

张海燕 他得安 刘镇清 著

层状各向异性 复合板中的 兰姆波



科学出版社

www.sciencep.com

层状各向异性复合板中的 兰姆波

张海燕 他得安 刘镇清 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细地探究了层状各向异性纤维增强复合材料中兰姆(Lamb)波的传播特性,发展了理论模型计算具有任意层数、各层具有宏观正交各向异性或更高对称性并且可按任意方向铺设的多层板系统,通过大量数值示例揭示了Lamb波在这些媒质中的传播特性.介绍了层析成像在Lamb波无损检测中的理论和方法、研究现状以及发展方向.有关结果能够提供与复合材料结构完整性相关的信息,从而可以为该类结构的定量无损评价提供具有理论和实际应用价值的基础性研究成果.

本书可供高等院校声学相关专业,如力学、土木、结构等的高年级本科生、研究生和教师使用,亦可供相关专业的科研人员参考使用.

图书在版编目(CIP)数据

层状各向异性复合板中的兰姆波/张海燕,他得安,刘镇清著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-020585-8

I. 层… II. ①张…②他…③刘… III. 层状结构-各向异性-复合板-兰姆波检验 IV. TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第021078号

责任编辑: 胡 凯 刘凤娟 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年3月第一版 开本: B5(720×1000)

2008年3月第一次印刷 印张: 10 1/2

印数: 1—2 500 字数: 200 000

定价: 38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

前 言

近年来,在纤维增强复合材料的建模、检测以及分析方面,人们已经投入了相当大的精力.一方面是因为广泛应用的纤维增强复合材料具有较高的比强度和比刚度;另一方面是因为它们作为复杂的力学系统本身所具有的吸引力.兰姆(Lamb)波用于无损检测已有40余年,然而,相对于各向异性单层板中Lamb波的研究而言,对层状各向异性介质中Lamb波的研究较少,特别是国内对这方面问题的研究更不多见,这主要是因为复合材料因其各向异性分层结构而使其中波的传播机理变得较为复杂的缘故.为了挖掘该技术在复合材料检测方面的潜力,对纤维增强复合材料中Lamb波的传播特性有一个比较清晰的理解是十分必要的.

本书第1章简要回顾复合材料及其黏接结构的超声检测研究概况以及层状复合介质中Lamb波的研究进展,介绍多层板中超声Lamb波的矩阵建模技术,分析了层析成像在Lamb波无损检测中的研究现状以及存在的问题.第2章从慢度面的角度研究了各向异性介质中平面体波的传播.在第2章的基础上,第3章应用“部分波分析”方法,建立了多层各向异性介质中Lamb波的理论模型.第4章利用第3章建立的数值计算较为稳定的全局矩阵模型,分析了层状各向异性介质中Lamb波的传播特性,考虑了纤维方向、层序、层数、层厚等变化对Lamb波频散特性以及位移和应力分布的影响.第5章研究了液、固各向同性介质负载时正交各向异性薄板中Lamb波的传播,由于液体层的引入导致固-液交界处位移和应力分量的不连续,通过适当的处理方法,推广了第3章的理论模型.第6章研究了界面层对层状各向异性复合结构中Lamb波的影响,把界面处力学量的边界条件用最简单的“准弹簧”模型来模拟,并将该层矩阵引入到全局矩阵模型中,从而可使第3章的全局矩阵包含弱界面的情况.第7章把中间层作为黏弹层以模拟黏接的复合结构中中间层未固化的情况,将材料的吸收入到多层板系统模型,研究黏接层的厚度、密度、体波的衰减系数变化对黏接的复合材料结构中Lamb波频散特性以及衰减特性的影响.第8章用二维傅里叶变换方法实验测量各向异性材料中Lamb波传播的相速度及模式识别.第9章介绍了层析成像在Lamb波无损检测中的理论和方法、研究现状以及发展方向.

本书的主要目的是详细探究层状各向异性纤维增强复合材料中Lamb波的传播特性.重点是发展理论模型计算具有宏观正交各向异性对称性的单层板或由它们组合而成的多层板系统中波的传播,并通过大量的数值示例显示层状各向异性材料中波传播特性的丰富性.对具有更高对称性的材料系统,如横向各向同性材料、立

方晶体等, 这些模型同样是适用的. 本书虽然也用实验进行了 Lamb 波相速度的检测和模式识别, 但大部分工作是理论建模和分析.

如今, 医学层析成像的思想已经拓展到各个领域, 如水声和海洋声学、地球物理学等, 特别是地球物理层析成像, 自 20 世纪 80 年代初期开始发展现已逐渐进入实用化阶段. 相对来说, Lamb 波层析成像的研究起步较晚, 开始于 20 世纪 90 年代, 并且由于 Lamb 波复杂的传播机理使得其层析成像的研究受到限制, 且进展缓慢. 本书研究了层析成像在 Lamb 波定量无损评价方面需要解决的一些基本问题, 为 Lamb 波层析成像提供具有理论与实际价值的基础性研究成果.

虽然国内外学者对 Lamb 波复合材料的研究无论是理论还是实验上都已比较充分, 再提出更精细且数学分析简单的模型似乎是比较困难的, 然而建立更合理、更易于实现的新模型永远是研究者们所追求的目标. 本书凝聚了作者近十年来研究工作的心血, 希望能为促进复合材料超声无损检测与评价技术的发展做出贡献.

本书所涉及的研究工作得到国家自然科学基金委员会的支持 (项目编号 10504020 和 10074050), 部分工作得到上海市青年科技启明星计划 (编号 07QA14003) 的支持. 本书的有关学术思想与作者在同济大学声学研究所的学习和工作经历是分不开的. 书中有关 Lamb 波层析成像的研究工作还得益于与上海大学通信学院吕东辉博士、冯玉田博士、王朔中教授、方勇教授等经常性的学术交流与讨论. 本书的出版工作得到上海市重点学科建设项目资助 (项目编号: T0102). 借此, 向所有关心和支持过作者工作的同志们表示衷心的感谢!

鉴于作者的水平有限, 本书在内容和文字方面难免存在不妥之处, 敬请读者不吝赐教.

作者

2007 年 6 月 20 日

于上海

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述.....	1
1.2 复合材料的超声无损检测.....	2
1.2.1 法向入射检测复合材料.....	2
1.2.2 复合材料的倾斜入射.....	2
1.2.3 漏 Lamb 波的应用.....	3
1.3 层状复合介质中 Lamb 波的研究进展.....	3
1.3.1 Lamb 波简介.....	3
1.3.2 各向同性介质中 Lamb 波的研究.....	5
1.3.3 复合材料板中 Lamb 波的研究.....	6
1.4 多层板中超声 Lamb 波的矩阵建模.....	8
1.5 Lamb 波层析成像.....	10
1.6 本书的主要内容.....	12
参考文献.....	13
第 2 章 平面体波在各向异性均匀介质中的传播	18
2.1 概述.....	18
2.2 坐标系绕轴旋转时, 弹性常数的转换.....	19
2.3 慢度计算.....	21
2.4 数值示例和分析.....	23
2.5 小结.....	28
参考文献.....	29
第 3 章 多层各向异性介质中 Lamb 波的矩阵建模技术	30
3.1 概述.....	30
3.2 多层各向异性介质中 Lamb 波的传递矩阵方法.....	31
3.2.1 各向异性固体层中声波的传播特性分析.....	31
3.2.2 传递矩阵的推导.....	35
3.2.3 对称模式和反对称模式的划分.....	38
3.3 多层各向异性介质中 Lamb 波的全局矩阵方法.....	40
3.4 Lamb 波沿正交各向异性材料特殊方向传播矩阵方程的处理.....	44
3.5 各向同性介质中 Lamb 波的传播.....	47

3.5.1	弹性各向同性介质中 Lamb 波的传播	48
3.5.2	黏弹性各向同性介质中 Lamb 波的传播	48
3.6	多层板模型中的位移和应力分析	49
3.6.1	Lamb 波的频散及多模式特征	49
3.6.2	Lamb 波模式沿板厚的位移和应力分布理论	50
3.7	小结	50
	参考文献	51
第 4 章	层状复合材料板中 Lamb 波的传播	54
4.1	概述	54
4.2	纤维方向变化对 Lamb 波频散特性及位移和应力分布的影响	55
4.2.1	纤维方向变化对 Lamb 波频散特性的影响	55
4.2.2	纤维方向变化对 Lamb 波模式位移和应力分布的影响	57
4.2.3	讨论	65
4.3	层序变化对 Lamb 波频散特性及位移和应力分布的影响	65
4.3.1	层序变化对 Lamb 波频散特性的影响	65
4.3.2	层序变化对 Lamb 波模式位移和应力分布的影响	65
4.3.3	讨论	69
4.4	层数增加对 Lamb 波频散特性及位移和应力分布的影响	70
4.4.1	层数增加对 Lamb 波频散特性的影响	70
4.4.2	层数增加对 Lamb 波模式位移和应力分布的影响	71
4.4.3	讨论	72
4.5	层厚变化对 Lamb 波频散特性及位移和应力分布的影响	74
4.5.1	层厚变化对 Lamb 波频散特性的影响	74
4.5.2	层厚变化对 Lamb 波模式位移和应力分布的影响	75
4.5.3	讨论	78
4.6	小结	78
	参考文献	79
第 5 章	有负载层时正交各向异性薄板中 Lamb 波的传播	81
5.1	概述	81
5.2	飞机机翼(尾翼)上冰检测的多层模型	82
5.3	四种不同状态下 Lamb 波的频散特性以及位移和应力分布	83
5.3.1	Lamb 波的频散特性	83
5.3.2	质点的位移和应力分布	85
5.4	小结	89
	参考文献	90

第 6 章 界面层对层状各向异性复合结构中 Lamb 波的影响 ·····	91
6.1 概述·····	91
6.2 界面层的弹簧模型·····	92
6.3 界面层对复合结构中 Lamb 波的影响·····	95
6.3.1 界面层对复合结构中 Lamb 波频散特性的影响·····	95
6.3.2 界面层对复合结构中 Lamb 波模式位移分布的影响·····	99
6.4 小结·····	102
参考文献·····	102
第 7 章 黏性联接的层状复合介质中 Lamb 波的传播 ·····	105
7.1 概述·····	105
7.2 衰减 Lamb 波频散曲线的生成·····	106
7.2.1 特征方程复根的求解·····	106
7.2.2 频散曲线的追踪·····	109
7.3 数值计算·····	111
7.3.1 中间层纵波和横波衰减系数变化·····	112
7.3.2 中间层厚度变化·····	117
7.3.3 中间层密度变化·····	119
7.3.4 讨论·····	120
7.4 小结·····	121
参考文献·····	122
第 8 章 Lamb 波模式的实验分析 ·····	125
8.1 概述·····	125
8.2 二维傅里叶变换理论·····	125
8.3 Lamb 波信号的实验测量及其二维傅里叶变换·····	126
8.3.1 实验系统·····	126
8.3.2 实验样品·····	127
8.3.3 实验结果·····	128
8.3.4 分析与讨论·····	133
8.4 小结·····	136
参考文献·····	136
第 9 章 Lamb 波层析成像 ·····	138
9.1 概述·····	138
9.2 Lamb 波 CT 理论·····	139
9.2.1 声波 CT 原理·····	139
9.2.2 计算步骤·····	141

9.2.3 迭代算法·····	142
9.3 跨孔 Lamb 波 CT·····	143
9.4 Lamb 波 CT 的效果分析·····	145
9.4.1 跨孔布置方式的影响·····	145
9.4.2 网格分割粗细的影响·····	148
9.4.3 采样间距大小的影响·····	148
9.4.4 射线路径的影响·····	149
9.4.5 缺陷尺寸的影响·····	150
9.4.6 Lamb 波模式的影响·····	150
9.5 Lamb 波 CT 的研究现状及存在问题·····	151
9.5.1 Lamb 波 CT 中的数据采集·····	152
9.5.2 Lamb 波 CT 中的反演源信息·····	152
9.5.3 Lamb 波 CT 中的反演目的信息·····	153
9.5.4 Lamb 波 CT 中的正演方法·····	154
9.5.5 Lamb 波 CT 中的图像重建方法·····	154
9.6 Lamb 波 CT 的发展方向·····	155
9.7 小结·····	156
参考文献·····	157

第1章 绪 论

1.1 概 述

工程上称两种或两种以上的材料在宏观尺度上组成的新材料称为复合材料, 其中的每一种组成材料称为复合材料的组分^[1]. 合金虽然在微观上可以辨认出是由多种元素(材料)组成的, 但在宏观上呈现出各向同性特性, 被认为是均质材料, 不属于复合材料. 复合材料通常由基体材料和增强材料两大组分构成, 组分材料之间具有明显的界面, 宏观上呈现各向异性特性, 是非均质的. 复合材料的种类很多, 大致可归纳为纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料和薄片增强复合材料三类. 本书所述的复合材料限于由较强的、脆性的、高模量的纤维和较弱的、韧性的、低模量的基体组成的纤维增强复合材料. 高强度、高模量纤维是理想的承载体. 纤维与基体复合后, 基体提供了一个连续的介质, 既保持了纤维的铺设方向, 又从结构上保证了纤维载荷的传递, 允许纤维承受压缩和剪切载荷. 同时, 基体在纤维间起着分散和传递载荷的作用, 也提高了纤维沿纤维方向的承载能力. 由于纤维增强复合材料可根据使用要求自行设计, 不仅保持了组分材料自身原有的一些优良性能, 而且彼此补偿, 明显改善或突出了一些特殊性能, 具有较高的比强度(强度除以比重)、较高的比刚度(弹性模量除以比重)、低密度以及耐高温、耐磨损和抗磁性、抗腐蚀、抗疲劳性能好等优点而成为一种新型材料. 近 20 年来, 复合材料已经得到迅速发展, 它最初在航空、航天等尖端技术领域显示其优越性, 继而在建筑、桥梁、车辆、船舶、化工设备、医疗器械(假肢、接骨等)、运动器材以及生活用品等方面的应用越来越广泛.

任何新材料的出现, 在它们能够放心地用于安全很关键的构件之前, 必须发展合适的质量控制和检测技术. 可以预计, 纤维增强复合材料的无损检测(NDE)不同于金属材料, 因为复合材料本身显然不同于金属及其合金^[2]. 纤维增强复合材料是不均匀且显著各向异性的材料, 其热传导率较低, 声衰减较高, 而且导电性一般较差. 高性能结构通常是用金属材料制造的, 这种材料很少带有不希望有的缺陷, 使用中的破坏往往开始于可识别的缺陷引发的裂纹, 并发生于裂纹扩展之后. 因此, 无损检测主要是对扩展中裂纹的检测和定位, 并用断裂力学来确定这一裂纹的危险性. 而对复合材料还未发现类似的占主导地位的破坏过程, 也未建立类似于断裂力学的分析方法, 因此到目前为止还有很多无损检测的要求没有明确的规定.

在探讨各向异性问题时, 必须弄清“各向异性”与“不均匀性”这两个概念的区

别与联系。“各向异性”指的是材料性能与方向有关,不同的方向有不同的性能值,如书中讨论的纤维增强复合材料,纤维排布方向的杨氏模量显著高于垂直于纤维的横向;“不均匀性”指的是材料性能与部位有关,不同的部位有不同的性能值。凡是组织因素引起的各向异性必然与不均匀性相联系,完全均匀体是无所谓“组织”的,当然也就无所谓组织各向异性,纤维增强复合材料的各向异性主要是由组织因素即纤维的定向排布引起的,即纤维和基体本身均各向同性,复合体仍然是各向异性的。显然,组织因素引起的各向异性,只能在较大范围内用均质等效的办法处理,不考虑材料的几何和物理细节,只看整体平均效果,把复合材料等效地视为均匀介质。书中对复合材料单层板的弹性各向异性分析,就是把它视为均匀各向异性介质来处理的。另一方面,在探索复合材料中复合体的性能与组分材料性能的关系时,又把复合材料视为非均质体,从组分材料的性能和复合结构出发。对后面这种情况,与此类似的对层状复合介质的分析是建立在各单层板均匀、层合板厚度方向上非均匀的基础上研究的。

1.2 复合材料的超声无损检测

在研究和实际应用中,超声技术在复合材料的无损检测中起主要作用^[3]。超声方法提供的许多参数可用于测试和表征不连续性,并决定复合材料的弹性性质。异常和性质变化将会影响透射入试件的超声波束的强度、速度、散射、波型转换以及反射特征。

1.2.1 法向入射检测复合材料

在大多数超声检测中,纵波束都垂直于复合材料表面入射,在这些条件下,材料各向异性效应可以忽略,而结果与各向同性介质中的近似,尽管材料的表现与各向同性介质近似,它的多层性仍然造成附加反射与增加衰减。

两种基本的法向入射测试模式经常使用。在透射法中,衰减由透过试件的波的振幅决定;在脉冲法中,可采用几个评价参量:①背反射振幅的变化;②附加反射的振幅;③前反射到背反射或附加反射测得的行程时间的变化。

1.2.2 复合材料的倾斜入射

声波以一定角度射入复合材料的行,受复合材料多层性、非均匀性以及各向异性的强烈影响。斜入射测试复合材料有两种方式:第一种是散射模式,其中使用单探头,复合材料中的散射源被作为纤维取向的函数分辨出来;第二种是漏 Lamb 波模式,其中使用两个探头以一收一发方式放置,探头可置于层压板的同侧或相对两侧,漏 Lamb 波接收器安置在由镜面反射与漏 Lamb 波分量干涉形成的零声压区。

很多不连续性都可以用这两种斜入射方法探测到。

1.2.3 漏 Lamb 波的应用

目前,应用漏 Lamb 波对复合材料进行无损检测的报道正迅速增加,这一方法提供了极好的无损检测工具,可用于探测和表征各种不连续性,包括脱层、气孔、夹层缝隙和树脂含量变化等。漏 Lamb 波法是基于以一定倾斜角入射试件产生的声透射,这时波被折射,多次反射并产生模式转换诱导出板波。漏 Lamb 波方法是用两个换能器按一发一收排列。被测试件通常浸于水槽中或在换能器表面与试件表面之间保持一水层。对某一固定角度的声透射,在某一特定频率时声波被转换为 Lamb 波,由此引起声辐射泄漏到液体中而形成漏 Lamb 波。当漏波形成时,镜面反射波的声场将产生畸变。反射波的镜面部分与漏波相干涉,产生相位相消并在干涉波之间形成带有一零声压的两个部分。漏 Lamb 波有几个特点使得它们可用于复合材料的无损检测:首先,漏 Lamb 波声场中无声区的相位抵消是一个对界面状态的任何变化十分敏感的参数;其次,当 Lamb 波在板中传播时两种应力(压应力和剪应力)同时出现,而在其他超声测试中只有一种应力出现。由于两种应力受不同材料及不连续性参数的影响各异,Lamb 波法有可能对复合材料提供更多的识别特征。然而,漏 Lamb 波方法没有得到广泛应用,这是因为:①对波现象的观察了解尚不充分;②相关声场的复杂性,特别是从多取向层压板接收到的波难以解释。

尽管复合材料的超声无损检测是一个相对成熟的技术,其可靠性仍受到试件各向异性、非均匀性和叠合性质的制约。传统的超声方法对材料的这些特性并未给予合适的考虑。过去,超声测试被认为是经验科学,主要是由于其有限的定量技术能力,特别是对复合材料。

1.3 层状复合介质中 Lamb 波的研究进展

1.3.1 Lamb 波简介

Lamb 波,也即板波,是在作为波导的具有表面边界的板中传播的弹性应力波。换句话说,在板中传播并且满足板的两个表面边界条件的波即为 Lamb 波。Lamb 波有无限多个振动模式,通过改变换能器的频率和入射角,可以激发不同的 Lamb 波模式。在一个均质板中,根据质点振动位移的方向,这些 Lamb 波模式可分为两类:对称模式和反对称模式。波速依赖于板厚、频率、模式的阶数以及材料的性质。随频率变化的不同,Lamb 波模式的相速度(或群速度、入射角等)曲线称为频散曲线,其中的每一条曲线代表了一个具体的模式,标记为 $a_0, s_0, a_1, s_1, \dots, a_i$ 和 $s_i (i = 0, 1, 2, \dots)$, 分别指第 i 阶反对称模式和对称模式。频散曲线描述了特定结构固有的振动特性,它们随材料的性质和板的几何形状而变化,一般用频散曲线来确

定换能器的频率和入射角以得到想要的 Lamb 波模式。

Lamb 波与传统的超声体波 (体纵波或体横波) 检测相比具有很多优点。一方面, 在体波检测中, 所检测的区域局限于换能器所能覆盖的范围, 换能器需对所检结构逐点扫描, 这种方法是很花费时间的。而 Lamb 波可在结构的一点激发, 由于 Lamb 波本身的特性 (沿传播路径衰减较小), 可以沿构件传播相当长的距离。使用一发一收装置, 将接收换能器放置在距发射换能器一定距离拾取传播信号, 则接收信号就包含了两换能器之间区域结构整体性的信息。因此, Lamb 波检测技术可在短时间检测相当大的区域。另一方面, 通过用不同的 Lamb 波模式激励板的不同深度, 可以检测到整个板厚。从各 Lamb 波模式的形状 (板厚方向上的位移和应力分布) 图上, 能知道哪个 Lamb 波模式对什么深度比较敏感, 这就意味着 Lamb 波既可检测内部缺陷, 也可检测两表面的缺陷。每一个模式都有它自己的模式形状, 一个模式对某一深度异常结构的灵敏度将会与另一个具有不同模式形状模式的灵敏度不同。总之, Lamb 波的多模式特征、长距离传播是其与传统体波相比最突出的两大特点。

根据 Lamb 波在传播过程中有无能量损失可将其分为自由波和损耗波。若弹性板置于真空, Lamb 波在其中传播时没有能量损失, 称为自由波。若弹性板置于液体或嵌入固体半空间或者板材本身为吸收材料, 则 Lamb 波在板中传播时能量将有损耗, 称为损耗波。损耗波可分为两种: 一种是因为 Lamb 波的部分能量从板辐射到周围介质 (只要 Lamb 波的传播速度大于周围介质中的声速), 这就是通常所说的漏 Lamb 波; 若 Lamb 波的能量并没有泄漏到周围其他介质, 但却在传播过程中能量不断有损失, 这是由于材料吸收而引起的 Lamb 波衰减, 在本书中称这样的 Lamb 波为衰减波, 以便与漏 Lamb 波区分开来。图 1.1 给出了自由波、衰减波、漏 Lamb 波的示意图。

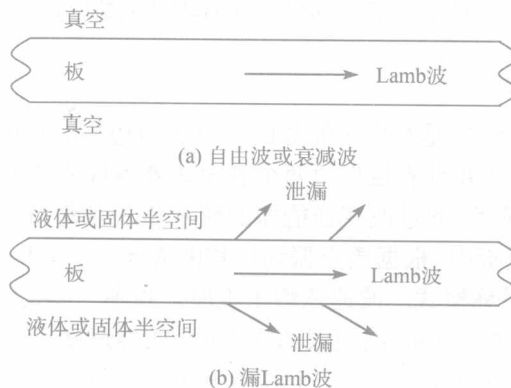


图 1.1 板中 Lamb 波的传播

1.3.2 各向同性介质中 Lamb 波的研究

自超声 Lamb 波发现以来,它在无损检测与评价方面的实用价值就为人们所研究. Lamb 波用于无损检测已有 40 余年. Worlton^[4] 将 Lamb 波实际应用于铝板近表面缺陷的检测. Ball 和 Shewring^[5] 以及 Mansfield^[6] 运用 Lamb 波对不同的板材进行了快速检测. Rokhlin^[7] 研究了 Lamb 波在层状材料检测中的应用. Alleyne 和 Cawley^[8] 详细地研究了 Lamb 波与钢材中槽形缺陷的相互作用. Lowe、Challis 和 Chan^[9] 等用有限元分析研究了胶黏剂黏接的搭接件中 Lamb 波的传播,该研究为黏接区域的无损评价以及黏接尺寸的测量提供了模式选择的依据. Jung、Kundu 和 Ehsani^[10] 将 Lamb 波技术用于混凝土内部不连续性的检测. 结果发现, Lamb 波技术比传统的体波在检测蜂窝状缺陷、密集裂纹、小异常结构方面更可靠. 宁伟、王耀俊^[11] 从理论和实验上研究了三层复合结构中 Lamb 波和漏 Lamb 波的传播. 采用宽频带超声透射谱实验系统,测量了浸没在水中的铝/水/铝结构中的漏 Lamb 波色散关系,理论与实验结果符合较好. 王耀俊、宁伟等^[12] 研究了平面层状复合介质中 Lamb 波的色散方程和传播特性,用界面层的“准弹簧”模型和微扰近似方法分析了双层复合介质中界面层对 Lamb 波传播的影响,同时给出了漏 Lamb 波的色散关系和已获得的有关实验结果. 朱哲民、赵晓亮等^[13,14] 研究了有液层、黏滞液层负载时薄板中类 Lamb 波的传播. 朱金颖等^[15] 采用传递矩阵方法,建立了层状板中 Lamb 波的特征方程以及相应的位移和应力分布计算公式,并由此分析了双层板、软夹层和硬夹层板中 Lamb 波的频散特性,特别指出软夹层的存在对 Lamb 波频散特性有显著影响. 吴昆裕、戴辉^[16] 基于对液体载荷固体板中漏 Lamb 波传播模复波谱的计算,研究了液-固密度比对漏 Lamb 波色散特性的影响. 计算结果表明,当液体密度接近固体密度时,认为漏 Lamb 波和自由界面的 Lamb 波色散曲线基本一致的假设是不正确的. 增大液-固密度比将导致漏 Lamb 波模之间的相互作用,并发生部分漏 Lamb 波模的重合、互易和分离现象. 当液体密度从极稀薄向极稠密变大时,漏 Lamb 波的色散曲线从自由界面的 Lamb 波模向法向位移为零的滑移夹持边界条件的情况过渡. 张锐、万明习、巩欣洲等^[17] 提出了用低频多模式超声 Lamb 波定征方法来估计超薄弹性层的纵波声速、横波声速、厚度和密度等参数. 文中采用水浸耦合方式,结合空间波场设计和泄漏 Lamb 波频域分析方法获取了材料零阶对称与反对称模式 Lamb 波色散曲线,并以色散特性为基础的零阶对称模式 Lamb 波定征方法、简化方法、零阶反对称模式 Lamb 波定征方法和最小二乘意义下以材料色散曲线为基础的反向算法对材料进行了参数估计. 实验结果表明,该方法能够准确估计厚度小到 26 μm 铝箔的材料参数. 张锐、万明习、Cao Wenwu^[18] 在推导层状黏接复合结构良好黏接及存在弱界面、滑移界面和脱层等几种不同界面条件下 Lamb 波广义频散方程的基础上,分析了界面径向与轴向力学参数对 Lamb 波传播

特性的影响. 刘镇清、张海燕^[19] 采用传递矩阵方法研究了固-液-固三层结构板中 Lamb 波传播的频散特性, 三层结构板中包含了中间有不同位置、厚度的液体层的状况, 通过对频散曲线的演化过程找出了中间液层厚度、位置对复合结构板 Lamb 波影响的规律.

1.3.3 复合材料板中 Lamb 波的研究

随着主要结构材料特别是航空工业用复合材料的出现, NDE 界已将注意力转向了复合材料, 许多用于各向同性材料的 NDE 技术已用于复合材料, 自然地, Lamb 波用于复合材料的 NDE 研究也在不断地增加. 复合材料中 Lamb 波的传播因其各向异性分层结构而变得较为复杂. 然而, 为了挖掘 Lamb 波在复合材料无损评价方面的潜力, 为了使该项技术变成实际检测的工具, 无论是理论还是实验上都需要对各向异性分层结构中的 Lamb 波进行大量的研究. 各国研究者都在积极开展该课题的研究, 要全面地回顾这些工作是十分困难的, 这里只就一部分研究文献做一下概述.

Nayfeh 和 Chimenti^[20,21] 以及 Li 和 Thompson^[22] 已经对各向异性单层板(均匀介质)中的 Lamb 波进行了详细的研究, 这些研究为 Lamb 波丰富的频散特征提供了生动的描述. 在 Mal 和 Ting^[23] 以及 Datta、Achenbach 和 Rajapakse^[24] 编辑的手册中, 可以看到对均匀各向异性板中 Lamb 波理论和实验研究的综合评述. 在理论研究中, 尤其需要提及的是 Kaul 和 Mindlin^[25]、Abubakar^[26]、Solie 和 Auld^[27]、Baylis 和 Green^[28]、Mal^[29]、Datta^[30]、Bratton^[31,32]、Dayal 和 Kinra^[33], 他们为该问题的研究做出了卓越的贡献.

Lamb 波用于多层介质的检测也受到广泛关注, 尤其是黏接结构和复合材料的检测. Karunasena、Shah 和 Datta^[34] 应用刚度方法和精确方法, 研究了正交铺设的层合板中 Lamb 波的频散. 结果表明, 当只有几层时, 层数对 Lamb 波的频散特性有强烈的影响; 当层数足够大时, 可以把层合板作为具有六个刚度常数的均匀板来预测其频散特性, 这六个刚度常数是用有效模量理论得到的. 他们指出, 虽然在原理上, 采用传递矩阵方法可以得到层状各向异性板中 Lamb 波的精确的频散方程, 然而, 要找到这个超越行列式方程的根相当困难并且耗时, 尤其当层数相当大时更是如此. 为方便其研究, 他们采用了最初由 Dong 和 Nelson^[35] 提出的刚度方法并对其进行了改进, 使得这种方法在高频时具有更好的精度, 数值计算结果显示了该方法预测的结果与精确解具有很好的一致性. Ji 和 Sullivan 等^[36] 应用 Thomson-Haskell 传递矩阵分析了多层非均质各向异性板中 Lamb 波的特性, 得到了非均质板内能量矢的内部分布. Niklasson 和 Datta 等^[37] 导出了具有薄镀层的板中弹性波的有效边界条件, 用这些有效边界条件得到了具有薄各向异性镀层的各向同性板中 Lamb 波的近似频散关系, 并数值计算验证了有效边界条件理论的准确性. 他们^[38] 也用

同样的理论研究了两各向同性层之间有一薄各向异性层的三层夹心板中导波的频散. Nayfeh^[39] 用传递矩阵方法研究了具有任意铺层的多层各向异性板中导波的传播, 并结合 Floquet 条件, 得到周期性铺设的多层各向异性板中导波的特征方程, 文中给出了包含不同层数、各种铺设方向的各向异性多层板的频散曲线.

对导波 (导波有多种, 主要分为圆柱体中的导波以及板中的 SH 波、SV 波和 Lamb 波等) 在材料定征方面的应用, Chimenti^[40] 列举了 362 篇参考文献, 详尽地回顾了用导波在该发展领域进行的大量理论和实验研究, 尤其是复合材料的发展以及对它们的检测和定征已经成为推动导波方法发展的主要推动力. 文中着重叙述了如何灵敏、可靠地检测复合材料中的缺陷并且探测它们的微观力学行为, 也涉及了用导波对黏接结构的定征、应力和材质的测量以及缺陷的检测.

与国外相比, 国内对各向异性复合材料中 Lamb 波的研究较少. 程建春、张淑仪^[41] 研究了沿均质的正交各向异性板任意方向 Lamb 波模式的传播, 导出了耦合的 Lamb 波的频散关系, 并数值分析了一个横向各向同性单向纤维增强复合材料板内耦合的 Lamb 波的频散特征. 结果表明: 当 Lamb 波沿纤维方向传播时, Lamb 波与 SH 波解耦, 两种模式之间存在交叉点, 频散曲线较各向同性情况更复杂, 最明显的区别是在这种情况下对称模式和反对称模式以振荡的方式接近其渐进极限; 当 Lamb 波逐渐偏离纤维方向传播时, Lamb 波与 SH 波耦合, 模式之间逐渐发生分离; 当 Lamb 波沿垂直纤维方向传播时, 仍得到解耦的 Lamb 波与 SH 波, 频散曲线与各向同性板的情况相同. 张锐、万明习和李刚^[42] 研究了使用低频多模式超声 Lamb 波估计超薄层状横观各向同性复合材料的弹性常数、密度和厚度等参数的方法. 这里“超薄”的概念是指材料厚度远小于材料中的声波波长, 导致在时域上材料前后界面的各次回波信号相互混叠. 文章分析了沿平行和垂直于纤维两种方向上, 在超薄层状横观各向同性复合材料中传播的低频 Lamb 波的色散特性, 提出在最小二乘意义下以材料多模式 Lamb 波色散曲线为基础的反向算法对材料进行了参数估计. 结合超声漏 Lamb 波频域分析方法并使用超声耦合剂耦合方式和一对中心频率为 2MHz 的宽带纵波换能器, 实验结果证实该方法能够准确估计单向玻璃纤维增强聚醚砜 (PEC) 的材料参数. 吴昆裕、邵继红^[43] 推导了流体负载的正交各向异性对称的固体板中漏 Lamb 波的频散方程, 计算了漏 Lamb 波的复波数, 得到了相速度和声衰减的频散特征. 数值结果表明, 无负载和流体负载的频散特性明显不同, 流体负载不仅引起相当大的声衰减, 而且也导致这些漏 Lamb 波模式的相互作用并强烈地影响频散曲线的形状.

从上面的叙述可以看到, 在复合材料及其黏接结构的超声检测与评价方面, Lamb 波技术正日益得到推广和应用, 这主要是因为 Lamb 波在检测时比传统体波具有很大的优越性. 相对于各向异性单层板中 Lamb 波的研究而言, 对层状各向异性介质中 Lamb 波的研究较少, 特别是国内对这方面问题的研究更不多见, 这主要是因为

复合材料因其各向异性分层结构而使其中波的传播机理变得较为复杂的缘故。虽然前人在这方面已做了一些工作,并逐步取得了进展,但该技术尚未成熟,在实际检测时还有许多问题需要弄清楚,如各向异性分层、某层材料为吸收材料等对波传播的影响,有必要对各向异性层状复合介质中波的传播特性进行进一步的研究。

本书以复合材料中最常用的纤维增强型复合材料作为研究对象,以单层板或多层结构中的某一分层作为研究单元,将其按正交各向异性均匀介质来处理,至于横向各向同性介质、立方晶体或各向同性体,可作为正交各向异性体的特殊情况来对待。

1.4 多层板中超声 Lamb 波的矩阵建模

研究多层结构中 Lamb 波的传播问题,有两种流行的矩阵方法:传递矩阵方法 (transfer matrix method) 和全局矩阵方法 (global matrix method)。传递矩阵方法是由 Thomson^[44] 和 Haskell^[45] 引入的,其基本思想是利用各层固体对应的传递矩阵和相邻层之间的边界条件,得到联系多层板系统上下界面处力学量的矩阵表达式;通过各层传递矩阵相乘,消去所有由中间层引入的未知项,得到联系多层板系统最下面一层和最上面一层力学量的矩阵表达式;最后利用多层板的外部边界条件,由解的唯一性给出系统的频散特征方程。传递矩阵的优点是其阶数不依赖于层数,一个传递矩阵所需的最大阶数为 6×6 阶 (各向异性板的情况)。然而,对于大频厚积 (频率与板厚的乘积) 问题,传递矩阵变成病态矩阵,特征方程的解出现数值不稳定,这就是所谓的传递矩阵方法在大频厚积时存在的精度损失现象。Dunkin^[46] 首次观察到了这种现象,此后,许多研究者对该方法进行了改进,但仍保留了简洁的传递矩阵的概念。Dunkin 在同一篇文章中,引入了一个“Delta 算子”技术,该技术使用了一个由传递矩阵中所有 2×2 阶子行列式组成的 6×6 阶矩阵。随后,其他许多研究者采纳并发展了 Delta 算子技术,得到了适用于各向同性固体的各种表达式,他们声称这些表达式具有较好的稳定性^[47~49]。后来, Castaings 和 Hosten^[50,51] 又进一步发展了这种技术,使得它能够用来建模各向异性层,因为各向异性传递矩阵为 6×6 阶矩阵,相应的必须考虑由其子行列式组成的 15×15 阶和 20×20 阶 Delta 矩阵。因此,相对于各向同性材料而言,对各向异性材料,Delta 算子技术变得很复杂性。于是,研究者又将目光转向了另一种完全不同的方法,即全局矩阵方法,它是 Knopoff^[52] 在 1964 年提出的。全局矩阵方法是通过同时满足所有界面上的边界条件,得到一个单一的矩阵方程,方程的解给出了所有层波的性质。Randall^[53] 首次使用了全局矩阵方法,随后许多研究者^[54~56] 也对它进行了应用,一个特别有意义的发展是认识到了每一层内体波空间起始点的重要性。全局矩阵方法的优点是它很稳定,可以有效地根除大频厚积时的精度损失问题,缺点是矩阵的阶数为层数的函数。只就各向同性固体而言,对单层板,需计算 4×4 阶矩阵;对双层板,需计算 8×8 阶矩阵;对三