劳寿命的 55% 左右之前, 超声非线性系数随疲劳周数的增加明显单调增加, 这可能是由于试件内部位错和驻留滑移带等微缺陷的累积造成的; 第二阶段在疲劳寿命的 55% 左右之后, 超声非线性系数出现较大波动, 这可能是因为试件疲劳后期, 材料内部出现宏观裂纹, 从而增大了二次谐波的衰减。

图 7 疲劳检测结果

3.2 测量位置对试验结果的影响

为了研究测量位置对超声非线性系数的影响, 对于试件 A, 在三个不同位置同时测量超声非线性系数。图 8 为测点位置示意图, 图 8 中测点 1 在应力集中区, 测点 2 和 3 对称分布在应力集中区两边。

图 8 测点位置示意图

图 9 为三个测点的测量结果, 从图 9 中可以看出, 虽然三个测点的超声非线性系数随疲劳周数整

体变化趋势基本相同, 但变化幅值相差较大。测点 1 的超声非线性系数值随疲劳周数增加较快, 超声非线性系数最大值达到未疲劳时超声非线性系数值的 1.5 倍; 测点 2 和 3 的超声非线性系数值虽然也随疲劳周数增加, 但最大值只有未疲劳时超声非线性系数值的 1.18 倍, 与应力集中区相比, 超声非线性系数变化幅度只有应力集中区的 27%, 这主要是因为测点 1 处在应力集中区, 相应的内部微观结构变化较大, 从而引起超声非线性系数的变化。同时说明, 试验测量的超声非线性系数的变化是由材料微观缺陷而不是由试验仪器等的非线性产生的, 进一步验证了试验的可靠性。

图 9 不同测点的试验结果

3.3 波速与弹性常数的测量

从理论上讲, 金属材料在受到疲劳载荷后, 密度会发生变化, 波速也会因密度的改变而发生改变, 进而使材料的弹性模量发生改变。利用实验室小试件材料弹性常数测试系统同时测量试件 C 的纵波波速和弹性常数。

下表为所测试件 C 的波速和弹性常数。从下表中可以看出, 随疲劳周数的增加, 波速和弹性常数没有出现规律性的变化, 由于每次测量的是同一个试件的同一个位置, 不存在试件的个体差异。表明波速和弹性常数对于金属材料的早期疲劳损伤不如超声非线性系数敏感, 不能作为检测早期疲劳损伤的特征参数。

表 试件 C 的波速和弹性常数

疲劳周数	纵波波速 /(m/s)	弹性常数 /GPa
0	5 710	46.68
6 000	5 763	42.11
12 000	5 622	46.71
18 000	5 726	45.38
24 000	5 723	45.12
30 000	5 705	46.06
36 000	5 693	46.98

4 结论

(1) 通过对 AZ31 镁合金疲劳寿命和超声非线性系数的关系研究表明, 超声非线性系数可以很好地表征 AZ31 镁合金的早期疲劳退化过程, 所得到的曲线对材料和结构的力学性能退化程度进行无损检测和疲劳寿命预测有潜在的应用价值。

(2) 随疲劳周数增加, 超声非线性系数都随之增大, 但弹性常数和波速等线性参数没有规律性变化, 表明超声非线性系数比弹性常数等线性参数敏感。不同位置的超声非线性系数测试结果, 进一步验证了试验的可靠性。

(3) 对不同加载应力方式下的镁合金疲劳损伤进行了在线非线性超声检测试验研究。试验结果表明, 非线性超声无损检测方法可以用于多种疲劳加载方式下的力学性能退化检测, 对实际的工程应用有重要指导作用。

基于非线性超声的金属材料早起疲劳损伤无损检测技术有很好的应用前景, 通过研究, 取得了一定的成果。但在试验仪器研制、信号处理、材料和波结构的扩展等方面需要进一步的研究和探索。

参 考 文 献

- [1] MEYENDORF N G H, ROSNER H K V. Thermo-acoustic fatigue characterization[J]. Ultrasonics, 2002, 40: 427-434.
- [2] NAGY P B. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization[J]. Ultrasonics, 1998, 36(1-5): 375-381.
- [3] 高桂丽, 李大勇, 董静薇, 等. 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.
GAO Guili, LI Dayong, DONG Jingwei, et al. Nonlinear acoustic characteristics of fatigue cracks in aluminum alloy sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 71-76.
- [4] 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.
- [5] JHANG K Y. 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.
- [6] SHUI Guoshuang, KIM J Y, QU Jianmin. A new technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using Rayleigh waves[J]. NDT & E International, 2008, 41(1): 326-329.
- [7] JAYA R V V S, ELANKUMARAN K, RAGHU V P. Observation of two stage dislocation dynamics from nonlinear ultrasonic response during the plastic deformation of AA7175-T7351 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 512(1-2): 92-99.
- [8] CANTRELL J H, YOST W T. Acoustic harmonic generation from fatigue-induced dislocation dipoles[J]. Phil. Mag., 1994, 69(2): 315-326.
- [9] SOHN K Y, JONES J W, BERKMORTEL J, et al. Creep and bolt load retention behavior of die cast magnesium alloys for high temperature application[R]. SAE, 20002-012-1120, 2000.
- [10] 税国双, 汪越胜, 曲建民. 材料力学性能退化的超声无损检测与评价[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 52-68.
SHUI Guoshuang, WANG Yuesheng, QU Jianmin. Advances in nondestructive test and evaluation of material degradation using nonlinear ultrasound[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 52-68.
- [11] CANTRELL J H. Substructural organization, dislocation plasticity and harmonic generation in cyclically stressed wavy slip metals[J]. Proc. R. Soc. Lond A, 2004, 460(2043): 757-780.
- [12] BREAZEALE M A, PHILIP J. Determination of third order elastic constants from ultrasonic harmonic generation measurements[C]//Physical acoustics: Principles and methods, Orlando, FL: Academic Press, Inc., 1984: 1-60.
- [13] 颜丙生, 吴斌, 何存富. 利用非线性 Rayleigh 波检测镁合金厚板疲劳损伤的仿真和试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18): 7-14.
YAN Bingsheng, WU Bin, HE Cunfu. Simulation and experiment of fatigue damage detection in magnesium thick plate using nonlinear Rayleigh wave [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(18): 7-14.

作者简介: 颜丙生, 男, 1978 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为超声无损检测新技术。

E-mail: yanbingsheng@emails.bjut.edu.cn

刘自然, 男, 1962 年出生, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为现代检测技术和机械故障诊断。

E-mail: liuziran@haut.edu.cn

张跃春, 男, 1963 年出生, 研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为机械传动技术。

E-mail: zhangyuechun@tom.com