

基于 PM 模型研究双层板中损伤引起的非经典非线性效应

范淼森¹, 林懿然¹, 何爱军², 刘晓宙¹

(1. 南京大学 声学研究所, 南京 210093; 2. 南京大学 电子科学与工程学院, 南京 210023)

摘要: 从仿真角度研究了复合层状板中微损伤与 Lamb 波相互作用产生的非经典非线性效应。仿真采用 Preisach-Mayergoyz(PM)模型描述损伤材料的动力学特征,该模型由大量迟滞单元组成。仿真中,在不同激发条件下双层板中产生了不同的 Lamb 波模态,结合 Lamb 波的频散特性,识别其为 S_0 和 A_0 模态,仿真结果表明,两种模态对损伤的检测效果也有差距。仿真还进一步研究了 PM 模型的尺寸与分布密度对 S_0 模态 Lamb 非线性性的影响,结果表明可以利用 Lamb 波检测到的非线性效应描述损伤的生长情况和严重程度。

关键词: 复合材料;非线性;Lamb 波;Preisach-Mayergoyz 模型

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2022)06-0021-05

Research on non-classical nonlinearity effects caused by damage in double-layer plate based on PM model

FAN Miaomiao¹, LIN Yiran¹, HE Aijun², LIU Xiaozhou¹

(1. Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. School of Electric Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Studies have been made of the non-classical nonlinear effects caused by the interaction of micro-damage and Lamb waves in the composite layered plate from the perspective of simulation. The Preisach-Mayergoyz (PM) model is used to describe the dynamic characteristics of the damaged material, which is composed of a large number of hysteresis elements. In the simulation, different Lamb wave modes are generated in the double-layer plate model under different excitation conditions. Combined with the dispersion characteristics of the Lamb wave, these modes are identified as S_0 and A_0 modes, respectively. The simulation results show that the damage detection effects of the two modes are also different. The simulation also further studied the influence of the size and distribution density of the PM model on the Lamb nonlinearity of the S_0 mode. The results show that the nonlinearity detected by Lamb waves can be used to describe the growth and severity of damage.

Key words: combined material; nonlinearity; Lamb wave; Preisach-Mayergoyz model

复合材料是由两种或两种以上化学、物理性质

不同的材料通过先进的制备技术组合而成的新材料,结构上由增强物和基体组成^[1]。增强物起到承受载荷的主要作用,基体起到黏结、支持、保护增强物和传递应力的作用。材料会因为前期制造工艺的缺陷或者在服役过程中受到外部载荷作用而产生微裂纹。材料中的微裂纹一旦产生,如果不加以检测和控制便会在外部载荷的作用下不断蔓延生长,对整体结构安全性造成破坏^[2],最终影响器件的正常运行,甚至引发重大安全事故,危害人身财产安全。

收稿日期: 2021-12-15
基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0211400); 国家自然科学基金重点项目(11834008); 国家自然科学基金(12174192); 声场与声信息国家重点实验室项目(SKLA202008); 中国科学院水下声环境重点实验室项目(SSHJ-KFKT-1701)
作者简介: 范淼森(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为物理声学
通信作者: 刘晓宙(1966—),男,教授, xzliu@nju.edu.cn

对材料中损伤的检测需求推动了无损检测技术的不断发展。超声检测具有传播距离远、穿透力强、操作方便、对材料和检测人员无害等优点,已经被广泛应用在航空航天、汽车工业、船舶制造等工业制造业领域。

根据超声波与损伤发生相互作用的不同特性,可以将超声检测分为线性和非线性两类。

Lamb 波是超声波中的一种特殊形式。非线性 Lamb 波检测能够精准快速地检测出板状结构中微损伤的存在,并能够通过分析接收信号来识别微损伤的尺寸、位置和类型等^[3-4],所以具有很高的研究价值和应用前景。

Lamb 波的非线性又可以分为经典非线性和非经典非线性。早先,对非经典非线性的研究主要集中在对岩石这类非线性细观弹性材料上^[5]。这类材料的非经典非线性主要表现在以下方面:①应力-应变关系表现出迟滞效应;②缓慢动力学特性,表现为当激励声停止后,弹性模量要经过很长时间才能恢复,这个过程一般需要 $10^3 \sim 10^4$ s 的时间;③共振频率漂移^[6],且共振频率偏移和应变成正比关系。目前用以研究非经典非线性的模型主要包括 3 种,即迟滞行为模型、粗糙界面模型^[7]和双线性本构模型^[8]。迟滞行为模型可用于描述固体中应力-应变关系的迟滞效应。粗糙界面模型认为裂纹接触面时局部接触,可用于分析有限尺寸形状体。双线性本构模型可用于解释谐波生成和混频调制等现象。

1 方法论述

1.1 Lamb 波频散特性

矩阵法是求解多层板中 Lamb 波频散曲线的有效方法,其中又分为传递矩阵法^[9]和全局矩阵法^[10]。以传递矩阵法为例,其主要利用多层板中每单层的特征矩阵和每两层之间的连续性条件构成解决问题的思路。从最上面一层通过每一层的传递矩阵相乘和最下面一层建立矩阵表达式的联系,再由上下表面的自由边界条件就可以解出多层板中 Lamb 波的频散曲线。

以铝-铜双层复合板为例,其中铝层在上,铜层在下,每一层的厚度都为 1 mm,两层之间刚性连接,计算得到双层板中 Lamb 波的相速度和群速度频散曲线如图 1 所示。

1.2 PM 模型基本理论

岩石、混凝土等材料的宏观弹性特性比其所组

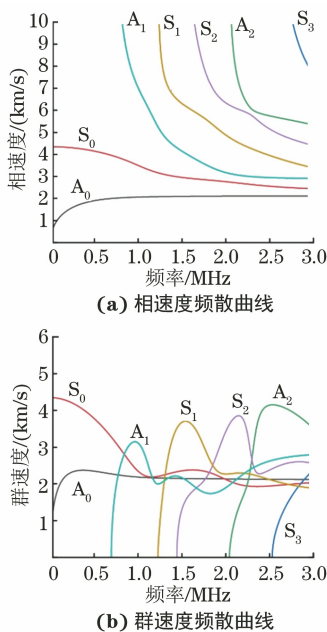


图 1 2 mm 厚铝-铜复合板的相速度和群速度频散曲线

成材料的微观弹性特性要复杂得多。典型岩石的状态方程,例如应力与应变的关系表现出明显的迟滞非线性效应和离散记忆。GUYER 等^[5]提出将像岩石这类弹性性质由近乎刚性的颗粒和可以产生弹性变形的黏结层组成的物质称为细观非线性弹性材料(NME)。

Preisach-Mayergoyz 模型(简称 PM 模型)是早期由 Preisach 等提出用以描述非线性迟滞效应的数学模型^[11],之后 McCall 和 Guyer 在此基础上进行完善并通过试验验证了该模型,认为 NME 材料是由一种细观弹性单元(HMEU)所构成的。这种迟滞单元有两个状态,即“打开”状态和“关闭”状态。典型的迟滞单元应力-应变关系曲线如图 2 所示^[12]。

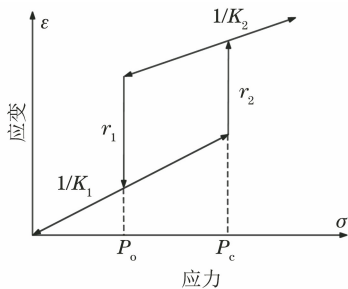


图 2 典型的迟滞单元应力-应变关系曲线

图 2 中, r_1, r_2 为发生跳变时的跳变距离; P 为孔压,被定义为局部应力的相反数; K 为介质的弹性模量,在线性材料中 K 为常数,而在非线性介质中 $K(t)$ 是关于时间的函数; $K(t) = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$, σ 为纵向应

力, ϵ 为应变; 单元在“打开”和“关闭”状态间的切换由临界孔压 P_o 和 P_c 决定。

假设一拥有该应力-应变关系性质的迟滞单元最初状态为“打开”状态。孔压 P 从小于 P_c 的位置逐渐增大, 应力-应变关系保持弹性模量为 K_1 的线性关系。当 P 达到 P_c 时, 应变发生突变, 单元也切换为“关闭”状态, P 继续增大时应力-应变关系又恢复为弹性模量为 K_2 的线性关系。此时孔压 P 再减小, 就需要达到 P_o 时, 应变才会发生突变, 回到弹性模量为 K_1 的线性应力-应变关系。

1.3 仿真模型

采用 ABAQUS 软件进行数值仿真。根据先前计算的铝-铜复合板 Lamb 波频散曲线的结果, 采用数值仿真建立二维铝-铜复合板的二维模型, 该模型尺寸为 $2\,000\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ (长 \times 宽), 每层厚度均为 1 mm 。铝层材料密度为 $2\,700\text{ kg/m}^3$, 杨氏模量为 69 GPa , 泊松比为 0.33 。铜层材料密度为 $8\,900\text{ kg/m}^3$, 杨氏模量为 123 GPa , 泊松比为 0.35 。在板的中心位置有一块损伤区域, 损伤区域用 PM 模型表征, 参数为 $K_1 = 7.5 \times 10^{14}\text{ Pa}$, $K_2 = 1.0 \times 10^{15}\text{ Pa}$, $r_1 = 0.002$, $r_2 = 0.001$ 。为了简化建模, PM 空间中迟滞单元均匀分布, 取值为 1.0×10^{-15} 。含有 PM 区域的铝-铜双层板二维模型如图 3 所示。

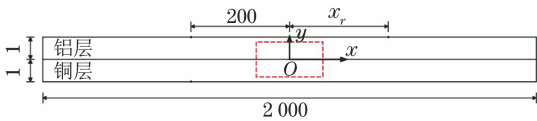


图 3 含有 PM 区域的铝-铜双层板二维模型

如图 3 所示, 以双层板的中心为坐标原点, 沿板面方向为 x 方向, 垂直板面为 y 方向, 设置损伤尺寸为 $2.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ (x 方向 \times y 方向), 位置处于复合板的中心, 同时包含有铝层和铜层的部分。在 $x = -200\text{ mm}$ 处双层板的上下表面对称放置信号激励点。在 $x = x_r$ 处放置信号接收点, x_r 根据仿真要求选定。仿真试验考察的对象是 PM 模型对 Lamb 波作用产生的高次谐波。试验采用中心频率为 100 kHz 的五波峰调制正弦信号, 用方程表示为

$$f(t) = \left(1 - \cos \frac{2\pi f_0 t}{5}\right) \sin 2\pi f_0 t \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为信号方程; f_0 为中心频率, 取 100 kHz ; t 为时间。

中心频率 100 kHz 五波峰调制正弦信号的时域和频域波形如图 4 所示。

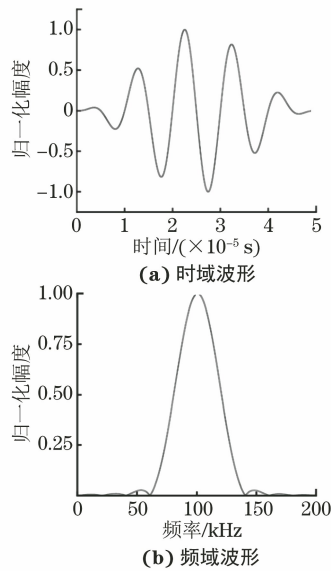


图 4 中心频率 100 kHz 五波峰调制正弦信号的时域和频域波形

由图 1 可知, 该声源信号的四次谐波频率为 400 kHz , 还未达到 S_1 和 A_1 模态的截止频率, 在低频区域只能激发 S_0 和 A_0 模态, 所以可以选取二次、三次、四次谐波成分作为考察对象。笔者先后使用 S_0 和 A_0 这两种模态来进行仿真。当上下两信号激励点发射同相信号时, 可以增强 S_0 模态的传播同时抑制 A_0 模态。反过来当上下两信号激励点发射反相信号时, 可以增强 A_0 模态的传播同时抑制 S_0 模态。

仿真中为兼顾结果的准确性和计算的效率, 按式 (2), (3) [13] 设置网格的尺寸和分析步长, 即

$$I_{\max} = \frac{\lambda_{\min}}{20} \quad (2)$$

$$\Delta t_{\max} = \frac{1}{20 f_{\max}} \quad (3)$$

式中: I_{\max} 为网格最大尺寸; λ_{\min} 为最小波长; Δt_{\max} 为最大分析步长; f_{\max} 为最大频率。

对于 100 kHz 信号, A_0 模态波长比 S_0 模态波长短, 所以只需要考虑 A_0 模态四次谐波的准确性, 网格的尺寸和分析步长要求分别小于 0.265 mm 和 $0.125\text{ }\mu\text{s}$ 。故仿真中设置网格尺寸为 0.25 mm , 步长为 $0.01\text{ }\mu\text{s}$, 以满足准确性的要求。

仿真的目的主要是考察损伤与 Lamb 波 S_0 模态和 A_0 模态相互作用产生的非经典非线性。笔者同时研究了 PM 模型损伤的面积和 PM 空间中迟滞单元的密度对接收信号非线性影响。其中 PM 模型由用户子程序 VUMAT 定义, 运用二维非线性材料迭代算法 [14] 编写, 实现每一个迭代步计算中更新

应力分量。

2 仿真结果

2.1 损伤对不同模式 Lamb 波非线性的影响

笔者首先研究了损伤对 Lamb 波 S_0 模态和 A_0 模态传播的影响。不同激发条件下接收信号时域波形和频域波形如图 5 所示。

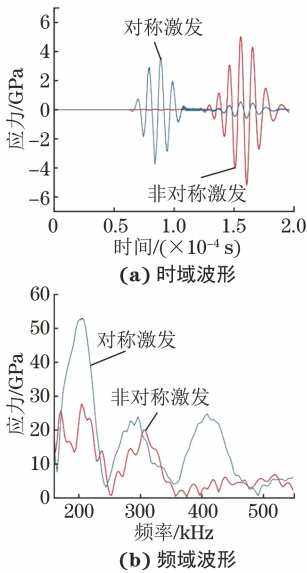


图 5 不同激发条件下接收信号时域波形和频域波形

图 5 中两条曲线分别是在 $x = -200$ mm 上下板面两发射点激发同向同波形信号和反向同波形时在 $x = 100$ mm 处接收到的信号时域波形与频域波形。从图 5 中可以看出,即使是对称激发或反对称激发,都会同时产生两个波包。根据两波包在时间上的距离和对称性质,可以判断其分别为铝-铜复合板中 S_0 和 A_0 模态。对时域波形进行分析可知,当对称激发信号时,接收信号中反对称模态 A_0 也较为明显。相比之下,反对称激发信号时,接收信号中对称模态 S_0 幅值较小。对频域波形进行分析可知,以 S_0 模态为主的信号与 PM 模型损伤区域相互作用产生的非线性更加明显,二次、三次、四次谐波成分都可以清晰分辨。而以 A_0 模态为主的信号与损伤相互作用虽然也产生了非线性,但除二次、三次谐波之外四次谐波成分不易分辨,并且 A_0 模态二次谐波幅值也远比 S_0 模态二次谐波幅值小。根据该数据,对接下来的仿真做出改进,着重利用 S_0 模态研究 PM 模型产生的非线性效应。

2.2 损伤尺寸和迟滞单元密度对 Lamb 波非线性的影响

利用 Lamb 波的群速度频散特性,将信号接收

点位置更改为 $x_r = 200$ mm。这样可以将 S_0 模态和 A_0 模态的波包在时域上分离,降低 A_0 模态对仿真的影响。同时接收点位置的设置也避免了 Lamb 波在模型两端反射波的影响。

为表征损伤在结构中的蔓延^[15-16],采用损伤区域 x 方向上的尺寸和 PM 空间中迟滞单元密度两个参数进行研究。首先改变损伤区域 x 方向上的尺寸, y 方向尺寸和损伤的中心位置均不变,考察引起的非线性变化。然后固定损伤区域的中心位置和面积,该区域尺寸为 $2.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ (x 方向 $\times y$ 方向)。改变 PM 空间中迟滞单元的密度,再次考察对非线性的影响。损伤区域 x 方向尺寸和迟滞单元均匀分布密度与接收信号的非线性关系如图 6,7 所示。

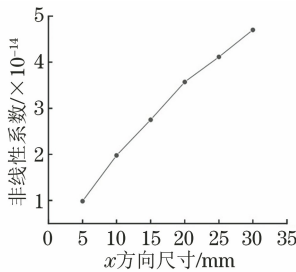


图 6 损伤区域 x 方向尺寸与接收信号的非线性关系

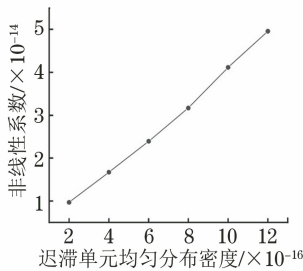


图 7 迟滞单元均匀分布密度与接收信号的非线性关系

仿真利用接收信号中的二次谐波的幅值与基波的幅值平方之比来表征接收信号的非线性。由图 6 可见,当损伤在 x 方向上蔓延时,接收信号的非线性也变得更加明显,二者大致呈线性关系。由图 7 可见,当迟滞单元均匀分布的密度增加时,接收信号的非线性也有显著提升,二者同样呈现线性关系。损伤的尺寸和 PM 模型迟滞单元的密度都可以用以描述损伤的严重程度。仿真结果还表明这两个量对信号非线性的影响大致处于同一量级。因此在对材料进行超声检测时,要同时考虑损伤尺寸以及损伤局部性质的变化这两个因素,对损伤情况做完整评估。

3 结语

文章采用数值求解出双层板中 Lamb 波的频散

曲线,对于仿真模型中损伤的描述,采用 PM 模型表征损伤材料的非线性特性,并采用二维非线性迭代算法实现了 PM 模型的定义。仿真中为避免 Lamb 波多模态性对结果的影响,采用了较低频率信号作为激发信号,并利用频散特性将 S_0 和 A_0 两个模态在时域上做分离处理。仿真结果表明双层板中 S_0 模态 Lamb 波与损伤作用可产生显著非线性特征,并且接收信号的非线性可以用来描述损伤的尺寸和局部严重程度。

参考文献:

[1] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[2] 刘瑶璐,胡宁,邓明晰,等. 板壳结构中的非线性兰姆波[J]. 力学进展,2017,47(0):503-533.

[3] LV H T, JIAO J P, WU B, et al. Numerical analysis of the nonlinear interactions between lamb waves and microcracks in plate [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2019, 32(6): 767-784.

[4] EREMIN A, GOLUB M, GLUSHKOV E, et al. Identification of delamination based on the Lamb wave scattering resonance frequencies[J]. NDT & E International, 2019, 103: 145-153.

[5] GUYER R A, JOHNSON P A. Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials[J]. Physics Today, 1999, 52(4): 30-36.

[6] VAN DEN ABEELE K, DE VISSCHER J. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9): 1453-1464.

[7] BRODA D, STASZEWSKI W J, MARTOWICZ A, et



(上接第 20 页)

边界角远大于常规超声的,故全聚焦相控阵具有很大的声场覆盖范围。

(6) 全聚焦纵波检测的声场覆盖范围大于横波检测的声场覆盖范围,但检测分辨力低于横波检测的。

参考文献:

[1] 强天鹏,杨贵德,杜南开,等. 全聚焦相控阵技术声场特性初探[J]. 无损检测, 2020, 42(1): 1-6.

[2] 杨敬,吴斌,焦敬品,等. 各向异性焊缝缺陷超声阵列全聚焦成像方法[J]. 声学学报, 2019, 44(1): 125-135.

[3] FELICE M V, VELICHKO A, WILCOX P D.

al. Modelling of nonlinear crack-wave interactions for damage detection based on ultrasound—A review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(4): 1097-1118.

[8] 王积硕,刘良兵,胡宁,等. 基于次级声源指向性的微裂纹取向定征方法[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 59-64.

[9] 张超,阎守国,张碧星,等. 分层固体板中导波的激发与频散特性[J]. 声学学报, 2017, 42(1): 85-94.

[10] 张海燕,刘镇清,吕东辉. 全局矩阵法及其在层状各向异性复合板中 Lamb 波传播特性研究中的应用[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 111-116.

[11] MAYERGOYZ I D. Hysteresis models from the mathematical and control theory points of view[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 57(8): 3803-3805.

[12] MCCALL K R, GUYER R A. Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1994, 99(B12): 23887-23897.

[13] SHEN Y F, GIURGIUTIU V. Predictive modeling of nonlinear wave propagation for structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(4): 506-520.

[14] LIU Y X, HE A J, LIU J H, et al. Location of microcracks in plates using time reversed nonlinear Lamb waves[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(5): 054301.

[15] RAUTER N, LAMMERING R, KÜHNRIICH T. On the detection of fatigue damage in composites by use of second harmonic guided waves [J]. Composite Structures, 2016, 152: 247-258.

Accurate depth measurement of small surface-breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique [J]. NDT & E International, 2014, 68: 105-112.

[4] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701-711.

[5] 于朋,刚铁. 基于全聚焦成像技术的焊缝近表面平面类缺陷检测[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 36-40, 162.

[6] 章东,桂杰,周哲海. 超声相控阵全聚焦无损检测技术概述[J]. 声学技术, 2018, 37(4): 320-325.

[7] 强天鹏,杨贵德,杜南开,等. 全聚焦相控阵技术的场校准[J]. 无损检测, 2020, 42(11): 1-5.