

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902797

短空间二维傅里叶变换对铝板的损伤定量研究*

常俊杰^{1,2} 万陶磊¹ 钟海鹰¹

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 日本探头株式会社 横滨 232-0033)

摘要:针对 Lamb 波对铝板损伤定量难的问题,使用短空间二维傅里叶变换的方法对其进行了研究。首先,使用空气耦合超声在铝板中激励 Lamb 波并进行线性扫查获取其时间-空间波场信号;然后,对信号进行短空间二维傅里叶变换获取扫查区域的 Lamb 波空间-波数曲线,并从中得到损伤的位置、长度和深度信息;最后,根据相速度-频厚积曲线反推出损伤的深度。结果表明,所提方法能够同时对扫查区域的板厚以及损伤的位置、长度和深度进行评估。其中,板厚定量误差最大为 5.50%,损伤长度和深度的定量误差最大分别为 6.00% 和 6.67%。

关键词:短空间傅里叶变换;Lamb 波;空气耦合超声;深度;定量;定位

中图分类号: TB559;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Quantitative study of short-space two-dimensional Fourier transform on aluminum plate damage

Chang Junjie^{1,2} Wan Taolei¹ Zhong Haiying¹

(1. Key Lab of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Japan Probe Co. Ltd, Yokohama 2320033, Japan)

Abstract: Aiming at the problem that Lamb wave is difficult to quantify the damage of aluminum plate, a short-space two-dimensional Fourier transform method is used to study it. Firstly, the Lamb wave is excited in aluminum plate by air coupled ultrasound and its time-space wave field signals is obtained by linear scanning. Then, the short space two-dimensional Fourier transform is used to obtain the Lamb wave space-wavenumber curve of the scanning area, and the location, length and depth of the damage are obtained. Finally, the depth of damage is deduced from the phase velocity frequency-thickness product curve. The results show that the proposed method can simultaneously evaluate the plate thickness of the scanning area and the location, length and depth of the damage. Among them, the maximum quantitative error of plate thickness is 5.50%, and the maximum quantitative error of damage length and depth is 6.00% and 6.67%.

Keywords: short-space Fourier transform; Lamb wave; air-coupled ultrasound; depth; quantitative; positioning

0 前言

金属板状结构被广泛应用于航天航空和汽车等重要领域^[1-2]。但板状结构在加工成形的过程中会产生分层、夹杂等缺陷^[3]。服役期间受到外界的持续应力、载荷冲击和环境腐蚀等原因也会造成金属板的表面及内部产生损伤。因此,为了预防安全事故的发生,对金属板结构的质量进行检测具有重要意义。

Lamb 波由于具有传播距离远、衰减小和检测灵敏度高等优点^[4-7]被广泛应用于金属板和复合材料板的质量检测上。刘增华等^[8]使用磁致伸缩贴片型传感器在铝板中激励 SH0 模态的导波结合椭圆概率损伤原理对缺陷进行了成像定位研究。焦敬品等^[9]使用 Lamb 波结合反转路径的方法对铝板中不同形状的损伤进行了成像定位研究。刘国强等^[10]使用 Lamb 波结合改进的椭圆概率损伤方法对复合材料加筋板中的损伤进行了成像定位研究。何存富等^[11]使用 Lamb 波结合时间反转聚焦的方法

收稿日期: 2019-11-29 Received Date: 2019-11-29

* 基金项目: 国家自然科学基金(11464030)资助项目

对铝板中的缺陷进行了成像定位研究。从以上文献可知,相关研究学者都只是对板中的损伤进行了定位研究,没有进行定量研究。

针对板中的损伤进行定量研究,Wu等^[12]对不同面积的圆孔缺陷进行研究时发现,缺陷的面积与信号的损伤因子之间存在正相关性。He等^[13]基于贝叶斯统计算法得到了能对铝梁表面缺陷进行定量的尺寸信息。王莉等^[14]在基于概率损伤原理对复合材料板进行损伤定位的基础上,结合代理模型对冲击损伤的面积进行了定量研究。随着波场分析技术的发展,朱倩等^[15]使用激光超声激励 Lamb 波对双层层压板进行线性扫查,然后结合短空间傅里叶变换对板中的损伤长度进行了成像定量研究。顾建祖等^[16]使用压电晶片激励 Lamb 波、激光超声接收的方式结合短空间傅里叶变换对金属板中的损伤长度和深度进行了定量研究。Tian等^[17]使用短空间傅里叶变换的方法得到检测结构每个位置处的波数,并根据波数的变化对损伤的长度进行了定量。

从以上众多文献可知,学者大多对缺陷的面积或长度进行定量,缺少对损伤的深度定量研究。且都是通过压电晶片或激光超声的方式进行实验研究。实际上,使用压电晶片进行实验时,接收信号容易受到耦合剂耦合效果的影响,导致实验结果误差大。并且在役检测时由于环境等因素,使得粘贴压电晶片受到限制。虽然激光超声可以非接触式的对材料进行检测,但其能量过高容易烧蚀材料^[4]。

空气耦合超声^[4, 18-19]由于其完全非接触式的检测方法具有无需耦合剂、对材料完全无伤害、可通过计算机控制单个探头进行移动,获得足够高的空间分辨率等优点,已经被广泛应用在复合材料与金属板的检测当中。针对以上,本文使用空气耦合超声探头发射和接收 Lamb 波的方式对铝板进行线性扫查,获取其时间-空间波场信号。结合短空间二维傅里叶变换获取不同扫查位置处的波数,最后对扫查区域中的损伤进行定量研究。

1 短空间二维傅里叶变换原理

1.1 二维傅里叶变换

假设一信号 $U(t, x)$ 沿特定方向 x 传播,经过二维傅里叶变换之后,可将时间-空间域转换为频率-波数域,如下式:

$$U(\omega, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U(t, x) \exp(-j(\omega t - kx)) dt dx \quad (1)$$

式中: x 为传感器之间的距离; t 为信号的时间长度; ω 为角频率; k 为波数。

1.2 短空间傅里叶变换

根据各向同性单层板中的 Lamb 波理论可知,当材料参数不变时,其相速度频散曲线只和频厚积有关。根据式(2)可知,当频率为定值时,Lamb 波的相速度发生变化时,其波数也会随之发生变化。

$$k = \frac{2\pi f}{C_p} \quad (2)$$

式中: f 为频率; C_p 为相速度。

因此,当激励频率不变,材料的厚度发生变化时,其对应相速度发生变化,最终会引起波数发生变化。当知道每个板厚位置处的波数数值即可反推出此处的板厚厚度。然而,对时间-空间波场信号做二维傅里叶变换只能将其转换为频率-波数域,并不能知道每个扫查位置处的波数情况。根据短时傅里叶变换的原理类推可知,使用三维空间窗函数对时间-空间波场信号进行移动截取后再进行二维傅里叶变换,便可保留空间位置信息的同时,获取其波数幅值信息。短空间二维傅里叶变换的表达式如下:

$$H(a, \omega, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(t, x) W \times (t, x - a) \exp(-j(\omega t - kx)) dt dx \quad (3)$$

式中: $W(t, x)$ 为三维窗函数; a 为空间位置。

短空间二维傅里叶变换的具体实行步骤如下。

使用空气耦合超声探头激励 Lamb 波,控制接收探头以步进 x 为间隔采集 n 个信号,获取时间-空间波场信号。

确定空间窗函数的类型和空间窗函数的宽度。为了减少频谱的泄漏,选择汉宁窗函数。其表达式如下:

$$G(x) = \begin{cases} 0.5[1 - \cos(2\pi \frac{x}{D_x})], & |x| \leq D_x \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: D_x 表示窗宽。文献[18]表明,窗函数的长度至少需要大于 2 个波长。

使用空间窗对时间-空间波场信号进行截取,并进行二维傅里叶变换得到空间-频率-波数信息 $H(a, \omega, k)$;提取出探头激励频率处的波数-幅值信息 $H(a, \omega_0, k)$;全部截取完毕后得到空间-波数-幅值信息。然后以每个空间位置处幅值最大的波数为此处的实际波数即可得到空间-波数曲线;最后根据式(2)和频厚积相速度曲线计算出各个空间位置处的厚度,进而对损伤进行定量。具体变换过程如图 1 中的框图所示。

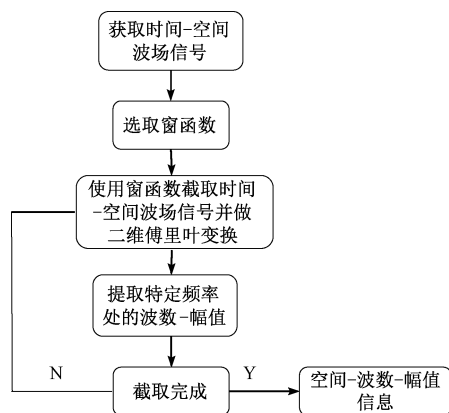


图 1 短空间二维傅里叶变换流程

Fig. 1 Short-space two-dimensional Fourier transform flowchart

2 实验研究

2.1 实验平台的搭建

实验系统使用的是日本探头株式会社生产的 NAUT-21 空气耦合超声检测系统。主要由空气耦合超声探头、高功率信号发射接收器 JPR-600C、前置信号放大器、数据采集卡、机械扫查装置和计算机组成,实验系统简图如图 2 所示。

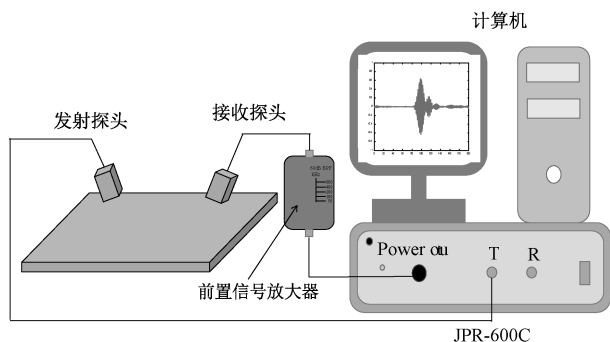


图 2 实验系统

Fig. 2 Schematic of the experimental system

实验材料为尺寸 300 mm×300 mm×2 mm 的铝板,在板中分别制作了尺寸为 20 mm×10 mm×1.25 mm 和 20 mm×10 mm×0.7 mm 的凹槽缺陷,分别将其记为缺陷 1 和缺陷 2,试件示意图如图 3 所示。

2.2 空气耦合超声 Lamb 波的激励

文献[3-4, 18, 20]表明,A0 模态 Lamb 波波长短、更适合对板中的损伤进行检测。且由于其离面位移相对于 S0 模态 Lamb 波要更大,更适合空气耦合超声探头接收板中泄漏的 Lamb 波。因此使用空气耦合超声探头激励 A0 模态 Lamb 波进行实验。根据 Disperse 软件计算出铝板的频厚积-相速度频散曲线,结果如图 4 所示。

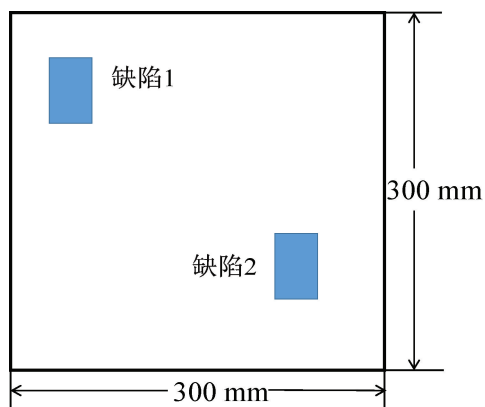


图 3 试件加工示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test piece

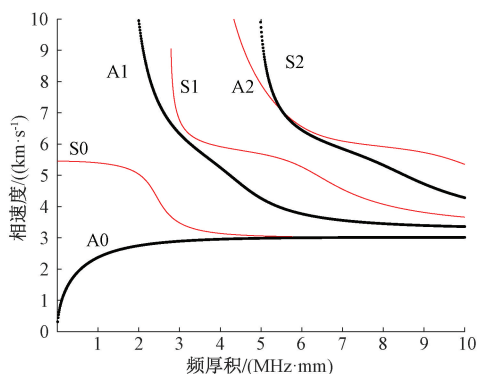


图 4 铝板的频厚积相速度频散曲线

Fig. 4 Frequency thickness phase velocity dispersion curve of aluminum plate

从图 4 可知,随着频厚积的增加,Lamb 波的模态逐渐增多。针对厚度为 2 mm 的铝板,为了尽可能的使板中的 Lamb 波模态较少,应选择低频激励 Lamb 波。在此选择中心频率为 400 kHz、晶片尺寸为 14 mm×20 mm 的空气耦合超声探头进行实验。使用低频激励 Lamb 波时,板中只存在 A0 和 S0 模态的 Lamb 波。为了激励所需 A0 模态的 Lamb 波,空气耦合超声探头斜入射激励时需要满足 snell 折射定理。

$$\theta = \arcsin \frac{C_a}{C_p} \quad (5)$$

式中: θ 为空气耦合超声探头的激励角度; C_a 为空气中的声速; C_p 为特定频率时所需 Lamb 波模态的相速度。

当激励频率为 400 kHz、板厚为 2 mm 时,A0 模态对应的相速度为 2 224 m/s。根据式(5)可得激励角度约为 8.8°。为了使接收探头能够充分接收到板中泄漏的 Lamb 波,其接收探头的倾斜角度需要和发射探头的倾斜角度保持一致。实验时使用 JPR-600C 施加电压为 300 V,周期数为 6 的矩形脉冲波作为激励信号。

2.3 实验分析

图5所示为缺陷1位于发射、接收探头直达路径之间与直达路径之外时的接收Lamb波信号。

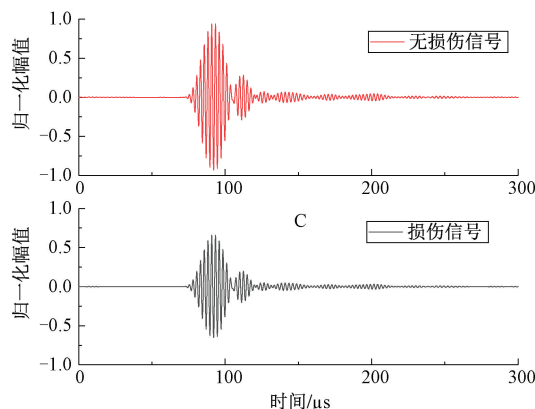


图5 损伤信号与无损伤信号

Fig. 5 Damage and no damage signals

从图5可知,损伤信号与无损伤信号相比较,其幅值明显降低。这表明A0模态Lamb波能够检测出板中存在的凹槽损伤。对缺陷2进行实验时也同样存在此规律。

为了对损伤的深度进行定量,首先需要对铝板进行线性扫查获取时间-空间波场信号。如图6所示,接收探头以1 mm为步进对铝板进行扫查,共扫查200 mm,采集200个信号,采样频率设置为5 MHz。

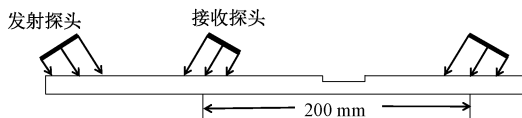


图6 时间-空间波场信号采集示意图

Fig. 6 Schematic diagram of time space wave field signal acquisition

按照空间扫查位置顺序,将信号进行组合可得到时间-空间波场信号,结果如图7所示。

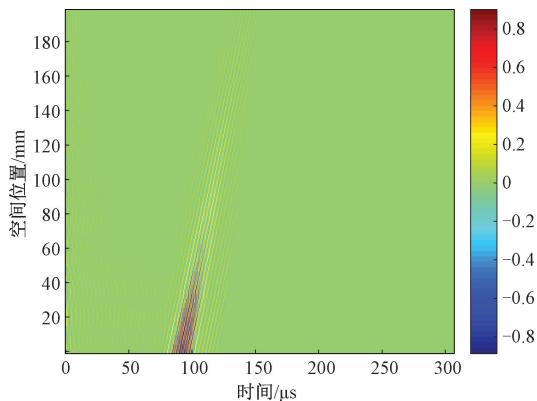


图7 时间-空间波场信号

Fig. 7 Time space wave field signal

从图7可知,进行扫查时接收Lamb波信号主要由一个主波包构成,但不能确认该波包的模态。随着空间距离的增加,Lamb波的幅值逐渐减小,但不能确认缺陷1的空间位置。对其进行二维傅里叶变换,将其转换为频率-波数-幅值域,并将厚度为2 mm铝板的理论频率-波数曲线与二维傅里叶变换结果进行对比,结果如图8所示。

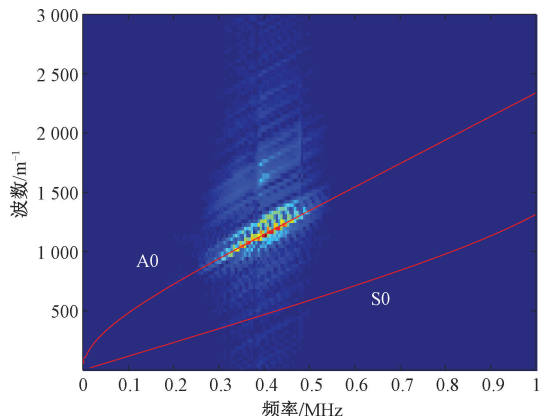


图8 二维傅里叶变换与理论频率波数对比

Fig. 8 Comparison of two-dimensional Fourier transform and theoretical frequency wave number

可知,在频率为0.4 MHz附近存在与A0模态理论频率-波数曲线非常吻合的极大值。因此,可认为激励Lamb波信号为A0模态,这进一步证明了空气耦合超声斜入射能够激励模态较为单一的Lamb波。

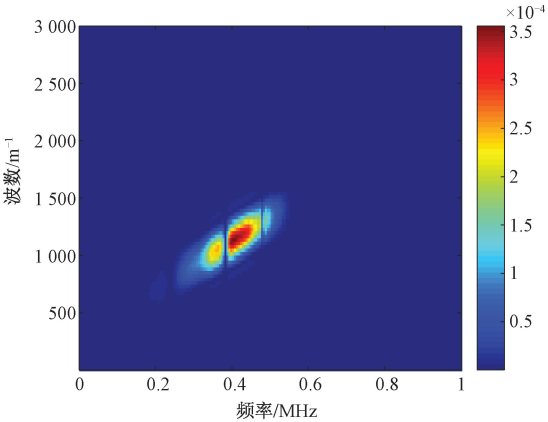
2.4 定量分析

为了对其进行短空间二维傅里叶变换,需要对时间-波场空间信号进行加窗。在此选择汉宁窗,空间长度设置为40 mm,移动步进为1 mm。加窗后进行二维傅里叶变换,并提取出中心频率为400 kHz处的波数-幅值信息,结果如图9所示。

对时间-空间波场信号进行移动加窗截取完毕后,将所有中心频率为400 kHz的波数-幅值信息进行组合可得到空间-波数-幅值信息,结果如图10所示。

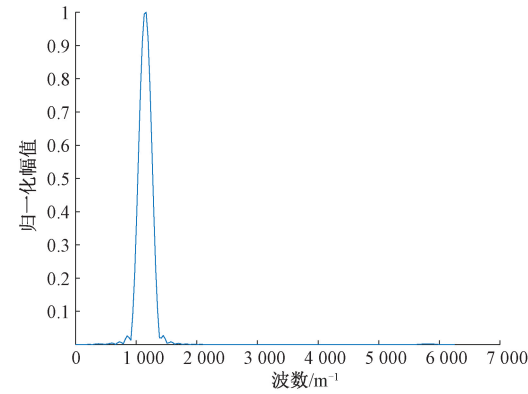
从图10可知,在长度为200 mm的扫查区域内,83~104 mm的空间位置处波数明显增大。这是由于在此处存在凹槽缺陷,铝板厚度变薄,使得Lamb波相速度减小造成波数增加。其他无缺陷位置处板厚未发生变化,所以波数较为平稳。将每个位置处的幅值最大值对应的波数定义为该位置处的实际波数,可得到空间位置-波数曲线,结果如图11所示。

同样在83~104 mm的扫查区域中波数明显增大,因此可认为是缺陷1的所在位置。其中,缺陷左端距离扫查起点83 mm,长度为21 mm。由于实际缺陷长度为20 mm,所以对缺陷长度进行定量的误差为5.00%。另外,缺陷处对应的波数为1 665 rad/m,无损伤缺陷的波



(a) 加窗信号的二维傅里叶变换结果

(a) Two dimensional Fourier transform results of windowed signal



(b) 频率为400kHz时的波数-幅值信息

(b) Wave number amplitude information at 400kHz

图 9 加窗信号的二维傅里叶变换及波数幅值信息

Fig. 9 Two dimensional Fourier transform and wave number amplitude information of windowed signal

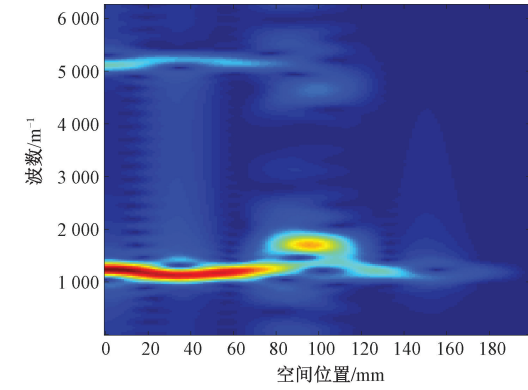


图 10 缺陷 1 的空间-波数-幅值谱

Fig. 10 Spatial wave number amplitude spectrum of defect 1

数为 1 104 rad/m。但在无损伤区域和损伤区域与无损伤区域过渡的位置还存在其他的波数成分。这可能是由于实际加工过程中的板厚可能会存在微小误差导致。同时加窗对信号进行二维傅里叶变换时频谱泄漏也会导致过渡区域存在其他成分的波数。根据式 (2) 计算可得, 损伤区域和无损伤区域的相速度分别为 1 509 和 2 276 m/s。根据频厚积相速度曲线可知, 当频率为

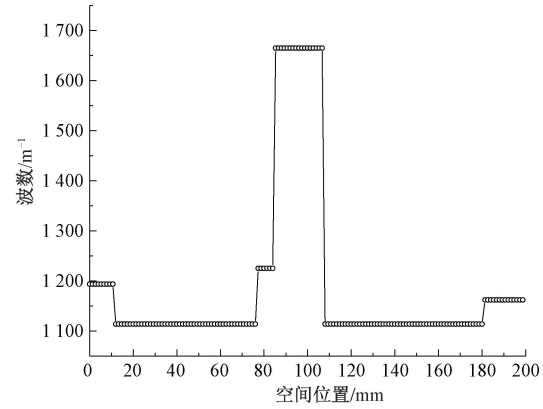
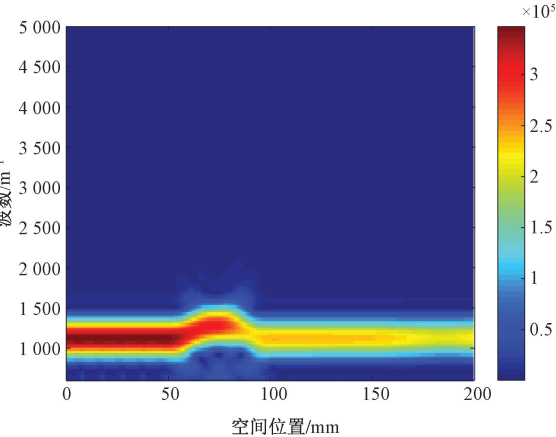


图 11 缺陷 1 的空间-波数曲线

Fig. 11 Spatial wave number curve of defect 1

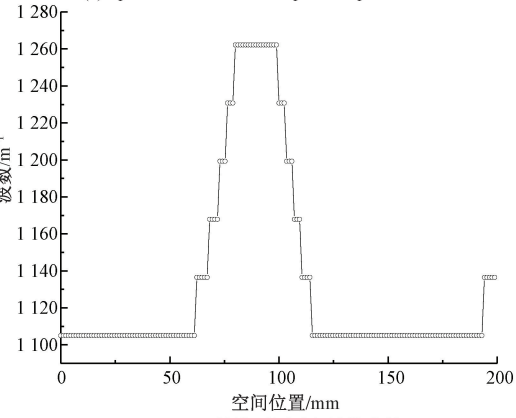
400 kHz 时,板厚依次估计为 0.70 和 2.10 mm。由于实际缺陷深度为 1.25 mm,板厚 2 mm。最终可得到缺陷的深度为 1.3 mm,误差为 6.67%,板厚测量误差为 5.00%

同样,对铝板中包括缺陷 2 的区域进行扫查后,结合短空间傅里叶变换可得到缺陷 2 的空间-波数-幅值谱和空间-波数曲线,结果如图 12 所示。



(b) 缺陷2的空间-波数-幅值谱

(a) Spatial wave number amplitude spectrum of defect 2



(b)缺陷2的空间-波数曲线

(b) Space wave number curve of defect 2

图 12 缺陷 2 的空间-波数-幅值谱和空间-波数曲线

Fig. 12 Spatial wave number amplitude spectrum and spatial wave number curve of defect 2

从图12可知,在距离扫查起点为80~98.80 mm处的波数为1 262 rad/m,与其他区域的波数值相比较明显较大。这表明在距离扫查起点为80~98.80 mm区域处为损伤区域,且损伤长度为18.80 mm。因为实际加工缺陷长度为20 mm,所以损伤长度定量误差为6.00%。由于在无损伤区域处的波数为1 105 rad/m,最后可分别计算出损伤区域与无损伤区域的板厚为1.37和2.11 mm。可知,缺陷2的深度为0.63 mm,无损伤区域的板厚为2.11 mm。其中,缺陷深度定量误差为5.0%,板厚度定量误差为5.50%。

综上所述,基于空气耦合超声 Lamb 波结合短空间二维傅里叶变换的方法不仅能够对铝板扫查区域的厚度进行评估,而且能够同时对区域中存在的损伤位置、长度和深度进行评估,且误差在可接受范围之内,具有一定的工程意义。

3 结 论

使用空气耦合超声 Lamb 波结合短空间二维傅里叶变换的方法对铝板中的损伤长度和深度进行了研究,得到以下结论。

1)空气耦合超声在满足 snell 折射定理时能够激励单一模态的 Lamb 波。

2)对 Lamb 波的时间-波场信号进行二维傅里叶变换后可分解成 Lamb 波的波数并识别出 Lamb 波的模式。

3)由于缺陷的存在,使得该位置处的有效板厚变薄,导致 Lamb 波波数急剧增大。通过短空间二维傅里叶变换的方法获取 Lamb 波的局部波数能同时对板厚及缺陷的长度和深度进行定量。其中,板厚的定量误差最大为5.50%,损伤长度和深度的定量误差最大分别为6.00%和6.67%,表明所提方法可应用于铝板的损伤定量研究中。

参考文献

[1] 杨理践,李春华,高文凭,等. 铝板材电磁超声检测中波的产生与传播过程分析[J]. 仪器仪表学报,2012, 33(6): 1218-1223.
YANG L J, LI CH H, GAO W P, et al. Finite element simulation of the generation and propagation processes of electromagnetic ultrasonic wave in aluminum plate test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(06): 1218-1223.

[2] 王文杰. 高性能先进舰船用合金材料的应用现状及展望[J]. 材料导报,2013, 27(7): 98-105.
WANG W H. Spective of alloys for high performance and advanced naval vessels [J]. Materials Reports, 2013, 27(7): 98-105.

[3] 孟翔震,李再伟,朱文发,等. 基于空耦超声 Lamb 波的金属板状结构内部缺陷检测方法[J]. 应用声学, 2020, 39(2): 316-324.
MENG X ZH, LI Z W, ZHU W F, et al. Detecti-on of i-ternal defect in metal plate structures usi-ng air-coupled ultrasonic Lamb waves[J]. Applied Acoustics, 2020, 39(2): 316-324.

[4] 刘增华,樊军伟,何存富,等. 基于概率损伤算法的复合材料板空气耦合 Lamb 波扫描成像[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 227-235.
LIU Z H, FAN J W, HE C F, et al. Scanning imaging of composite plate using air-coupled Lamb waves based on probabilistic damage algorithm [J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2015, 32(1): 227-235.

[5] 冯勇明,杨建元,陈卫东,等. 基于概率成像的复合材料结构健康监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3): 253-257.
FENG Y M, YANG J Y, CHEN W D, et al. Structural health monitoring system for composite matrial based on probabilistic damage imagin [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(3): 253-257.

[6] 张闯,李泽欢,刘小康,等. 基于 Lamb 波的金属材料涂层厚度测量[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 133-140.
ZHANG CH, LI Z H, LIU X K, et al. Thickness measurement of coating on a metallic substrate using Lamb wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 133-140.

[7] 刘增华,穆云龙,宋国荣,等. 复合材料板 Chirp 激励的 Lamb 波成像技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1961-1971.
LIU Z H, MU Y L, SONG G R, et al. Research on Lamb wave imaging technique for composite plate based on chirp excitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 1961-1971.

[8] 刘增华,钟栩文,李欣,等. 基于全向性 SH0 模态磁致伸缩贴片型传感器阵列的铝板缺陷成像研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 8-15.
LIU Z H, ZHONG X W, LI X, et al. Research on dama-ge imaging based on omnidirectional S-H0 mode magnet-ostriptive patch transducers arr-ay in aluminum plates[J]. J-ournal of Mechanical E-ngineering, 2018, 54(14): 8-15.

[9] 焦敬品,李海平,何存富,等. 基于反转路径差信号的兰姆波成像方法[J]. 物理学报, 2019, 68(12): 129-141.
JIAO J P, LI H P, HE C F, et al. Lamb wave imaging method based on difference signal in reverse path [J].

- Acta Physica Sinica, 2019, 68(12): 129-141.
- [10] 刘国强, 肖迎春, 张华, 等. 复合材料加筋壁板损伤识别的概率成像方法[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2): 311-319.
- LIU G Q, XIAO Y CH, ZHANG H, et al. Probability-based diagnostic imaging for damage identification of stiffened composite panel [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2018, 35(2): 311-319.
- [11] 何存富, 周文桢, 刘增华, 等. 基于多通道时间反转 Lamb 波的铝板小缺陷检测[J]. 实验力学, 2015, 30(6): 683-689.
- HE C F, ZHOU W ZH, LIU Z H, et al. Small-sized defect detection in aluminum plate based on time reversal Lamb waves [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6): 683-689.
- [12] WU Z J, LIU K H, WANG Y S, et al. Validation and evaluation of damage identification using probability based diagnostic imaging on a stiffened composite panel [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(16): 2181-2195.
- [13] HE S, NG C T. Guided wave-based identification of multiple cracks in beams using a Bayesian approach [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017(84): 324-345.
- [14] 王莉, 刘国强, 肖迎春. 基于代理模型的复合材料加筋壁板分层损伤定量监测方法[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 302-308.
- WANG L, LIU G Q, XIAO Y CH. Quantitative monitoring method for delamination damage of stiffened composite panel based on surrogate model [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2020, 37(2): 302-308.
- [15] 朱倩, 裘进浩, 张超, 等. 双层层压材料中激光超声检测方法的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 126-133.
- ZHU Q, QIU J H, ZHANG CH, et al. Application of laser ultrasonic detection method for double-layer laminated material [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 126-133.
- [16] 顾建祖, 顾林霞, 骆英, 等. 基于频率-波数域分析方法的金属板损伤检测与评估[J]. 建筑技术, 2017, 48(12): 1283-1285.
- GU J Z, GU L X, LUO Y, et al. Damage detection and evaluation for metallic plates based on frequency-wave number analysis [J]. Architecture Technology, 2017, 48(12): 1283-1285.
- [17] TIAN Z, YU L. Lamb wave structural health monitoring using frequency-wavenumber analysis [C]. proceedings of the AIP Conference Proceedings, 2013.
- [18] 张慧, 刘玉振, 于露, 等. 复合板缺陷的空耦 Lamb 波扫描仿真与成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 150-157.
- ZHANG H, LIU Y ZH, YU L, et al. Simulation and imaging of air-coupled Lamb wave scanning for defects detection of composite plates [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 150-157.
- [19] 张慧, 李志, 郑冠儒, 等. 空气耦合电容式微超声换能器设计[J]. 声学学报, 2019, 44(1): 116-124.
- ZHANG H, LI ZH, ZHENG G R, et al. Design of air-coupled capacitive micro-ultrasonic transducer [J]. Acta Acustica, 2019, 44(1): 116-124.
- [20] 于洪涛. 复合材料板的非接触超声导波扫描成像检测技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- YU H T. Research on non-contact ultrasonic guided wave scan imaging technology for composite laminates [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.

作者简介



常俊杰(通信作者), 2005 年于日本京都工艺纤维大学获得博士学位, 现为南昌航空大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为超声无损检测技术的应用。

E-mail: junjiechang@hotmail.com

Chang Junjie (Corresponding author)

received Ph. D. from Kyoto Institute of Technology in 1988. She is a professor and M. Sc. supervisor at Nanchang Hangkong University now. Her main research interest includes application of ultrasonic nondestructive testing.