

引用本文: 阎石, 王鲁, 崔赛杰, 等. 基于非线性 Lamb 波的板状结构微裂缝识别机理与算法[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(5): 113-121.

YAN Shi, WANG Lu, CUI Sai-jie, et al. Microcrack Recognition Mechanism and Algorithm of Plate Structures Based on Nonlinear Lamb Wave[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 113-121.

DOI: 10.19815/j.jace.2021.02039

# 基于非线性 Lamb 波的板状结构微裂缝识别 机理与算法

阎石<sup>1</sup>, 王鲁<sup>1,2</sup>, 崔赛杰<sup>1</sup>, 王雪南<sup>1</sup>, 于水旺<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 菏泽交通投资发展集团有限公司, 山东 菏泽 274000)

**摘要:** 为了研究复合板微小剥离损伤诱发二次谐波机理, 提出一种基于超声 Lamb 波非线性系数的水平向微裂缝识别方法。通过薄板结构的一维波动方程, 推导并阐述了非线性系数的概念; 采用有限元数值分析法, 研究了基于二次谐波的损伤识别原理, 并对复合板微裂缝的宽度、长度和激励信号的幅值、频厚积等参数对超声 Lamb 波非线性系数  $\beta$  的影响进行模拟分析, 通过试验验证了模拟结果的正确性。结果表明: 随着微裂纹宽度增加, 非线性系数呈非线性减小; 随着微裂纹长度增加, 非线性系数值先增加后减小; 随着外部激励幅值的增加, 非线性系数值基本不变; 随着频厚积的增加, 非线性系数值在结构自振频率对应的频厚积处呈现最大值; 利用非线性系数  $\beta$  能够有效表征非线性应力波与微损伤几何特征之间的关系; 基于超声 Lamb 波非线性系数的水平向微裂缝识别方法是可行的。

**关键词:** Lamb 波; 板状结构; 二次谐波; 微裂缝; 非线性系数; 损伤识别算法

**中图分类号:** TU973.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-2049(2022)05-0113-09

## Microcrack Recognition Mechanism and Algorithm of Plate Structures Based on Nonlinear Lamb Wave

YAN Shi<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>1,2</sup>, CUI Sai-jie<sup>1</sup>, WANG Xue-nan<sup>1</sup>, YU Shui-wang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;

2. Heze Communications Investment Development Group Co., Ltd, Heze 274000, Shandong, China)

**Abstract:** To study the mechanism of second-order harmonic induced by micro-peeling damage of composite plates, a method to identify horizontal microcrack based on ultrasonic Lamb nonlinear coefficient was proposed. The concept of nonlinear coefficient was introduced and deduced through the one-dimensional wave equation of motion. The detection principle of second-order harmonic was studied by using finite element method. The impacts of width and length of composite plate microcrack and amplitude and product of frequency and thickness of excitation signal on the nonlinear coefficient  $\beta$  were simulated and studied. The simulation results were validated through the experiments. The results show that the nonlinear coefficient decreases with the increase of microcrack width. The nonlinear coefficient firstly increases and then decreases

收稿日期: 2021-02-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1503106)

作者简介: 阎石(1962-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: cesyan@sjzu.edu.cn。

with increase of the microcrack length. With increase of the external excitation amplitude, the nonlinear coefficient is basically unchanged. As the product of frequency and thickness increases, the nonlinear coefficient shows the maximum value at the product of frequency and thickness corresponding to the natural frequency of the structure. The relationship between nonlinear stress wave and geometric characteristics of microdamage can be effectively characterized by nonlinear coefficient  $\beta$ . The proposed horizontal microcrack detection method based on ultrasonic Lamb nonlinear coefficient is feasible.

**Key words:** Lamb wave; plate structure; second-order harmonic; microcrack; nonlinear coefficient; damage detection algorithm

## 0 引言

引起复合板层间剥离的主要原因是其层间水平向微裂缝的产生与发展,目前对微剥离损伤的识别难度较大。及时准确地识别复合板中水平向微裂缝,通过预警并采取有效措施可有效防止其层间剥离<sup>[1-3]</sup>。

目前,国内外对于复合材料层合板层间剥离的超声检测技术主要分为传统线性超声检测和非线性超声检测。传统线性超声检测技术利用声波的波速、幅值或能量的测量进行缺陷检测和评价<sup>[4]</sup>,此技术对于被检测介质中的水平向宏观裂缝较为敏感,但是对于结构内的水平向微裂缝不够敏感。Sarakinos 等<sup>[5]</sup>利用传统线性超声 Lamb 波,从理论和试验上证实了 Lamb 波检测复合材料梁结构中分层缺陷的有效性。刘梦龙等<sup>[6]</sup>提出基于 Lamb 波和稀疏压电传感阵列的监测区域损伤检测方法,并且通过试验验证了碳纤维复合材料平板上多损伤精确定位和尺寸判别的准确性。Guo 等<sup>[7]</sup>研究发现 Lamb 波 S0 模式可以作为各向异性材料层合板中脱层缺陷检测波,但其敏感程度与脱层位置有关。由于传统线性超声 Lamb 波在微损伤识别中的不足,非线性超声 Lamb 波在水平向微裂缝识别方面的应用受到关注。Sohn 等<sup>[8]</sup>使用有限元法并结合空间状态控制模型来模拟 Lamb 波在复合材料脱层缺陷结构中传播,并对复合材料中的脱层缺陷进行检测。Deng<sup>[9-12]</sup>对板结构中二次谐波的产生进行了大量研究。Bermes 等<sup>[13]</sup>通过试验验证了将非线性超声技术应用于微裂纹缺陷出现前的早期检测的可行性。综上,国内外学者对水平向微裂缝的二次谐波非线性超声检测开展了卓有成效的研究,但由于用超声波非线性表征水平向微裂缝的损伤程度受多种因素影响,对使用超声波非线性系数来进行水平向微裂缝损伤评价的研究较少,目前这方面的工作还有待

于进一步深入开展<sup>[14]</sup>。

基于非线性超声波动理论以及接触非线性概念,利用有限元分析方法阐述了复合板微小剥离损伤诱发二次谐波的基本原理;利用接触非线性原理与有限元技术,研究了复合板微裂缝的宽度、长度和激励信号的幅值、频厚积等参数对超声 Lamb 波非线性系数的影响,并提出一种基于超声 Lamb 波非线性系数的微裂缝识别方法。

## 1 二次谐波理论与非线性系数

### 1.1 二次谐波理论推导

位移  $\mathbf{D}=(u,v,w)$  为应力波传播距离  $x$  和时间  $t$  的函数, $u,v,w$  分别为笛卡儿坐标系下沿 3 个坐标方向的位移分量。基于位移向量  $\mathbf{D}$  在三维笛卡儿坐标系下的非线弹性波动方程,假定入射波为一维超声波,且忽略超声波在介质中的衰减,考虑一维波动方程( $v=0,w=0$ ),则笛卡儿坐标系下,一维纵波在含有二阶非线性的各向同性固体中传播,波动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为介质密度; $u$  为介质内位于  $x$  处质点位移; $\sigma$  为应力。

对于一维应力-应变关系,其表达式为

$$\sigma = E\epsilon(1 + \frac{1}{2}\beta'\epsilon + \frac{1}{3}\gamma\epsilon^2 + \dots) \quad (2)$$

式中: $\epsilon$  为应变; $E$  为弹性模量; $\beta'$  和  $\gamma$  为二阶非线性系数。

考虑小形变条件下应变与位移关系  $\epsilon = \partial u / \partial x$ ,为简化计算,求解过程仅考虑  $\beta'$  项,即

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \beta' \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中: $c$  为介质中波速。

应用扰动理论<sup>[15]</sup>,假设非线性波动方程的解为

$$u = u_1 + \beta' u_{nl} \quad (4)$$

式中:  $u_l$  为由于线性引起的位移;  $u_{nl}$  为由于非线性引起的位移,即扰动项。

假定该非线性位移与波传播的距离成正比,即

$$u_{nl} = xh(\tau) \quad (5)$$

式中:  $\tau = t - x/c$ ;  $h(\tau)$  为未知函数。

将式(4)、(5)代入到式(3),将所得式子展开并略去式中  $\beta'$  高次项,整理后得一维非线性波动方程的解为

$$u(x, t) = u_l + \beta' u_{nl} =$$

$$A_1 \cos(\omega t - kx) - \beta' x \frac{A_1^2 k^2}{8} \sin[2(\omega t - kx)] =$$

$$A_1 \cos(\omega t - kx) - A_2 \sin[2(\omega t - kx)] \quad (6)$$

式中:  $\omega$  和  $k$  分别为谐波响应的角频率和波数;  $A_1$  和  $A_2$  分别为基波幅值和二次谐波响应的幅值。

由式(6)可见,超声波在均质材料的传播过程中与裂缝相互耦合,波的频率会发生改变,除原角频率  $\omega$  外,还出现二次谐波  $2\omega$ ,对应的幅值  $A_2$  为

$$A_2 = \beta' x \frac{A_1^2 k^2}{8} \quad (7)$$

因此,二次谐波幅值与基波的强度及频率(波数)的平方成正比,并且随传播距离增加而增长。基波的强度越大,频率越高,二次谐波幅值也越大<sup>[16]</sup>。

根据  $A_1$  和  $A_2$  的值,可得到相应的非线性系数  $\beta'$  值,即

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

在本文中,因为激励出的超声波幅值相对较小,所以采用较高的输入频率。然而,输入频率越高,声波衰减越快,从而限制了超声探测的范围,所以不得不考虑波在固体介质中传播时的衰减问题。本文在考虑声波衰减的影响后,在传播距离  $x$  及波数  $k$  一定的条件下,非线性系数  $\beta'$  正比于二次谐波幅值与基波幅值平方之比,故式(8)改为

$$\beta = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (9)$$

$\beta$  反映了波穿过几何非线性时波形发生畸变的程度,可以用来描述非线性损伤的程度<sup>[17]</sup>。在以上前提条件下,本文使用  $\beta$  来代替  $\beta'$ 。

## 1.2 基于超声 Lamb 波的二次谐波法

基于超声 Lamb 波的二次谐波法集合了纵波有限幅度法和表面波有限幅度法的优点,利用超声导波能量集中、对介质不连续扰动敏感的特性,可以用来检测材料内部及材料表面的接触型损伤,如复合材料分层、界面脱黏、闭合裂缝等。基于超声 Lamb 波二次谐波法的损伤识别示意图如图 1 所示,其中

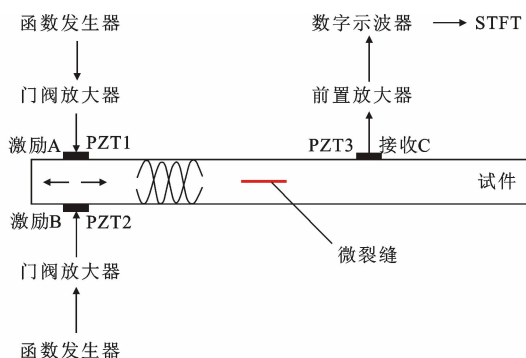


图 1 超声 Lamb 波二次谐波法损伤识别示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Second Order Harmonic Damage Detection Method Based on Ultrasonic Lamb Waves

PZT 为锆钛酸铅片,可以用于激发和接收检测信号。

超声 Lamb 波二次谐波法利用大振幅超声波在有缺陷材料中传播时产生波形畸变,对接收信号进行频谱分析,观测谐波产生,并计算  $\beta$ ,图 2 为一维高阶谐波产生示意图,其中  $A$  为幅值,  $f$  为频率,  $A_3$  为 3 倍频对应的传感信号幅值。

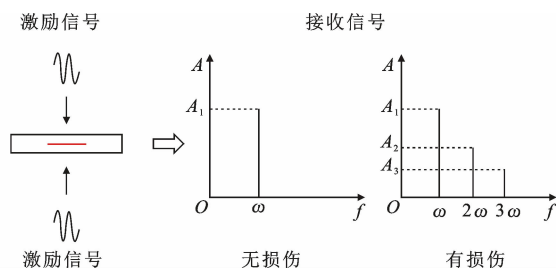


图 2 一维高阶谐波产生示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of One-dimensional High-order Harmonic Generation

## 2 非线性损伤识别有限元分析

### 2.1 关于微裂缝的基本假定

在所采用的微裂缝模型的上下两边界面上,不考虑微裂缝的接触摩擦影响。特别地,当微裂缝宽度  $w=0$  时,此时微裂缝为闭合裂缝,且设置接触类型为平面“硬”接触;当微裂缝长度  $l=0$  时,板为健康板。

### 2.2 有限元建模及模型验证

#### 2.2.1 有限元建模

Lamb 波在传播过程中因遇到损伤容易产生接触非线性问题<sup>[18-20]</sup>。为了深入研究波动非线性产生的机理和影响因素,利用 ABAQUS 有限元软件进行了微裂缝损伤识别数值仿真分析。采用铝板-环

氧黏结层-铝板作为波动介质材料,其材料特性参数如表 1 所示,其中  $G$  为剪切模量, $\nu$  为泊松比。为更好地解释传感信号非线性来源,材料采用线弹性模型,即不考虑材料非线性的影响。

表 1 基本材料参数  
Table 1 Basic Material Parameters

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$G/\text{MPa}$	$\nu$
铝	2 700	69 000	26 000	0.33
环氧树脂	1 120	1 200		0.38

采用带有人工水平微裂缝的分层板模型,如图 3 所示。复合板长 400 mm,宽 3 mm。图 3 中的 A 和 B 为板上下表面的激励源位置,构成双侧对称激励。同时,C 点设置为接收点,用以接收传感信号。在黏结层与上层铝板接触界面之间设置水平向微裂缝,裂缝左右边缘距离接收点和激励点中心位置均为 85 mm,微裂缝用矩形代替,裂缝设置通过有限元软件中 Cohesive 单元来实现。通过设置不同工况,模拟不同微裂缝宽度、长度、外部激励幅值及频厚积对非线性传感信号的影响。

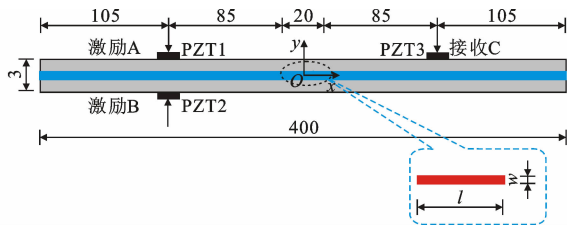


图 3 仿真模拟结构示意图(单位:mm)  
Fig. 3 Schematic Diagram of Simulation Structure (Unit:mm)

根据已获得的复合板 Lamb 波频散曲线和模拟需求,选取中心频率为 400 kHz 的汉宁窗调制后的 5 周期正弦波作为激励信号。

为获得理想的由接触非线性效应产生的谐波分量,有限元模型最大网格尺寸  $l_{\max}$  为

$$l_{\max} \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} \tag{10}$$

式中: $\lambda_{\min}$  为相关最小波长。

考虑了 Courant-Friedrichs-Lewy 稳定条件,时间增量步长  $\Delta t$  为

$$\Delta t \leq \frac{l_{\min}}{c_L} \tag{11}$$

式中: $c_L$  为纵波波速。

考虑 Mose 等提出的时间增量准则可得

$$\Delta t \leq \frac{1}{20 f_{\min}} \tag{12}$$

式中: $f_{\min}$  为激发信号最小频率。

采用 400 kHz 激励信号,考虑二次谐波影响,传感信号中包含频率 800 kHz 信号分量,所以取最大网格单元尺寸为 0.1 mm。时间增量步长为 50 ns,在裂缝处进行网格加密,动力分析总时间为 0.000 25 s,分析步数为 5 000 步。

2.2.2 模型验证

分别采用有限元方法与试验方法对损伤状态下的“铝板-胶层-铝板”模型进行分析,并将两种方法得到的传感信号时域图及频域图进行对比,从而验证所建立有限元模型的有效性。

为了使有限元模拟更接近试验,有限元模拟采用压电单元施加对称激励,并且考虑压电单元黏结层厚度,激励电压为 5 V,使用 MATLAB 软件调试出频率为 400 kHz 的汉宁窗调制的 5 波峰信号。模型验证模拟结构与图 3 一致,最大网格单元尺寸及时间增量步长取计算值。

取损伤试件进行试验,试验中激励电压、频率及损伤尺寸等参数与有限元模拟中所采用的参数值一致。然后,将试验与有限元模拟中的传感信号时域图与频域图进行对比分析。图 4 为模拟与试验的时域首波对比。可以看出,在幅值上试验值较模拟值略小,主要是因为仿真分析中 PZT 黏结厚度、角度与试验值略有差异,但两者的时域图基本一致。

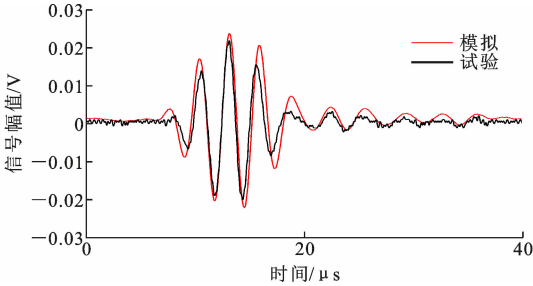


图 4 模拟与试验传感信号时域对比  
Fig. 4 Comparison of Sensing Signals in Time Domain Between Simulation and Experiment

图 5 为频域首波对比。使用含裂缝的有限元损伤模型进行模型验证时,试验和有限元模拟均出现了二倍频,且因为试验中 PZT 黏结厚度与角度较仿真分析略有差异,使得试验较模拟所得到的二倍频在幅值上略小,两者在频域图中基本一致。综合以上试验与有限元传感信号时域及频域图的对比分析结果,验证了所建立含裂缝有限元损伤模型的有效性。

2.3 微裂缝损伤识别有限元分析

2.3.1 裂缝宽度影响

采用单一参数法,固定外部激励幅值、频厚积和

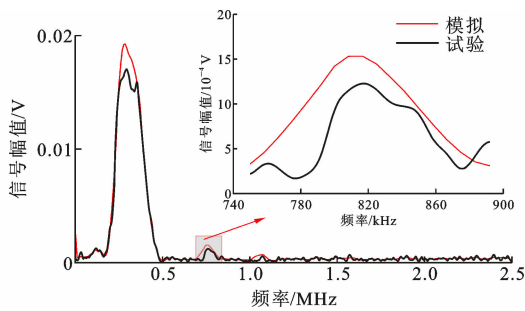


图 5 模拟与试验传感信号频域对比

Fig. 5 Comparison of Sensing Signals in Frequency Domain Between Simulation and Experiment

微裂缝长度,只改变微裂缝的宽度。通过设置 Cohesive 单元来模拟闭合裂缝宽度的变化。

图 6 为归一化非线性系数与裂缝宽度关系。可以看出,二阶非线性系数  $\beta$  随着裂缝宽度的线性增加呈现非线性递减趋势。裂缝在闭合状态下( $w=0$ )非线性系数值最大。

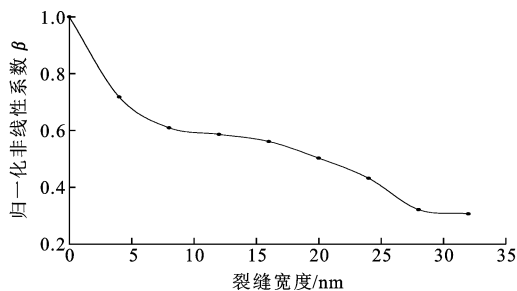


图 6 归一化非线性系数与裂缝宽度关系

Fig. 6 Relationship Between Normalized Nonlinear Coefficient and Crack Width

图 7 为归一化最大接触面积与裂缝宽度关系。可以看出,当裂缝宽度为 32 nm 时,裂缝处的最大接触面积为 0,表示裂缝处上下界面没有发生碰撞,且此时所求得的  $\beta$  值接近健康状态下二阶非线性系数  $\beta_0$  值,说明非线性系数的大小与振动时裂缝处上下裂缝界面的接触面积有关,当裂缝为闭合状态时,接触面积最大,此时二阶非线性系数值也最大,接触声非线性现象表现也最为明显。

图 8 为最大接触面积  $S_{\max}$  与  $\beta$  关系。可以看出,二阶非线性系数  $\beta$  随着  $S_{\max}$  增加而线性增加。当最大接触面积  $S_{\max}$  值最大时,二阶非线性系数  $\beta$  值亦为最大。当裂缝处的最大接触面积为 0 时,表示裂缝处上下界面没有发生碰撞,且此时所求得的二阶非线性系数  $\beta$  值接近健康状态下的二阶非线性系数  $\beta_0$  值,说明几何非线性产生的前提是裂缝处界面发生碰撞接触,声波在与其发生相互作用的同时通过接触部分传播至另一端,且碰撞时的接触面积

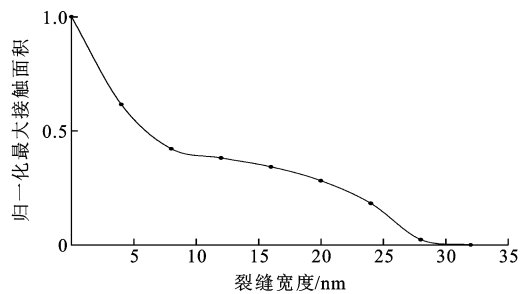


图 7 归一化最大接触面积与裂缝宽度关系

Fig. 7 Relationship Between Normalized Maximum Contact Area and Crack Width

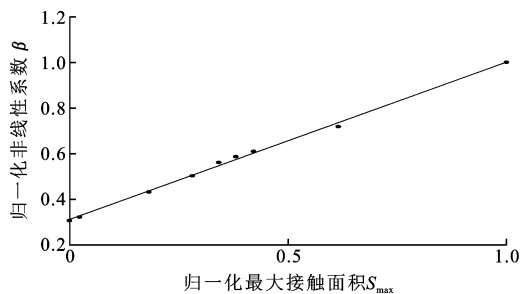


图 8  $S_{\max}$  与  $\beta$  关系 1

Fig. 8 Relationship 1 Between  $S_{\max}$  and  $\beta$

越大,接收信号中含有的非线性信息越丰富,二阶非线性系数值也就越大。

### 2.3.2 裂缝长度影响

固定外部激励幅值、频厚积和微裂缝宽度,只改变微裂缝长度。线性增加裂缝长度,研究二阶非线性系数与裂缝长度之间的关系。

图 9 为归一化非线性系数与裂缝长度关系。可以看出,二阶非线性系数  $\beta$  随着裂缝长度的线性增加呈现先上升后下降的趋势。裂缝长度为 10 mm 时, $\beta$  值最大。结合图 10,当微裂缝长度较小时,非线性效应可忽略不计,随着微裂缝长度不断增加,裂缝间的最大接触面积不断增加,相应的  $\beta$  值也增加;当裂缝长度增大到一个波长左右时,裂缝间的有效接触面积达到最大,相应的  $\beta$  值也达到最大。

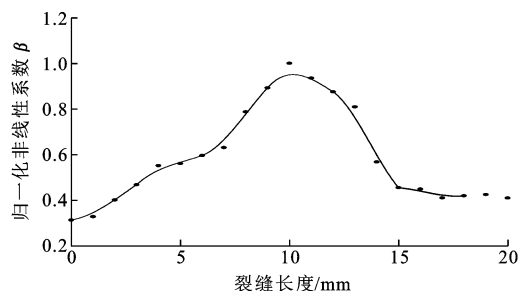


图 9 归一化非线性系数与裂缝长度关系

Fig. 9 Relationship Between Normalized Nonlinear Coefficient and Crack Length



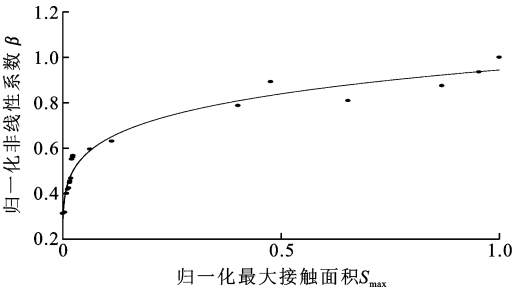


图 10  $S_{\max}$  与  $\beta$  关系 2

Fig. 10 Relationship 2 Between  $S_{\max}$  and  $\beta$

当裂缝达到一定长度后,基波能量的衰减不能忽略,随着裂缝长度的增加,能量衰减效应越来越明显。由式(9)可知,由于基波和二次谐波均会发生衰减,但二次谐波频率比基波频率大,所以衰减更快,非线性系数值也就会减小。

图 11 为归一化幅值与裂缝长度关系,可以看出,基波幅值和二次谐波幅值在裂缝长度的增大过程中有着不同的变化规律。随着裂缝长度的增加,二次谐波幅值在前期急剧增加,而基波幅值在此过程中变化较小,证明非线性二次谐波检测技术对微裂缝损伤识别要比传统的线性损伤识别敏感得多;当裂缝长度达到 10 mm 左右后,无论是基波幅值还是二次谐波幅值都表现为下降趋势,且二次谐波幅值下降得更快。

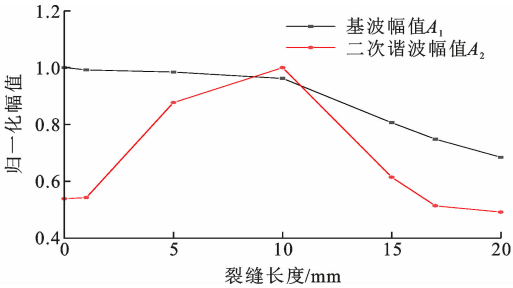


图 11 归一化幅值与裂缝长度关系

Fig. 11 Relationship Between Normalized Amplitude and Crack Length

2.3.3 裂缝面积影响

固定外部激励幅值和频厚积,通过改变裂缝长度和裂缝宽度来改变裂缝面积,线性增加裂缝面积,研究裂缝面积与二阶非线性系数、最大接触面积之间的关系。

图 12 为归一化最大接触面积与非线性系数对比。可以看出,二阶非线性系数  $\beta$  随着裂缝面积的线性增加呈现先上升后下降的趋势,最大接触面积随着裂缝面积的线性增加呈现与二阶非线性系数  $\beta$  相同的变化趋势。在保证裂缝上下界面能够碰撞到

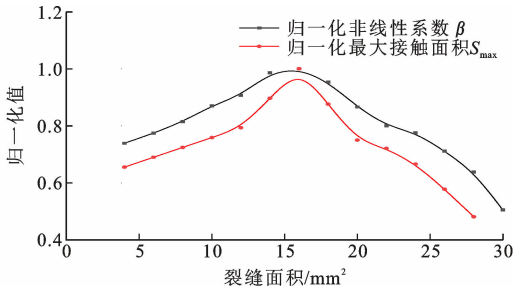


图 12 归一化最大接触面积与非线性系数对比

Fig. 12 Comparison Between Normalized Maximum Contact Area and Nonlinear Coefficient

的前提下,保持微裂缝宽度不变,通过增加裂缝长度来增大裂缝面积。随着裂缝面积的增加,非线性系数值表现出不断增大的趋势,且最大接触面积与非线性系数的变化趋势一致,表现在图 12 中为上升段,这符合图 9 中非线性系数与裂缝长度关系的变化规律。

通过增大裂缝宽度来增加裂缝面积,随着裂缝面积的增加,非线性系数和最大接触面积表现出不断下降的趋势,表现在图 12 中为下降段,这符合图 6 中非线性系数与裂缝宽度关系的变化规律。

通过对裂缝面积与非线性系数、最大接触面积之间关系的研究,更有效地说明了微剥离损伤机理与最大接触面积密切相关,表现为最大接触面积越大,非线性系数  $\beta$  也相应增大;最大接触面积越小,非线性系数  $\beta$  也相应减小。

2.3.4 激励源幅值影响

将模型裂缝设置为闭合裂缝,且控制裂缝长度与频厚积不变,只改变激励幅值。对激励幅值进行线性增加,研究二阶非线性系数与外部激励幅值之间的关系。

对健康模型和微损模型的检测结果进行分析。根据式(9)绘制基波幅值的平方和二次谐波幅值关系,如图 13 所示,其中曲线斜率表示二阶非线性系数  $\beta$ 。可以看出, $\beta$  值随着激励幅值的线性增加基本保持不变,且基波幅值的平方和二次谐波幅值呈明显的线性关系。此外,健康模型与微剥离损伤模型的  $\beta$  值大小有明显差异。随着输入信号强度的增大,微损模型的  $\beta$  值比健康模型的  $\beta$  值大很多,这也表明非线性超声方法对微剥离损伤更加敏感。

2.3.5 Lamb 波频厚积影响

模型内设置长为 20 mm 的闭合裂缝,且控制外部激励幅值不变,只改变频厚积。对频厚积进行线性增加,研究  $\beta$  值与频厚积之间的关系。

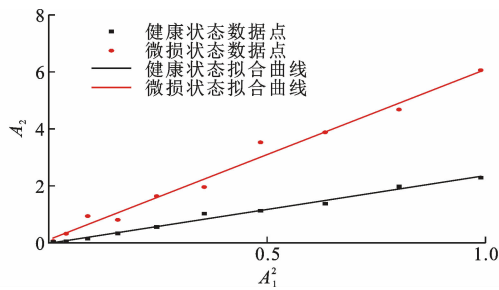


图 13 基波幅值的平方与二次谐波幅值关系

Fig. 13 Relationship Between Amplitude of Fundamental Wave and Second-order Harmonic Wave

图 14 为归一化非线性系数与频厚积关系。由图 14 可见,频厚积在  $0.6 \sim 1.8 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$  范围内,随着频厚积的线性增加, $\beta$  值表现出先增加后减小的趋势。在频厚积为  $1.2 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$  时, $\beta$  值最大。

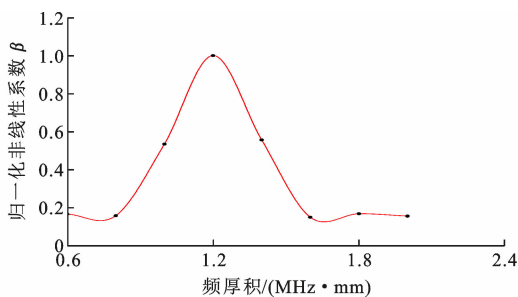


图 14 归一化非线性系数与频厚积关系

Fig. 14 Relationship Between Normalized Nonlinear Coefficient and Product of Frequency and Thickness

保持复合板厚度不变,对模型进行线性扫频,结果如图 15 所示。由图 15 可见,频率在  $200 \sim 600 \text{ kHz}$  (频厚积为  $0.6 \sim 1.8 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ ) 范围内,幅值整体趋势表现为先增加后减小。

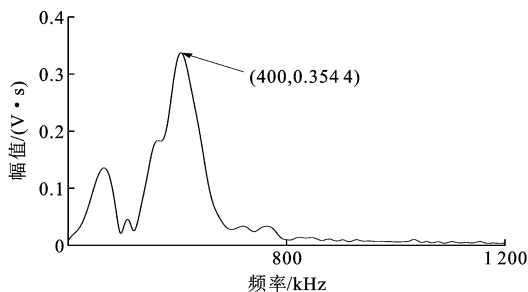


图 15 模型扫频波作用的幅频

Fig. 15 Amplitude Frequency of Model for Frequency Sweep Wave

频厚积为  $0.6 \sim 1.8 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$  范围内的模型自振频域图和二阶非线性系数与频厚积的变化情况基本一致,且模型在  $400 \text{ kHz}$ ,即频厚积为  $1.2 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$  时,模型的振动幅值最大, $\beta$  值也最大,验证了  $\beta$  值与模型的频厚积密切相关。

### 3 微剥离裂缝识别机理与方法

根据以上分析,可以得到运用二次谐波法的微剥离损伤识别机理。

当 Lamb 波与微剥离裂缝发生相互作用后,幅值会发生变化并产生新波包,由于非线性效应会造成信号改变。从微观角度,裂纹引起波动非线性是应力波在裂缝上下界面发生碰撞后,再与基频 Lamb 波相互作用所引起的,即发生了模式转换,二次谐波的分量增大,对应的  $\beta$  值也相应增大。在宏观上,其表现为裂缝处的最大接触面积与非线性系数  $\beta$  值之间的关系,最大接触面积越大,非线性系数  $\beta$  值也相应增大。微裂缝的几何物理量与传感信号的非线性系数  $\beta$  之间存在密切关系,该物理关系成为建立微裂缝识别算法的理论依据。

为此,对一块具有微剥离损伤的复合板进行识别时,可采取如下步骤:

(1)选择合适的谐波激振频率。先对损伤板进行扫频检测,并根据扫频结果,结合仪器、检测环境等各方面因素,选出合适的激振频率。

(2)选择合适的激振幅值。根据被检测试件长度,选择的激振幅值要保证能够从激励器处有效传播到接收器;同时,要保证所选激振幅值能够引起裂缝上下界面的有效接触。

(3)在确定了频率和幅值的前提下,对健康板与损伤板分别进行检测,将检测得到的信号进行时域、频域对比分析。分别计算出健康板与损伤板的非线性系数  $\beta_0$  和  $\beta$ ,并以二者为损伤变量建立损伤评价指标  $D_r$ ,如式(13)所示。

$$D_r = \frac{\beta - \beta_0}{\beta_0} \times 100\% \quad (13)$$

由于二阶非线性系数  $\beta$  对微裂缝的敏感程度较高,所以当  $D_r$  超过  $5\%$  时,则认为被检测试件存在微损伤。

传统线性检测方法是通过对能量、幅值等参量对试件损伤程度进行评估,传统线性检测手段对检测试件中的宏观裂缝、漏洞及严重剥离损伤有较好的检测效果,而使用传统线性检测手段对同一微剥离损伤试件进行检测时,所得时域图与健康试件时域图相比,变化并不明显,从而较难判断试件是否存在损伤。

与传统线性超声波检测手段相比,本文所提出的基于超声 Lamb 波二阶非线性系数  $\beta$  对水平向微裂缝的识别方法,克服了传统线性超声波检测方法

对微剥离不够敏感的缺点。该方法通过给出具体判断损伤指标的方式,达到提高对复合板层间剥离缺陷识别精度的目的。

将本文所提出的对水平向微裂缝的识别方法进行具体运用。将有限元模拟中的损伤模型以 1 : 1 的尺寸构建,然后对构建的损伤试件进行检测,试验装置及试件连接如图 16 所示。

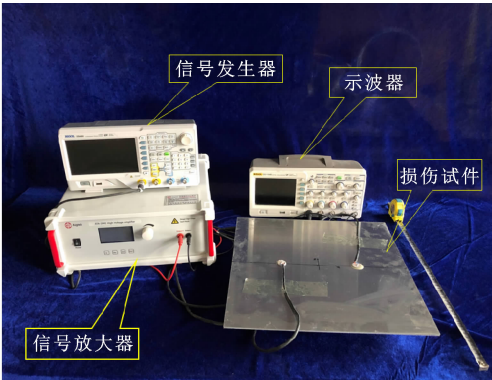


图 16 试验装置

Fig. 16 Experiment Setup

将试验接收到的传感信号进行时域分析,得到的首波时域图如图 17 所示。由图 17 可见,健康与损伤两种工况下所得到的时域图在幅值上略有差别,但不能确定这种差异是由损伤所造成的,也有可能是在黏结压电元件时胶层厚度不一或者压电元件黏结角度不同所引起的,这也就导致使用传统线性检测方法对水平向微剥离损伤的检测失效。

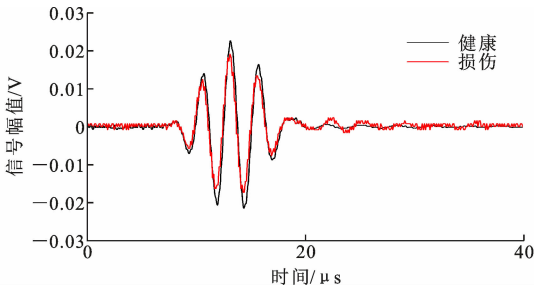


图 17 试验传感信号时域图

Fig. 17 Time Domain Diagram of Experiment Sensing Signals

将试验接收到的传感信号进行频域分析,得到的首波频域图如图 18 所示。在水平向微剥离损伤工况下,基频与水平向微裂缝相互作用,发生了模式转换,体现在频域图上为基波幅值下降,而二次谐波的分量增大。由图 18 可得基波与二次谐波的幅值,然后结合式(13),可以计算出微损伤评价指标  $D_i$  为 71.7%,其值超过了 5%,根据本文所提出的微损伤判断指标,则可精准地判断该试验中的被检测试

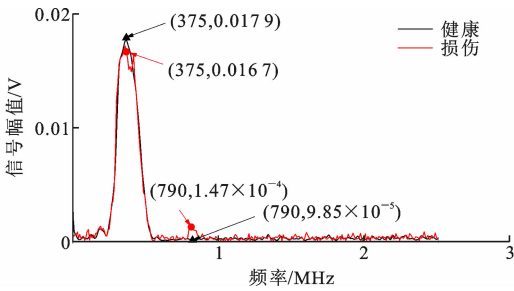


图 18 试验传感信号频域图

Fig. 18 Frequency Domain Diagram of Experiment Sensing Signals

件存在剥离损伤。

综合以上的数值仿真结果及试验结果可以得到,本文所提出的基于超声 Lamb 波二阶非线性系数  $\beta$  对水平向微裂缝的识别方法,其可以提高对复合板层间剥离缺陷的识别精度,有效克服了传统线性超声波检测方法对微剥离不够敏感的缺陷;该方法也可以用来区分界面的弱黏结区域,为复合材料的安全使用提供保障。

4 结 语

(1)复合板界面微裂缝处的接触非线性是诱发二次谐波的主要原因,利用传感信号的二阶非线性系数  $\beta$  能够有效表征非线性应力波与微损伤几何特征之间的关系。

(2)有限元模拟结果表明,随着微裂纹宽度增加, $\beta$  值呈非线性减小;随着微裂纹长度增加, $\beta$  值先增加后减小;随着外部激励幅值增加, $\beta$  值基本不变;随着频厚积的增加, $\beta$  值在结构自振频率对应的频厚积处表现出最大值。

(3)提出了一种基于超声 Lamb 波二阶非线性系数  $\beta$  对水平向微裂缝的识别方法。

参考文献:

References:

[1] 赵一男,公茂盛,杨游. 结构损伤识别方法研究综述[J]. 世界地震工程,2020,36(2):73-84.  
ZHAO Yi-nan, GONG Mao-sheng, YANG You. A Review of Structural Damage Identification Methods [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(2): 73-84.  
[2] KACHANOV L M. Separation Failure of Composite Materials[J]. Polymer Mechanics, 1976, 12(5): 812-815.  
[3] ZHANG Y F, ZHAO J H, CAI C S. Seismic Behavior of Ring Beam Joints Between Concrete-filled Twin



- Steel Tubes Columns and Reinforced Concrete Beams [J]. *Engineering Structures*, 2012, 39: 1-10.
- [4] 周正干, 刘斯明. 非线性无损检测技术的研究、应用和发展[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(8): 2-11.  
ZHOU Zheng-gan, LIU Si-ming. Nonlinear Ultrasonic Techniques Used in Nondestructive Testing: A Review [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(8): 2-11.
- [5] SARAVANOS D A, HEYLIGER P R. Coupled Layerwise Analysis of Composite Beams with Embedded Piezoelectric Sensors and Actuators[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6(3): 350-363.
- [6] 刘梦龙, 袁慎芳, 卿新林, 等. 采用 Lamb 波对复合材料板结构进行多损伤检测 [J]. *测控技术*, 2012, 31(增): 299-303.  
LIU Meng-long, YUAN Shen-fang, QING Xin-lin, et al. Multi-damage Detection in Composite Panel Using Lamb Wave[J]. *Measurement & Control Technology*, 2012, 31(S): 299-303.
- [7] GUO N, CAWLEY P. The Interaction of Lamb Waves with Delaminations in Composite Laminates[J]. *NDT & E International*, 1996, 29(4): 246.
- [8] SOHN J W, KIM H S. Active Healing of Delaminated Composite Structure Using Piezoelectric Actuator [C]//SPIE. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. San Diego: SPIE, 2014: 544-550.
- [9] DENG M X. Cumulative Second-harmonic Generation of Lamb-mode Propagation in a Solid Plate[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(6): 3051-3058.
- [10] DENG M X. Analysis of Second-harmonic Generation of Lamb Modes Using a Modal Analysis Approach [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(6): 4152-4159.
- [11] 邓明晰. 分层结构中兰姆波二次谐波发生的模式展开分析[J]. *声学学报*, 2005, 30(2): 132-142.  
DENG Ming-xi. Modal Expansion Analyses of Second-harmonic Generation of the Lamb Waves in Layered Structures[J]. *Acta Acustica*, 2005, 30(2): 132-142.
- [12] 邓明晰. 兰姆波非线性效应的实验观察(Ⅱ)[J]. *声学学报*, 2006, 31(1): 1-7.  
DENG Ming-xi. Experimental Observations of Nonlinear Effects of Lamb Waves (Ⅱ)[J]. *Acta Acustica*, 2006, 31(1): 1-7.
- [13] BERMES C, KIM J Y, QU J M, et al. Nonlinear Lamb Waves for the Detection of Material Nonlinearity[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(3): 638-646.
- [14] 李立, 焦敬品, 吴斌, 等. 结构中微裂纹与超声波的混频非线性作用数值仿真研究[J]. *计算力学学报*, 2018, 35(6): 725-731.  
LI Li, JIAO Jing-pin, WU Bin, et al. Numerical Simulation of the Nonlinear Effects of Micro-cracks and Ultrasonic Waves in the Structure[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, 35(6): 725-731.
- [15] ZAREMBO L K, KRASIL'NIKOV V A. Nonlinear Phenomena in the Propagation of Elastic Waves in Solids[J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1971, 13(6): 778-797.
- [16] 陈小佳. 基于非线性超声特征的混凝土初始损伤识别和评价研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.  
CHEN Xiao-jia. Study on Initial Damage Detection and Evaluation of Concrete Based on Nonlinear Acoustic Features[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [17] 胡海峰. 板状金属结构健康监测的非线性超声理论与关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.  
HU Hai-feng. Research on Theory and Key Technologies of Nonlinear Ultrasonics for Health Monitoring of Plate-like Metallic Structures[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [18] SOROHAN S, CONSTANTIN N, GAVAN M, et al. Extraction of Dispersion Curves for Waves Propagating in Free Complex Waveguides by Standard Finite Element Codes[J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(4): 503-515.
- [19] 杜平安, 甘娥忠, 于亚婷. 有限元法——原理、建模及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
DU Ping-an, GAN E-zhong, YU Ya-ting. Finite Element Method: Principles, Modeling and Applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [20] 吴斌, 周伟, 郑阳, 等. 基于波结构的 Lamb 波单一模态激励仿真[J]. *无损检测*, 2011, 33(7): 1-4, 10.  
WU Bin, ZHOU Wei, ZHENG Yang, et al. Excitation of Single Mode Lamb Wave Simulation Based on Wave Structure[J]. *Nondestructive Testing*, 2011, 33(7): 1-4, 10.