

文章编号 1004-924X(2011)01-0132-06

# 微纳米级裂纹的非线性超声检测

敦 怡<sup>1,2</sup>, 师小红<sup>1</sup>, 王广龙<sup>1</sup>, 周兆英<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003; 2. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:** 为了实现对金属材料中微纳米级裂纹的超声检测, 建立了非线性超声检测系统, 研究了超声波与金属材料中裂纹的相互作用以及超声波的畸变效应。介绍了固体中普遍存在的超声非线性现象; 以金属材料中的微纳米级裂纹为例研究了裂纹与超声波相互作用产生的畸变效应; 在分析超声波产生畸变的基础上, 描述了超声高次谐波振幅的测量方法。最后, 以金属材料疲劳裂纹为例, 利用常规超声检测和非线性超声检测两种方法, 证明了非线性超声检测在微纳米级裂纹检测中的有效性。实验结果表明: 疲劳裂纹扩展长度与二次谐波激发效率关系密切; 利用二次谐波, 非线性超声检测方法检测出的裂纹长度比常规超声检测方法检测出的裂纹长度增加了 30%, 实现了对金属材料微纳米级裂纹的检测。

**关键词:** 非线性超声检测; 无损检测; 二次谐波; 微纳裂纹

**中图分类号:** TB553; TG115 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111901.0132

## Nonlinear ultrasonic test of micro-nano crack

DUN Yi<sup>1,2</sup>, SHI Xiao-hong<sup>1</sup>, WANG Guang-long<sup>1</sup>, ZHOU Zhao-ying<sup>2</sup>

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A self-built nonlinear ultrasonic test system was established and the interaction between ultrasonic waves and cracks in metal materials and the distortion effects of ultrasonic waves were researched to implement the ultrasonic test of micro-nano cracks in metal materials. On the basis of the presumption that nonlinearity of ultrasonic waves in solid materials is universal, the distortion effect caused by the interaction between ultrasonic waves and the micro-nano cracks in metal materials was explored. Then, according to the analysis on the distortion effect, the measurement of ultrasonic high-order harmonic amplitude was illustrated. Finally, a regular ultrasonic test and a nonlinear ultrasonic test were conducted respectively on fatigue cracks in metal materials, which proves that the nonlinear ultrasonic test is more effective for the micro-nano crack detection. Experiments show that the length of a fatigue crack is relative closely to the exciting efficiency of the second harmonics and the length of the crack detected by the nonlinear ultrasonic method based on the second harmonics is 30% longer than that by the regular ultrasonic test, which realizes the test for micro-nano cracks in metal materials.

**Key words:** nonlinear ultrasonic detection; non-contact detection; second harmonic; micro-nano cracks

收稿日期: 2010-03-26; 修订日期: 2010-05-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50805145)

## 1 引 言

随着新材料和新技术的应用,人们日益关注超声无损检测技术的精度问题。对于常规超声波探伤而言,其检测分辨力的理论极限值是检测声波波长的一半。然而,在材料制备过程、机械加工以及设备服役过程中,往往会产生超微裂纹(纳米级空隙的缝隙)、闭合裂纹(产生裂纹后又闭合在一起,没有空隙但存在界面)以及伪结合(如复合材料界面间的机械贴合)等微纳米级裂纹<sup>[1]</sup>。超微裂纹和闭合裂纹等缺陷多存在于机械设备和工程结构构件的疲劳损伤初期阶段,占结构材料整个疲劳寿命的80%~90%<sup>[2]</sup>,是造成机械设备和工程结构重大事故的隐患。

力学、声学和材料学领域最新研究表明:材料性能退化(应力、疲劳和微裂纹等)与超声波透过材料传播的非线性效应密切相关。材料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,譬如高频谐波的产生<sup>[3]</sup>。相对于基频谐波来说,高频谐波参量对材料的疲劳寿命、拉伸性能退化、蠕变损伤、界面粘接强度等更为敏感<sup>[4-9]</sup>。实验表明,当疲劳载荷循环次数达到一定值时,非线性系数较线性系数有非常明显的变化<sup>[10]</sup>。因此,通过测量二次或三次谐波系数,可以评价材料的早期性能退化,这为超声无损检测与评价技术的发展提供了新的思路。

目前,非线性超声检测系统多通过收发分置的两个换能器进行接触法透射式测量,采用特定的RITEC SNAP系统,利用外差法进行频谱搬移得到高次谐波。该方法设备复杂且昂贵;由于采用透射式测量,不适合进行工业现场检测。

本文将非线性超声检测技术应用于金属材料微纳米级裂纹的检测,建立了基于反射式检测的非线性超声系统,研究了金属材料中微纳米级裂纹的超声非线性效应,并以钢结构中的疲劳裂纹为实例,验证了非线性超声检测微纳米级裂纹的可行性及有效性。

## 2 微纳米级裂纹的超声非线性响应

### 2.1 固体中的超声非线性

传统超声无损检测使用的检测超声波幅度极小,即由超声波传播时产生的应力和应变均为极小值,此时介质中超声波的传播遵循线性应力-应变关系。当使用大幅度的超声波(有限幅度超声)检测时,超声波传播时受介质应力-应变关系非线性的影响增强,超声非线性响应信号幅度变大,超声波将发生较明显地失真。以最简单的各向同性固体中二次谐波激发为例,当一列正弦超声波在固体中传播时,其二级近似解为:

$$\mu = A_0 \sin(kx - \omega t) + \frac{1}{8} (A_0^2 k^2 \beta x) \cos 2(kx - \omega t), \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为角频率, $x$ 为传播距离, $t$ 是时间; $k = \omega/c_0$ 是波数, $A_1 = A_0$ 是基波幅值,二次谐波幅度 $A_2 = \frac{k^2 A_1^2 \beta x}{8}$ ; $\beta$ 是超声非线性系数,它除与材料的三阶弹性系数有关外,固体内的不均匀性如空隙、位错以及微裂纹等缺陷均对其有影响。可见,在入射超声波幅度 $A_1$ 较大的情况下,超声波传播时由介质非线性引起的二次谐波 $A_2$ 将不可忽略。

### 2.2 经典声非线性与接触声非线性

非线性超声无损检测利用超声波在材料中传播时的各种超声非线性响应信号,这些信号的来源可以分为两类<sup>[4]</sup>:经典声非线性和接触声非线性。固体的经典声非线性主要与材料晶格的非简谐性和晶体缺陷(畸变)有关,因此也称为材料的固有物理非线性,它具有分布性的特点,由此引起的超声非线性响应随着传播距离而累积,主要表现为超声波中的谐波成分;经典非线性可以通过高阶弹性常数或超声非线性系数 $\beta$ 来描述。接触声非线性主要来源于裂纹、界面和接触面的非线性应力-应变,它反映了材料局部的缺陷特征,缺陷的存在将导致超声波与其相互作用时产生强非线性失真,主要表现为高次谐波和分频波成分的产生、声直流效应、自调制等现象<sup>[5-7]</sup>。本文研究的微纳米级裂纹非线性超声检测问题属于接触声非线性范畴。

### 2.3 微纳米级裂纹的超声非线性响应模型

当超声纵波  $f(x-ct)$  在施加外部静态压力  $p_0$  通过裂纹传播时, 裂纹可等效为如图 1 所示的两个半无限大的粗糙裂纹界面  $A_1$  和  $A_2$ ,  $Z_- = \mu(-0, t)$  和  $Z_+ = \mu(+0, t)$  是粗糙裂纹面  $A_1$  和  $A_2$  的平均等效面。

令  $\mu(0, t) = [\mu(-0, t) + \mu(+0, t)]/2$ , 表示两裂纹的平均等效接触面, 它随超声波的传播动态运动, 如图 1 中所示,  $y(t) = \mu(+0, t) - \mu(-0, t)$  是裂纹界面动态开口位移(裂纹间距),  $p$  是粗糙裂纹接触面动态压力,  $F$  是超声波作用力,  $g(x+ct)$  和  $h(x-ct)$  是弹性纵波产生的反射波和透射波。

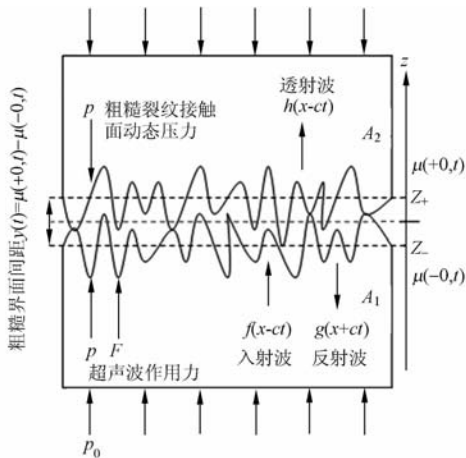


图 1 裂纹非线性超声响应示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Nonlinear ultrasonic response of fatigue crack

当超声波通过裂纹时, 它的反射率明显依赖于裂纹的闭合。因此, 裂纹的闭合可能对超声波产生强烈的调制作用。当非负的外部静态压力加载到裂纹界面上时, 裂纹界面接触状态的变化会对作用于裂纹的超声波反射产生调制。在较小的外部静态加载压力作用下会产生两种响应机制的调制: 一种是当超声波作用力小于外部静态压力时, 这种超声非线性响应主要由裂纹部分闭合诱发, 产生裂纹界面间粗糙峰弹性接触的应力-应变非线性响应, 所以称为弹性接触机制的裂纹部分闭合非线性响应模型; 另一种是当超声波作用力大于外部静态压力时, 声波引起裂纹在各种闭合状态下转换, 裂纹界面不断张开和闭合, 类似于两界面间的碰撞接触, 激发的是分段应力-应变非线性

响应, 所以称为碰撞(弹性)接触机制的张开/闭合状态转换裂纹超声非线性响应模型。通过研究发现, 裂纹的超声非线性行为可以通过反射波的二次谐波的激发效率来表征<sup>[8]</sup>。

### 3 高次谐波幅度的测量

测量高次谐波的幅度实际上是要测量声波的绝对振幅。目前最常用的声波绝对振幅测量方法有: 电容换能器法、激光探针法、压电换能器法。前二者均为非接触式测量方法, 测量系统对材料表面的声波传播不造成干扰, 能够精确地测量声波的绝对振幅, 但它们对样品表面和测量环境均有极高的要求。压电换能器法是接触式测量方法, 测量换能器与样品之间的耦合质量以及换能器本身的性能都可能会对测量结果造成影响, 但从简单、方便和工程实用的角度考虑, 这一方法较为切实可行。

声波作用在压电换能器表面时, 检测仪器测量的实际上是压电晶片的输出电压, 为了准确测量声波的绝对振幅, 必须对换能器的灵敏度做绝对校正, 得到换能器的响应函数。定义换能器响应函数为  $H(\omega)$ , 根据逆压电效应可知<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} |A_1(f)| = |H(f)| |V_{\text{out}}(f)| \\ |A_2(2f)| = |H(2f)| |V_{\text{out}}(f)| \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $A_n$  是声波的质点位移绝对振幅,  $V_{\text{out}}$  为系统测量的换能器输出电压。从式(2)可知, 换能器的输出电压和质点位移绝对振幅成正比。在排除换能器和试件之间耦合因素的干扰后, 通常检测中换能器的响应函数是保持不变的, 因此, 测量换能器对基波和谐波信号的响应电压便可以表示声波绝对振幅的相对大小。

### 4 疲劳裂纹扩展长度非线性超声测量

在常规超声检测中, 裂纹长度的测量是通过测量裂纹尖端的位置得到的, 如衍射传播时间(TOFD)技术, 这种方法通过测量裂纹两末端的衍射回波的延时时间差值得到裂纹的长度。但是衍射波强度很弱, 难以发现, 所以通过衍射传播时间技术测量裂纹长度有较大难度。而非线性超声

从实际操作上和测量精度上都比 TOFD 法要好。

疲劳裂纹扩展实验中,试验材料为 45 # 钢。试样的厚度  $B=15\text{ mm}$ ,宽度  $W=100\text{ mm}$ 。试样的取样方位为 L-T,并按 GB/T6398-2000 要求制成标准紧凑拉伸试样 C(T);在试样中心开出 20 mm 的机械缺口,并在缺口尖端预制 2 mm 的疲劳裂纹。预制疲劳裂纹采用渐减方法,在常温下完成。疲劳裂纹扩展过程中采用的参数全部满足 GB/T6398-2000 标准,在 45 # 钢材料的疲劳裂纹扩展实验中,共对 2 个 CT 试样进行了试验研究工作。所用试样及其尺寸如图 2 所示。在试件 1 和试件 2 中心开出 20 mm 的机械缺口,作为疲劳裂纹扩展实验时的应力集中区,并在缺口尖端预制 2 mm 的疲劳裂纹。

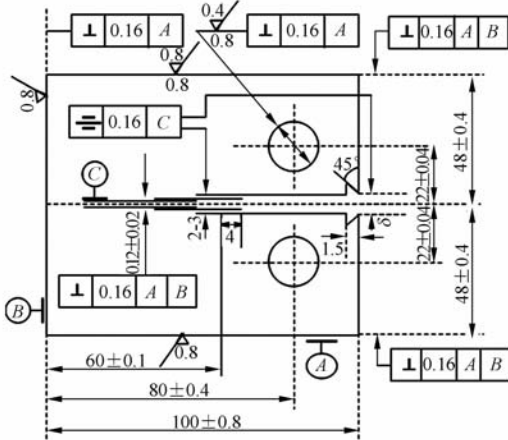


图 2 CT 紧凑拉伸试样尺寸  
Fig. 2 Dimension of CT samples

疲劳试验在 MTS 810 Teststar 液压伺服疲劳试验机上进行,载荷误差  $<1\%$ 。整个等幅裂纹扩展试验在室温下进行,试验室温为  $(25 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ ,室温通过空调控制。正弦恒幅循环加载,45 # 钢试样最大载荷为 18.0 kN,应力比  $R=0.1$ ,加载频率分别为 10 Hz,整个加载过程由试验机自动完成,循环次数是由疲劳试验机计数器直接读出。裂纹扩展长度的测量使用的是常规的超声检测方法,对裂纹扩展的极限长度(裂纹尖端位置)使用非线性超声方法进行了测量。

### 4.1 非线性超声检测实验系统

本文设计了基于反射式检测的非线性超声系统,如图 3 所示。用一个复合双晶直探头来发射和接收超声检测信号,其中发射频率为 2.5

MHz,接收频率为 5 MHz。由脉冲发生器产生控制信号,使信号发生器产生的脉冲调制正弦波 Tone Burst 信号,经滤波、放大后,驱动固定于被测试件一端的倍频双晶压电传感器中发射压电传感器上。输入的超声波在试件内传播时,与被测试件发生非线性相互作用,产生包含高频成分的非线性超声波。同时倍频双晶压电传感器中的接收压电传感器将接收传来的超声波信号,首先进行选频放大,然后将经过 A/D 采集转换后的信号进行 FFT 分析,最终得到基波和二次谐波的幅值。

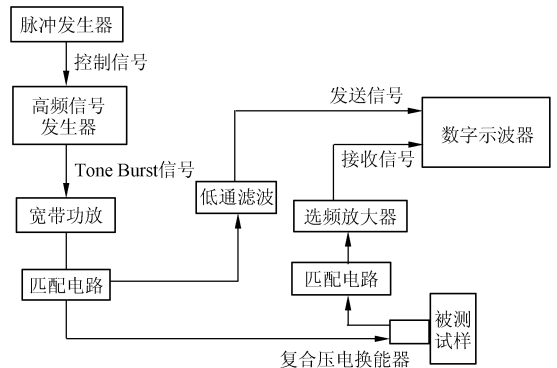


图 3 非线性超声检测系统  
Fig. 3 Nonlinear ultrasonic detection system

### 4.2 实验结果与讨论

图 4 和图 5 分别给出了试件 1 和试件 2 中疲劳裂纹扩展到最终长度时二次谐波激发效率与裂纹扩展长度的关系曲线,通过关系曲线可以确定出裂纹最终扩展的长度值,即裂纹尖端位置。因为疲劳裂纹尖端区的宽度是很窄的,尖端的宽度

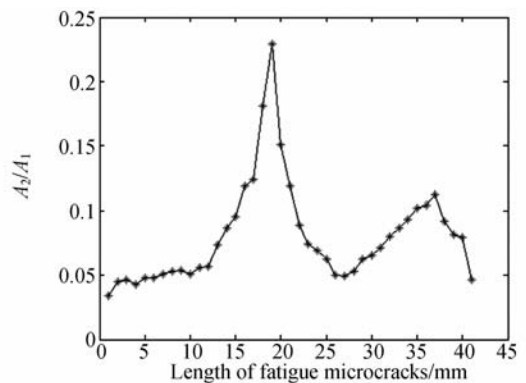


图 4 试件 1 的二次谐波激发效率与疲劳裂纹长度的关系  
Fig. 4 Relation of second harmonic exciting efficiency and the length of fatigue microcracks of specimen 1

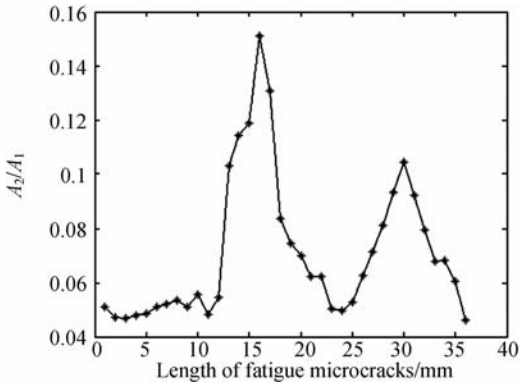


图 5 试件 2 的二次谐波激发效率与疲劳裂纹长度的关系

Fig. 5 Relation of second harmonic exciting efficiency and the length of fatigue microcracks of specimen 2

只有几微米,开口端的宽度也不过几十微米,因此,疲劳裂纹尖端位置的检测是线性超声检测无法准确实现的。

图中的两个突变极值点直接关系到裂纹尖端的确定。第一个突变极值点充分体现了裂纹的“呼吸效应”,即表明裂纹从此处开始由开口变为部分闭合,大幅度的超声波作用下裂纹在此处激发碰撞接触机制的超声非线性响应,极值位置可作为疲劳裂纹闭合区和裂纹开口区的分界点;第二个突变极值点则表明疲劳裂纹的尖端位置,此时激发的是弹性接触机制的二次谐波,体现了非线性超声的“声悬浮”效应,极值点的位置表明了非线性超声检测能检测到的疲劳裂纹扩展的极限

## 参考文献:

- [1] 刘慧,刘俊岩,王扬. 超声锁相热像技术检测接触界面类型缺陷[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(3): 653-661.  
LIU H, LIU J Y, WANG Y. Study of detection surface microcracks on metal plane using ultrasound lock-in thermography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 653-661. (in Chinese)
- [2] CANTRELL J H. Substructural organization, dislocation plasticity and harmonic generation in cyclically stressed wavy slip metals[J]. *R Soc Lond A*, 2004, 460: 1-24.
- [3] 税国双,汪越胜,曲建民. 材料力学性能退化的超声

长度。

为了验证非线性超声检测的精度,将测试结果与疲劳裂纹扩展实验中使用常规超声法测得的长度进行对比。从图 4 和图 5 中可以看出,试件 1 的裂纹扩展长度为 37 mm,试件 2 的裂纹扩展长度为 30 mm。而利用常规线性超声检测的结果,试件 1 最终裂纹扩展到 49.63 mm,实际裂纹的扩展最终长度为 27.63 mm;试件 2 最终扩展到 43.84 mm,实际裂纹的扩展最终长度为 21.84 mm。显然,非线性超声检测的分辨率高于常规超声的检测分辨率,能够检出的裂纹长度比使用常规超声检测方法检出的裂纹长度要增加 30%。

## 5 结 论

本文通过对疲劳裂纹的非线性超声响应理论模型的研究,利用非线性超声检测方法对两个 45 # 钢疲劳试件的疲劳裂纹扩展进行了检测和分析,结果发现疲劳裂纹扩展长度与二次谐波激发效率关系密切,实验结果与其它文献中使用透射式非线性超声检测系统得到的结果相吻合。因此可以证明,在金属材料出现早期损伤的阶段,超声非线性特征参量比常规超声的特征参量对微裂纹缺陷更为敏感,而且利用基于反射超声波的二次谐波激发效率可以较为精确地测定金属材料中微裂纹的长度,能够检出的裂纹长度比使用常规超声检测方法检出的裂纹长度增加了 30%。

无损检测与评价[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 52-68.

SHUI G SH, WANG Y SH, QU J M. Advances in nondestructive test and evaluation of material degradation using nonlinear ultrasound [J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1): 52-68. (in Chinese)

[4] 陈斌. 金属材料闭合裂纹和疲劳损伤的非线性超声检测技术研究[D]. 北京:清华大学, 2006.

CHEN B. *Research on nonlinear ultrasonic ndt of closed cracks and fatigue damages in metallic materials* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)

[5] CANTRELL J H, YOST W T. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures [J]. *In-*

*ternational Journal of Fatigue*, 2001, 23: 487-490.

- [6] KIM J Y, ARTURO B, JONG W, *et al.*. Hysteretic linear and nonlinear acoustic responses from pressed interfaces [J]. *International Journal of Solids and Structure*, 2006; 1-17.
- [7] SOLODOV I Y, KROHN N, CAN G B. An example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids [J]. *Ultrasonic*, 2002, 40: 621-625.
- [8] 师小红. 基于裂纹扩展规律的金属件寿命预测研究 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2008.
- SHI X H. *Life predict research based on crack propagation law for the metal part* [D]. Shijiazhuang; Ordnance Engineering College, 2008. (in Chinese)

- [9] 敦怡, 徐章遂, 师小红. 非线性超声在金属基复合材料结构界面粘接强度评价中的应用 [J]. *中国机械工程*, 2008, 19(19): 2351-2354.
- DUN Y, XU ZH S, SHI X H. Nondestructive evaluation of adhesive interfaces in MMCS using nonlinear ultrasonic method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(19): 2351-2354. (in Chinese)
- [10] 徐从元, 姜文华. 疲劳金属材料非线性声学特性的实验研究 [J]. *南京大学学报*, 2000, 36: 328-335.
- XU C Y, JIANG W H. Experimental investigation on acoustic nonlinearity of fatigued metals [J]. *Journal of Nanjing University*, 2000, 36: 328-335. (in Chinese)

#### 作者简介:



敦 怡(1973—), 女, 河北石家庄人, 博士后, 讲师, 1989年于国防科技大学获得学士学位, 2007年于军械工程学院获得博士学位, 主要从事测试计量及无损检测方面的研究。E-mail: dnyee@126.com



王广龙(1964—), 男, 山东泗水人, 博士, 教授, 博士生导师, 1999年于北京理工大学获得博士学位, 长期从事传感器、微纳米技术与微测控系统方面的研究。E-mail: glwang2005@163.com



师小红(1968—), 女, 河北石家庄人, 博士, 讲师, 2004年、2008年于军械工程学院分别获得硕士、博士学位, 主要从事超声检测、故障诊断、质量评估及信号处理方面的研究。E-mail: sxh682003@163.com



周兆英(1937—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微型机电系统 MEMS、测量与控制技术和生物医疗仪器。E-mail: zhouzy@mail.tsinghua.edu.cn