DOI: 10.3901/JME.2019.06.074

基于空间-频率-波数法的梁中分层缺陷定量检测^{*}

何存富 李子明 刘增华 冯雪健 任捷 吴斌

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘要: 为了描述梁中 Lamb 波的传播特性并对梁中的分层缺陷进行定量检测,以铝梁为研究对象,分别从有限元仿真和试验两方面进行研究。采用基于 Matlab 和 ABAQUS 相结合的方法,构建含分层缺陷的铝梁三维有限元仿真模型。通过提取覆盖缺陷的矩形区域接收点的时域信号,对铝梁中 Lamb 波与分层缺陷的作用规律进行分析。讨论对称边界和自由边界两种条件下,波场幅值分布的一致性与差异性,并得到了入射波幅值在梁宽度方向上的变化规律。同时,搭建 EMAT/激光检测系统对有限元仿真结果进行验证,发现二者具有良好的一致性。针对接收波形中复杂的时域信息,采用空间-频率-波数法对铝梁中的分层缺陷进行定位和定量评估。研究表明,从仿真和试验分析,采用空间-频率-波数法对铝梁中分层缺陷的测量误差均在 6%左右。

关键词: 电磁声换能器; 激光; 梁; 分层缺陷; 空间-频率-波数法

中图分类号: TG156; TB559

Quantitative Detection of Lamination Defect in Beams Based on Space-frequency-wavenumber Method

HE Cunfu LI Ziming LIU Zenghua FENG Xuejian REN Jie WU Bin

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

Abstract: In order to depict the propagation characteristics of Lamb waves in beams, and quantitatively detect the lamination defect, an aluminium beam structure is used as a research object by using both finite element and experimental analysis, respectively. Based on the combination of Matlab and ABAQUS, a three-dimensional finite element model of aluminum beam with lamination defect is constructed. By extracting the time domain signal of the rectangular receiving area covering the defect, the behaviours of Lamb wave interacts with lamination defect are studied. Two circumstance, symmetric boundary and free boundary, are simulated to discuss the consistency and difference of the amplitude distribution in the wavefield. The phenomena of the incident wave amplitude varies with the beam width is obtained. Meanwhile, the EMAT/laser detection system is set up to verify the finite element simulation results, and found that the two have good consistency. For the complex time domain information in the received waveforms, the space-frequency-wavenumber method is used to locate and quantitatively evaluate the lamination defect in the aluminum beam. The results of the study indicate that the measurement error is about 6% in both simulation and experimental analysis by using space-frequency-wavenumber method.

Key words: EMAT; laser; beam; lamination defect; space-frequency-wavenumber method

0 前言

从航空领域到人类生活中的各项基础设施,梁作为主要的连接和支撑构件,在大型结构中起着非常重要的作用^[1]。在实际的生产制造过程中,由于加工工艺中存在的不确定因素,使得梁中极易产生

各种类型的缺陷。这些缺陷会导致梁存在严重的质量问题,从而降低其承载强度,最终导致在使用过程中出现安全问题,并带来巨大的经济损失。因此,需要发展一种方法能够实现梁结构的快速、无损、全面检测。近年来,超声导波技术作为一种能够进行快速、长距离、大范围、相对低成本的无损检测方法,广泛应用于结构的无损检测评价和结构健康监测领域中^[2-5]。

HU 等^[6]对 Lamb 波应用于金属梁结构中的缺陷检测进行了试验和仿真研究。由于 Lamb 波的频散

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51475012,51235001,11772014)。20180403 收到初稿,20181009 收到修改稿

和多模态现象,选取波长较小且对缺陷更敏感的 A_0 模态进行检测。通过研究发现 A_0 模态在遇到缺陷时会产生反射,根据反射回波的抵达时间便实现了缺陷的位置识别。同时,还对缺陷深度与反射回波幅值的关系进行了试验研究,发现随着缺陷深度增加,反射回波幅值越大。VENUGOPAL 等^[7]采用谱有限元法对文献[6]中的含缺陷铝梁结构进行研究,综合考虑了传感器尺寸、激励频率、摆放位置等参数的影响,选取传感器最优激励参数,得到与文献[6]中试验结果一致的结论,实现了梁结构中缺陷的定位。ERNST 等^[8]采用宽频信号激励出频散严重的 A_0 模态,并结合时间反转法对频散的 A_0 模态进行重构,用于对铝梁结构中上下表面存在的多个缺陷同时进行定位检测,且通过计算重构的 A_0 模态与测量的 S_0 模态之间的幅值比,实现梁中单个缺陷的定量分析。HE 等^[9]研究了 S_0 模态和 A_0 模态分别单独激励且与不同尺寸的缺陷相互作用时波的传播现象,基于贝叶斯统计算法得到铝梁表面存在的缺陷个数及各缺陷的位置和尺寸信息。以上学者虽然采用多种方法对梁结构中的缺陷进行检测研究,然而这些缺陷大多为位于梁表面的槽形缺陷,鲜见对梁内部缺陷进行检测的研究工作。分层缺陷作为一种平行于金属表面的内部缺陷,主要存在于金属板材结构的生产制作过程中^[10]。基于此,考虑到试验中被测对象的加工难易程度,本文选取铝梁结构作为研究对象,并对铝梁结构中的分层缺陷进行检测研究。

RAMADAS 等^[11-12]通过有限元仿真和试验分别研究了铝板中 S_0 模态和 A_0 模态与半无限大分层缺陷的相互作用,详细描述了波的传播现象,发现入射波在遇到分层缺陷时不仅会发生伴随模态转换现象的波的反射和透射,且上下子板之间还存在波的相互绕射。针对梁结构,与板相比波在宽度方向上的传播受到边界条件的影响,因此,直接从接收波形中提取缺陷的有用信息将变得更加困难。

频率-波数分析法作为一种信号处理方法,通过对包含大量信息的时间-空间波场进行多维傅里叶变换,将信号从时间-空间域转换到频率-波数域进行分析,进而可获取波的频散特性和模态成分^[13]。RUZZENE^[14]和他的同事^[15]在此基础上提出用于分离入射波/反射波以及波中不同模态成分的频率-波数滤波技术。YU 等^[16-17]将频率-波数分析法用于研究铝板结构中 Lamb 波的传播,并发展了一种空间-频率-波数分析法,用于得到频率-波数随空间位置的变化信息,从而实现板中缺陷的检测和评估。FLYNN 等^[18]采用频率-波数分析法对二维空间上的

模态波数进行成像,分别实现了铝板中矩形缺陷、钢管中内壁减薄缺陷和复合材料结构中分层缺陷的损伤检测。KUDELA 等^[19]分别对含不同角度疲劳裂纹的铝板以及含多个缺陷(空洞和槽形缺陷)的复合材料板进行仿真和试验研究,结果表明频率-波数分析法能够实现缺陷的准确定位。

以上关于频率-波数分析法的研究工作中,对于 Lamb 波的激励和接收,大多数在试验中均采用压电片进行激励,激光器进行接收。实际上,压电片非常容易受耦合剂影响,耦合效果不好将会影响测量结果的准确性^[20]。许多学者^[21-24]基于电磁声换能器(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT)非接触,无需耦合介质的特点,搭建 EMAT/激光组合检测系统对结构中的缺陷进行检测。

综上所述,本文分别采用有限元仿真分析和试验研究对含分层缺陷的铝梁结构进行检测。基于商业有限元软件 ABAQUS 构建三维数值仿真模型,研究 Lamb 波在铝梁中的传播特性;并搭建 EMAT/激光组合的检测系统,通过围绕缺陷所在局部区域合理设置空间接收点,并结合空间-频率-波数分析法,对分层缺陷进行定量评估。

1 空间-频率-波数分析法

空间-频率-波数分析法是在二维傅里叶变换的基础上发展起来的^[16-17]。根据式(1),对于沿某特定方向 x 传播的全波场信号 $u(t, x)$,经过二维傅里叶变换后,可得到信号在频率域-波数域的信息。

$$U(\omega, k) = F_{2D}[u(t, x)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(t, x) \exp(-j(\omega t - kx)) dt dx \quad (1)$$

式中, t 为时间, x 为空间位置, k 为波数, ω 为频率。 $U(\omega, k)$ 为经过变换后的频率-波数谱,不仅能够反映波的传播特性,还能够对模态成分进行识别。对于各向同性材料,由于导波模态的波数大小与激励频率以及结构的厚度有关,因此,对于某一特定激励频率下的导波模态,可通过其波数变化反映缺陷信息^[25]。倘若被测结构存在缺陷,则结构的厚度发生了变化,从而 $U(\omega, k)$ 中还会出现新的波数信息。尽管如此, $U(\omega, k)$ 并不包含任何与信号相关的空间信息,即便已经对缺陷进行了识别,依然无法获取缺陷的空间位置。

为此,借鉴短时傅里叶变换的思想,在二维傅里叶变换的基础上引入空间窗函数的概念,将时间-空间波场信号分割成空间上的多个区间段后,再进行二维傅里叶变换,即对 $u(t, x)$ 进行短空间二维傅里

叶变换。具体变换过程如下：首先，将波场与空间窗函数相乘后得到一加窗后的波场，其次再对该加窗后的波场进行二维傅里叶变换，得到某空间位置处信号的频率-波数谱。接下来，根据波场信号是否全部截取完毕，决定是否沿着信号的空间位置移动窗函数，若否，则继续重复前面的操作，直到全部截取完毕为止。最终可得到随窗的空间位置变化的频率-波数谱。空间位置 a 处，信号的短空间二维傅里叶变换的数学表达式为

$$Z(a, \omega, k) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(t, x) W^*(t, x - a) \exp(-j(\omega t - kx)) dt dx \quad (2)$$

式中， $W(t, x)$ 为选用的空间窗函数。这样，在得到频率-波数信息的同时，通过 $Z(a, \omega, k)$ 保留了信号的空间位置。常见的窗函数有矩形窗、高斯窗、汉宁窗等。为尽量减少加窗后引起的信号能量泄漏，本文中的 $W(t, x)$ 选用汉宁窗，即

$$W(x) = \begin{cases} 0.5 \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{x}{D_x}\right) \right] & |x| \leq D_x / 2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中， D_x 表示窗函数的窗宽。需要注意的是，在进行信号的二维傅里叶变换过程中，采样的空间窗需包含至少两个超声波波长^[26]。本文所采用的汉宁窗的形状如图1所示。

图1 二维汉宁窗

在 $Z(a, \omega, k)$ 中选取激励频率 ω_0 处的 $Z(a, \omega_0, k)$ ，可得到空间位置 a 处的波数幅值分布。对波数幅值进行加权平均作为空间位置 a 处的波数值，得到波数随空间位置变化的曲线，从而通过波数的变化实现对缺陷的定位检测。整个空间-频率-波数分析法的原理如图2所示。

2 激励模态和频率选取

本文所使用的被测试件为长×宽×高分别是 1 000 mm×30 mm×3 mm 的铝梁结构，如图3所示。

图2 空间-频率-波数分析法原理图

在铝梁长度方向，距铝梁端面 500 mm 处存在一平行于梁表面的缺陷。该缺陷为位于铝梁厚度中间位置的贯穿型分层缺陷，其长度为 30 mm。

图3 被测试件结构示意图

图4为铝梁中 Lamb 波相速度频散曲线，由图可知，同一频厚积下 Lamb 波存在多个模态。在低频厚积下，Lamb 波的模态较少，主要为 A_0 和 S_0 模态；在高频厚积下，随着频厚积的变大，Lamb 波中的模态开始增多，且各个模态的相速度逐渐趋于相同。由于模态相速度变化直接反映了模态波数的变化，因此，选取低频厚积段相速度变化较大的 A_0 模态进行缺陷检测，本文中采用的激励频率为 0.41 MHz。

图4 铝梁中 Lamb 波相速度频散曲线

3 检测方案

3.1 有限元仿真建模

采用 Matlab 和 ABAQUS 相结合的方法，建立

图3所示尺寸大小的铝梁结构, 所构建的三维有限元仿真模型如图5a所示。为了与铝板中Lamb波的传播现象进行对比, 在图5a所示的自由边界铝梁结构中添加沿Y轴对称的边界条件, 见图5b。两个仿真模型中的分层缺陷均采用一个“体积为零”的裂缝进行模拟^[27]。图6为分层缺陷构建示意图, 其中, 实心圆点表示分层缺陷位置, 空心圆点表示无分层区域。

图5 含分层缺陷铝梁结构三维有限元仿真模型

图6 分层缺陷构建示意图

图7为三维仿真模型中激励和接收点的位置示意图。其中, 以端面所在位置为原点, 激励位于 $x=250\text{ mm}$ 处, 根据位移波结构, 采用在铝梁上下表面沿面内方向反对称加载的方式激励 A_0 模式; 接收点为覆盖分层缺陷的矩形区域, 从图中的 $(450,0)$ 一直延伸至 $(600,30)$ 处, 接收点空间间隔为 1 mm 。

图7 仿真模型中激励和接收位置示意图

仿真模型中采用C3D8R类型的网格单元进行划分。为了保证模型的计算精度, 同时又尽量少地占用计算资源, 设置网格大小至少是所激励导波模式最短波长的十分之一, 本例中网格大小为 $0.5\text{ mm} \times 0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$, 时间步长设置为 $1 \times 10^{-8}\text{ s}$ 以保证模型的稳定性。

3.2 试验设置

图8a为用于铝梁结构中分层缺陷检测的试验系统示意图。其中, 该系统的激励部分包括RPR 4000脉冲接收器、阻抗匹配模块以及EMAT; 接收部分采用美国IOS公司的激光超声接收系统, 包括连续激光器、分光器、解调器、高精度激光探头以及其他相关配件。

图8b为搭建的试验系统全景照, 图中分别标出了激励传感器和接收传感器的安装位置。其中, EMAT放置位置与仿真中激励位置相同, 用于产生中心频率 0.41 MHz 的 A_0 模式, 在该频率下, A_0 模式的波长约为 6 mm , 因此所采用的回折线圈的指间距为 3 mm 。图中, 尺寸 $30\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的钕铁硼方形磁铁用于提供EMAT工作所需要的偏置静磁场。由于铝并非铁磁性材料, 因此使用皮筋对EMAT进行固定。高精度激光探头用于采集铝梁表

(a) 示意图

(b) 全景图

(c) 被测试件

图8 试验系统

面接收点信号的离面位移,其接收位置包括两条扫描路径,详见图 8c,其中一条为从(450, 0)沿梁宽度方向扫描至(450, 30),另一条为从(450, 1)沿梁长度方向扫描至(600, 1),两条路径中的采集点的间隔均为 1 mm。激光探头的移动通过计算机控制, X-Y 扫描架带动激光探头沿水平方向或竖直方向移动。

为了保证激光信号的接收能量的强度以及稳定性,需在缺陷扫描区域粘贴反光胶带(型号 3M 8850,厚度约 0.1 mm),且要在信号采集过程中时刻监测示波器接收到的直流信号幅值。

4 结果与讨论

4.1 铝梁中 Lamb 波的传播特性

根据仿真模型计算结果,提取各接收点处时域波形中的离面位移进行分析。图 9 和图 10 分别为对

图 9 对称边界条件下, Lamb 波在不同时刻的波场快照

图 10 自由边界条件下, Lamb 波在不同时刻的波场快照

称边界和自由边界条件下, Lamb 波在不同时刻传播的波场快照图。从图中可以明显看出,在两种边界条件下,随着时间的推移, Lamb 波均从波场左侧逐步向波场右侧推进。当 Lamb 波传播到缺陷入口端时,通过肉眼可见微弱的反射回波,大部分波透过缺陷继续传播;且这些透射波传播至缺陷出口处时,会与缺陷再次发生相互作用,进一步产生反射回波,以及大量的透射波。

上述这些复杂的波的反射和透射现象共同描述了铝梁中 Lamb 波的传播情况。通过进一步对比观察发现,尽管在两种边界条件下,铝梁中 Lamb 波传播的趋势一致,但是接收点处 Lamb 波的幅值分布却呈现出差异性。分别提取两种边界条件下,从(450, 0)到(450, 30)处接收波形中离面位移的时间-空间波场图,如图 11 所示。

图 11 仿真模型中,接收点(450, 0)到(450, 30)处,信号的时间-空间波场图

根据图 11a、11b 中各波包的出现时间,发现在两种边界条件下,同一时刻产生相同的 Lamb 波传播现象,但同一时刻沿梁宽度方向,波的幅值分布不同。这一结论与图 9 和图 10 中得到的结论相同。且根据图 9 和图 10 的波场快照信息,可知在 450 mm 处,入射波应出现在 0.08 ms 之前。因此,图 11 中出现的第一个波包即为入射波。图 12 为通过试验得到的从接收点(450, 0)到(450, 30)处信号的时间-空间波场图,该结果与图 11 中仿真结果的传播现象非常相似。

图12 试验得到的接收点(450, 0)到(450,30)处信号的时间-空间波场图

分别提取上述仿真波场(对称边界和自由边界两种条件)和试验波场中,接收波形入射波幅值的最大值,绘制成随接收位置变化的曲线,如图13所示。由图可知,根据仿真结果,两种边界条件下入射波的位移均以梁的中间位置为轴,近似呈对称分布。在对称边界时,每个接收点处的入射波位移值大小近似相同;而在自由边界时,入射波位移分布与接收点位置有关,靠近梁边界处接收点的位移值明显要大于中间位置接收点的位移值,随着接收位置越来越接近中间对称轴位置,幅值又出现一个小幅度的上升。对于试验结果,考虑到试验过程中,激光在铝梁边界处接收波形信息时,会有半个激光光斑未聚焦到铝梁试件上,因此在曲线绘制过程中将两个边界处的接收点作为“伪点”予以舍弃,只考虑剩余29个位置处的接收波形。通过对比发现试验结果与仿真结果表现出良好的一致性,且与仿真结果相比,在梁中间位置处,试验得到的入射波幅值上升趋势表现的更加明显。

图13 仿真波场和试验波场中,入射波幅值的空间分布图

4.2 激励单一 A_0 模态

由于采用 A_0 模态对铝梁中的缺陷进行检测,为了激励出单一的 A_0 模态,在仿真中根据模态的位移波结构,在铝梁上下表面采用反对称加载的方式;在试验中根据 EMAT 工作机理,通过设置回折线圈的间距实现模态激励。为了对仿真和试验中的激励

方式进行验证,分别提取(450, 1)处接收点的仿真和试验的离面位移,如图14所示。

图14 接收点(450,1)处接收的时域波形

图14a 仿真结果中,第一个波包即为入射波信号,对该信号进行 Hilbert 变换后,提取该波包幅值最大处所对应的时间作为入射波的抵达时间,为 0.072 ms。经计算, A_0 模态的理论抵达时间为 0.069 ms。因此,仿真模型中所激励的 Lamb 波模态为单一的 A_0 模态。图14b 试验结果中,第一个波包为试验串扰信号,第二个波包为入射波信号,与仿真结果的验证过程相同,得到入射波的抵达时间为 0.076 ms。尽管该时间与理论抵达时间有一定偏差,仍然可以认定在试验中激励出单一的 A_0 模态。理由如下:① 根据 Lamb 波的频散曲线,该激励频率下仅存在 A_0 和 S_0 两种模态, S_0 模态的群速度又近似 1.5 倍于 A_0 模态的群速度,因此 S_0 模态出现的时间要早于计算得到的 0.076 ms;② 试验中波的传播时间与传播距离有关,与激励和接收传感器之间 200 mm 的距离相比,激励 A_0 模态所采用的 EMAT 自身的尺寸(25 mm)所造成的影响不可忽略,从而导致与理论计算得到的数值有偏差。

4.3 分层缺陷的定量评估

图15a、15b 分别为(450, 1)到(600, 1)处接收波形离面位移时间-空间波场图的仿真结果和试验结果。对比图15a、15b,可知在 450 mm 到 600 mm 的距离区间内,入射波的抵达时间均从约 0.07 ms 到约 0.12 ms,且随着传播距离的增加,入射波的幅值逐渐降低。尽管如此,无论是通过仿真波形,还

是试验波形, 都很难直接从图中获得有关缺陷的相关位置和尺寸等信息。

图 15 接收点(450,1)到(600,1)处, 信号的时间-空间波场图

基于空间-频率-波数分析法的相关基本理论, 选取窗宽为 18 mm 的二维汉宁窗对图 15 所示接收波形的时间-空间波场图进行短空间傅里叶变换, 之后选取激励频率下的波数幅值分布, 便可得到扫描区间内信号的空间-波数图, 如图 16 所示。由图 16a 和 16b 可知, 在 450~530 mm 范围内, 存在对称形式的波数分布, 同一空间位置处, 其大小相等, 方向相反, 这表示该位置既存在入射波(k 为正数), 还存在反射波(k 为负数); 而 530~600 mm 范围内, 只存在波数 k 为正数的透射波。同时, 可观察到在约 500 mm 处波数值突然有上升趋势, 而该趋势正是由于缺陷的存在而引起的。因此, 经过上述分析, 便可对缺陷进行位置识别, 即位于 500~530 mm 区间内。

对扫描范围内每个空间位置处的波数幅值分布进行加权平均, 得到图 17 所示信号的空间-波数曲线。考虑到在短空间傅里叶变换过程中, 加窗会造成信号能量泄漏, 因此选取中间位置的波数最大值

图 16 接收点(450,1)到(600,1)处, 信号的空间-波数图

图 17 接收点(450,1)到(600,1)处接收信号的空间-波数曲线

作为缺陷深度的定量参考值, 仿真和试验结果中选取波数 k 分别为 1.248 rad/mm 和 1.367 rad/mm。根据波数与相速度的关系, 得到激励频率下对应的相速度值为 2 064.79 m/s 和 1 883.54 m/s。将这些数值代入图 4 铝梁中 Lamb 波的相速度频散曲线, 发现与该相速度相对应的 A_0 模式所在的频厚积应为 0.651 MHz · mm 和 0.516 MHz · mm, 由此可估算该位置的板厚分别为 1.58 mm 和 1.26 mm。这一结果与缺陷的实际尺寸非常吻合, 在仿真中, 由于分层缺陷采用厚度为 0 的裂缝进行模拟, 因此分层缺陷对应板厚位置应为 1.5 mm, 其误差为 5.3%; 实际上, 由于分层缺陷加工工艺的原因, 试验所用试件中的分层缺陷存在一 0.3 mm 的厚度, 因此分层缺陷对应的板厚位置应为 1.35 mm, 其误差仅为 6.7%。

5 结论

本文对含分层缺陷的铝梁结构进行检测研究, 分别通过有限元仿真和试验对铝梁中 Lamb 波波场的传播现象进行讨论, 研究了自由边界和对称边界条件下, 铝梁中 Lamb 波传播的相似性和差异性; 根据时间飞行法对所激励的模式进行识别, 并基于空间-频率-波数分析法实现铝梁结构中分层缺陷的位置识别和定量评估。

(1) 采用 Matlab 和 ABAQUS 相结合的方法, 分别建立了两种(对称边界和自由边界)边界条件下含分层缺陷的三维铝梁结构有限元仿真模型, 得到两种边界条件下 Lamb 波传播现象的一致性和差异性, 通过提取入射波幅值, 得到梁宽度方向上波的幅值分布规律。并且通过试验研究, 得到了与仿真结果一样的结论。

(2) 在仿真和试验中, 分别根据模式的位移波结构以及 EMAT 工作机理, 实现单一 A_0 模式的激励, 通过时间飞行法对铝梁中的入射波模式进行验证。并基于 A_0 模式波数检测缺陷原理和空间-频率-波数分析法实现了铝梁结构中分层缺陷的识别和定量评估。结果表明, 无论是仿真还是试验分析, 其测量误差均在 6% 左右。

参 考 文 献

- [1] HONG Y, WANG G P, HAN B H, et al. Improved impedance method and guided wave technique for damage assessment of beam structures using PZT patches[J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 33-37: 285-290.
- [2] ROSE J L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2002, 124(3): 273-282.
- [3] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1713-1735. HE Cunfu, ZHENG Mingfang, LÜ Yan, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [4] 刘增华, 何存富, 杨士明, 等. 充水管道中纵向超声导波传播特性的理论分析与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(3): 171-178. LIU Zenghua, HE Cunfu, YANG Shiming, et al. Theoretical and experimental studies of longitudinal ultrasonic guided wave propagation characteristics in water-filled pipes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(3): 171-178.
- [5] 陈洪磊, 邓菲, 刘增华. 基于 Lamb 波传播路径分析的复合材料板中缺陷成像[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(24): 72-79. CHEN Honglei, DENG Fei, LIU Zenghua. Defect imaging in composite plates based on propagation paths analysis of Lamb waves[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(24): 72-79.
- [6] HU N, SHIMOMUKAI T, FUKUNAGA H, et al. Damage identification of metallic structures using A_0 mode of Lamb waves[J]. *Structural Health Monitoring*, 2008, 7(3): 271-285.
- [7] VENUGOPAL V P, WANG G. Modeling and analysis of Lamb wave propagation in a beam under lead zirconate titanate actuation and sensing[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(13): 1-20.
- [8] ERNST R, DUAL J. Quantitative guided wave testing by applying the time reversal principle on dispersive waves in beams[J]. *Wave Motion*, 2015, 58: 259-280.
- [9] 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.
- [10] 李艳梅, 朱伏先, 崔凤平, 等. 中厚钢板分层缺陷的形成机制分析[J]. *东北大学学报*, 2007, 28 (7): 1002-1005. LI Yanmei, ZHU Fuxian, CUI Fengping, et al. Analysis of forming mechanism of lamination defect of steel plate[J]. *Journal of Northeastern University*, 2007, 28(7): 1002-1005.
- [11] RAMADAS C, HOOD A, KHAN I, et al. Transmission and reflection of the fundamental Lamb modes in a metallic plate with a semi-infinite horizontal crack[J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(3): 773-781.
- [12] RAMADAS C. Interaction between the fundamental

- Lamb modes and the front edge of a crack in a metallic plate[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(6): 1152-1164.
- [13] ALLEYNE D, CAWLEY P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(3): 1159-1168.
- [14] RUZZENE M. Frequency-wavenumber domain filtering for improved damage visualization[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16: 2116-2129.
- [15] MICHAELS T E, MICHAELS J E, RUZZENE M. Frequency-wavenumber domain analysis of guided wavefields[J]. Ultrasonics, 2011, 51(4): 452-466.
- [16] YU L Y, TIAN Z H. Lamb wave structural health monitoring using a hybrid PZT-Laser vibrometer approach[J]. Structural Health Monitoring, 2013, 12(5-6): 469-483.
- [17] YU L Y, TIAN Z H, LECKEY C A. Crack imaging and quantification in aluminum plates with guided wave wavenumber analysis methods[J]. Ultrasonics, 2015, 62: 203-212.
- [18] FLYNN E B, CHONG S Y, JARMER G J, et al. Structural imaging through local wavenumber estimation of guided waves[J]. NDT&E International, 2013, 59(7): 1-10.
- [19] KUDELA P, RADZIENSKI M, OSTACHOWICZ W. Identification of cracks in thin-walled structures by means of wavenumber filtering[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 50-51: 456-466.
- [20] BURROWS S E, FAN Y, DIXON S. High temperature thickness measurements of stainless steel and low carbon steel using electromagnetic acoustic transducers[J]. NDT&E International, 2014, 68: 73-77.
- [21] YANG L, UME I C. Measurement of weld penetration depths in thin structures using transmission coefficients of laser-generated Lamb waves and neural network[J]. Ultrasonics, 2017, 78: 96-109.
- [22] 刘增华, 樊军伟, 何存富, 等. 基于全向型 S_0 模态磁致伸缩传感器的无参考缺陷成像方法研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 8-16.
- LIU Zenghua, FAN Junwei, HE Cunfu, et al. Research on baseline-free damage imaging method employing omni-directional S_0 mode magnetostrictive transducers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 8-16.
- [23] 刘增华, 钟翎文, 李欣, 等. 基于全向型 SH_0 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 Zenghua, ZHONG Xuwen, LI Xin, et al. Research on damage imaging based on omnidirectional SH_0 mode magnetostrictive patch transducers array in aluminum plates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 8-15.
- [24] BURROWS S E, DUTTON B, DIXON S. Laser generation of Lamb waves for defect detection: Experimental methods and finite element modeling[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(1): 82-89.
- [25] 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(3): 120-127.
- ZHU Qian, QIU Jinhao, ZHANG Chao, et al. Application of laser ultrasonic detection method for double-layer laminated material[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016(3): 120-127.
- [26] MCAULAY R J, QUATIERI T F. Speech analysis/synthesis based on a sinusoidal representation[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1986, 34(4): 744-754.
- [27] LIU Z H, YU H T, HE C F, et al. Delamination detection in composite beams using pure Lamb mode generated by air-coupled ultrasonic transducer[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(5): 541-550.
-
- 作者简介: 何存富, 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械测试理论、方法及技术、超声无损检测新技术、传感器测试技术等。
E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn
- 李子明, 女, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为无损检测与健康评价。
E-mail: b2013011zm@emails.bjut.edu.cn
- 刘增华(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超声和电磁无损检测技术、结构健康监测、传感器测试技术等。
E-mail: liuzenghua@bjut.edu.cn