

基于波结构的 Lamb 波单一模态激励仿真

吴斌,周伟,郑阳,何存富

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院,北京 100124)

摘要:在中长距 Lamb 波检测中,研究单一模态与缺陷的作用极为重要。利用有限元分析软件 ANSYS 的 APDL 进行模块程序设计,按模态波结构的方式在有限元模型上进行位移加载,得到了单一的 S0 和 A0 模态,证明了这种加载方式的正确性和可靠性;对比分析了按激励信号带宽范围内复合频率合成波结构加载和按中心频率点波结构加载得到的波形。结果表明,在波结构变化不大的频段内,通常在频厚积 $<2 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 范围内,可以用中心频率点的波结构来代替带宽范围内合成的波结构进行加载。

关键词:Lamb 波检测;波结构;单模态;有限元法

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2011)07-0001-04

Excitation of Single Mode Lamb Wave Simulation Based on Wave Structure

WU Bin, ZHOU Wei, ZHENG Yang, HE Cun-Fu

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: It is very important to study the interaction of fundamental single mode and defects in the area of middle-range and long-range lamb waves inspection. Modularization programs were designed to load the displacement on the FEM modal in the way of mode wave structure using the ANSYS Parameter Design language, obtained the pure single S0 and A0 mode was obtained. It proved the correctness and reliability of this method. Comparing the obtained waveform of loading the wave structure in certain range frequencies of bandwidth and in the centre frequency of excitation signal respectively, it presents that when the wave structure variety is not obvious, usually less than $2 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ in the range of fd , the wave structure of centre frequency can replace the summing wave structure of a range of frequencies.

Keywords: Lamb waves testing; Wave structure; Single mode; FEM

超声 Lamb 波具有传播距离长、检测效率高等特点,因而在板类结构的健康检测中得到了广泛应用^[1-3],如对钢板、复合材料板、压力容器、飞机机翼、焊缝、粘结结构等的无损检测。通常 Lamb 波检测分为中距和长距检测。中距检测的范围 $<5 \text{ m}$,频率在 $250 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$ 之间,应用主要包括板、管、焊缝、飞机上的搭接接头及机翼结冰的检测;而长距检测范围可达 100 m 左右,频率则 $<100 \text{ kHz}$,

收稿日期:2010-11-2

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10972014)

作者简介:吴斌(1962—),男,博士,教授,主要从事工程波动力学与现代测控技术研究

应用对象主要有管道和铁轨等^[4]。然而由于 Lamb 波的多模态与频散特性,使得利用 Lamb 波进行无损检测变得非常复杂。在 Lamb 波的频散曲线上,任何频率下都存在至少两个模态,且模态通常是频散的,这意味着在接收到的检测信号中将会存在多个波包,且大部分时候它们会相互交叠,使得信号不易分析。因而利用超声 Lamb 波进行无损检测的一个关键问题就是在频散较小的区域内激励单一模态的 Lamb 波^[5]。但在试验中试图达到分离模态的效果是非常困难的,需要合适的信号处理技术才能实现,比如 Youbi 等^[6]在研究 Lamb 波与圆形缺陷的交互作用时对接收信号二维傅里叶变换来分离模态

和研究其灵敏度。

数值模拟作为一种有效的分析方法在对 Lamb 波的传播研究中起到了非常重要的作用^[7]。通过有限元仿真可以模拟具体的导波模态,研究其传播特性^[8],为设计导波试验提供理论依据,大大减少试验的盲目性,提高工作效率;利用数值模拟还可以研究导波模态与不同缺陷相互作用的规律^[9-10]。

笔者采用一种基于波结构进行加载的方法,利用大型有限元仿真软件 ANSYS 的参数化设计语言进行模块程序设计^[11],在单层自由板中激励单一模态的超声 Lamb 波。同时,比较了利用频带内复合频率的合成波结构进行加载和利用中心频率处的波结构进行加载的特点。

1 基本理论

1.1 波结构理论

Lamb 波的模态波结构是指位移、应力和应变等物理量沿板厚的分布,体现了导波各模态在不同频率下振动幅值和能量分布的差别。



图 1 Lamb 波传播的二维模型

各向均匀单层自由板中,设波的传播方向为 x_1 ,且其在 x_3 方向上无限分布,则可将此模型简化为图 1 中的二维模型。据波结构的相关理论^[12],Lamb 波存在对称与反对称两种模态,其位移场为:

对称模态

$$u_1 = ikA_2 \cos(px_3) + qB_1 \cos(qx_3) \quad (1)$$

$$u_3 = -pA_2 \sin(px_3) - ikB_1 \sin(qx_3) \quad (2)$$

反对称模态

$$u_1 = ikA_1 \sin(px_3) - qB_2 \sin(qx_3) \quad (3)$$

$$u_3 = pA_1 \cos(px_3) - ikB_2 \cos(qx_3) \quad (4)$$

式中 $p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2$; $q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$, ω 为角频率; c_L 和 c_T 分别为纵波波速和横波波速; k 为波数; h 为板厚 d 的一半。由于 $\omega = 2\pi f$, $k = \frac{\omega}{c_p}$, 相应频散方程可表示为式(5)和(6):

对称模态

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (5)$$

反对称模态

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (6)$$

对频散方程求解,给定 ω 可以得到对应的 k ,从而可以利用式(1)~(4)求出对称与反对称模态的波结构。

1.2 激励单一模态原理

要在结构中激励出单一模态的 Lamb 波,必须满足两个基本条件:一是选择模态频散较小的区域作为激励频率;二是在板的厚度方向上要按照波结构中位移的分布来进行加载^[13]。

波速随频率变化而导致频散现象,因而要减小频散,最好的办法就是采用单一频率的信号来进行激励,以获取单一波速和非频散现象。然而这是困难的,因为激励信号是时间有限信号,所以总会有一定的带宽。通常的做法是对正弦函数加特定的窗函数作为激励信号,这样可以使激励信号带宽较小,从而减小频散。笔者用 $H(t)$ 来表示窗函数,同时激励函数是厚度的函数,且与截面上的波结构有关。可将激励函数表示为:

$$E(x_3, t) = \Phi(f_0, x_3) H(t) \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (7)$$

式中 $\Phi(\omega, x_3)$ 是波结构函数,表示在频率为 ω 时,要激励的模态的波结构在厚度方向 x_3 处的位移。 f_0 是函数 $H(t) \sin(2\pi ft + \varphi)$ 的中心频率。 f 是正弦函数的频率。式(7)是一种简单的加载方式,只需按中心频率点的波结构进行加载即可,它对于在中心频率两侧一定带宽范围内,波结构变化较小的情况适用。如果波结构变化较大时,只考虑中心频率处的波结构进行加载将无法激励出单一的模态。此时需要将函数 $H(t)e^{i\omega t}$ 带宽内的所有频率分量均考虑在内,按复合频率的合成波结构进行加载。对于数值计算而言,无法也没有必要将正负无穷的频率范围考虑在内,只考虑一定带宽范围内,包含信号主能量的频带即可。设此频带为 $[\omega_l, \omega_u]$,则激励信号可表示为:

$$E(x_3, t) = \int_{\omega_l}^{\omega_u} \Phi(\omega, x_3) A(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (8)$$

式中 $A(\omega) = |\int_{-\infty}^{\infty} H(t) \sin(2\pi ft + \varphi) e^{-i\omega t} dt|$, 表示信号 $H(t) \sin(2\pi ft + \varphi)$ 傅里叶变换后的模。

2 数值仿真实例

2.1 有限元模型的建立

Lamb 波可视为一种平面应变波,沿着波的传播方向只存在 x 方向位移(即面内位移)和 y 方向位移(即离面位移),如图 2 所示。为了节省计算时

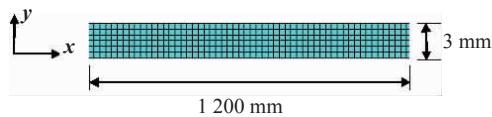


图 2 具有长度和厚度尺寸的二维模型

间,提高效率,笔者采用具有长度和厚度尺寸的二维模型进行仿真。试样模型为长 1 200 mm,厚 3 mm 的铝板,其纵波波速 $c_L = 6\ 320\ m/s$,横波波速 $c_T = 3\ 130\ m/s$,密度 $\rho = 2\ 700\ kg/m^3$ 。

为了正确地仿真出波动场的传播特性,网格尺寸根据选择的激励频率要求小于在结构中传播的最小波长的十分之一,同时,时间步长也要小于波传播一个网格距离所需要的时间。选择在模型左边缘加载中心频率为 400 kHz,10 个周期汉宁窗调制的正弦波激励信号,如图 3 所示。网格尺寸 0.6 mm,时间步长 0.06 μs ,采样频率 8 MHz。

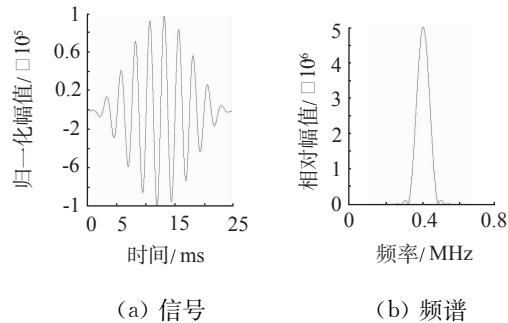


图 3 中心频率为 400 kHz,10 个周期汉宁窗调制正弦波信号及其频谱

2.2 模型上表面单节点加载

对模型按波结构进行加载之前,首先在模型上表面左端的一个节点上进行位移约束的加载,以观察通常情况下 Lamb 波在板中的传播情况。根据 Disperse 软件的计算,400 kHz 时板中只存在 S0 和 A0 模态,其群速度 $v_{S0} = 4\ 989\ m/s$ 、 $v_{A0} = 3\ 165\ m/s$ 。将中心频率为 400 kHz,10 个周期汉宁窗调制正弦波的激励信号作为位移约束加载在模型左端上表面第一个节点上,经 ANSYS 计算后,提取模型上表面紧邻激励区的一个节点数据来模拟实际检测中自激自收波形进行处理。图 4 即为最后得到的波形图。图中可以清晰地看出在板中出现了两个波包,通过计算得到波包 1 的波速为 4 932 m/s,可确定为 S0 模态,波包 2 的波速为 3 331 m/s,可确定为 A0 模态。由此可以表明,按该方法进行加载得到了与理论计算相吻合的结果,板中同时出现了 S0 模态和 A0 模态。由于在节点加载的是 y 方向的离

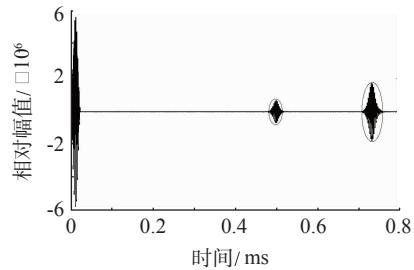


图 4 在模型上表面左端点进行位移加载后得到的自激自收波形

面位移,因此以离面位移为主的 A0 模态的能量要大于以面内位移为主的 S0 模态。

2.3 沿厚度方向按波结构加载

2.3.1 边界条件的施加

根据 Disperse 软件的计算,400 kHz 时板中 S0 和 A0 模态的波结构如图 5 所示。对于 S0 模态,面内位移 U_x 占主要地位,且沿着厚度方向对称分布;相反,对于 A0 模态,离面位移 U_y 占主要地位,并沿着厚度方向对称分布。根据上述激励单一模态理论,对于在一定带宽范围内进行加载的情况,根据图 3 频谱的分布,选取 350~450 kHz 范围内的频率分量进行计算,选取此频率范围能在 Disperse 软件获得的波结构,同对应频率幅值相乘后再叠加,将合成后的波结构与调制正弦波相乘后作为激励信号进行复合频率加载。而对于仅加载中心频率点波结构的情况,只需将 400 kHz 时的波结构乘以调制正弦波,作为最终的激励信号进行单频率点加载。

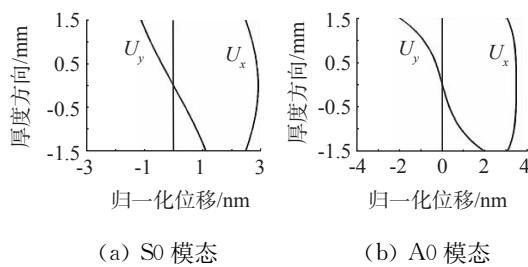


图 5 3 mm 厚铝板,激励频率 400 kHz 时的波结构

2.3.2 结果分析

图 6 是在带宽范围内按合成 S0 模态波结构加载得到的波形。图 6(a)是沿 x 方向振动的位移分量,左侧是激励信号,为波结构位移量同调制正弦波信号相乘的结果,其大小同波结构位移值分量相关,右侧是接收到的波包;图 6(b)是沿 y 方向振动的位移分量,同图 6(a)相比,由于波结构的 $U_y < U_x$,因此激励信号的 U_y 分量小于 U_x ,接收到的波包幅值也比 U_x 分量小,经过计算得到此波包的群速度值

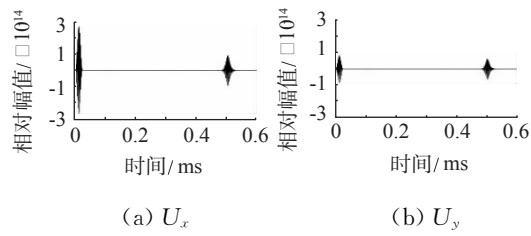


图 6 按 S0 波结构进行复合频率加载得到的自激自收波形为 4 916 m/s, 与理论值吻合, 证明这个波包就是 S0 模态。图 7 则是按单一频率加载后得到的波形, 对比 U_x 同 U_y 的差别, 与图 6 基本一致。观察 Disperse 中 350~450 kHz 这个频率段内 S0 的波结构变化不大, 因此最后得到的波形规律同复合频率加载时相同, 只是因为加载的波结构位移量不同, 导致波包幅值不同, 经计算其波速同样为 4 916 m/s。

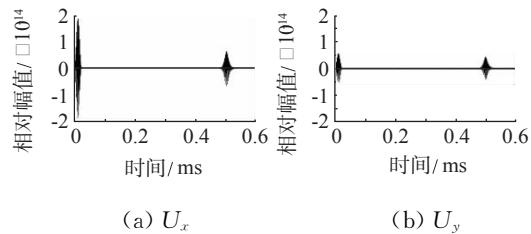


图 7 按 S0 波结构进行单频率加载得到的自激自收波形

图 8 是按 A0 波结构复合频率加载得到的接收波形, 同 S0 模态相反, 反对称模态的离面位移占主导地位, 图 8 中的接收波包的 $U_y > U_x$, 说明能量主要集中在离面位移上。通过计算得到此波包的群速度值为 3 339 m/s, 确定此波包就是 A0 模态。图 9 是按单频率进行加载得到的波包, 同加载 S0 的情形一样, 由于 A0 的波结构变化也不大, 最后得到的

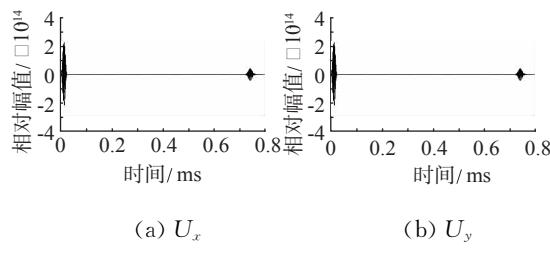


图 8 按 A0 模态波结构进行复合频率加载得到的自激自收波形

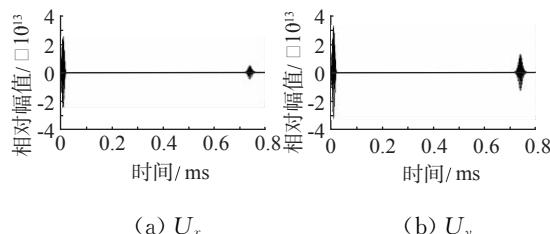


图 9 按 A0 波结构进行单频率加载得到的自激自收波形

波包同复合频率加载时一致, 经计算, 其波速为 3 327 m/s。

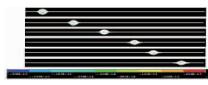
通过在 350~450 kHz 范围内进行复合频率加载和 400 kHz 进行单频率加载对比可知, 由于此范围内 S0 和 A0 波结构变化不大, 其得到的波包基本相同, 并与理论值比较吻合, 因此可以用单点加载来代替在一定带宽内进行复合频率加载。

2.4 波场等值线图

为了直观地观察单一模态在平板中的传播, 现分别选取按中心频率点加载的六个不同时刻 S0 和 A0 模态的位移等值线图, 如图 10 所示。图 10(a) 是 S0 模态的传播情况, 随着时间的增加, S0 模态的波包由左向右传播; 图 10(b) 是 A0 模态的传播情况, 从图中可以清晰地看出, 按波结构加载后得到了单一模态。



(a) S0 模态



(b) A0 模态

图 10 按波结构加载得到的单一模态位移等值线图

3 结论

在厚 3 mm 长 1 200 mm 的铝板模型上施加中心频率为 400 kHz, 10 个周期汉宁窗调制的正弦波位移约束, 得到如下结论:

(1) 对比按单节点加载与按厚度方向波结构进行加载, 发现按模态波结构加载可成功将同时出现的 S0 模态和 A0 模态分离而得到单一模态在板中传播, 证明了在有限元分析中按波结构加载位移得到单一模态的可行性, 避免了 Lamb 波的多模态现象对信号分析的影响。

(2) 分别用中心频率点 400 kHz 的波结构以及 350~450 kHz 带宽范围内的复合频率点进行加载, 都得到了单一的 S0 模态和 A0 模态。同时由于在 350~450 kHz 这个范围内, S0 和 A0 的波结构变化不大, 因此这两种加载方式得到的波形基本相同。考虑到中心频率点加载的简单快捷, 可以用单一中心频率点加载来代替带宽范围内的复合频率加载。

(3) 得到了单一模态在板中传播过程的位移等值线图, 清晰直接地观察到 S0 和 A0 模态随时间的传播过程, 为以后观察单一模态在缺陷状态下或板类组合结构中的传播提供了有利工具。

(下转第 10 页)

密度对比法不需要知道材料的组分和质量衰减系数,原理相对简单,容易实现。线衰减系数对比法需要知道材料组分和质量衰减系数,技术相对复杂。

4 结论

(1) 基于组分特性的线衰减系数对比法是工业 X 射线 CT 定量检测材料密度的有效方法,检测均匀铝合金材料密度时,其绝对误差最大为 0.009 9 g/cm³,相对误差最大为 0.339%。

(2) 对于均匀铝合金材料的密度检测,线衰减系数对比法测试精度明显优于密度对比法。

(3) 密度对比法无需知道材料的组分和质量衰减系数,原理相对简单,容易实现。线衰减系数对比法需要知道材料组分和质量衰减系数,技术相对复杂。

参考文献:

- [1] Bossi R H, Georgeson G E. The application of X-ray computed tomography to materials development [J]. *JOM*, 1991, 43(9): 723—728.
- [2] London B, Yancey R N, Smith J A. High-resolution X-ray computed tomography of composite materials [J]. *Materials Evaluation*, 1990, 48(5): 604—608.
- [3] 杨文海,何得昌,徐军培,等. γ 射线工业 CT 技术在高能炸药密度检测中的应用[J]. 火炸药学报, 2001, 24

(上接第 4 页)

参考文献:

- [1] 刘增华,何存富,吴斌,等. 利用兰姆波对板状结构中隐蔽腐蚀缺陷的检测[J]. 实验力学, 2005, 20(2): 166—170.
- [2] Benmeddour F, Grondel S, Assaad J. Study of the fundamental Lamb modes interaction with asymmetrical discontinuities[J]. *NDT&E International*, 2008, 41(5): 330—340.
- [3] Benmeddour F, Grondel S, Assaad J. Study of the fundamental Lamb modes interaction with symmetrical notches[J]. *NDT&E International*, 2008, 41(1): 1—9.
- [4] Cawley P, Lowe M, Alleyne D. Practical long range guided wave testing: applications to pipes and rail[J]. *Materials Evaluation*, 2003, 61(1): 66—74.
- [5] Cawley P, Alleyne D. The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures[J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(2/5): 287—290.
- [6] El-Youbi F, Grondel S, Assaad J. Signal processing for damage detection using two different array transducers[J]. *Ultrasonics*, 2004, 42(1/9): 803—806.

(3): 33—34, 72.

- [4] 王珏,黄苏红,蔡玉芳. 工业 CT 材料密度测量方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(2): 203—205.
- [5] 杨雪海,张伟斌,戴斌,等. 含能材料密度的 XCT 自参照测试[J]. *无损检测*, 2010, 32(6): 431—433.
- [6] CHEN Hui-neng, YANG Shu-bing. Study on the density characterization of the CT image[C]. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, 2008, China.
- [7] Kropas C V, Moran T J, Yancey R N. Effect of composition on density measurement by X-ray computed tomography[J]. *Materials Evaluation*, 1991, 49(4): 487—489.
- [8] ASTM E1935—1997 (2008) Standard Test Method for Calibrating and Measuring CT Density[S].
- [9] 中国机械工程学会无损检测分会编. 射线检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 10—50.
- [10] 美国无损检测学会编. 美国无损检测手册(射线卷)[M]. 《美国无损检测手册》译审委员会译. 上海: 世界图书出版公司, 1992: 90—100.
- [11] 石磊,主编. 探伤用射线防护技术[M]. 北京机械工业出版社, 1990: 78—85.
- [12] Hubbell J H, Seltzer S M. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients. 2005-2-16. <http://physics.nist.gov/xaamdi>.

- [7] 周正干,冯海伟. 超声导波检测技术的研究进展[J]. 无损检测, 2006, 28(2): 57—63.
- [8] 魏运飞,卢超,张在东. 薄板声-超声检测时兰姆波传播模式的有限元模拟[J]. 无损检测, 2009, 31(7): 520—524.
- [9] Lee B C, Staszewski W J. Lamb wave propagation modelling for damage detection: I. Two-dimensional analysis[J]. *Smart Materials And Structures*, 2007, 16(2): 249—259.
- [10] Lee B C, Staszewski W J. Lamb wave propagation modelling for damage detection: II. Damage monitoring strategy[J]. *Smart Materials And Structures*, 2007, 16(2): 260—274.
- [11] 王秀彦,孙雅欣,刘增华,等. ANSYS 二次开发技术在弯管缺陷超声导波检测数值模拟中的应用[J]. 无损检测, 2006, 28(8): 413—415.
- [12] Rose J L. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] Alleyne D, Cawley P. The interaction of lamb waves with defects[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, 39(3): 381—397.