

超声检测中的兰姆波层析成像

张海燕, 吕东辉, 袁瀚贝

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要: 兰姆波作为超声导波, 可以对薄板类结构实现大范围快速的检测。然而, 从兰姆波数据中提取定量信息时对检测人员的技术素质提出了很高的要求。文章用兰姆波层析成像仿真实现了铝板中不同缺陷的重建图像。结果表明: 采用滤波反投影算法得到的层析图像给出了关于缺陷位置和类型的信息, 从而使技术人员可以方便地识别出材料中的缺陷。

关键词: 兰姆波; 层析成像; 无损检测

中图分类号: TB559 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)03-0138-03

Lamb wave tomography in ultrasonic testing

ZHANG Hai-yan, LI Dong-hui, YUAN Han-bei

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: As ultrasonic guided waves, Lamb waves allow large sections of thin sheet structures to be rapidly inspected. However, extraction of quantitative information from Lamb wave data requires well-trained personnel with detailed knowledge of mechanical waveguide physics. Simulation of tomographic image reconstruction of different defects in thin aluminum using Lamb waves is described in this paper. The tomographic images obtained by using a filtered back projection algorithm can provide information concerning the location and nature of the defects, which can be interpreted by a technician.

Key words: Lamb waves; tomography; nondestructive testing

1 引 言

计算机层析成像技术 (computed tomography, 简称 CT) 是根据物体横剖面的一组投影数据, 经过计算机处理后得到物体该横剖面图像的图像重建技术。70 年代 CT 的出现, 引起了医学上放射诊断学的革命, 并产生了巨大的影响。此后, CT 在许多学科, 如地球物理勘探、射电天文学、遥感技术、无损材料检验和工业自动化等工程和应用科学中得到越来越广泛的应用。

超声兰姆波用于无损检测已超过 40 年, 而将其与医学、地球物理学中层析成像 (Tomography) 技术结合起来的研究国内几乎未见报导^[1-6]。国外关于

Lamb Wave Tomography—LWT 问题的研究始于近 10 年, 在材料无损评价中的应用主要有:

1993 年, Hutchins 等^[7]对铝板中的孔类缺陷进行了层析成像研究。实验表明, 采用脉冲激光源和电磁声换能器接收产生的兰姆波信号可用于对薄板材料的结构变化层析成像。1994 年, Jansen 等^[8]将 LWT 技术推广到复合材料的无损检测中, 得到了纤维失效、基质裂纹、脱层等缺陷的图像。在这些研究中, 以兰姆波的走时、衰减或频谱的形心偏移作为层析成像时的输入数据, 采用了平行投影情况下滤波反投影 (FBP) 重建方法来获得多种模式的图像。1999 年, McKeon 等^[9]同样利用上述兰姆波的信息, 研究了跨孔 (Crosshole) 层析成像技术在兰姆波层析成像中的应用。2000 年, Malyarenko 等^[10]对扇束投影的滤波反投影方法和双跨孔几何学都进行了研究, 发现后者效果更好。

2001 年, Malyarenko 等^[11]为精确确定复合材料中的缺陷尺寸, 考虑到兰姆波在媒质中的散射和折

射, 采用了弯曲射线追踪技术来进行缺陷的成像研究。2002 年, Leonard 等^[12]综合前人的研究成果, 对超声兰姆波及其在无损伤评价中的应用, 给出了平行投影和扇束投影的示例, 阐述了双跨孔技术并显示了部分结果。最后, 对应用于复合材料的平行投影层析成像和双跨孔层析成像结果进行了比较。

作为对 LWT 理论的初步研究, 本文用计算机模拟生成带有不同缺陷的铝板, 从兰姆波在某一频厚积下的相速度值以及铝板和缺陷的尺寸参数中生成延时投影数据, 采用滤波反投影算法从投影数据重建出层析图像。

2 滤波反投影重建理论

图像重建是研究如何从所获得的有关目标的投影数据中反演出原始目标。获得目标数据的方法不同, 决定了图像重建问题求解的方法及其复杂性。目前, 图像重建问题的求解方法大致分为两类: 级数展开法和变换法。滤波反投影重建算法为变换法中一类典型的重建方法, 其基本思想是在反投影重建以前把投影数据先滤波, 再把滤波后的投影数据进行反投影运算, 过程如图 1 所示。



图 1 滤波反投影重建原理

滤波反投影算法的理论基础为中心切片定理^[1,3], 该定理给出了目标函数的二维傅里叶变换 (FT) 与投影函数的一维 FT 之间的关系, 一旦求得投影函数的 FT, 也就知道了目标函数的二维 FT, 由二维 FT 的反变换重建目标函数。设目标函数为 $f(x, y)$, 投影函数为 $p(x', \theta)$, 则目标函数的二维 FT 与投影函数的一维 FT 之间关系由中心切片定理表达为:

$$P(R, \theta) = F(R \cos \theta, R \sin \theta) = F(R, \theta) \quad (1)$$

式中, $P(R, \theta)$ 为平行投影 $p(x', \theta)$ 的一维 FT, $F(R, \theta)$ 是 $f(x, y)$ 的二维 FT 的极坐标表达式。

3 兰姆波层析成像

3.1 模拟生成有缺陷的铝板

要在计算机中模拟出从兰姆波扫描到投影, 然后再从投影到反投影, 最后重建出图像, 首先要模拟产生一个带有缺陷的铝板。这里假设铝板上的缺陷是椭圆或是圆形的, 如图 2 所示, 中间的椭圆代表铝板上的缺陷。

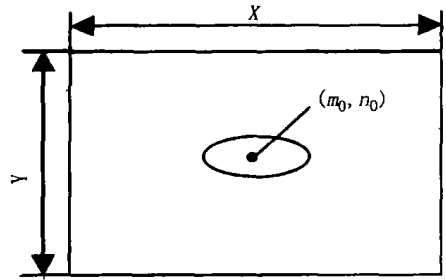


图 2 椭圆缺陷铝板

假设椭圆的纵向半径和横向半径分别为 a 和 b , 中心坐标为 (m_0, n_0) , 铝板的长和宽分别为 X 和 Y , 则从方程 (2) 可得到矩阵元素 $f(m, n)$ 。

$$f(m, n) = \begin{cases} I, & \frac{(m-m_0)^2}{a^2} + \frac{(n-n_0)^2}{b^2} < 1, \\ & m \in \{1, 2, \dots, X\}, n \in \{1, 2, \dots, Y\} \\ O, & \frac{(m-m_0)^2}{a^2} + \frac{(n-n_0)^2}{b^2} > 1, \\ & m \in \{1, 2, \dots, X\}, n \in \{1, 2, \dots, Y\} \end{cases} \quad (2)$$

式中的 I 和 O 分别是椭圆里和椭圆外的矩阵元素取值, 本文中用兰姆波在某一频厚积下的慢度 (相速度的倒数) 来描述。

类似地, 只要输入孔的位置和孔大小的参数, 可以模拟生成多孔的板材, 图 3 所示。

3.2 延时投影的生成

兰姆波在铝板中的传播速度与其模式和频厚积有关, 图 4 为铝板中兰姆波的频散曲线, 横坐标为频



图 3 模拟生成不同缺陷的铝板

厚积, 纵坐标为相速度。可以看到频率厚度积为 $2\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 的情况下, a_0 和 s_0 模式的相速度为分别为 2.6km/s 、 4.5km/s 。假设空气中兰姆波的相速度为 0.340km/s , 则式 (2) 中, $I=1/0.34$, 对 a_0 模式, $O_{a_0}=1/2.6$, 对 s_0 模式, $O_{s_0}=1/4.5$, 则由式 (2) 可生成反映 a_0 和 s_0 兰姆波模式信息的走时矩阵。

应用 Matlab 中的 Radon 算法函数, 对走时矩阵变换, 产生从不同角度入射的兰姆波走时投影。以此作为后续层析成像重建的投影数据。

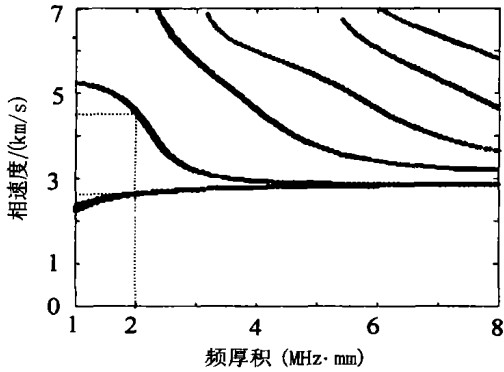


图 4 铝板中兰姆波的相速度频散

3.3 从走时投影数据重建图像

基于上述方法产生的投影数据, 利用滤波反投影算法对图 3 中的不同模拟缺陷进行层析图像的重建^[8], 分两种扫描方式: 一种为间隔为 1° , 共进行 180 次扫描; 另外一种为间隔为 18° , 进行 10 次等间隔扫描。图 5 和图 6 分别为 a_0 和 s_0 模式两种扫描方式下的重建图像。

图 5 (a) 和图 6 (a) 所示的重建图像清晰效果要比图 5 (b) 和图 6 (b) 好。说明了投影取得越多, 重建

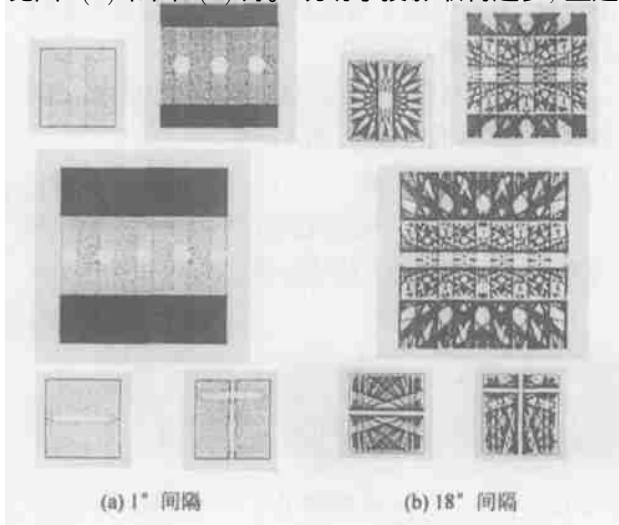


图 5 a_0 模式 1° 间隔和 18° 间隔扫描重建效果

的层析图像效果越好。

但是在实际工作中, 投影取得越多所消耗的时间和成本将会相应增加, 所以实际中应尽量采用少的投影数。但是这样又会引起重建层析图像的质量下降。所以投影数和图像质量两者是一对矛盾, 应该按照实际的不同情况, 正确的选取不同投影数。在需要快速检测的场合下, 尽量少作扫描, 少取投影数。在需要精确的检测时, 需要尽量多的扫描来提高重建层析图像的清晰度。

从图 5 和图 6 中还可以知道, a_0 和 s_0 模式均可用于图像的重建, 对所采用的铝板, 两者的效果差别并不显著。实际应用中要根据材料的不同, 从理论上对不同模式的重建效果进行比较, 从而找出最佳效果的兰姆波模式进行测试。

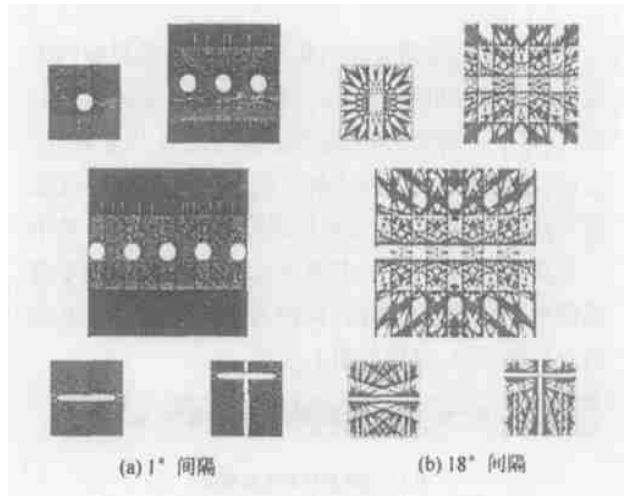


图 6 s_0 模式 1° 间隔和 18° 间隔扫描重建效果

3 结 论

与传统体波(纵波或横波)相比, 兰姆波的长距离传播、多模式和频散等特性使其成为薄板类材料无损检测的有力工具。近年来, 随着复合材料在航空、航天等工业的广泛应用, 对复合材料的兰姆波无损检测提出了更高的要求。将其与医学、地球物理学中的 CT 成像技术结合起来, 可以实现对薄板中缺陷进行快速的定量检测, 并直观地以图像方式显示, 从而提高检测的可靠性。作为对 LWT 技术的初步探讨, 本文用计算机模拟产生不同缺陷的铝板, 给出了 a_0 和 s_0 模式不同扫描方式下的重建层析图像, 效果较好。进一步的工作将是建立 LWT 实验装置以及为提高重建图像效果而进行深入的图像重建算法的理论研究。

(下转第 145 页)

5 结 论

本文介绍了临界折射纵波(L_{CR}波),建立了模拟L_{CR}波在钢轨传播的模型,用有限元方法模拟L_{CR}波激发、传播、接收的整个过程,初步探讨了临界折射纵波的传播机理。对这一过程的初步探讨将有助于对L_{CR}波的进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Bray D E, Leor Salamanca T. Zero force travel time parameters for ultrasonic head waves in railroad rail[J]. Materials Evaluation, 1985, **43**(7): 854-858, 863.
- [2] Bray D E, Junghans P. Application of the L_{CR} ultrasonic tech-

nique for evaluation of post-weld heat treatment in steel plates [J]. NDT & International, 1995, **28**(4): 235-242.

- [3] Leor Salamanca T, Bray D E. Residual stress measurement in steel plates and welds using critically refracted longitudinal (L_{CR}) waves [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1996, **7**(4): 169-184.
- [4] Bray D E. Current directions of ultrasonic stress measurement techniques[J/OL]. Roma 2000 15th WCNDT, <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn647/idn647.htm>, 2000
- [5] Bray D E. Ultrasonic stress measurement with the L_{CR} technique[EB/OL]. <http://brayengr.com/lcrproc2.html>, 1998.
- [6] Langenberg K J, Fellingner P, Marklein R. On the nature of the so called subsurface longitudinal wave and/or the surface longitudinal "creeping" wave[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1990, **2**(2): 59-81.
- [7] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 56-70

(上接第 140 页)

参 考 文 献

- [1] 喻明, 兰从庆, 许克克. Lamb 波 CT 成像的实验研究[J], 声学技术, 1995, **14**(4): 162-164.
- [2] 张海燕, 吕东辉, 袁瀚贝. 超声 Lamb 波层析成像在无损检测中的应用[J], 声学技术, 2003, **22**: 294-296.
- [3] ZHANG Haiyan, LIU Zhenqing. Propagation of Lamb waves in adhesively bonded multilayered media [J]. Technical Acoustics, 2003, **22**: 40-43.
- [4] 刘镇清, 他得安. 用二维傅里叶变换识别兰姆波模式的研究[J]. 声学技术, 2000, **19**(4): 212-216.
- [5] 张海燕, 谢远遐, 刘镇清. 粘性粘接的层状固体媒质中兰姆波的传播[J]. 声学技术, 2000, **19**(3): 163-165.
- [6] 刘镇清, 张海燕. 固-液-固三层结构板中超声兰姆波的频散特性[J]. 声学技术, 2001, **20**(2): 89-91.
- [7] Hutchins D A, Jansen D P, Edwards. Lamb wave tomography

using non contact transduction[J]. Ultrasonics, 1993, **31**(2): 97-103.

- [8] Jansen D P, Hutchins D A, Mottram J T. Lamb wave tomography of advanced composite laminates containing damage [J]. Ultrasonics, 1994, **32**(2): 83-89.
- [9] McKeon J C P, Hinders M K. Parallel projection and crosshole contact scanning Lamb wave tomography [J]. J Acoust Soc Am, 1999, **106**(15): 2568-2577.
- [10] Malyarenko, Hinders M K. Fan beam and double crosshole lamb wave tomography for mapping flaws aging aircraft structures [J]. J Acoust Soc Am, 2000, **108**(4): 1631-1639.
- [11] Malyarenko E V, Hinders M K. Ultrasonic Lamb wave diffraction tomography[J]. Ultrasonics, 2001, **39**: 269-281.
- [12] Leonard K R, Malyarenko E V, Hinders M K, Ultrasonic Lamb tomography [J]. Inverse Problems, 2002, **18**: 1795-1808.
- [13] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 22-25.

欢迎订阅 欢迎赐稿

欢迎刊登广告