复合波导中的
导波理论基础及应用

何文 王成 赵奎 林凤翻 著

冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn

Metallurgical Industry Press
冶 金 工 业 出 版 社

体验更多精彩阅读
尽在冶金工业出版社微信平台

ISBN 978-7-5024-8144-5
9 787502 481445 >

定价 55.00 元
销售分类建议：地质·矿业

江西理工大学清江学术文库

复合波导中的导波理论基础及应用

何 文　王 成　赵 奎　林凤翻　著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2019

内 容 提 要

本书系统地介绍了几种复合结构中的纵向导波和扭转导波的理论基础和导波检测及监测的应用实例，是作者十多年来在导波理论和应用方面的研究总结。全书分3篇共7章。主要内容包括绪论、波动理论基础、空心圆柱体结构中的导波理论基础、实心圆柱体结构中的扭转导波理论基础、复合波导中的导波理论应用、锚固介质强度的扭转导波检测和充填体强度的导波监测试验。

本书可供采矿工程、岩土工程和地质工程技术人员使用，也可供相关领域的科研人员和高校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合波导中的导波理论基础及应用/何文等著. —北京：冶金工业出版社，2019.7

ISBN 978-7-5024-8144-5

Ⅰ.①复… Ⅱ.①何… Ⅲ.①导波 Ⅳ.①P315.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第144518号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmip.com.cn 电子信箱 yjcbs@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 吕欣童 版式设计 禹 蕊

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8144-5

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2019年7月第1版，2019年7月第1次印刷

169mm×239mm；10印张；194千字；150页

55.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

前　言

无损检测技术是在不损害被检测物体的前提下，采用物理化学手段，利用各种仪器，对被检测物体的结构变化或缺陷进行检测的技术。导波检测技术作为一种新兴的无损检测技术，由于导波在传播过程中的特性，广泛应用于油气管道、锚杆、锚索、轨道等结构的损伤检测。然而，导波检测技术虽在诸多领域都有广泛应用，但缺少系统介绍导波在各种结构检测中传播理论的参考书。

作者从事导波理论和应用方面的研究已有多年，为了使读者更好地了解导波检测技术的推广和应用，于是将多年的研究成果汇总归纳成书。导波检测技术的应用领域众多，任何一个领域都值得我们皓首穷经、终其一生去研究，因此，在本书的内容安排上，我们无法面面俱到，只期望将我们主要涉猎领域的研究成果与大家共享。

本书系统地研究了几种常见复合波导结构中的导波理论，并采用理论、实验和数值模拟相结合的手段，详细阐述了导波在矿业领域中的应用。本书分3篇共7章，即入门篇（第1和2章）、理论篇（第3和4章）、应用篇（第5～第7章）。入门篇介绍了国内外导波理论和应用方面的研究进展、波动方程和体波的基础知识，总结了导波的形成原因、导波的概念及特点。通过入门篇的学习使读者对导波的相关知识有一个初步的印象。理论篇论述了空心圆柱体结构中的导波理论基础和实心圆柱体结构中的扭转导波理论基础。通过理论篇的学习使读者对导波在空心圆柱体结构和实心圆柱体结构中的传播有一定的

认知。应用篇介绍了导波理论的应用实例，包括复合波导中的导波理论应用、锚固介质强度的扭转导波检测和充填体强度的导波监测试验。

本书内容涉及的研究得到了国家自然科学基金（51604127）、中国博士后科学基金（2019M650156）、江西省自然科学基金（20171BAB206021）和江西省重点研发计划重点项目（20161BBG70077）的资助，在此表示衷心的感谢。

本书由江西理工大学资助出版，在此对江西理工大学在各方面提供的支持和帮助表示感谢。

由于作者水平有限，疏漏在所难免，恳请广大读者批评指正。

作　者

2019 年 2 月

目　　录

第1篇　入门篇

1　绪论 …… 1

1.1　国外导波理论及应用研究进展 …… 2
1.2　国内导波理论及应用研究进展 …… 4
参考文献 …… 4

2　波动理论基础 …… 7

2.1　无限大各向同性介质中的波动方程及体波 …… 7
2.1.1　波动方程的推导 …… 7
2.1.2　体波的介绍 …… 10
2.2　导波 …… 11
2.2.1　导波的形成 …… 11
2.2.2　导波的常见概念 …… 12
2.2.3　导波的特点 …… 13
参考文献 …… 14

第2篇　理论篇

3　空心圆柱体结构中的导波理论基础 …… 17

3.1　自由空心圆柱体结构中的纵向导波理论 …… 17
3.1.1　频散方程的建立 …… 18
3.1.2　频散曲线的求解 …… 22
3.1.3　波结构分析 …… 24
3.1.4　波的衰减特性分析 …… 26
3.1.5　参数变化对频散曲线的影响 …… 27
3.2　自由空心圆柱体结构中的扭转导波理论 …… 29
3.2.1　频散方程的建立 …… 29
3.2.2　频散曲线的求解 …… 31

3.2.3　波结构分析 …… 33
3.2.4　波的衰减特性分析 …… 34
3.2.5　参数变化对频散曲线的影响 …… 34
3.3　双层空心圆柱体结构中的纵向导波理论 …… 36
3.3.1　缝管锚杆中的位移和应力 …… 36
3.3.2　围岩层中的位移和应力 …… 37
3.3.3　频散方程的建立 …… 38
3.3.4　频散曲线的求解 …… 40
3.3.5　波结构分析 …… 41
3.3.6　波的衰减特性分析 …… 42
3.3.7　参数变化对频散曲线的影响 …… 43
3.4　双层空心圆柱体结构的扭转导波理论 …… 45
3.4.1　缝管锚杆中的位移和应力 …… 45
3.4.2　围岩中的位移和应力 …… 45
3.4.3　频散方程的建立 …… 46
3.4.4　频散曲线的求解 …… 47
3.4.5　波结构分析 …… 48
3.4.6　波的衰减特性分析 …… 49
3.4.7　参数变化对频散曲线的影响 …… 49
参考文献 …… 51

4　实心圆柱体结构中的扭转导波理论基础 …… 53

4.1　自由实心圆柱体结构中的扭转导波理论 …… 53
4.1.1　频散方程的建立 …… 53
4.1.2　频散曲线的求解 …… 55
4.1.3　波结构分析 …… 56
4.1.4　波的衰减特性分析 …… 58
4.1.5　参数变化对频散曲线的影响 …… 59
4.2　双层实心圆柱体结构中的扭转导波理论 …… 59
4.2.1　钢筋混凝土结构中的位移和应力 …… 59
4.2.2　混凝土中的位移和应力 …… 60
4.2.3　频散方程的建立 …… 61
4.2.4　频散曲线的求解 …… 61
4.2.5　波结构分析 …… 63
4.2.6　波的衰减特性分析 …… 64

4.2.7　参数变化对频散曲线的影响 …… 64
4.3　多层实心圆柱体结构中的扭转导波理论 …… 66
4.3.1　金属杆中的位移和应力 …… 66
4.3.2　树脂层中的位移和应力 …… 67
4.3.3　围岩层中的位移和应力 …… 68
4.3.4　频散方程的建立 …… 68
4.3.5　频散曲线的求解 …… 69
4.3.6　波结构分析 …… 71
4.3.7　波的衰减特性分析 …… 72
4.3.8　参数变化对频散曲线的影响 …… 72
参考文献 …… 74

第3篇　应用篇

5　复合波导中的导波理论应用 …… 77

5.1　导波检测实验平台 …… 77
5.1.1　导波的常用检测方法 …… 77
5.1.2　导波的激励方式 …… 78
5.1.3　导波检测系统 …… 79
5.1.4　导波检测信号的选取 …… 82
5.1.5　导波检测信号的处理方法 …… 84
5.2　导波在树脂端锚锚杆锚固段上界面的反射研究 …… 85
5.2.1　问题的提出 …… 85
5.2.2　波动问题的数值模拟方法 …… 86
5.2.3　导波在锚杆锚固段上界面反射的数值模拟 …… 87
5.2.4　导波在锚杆锚固段上界面反射的实验研究及讨论 …… 97
5.3　水泥砂浆端锚锚杆低频导波检测的实验研究 …… 99
5.3.1　锚固密实度的检测方法 …… 100
5.3.2　实验研究及讨论 …… 102
5.4　水泥砂浆端锚锚杆高频导波检测的实验研究 …… 104
5.4.1　自由圆钢锚杆中的高频纵向导波实验 …… 104
5.4.2　水泥砂浆锚固锚杆中的高频纵向导波实验 …… 106
5.4.3　水泥砂浆锚固锚杆体缺陷的高频纵向导波检测 …… 109
参考文献 …… 110

6 锚固介质强度的导波检测 …… 114

6.1 理论分析 …… 114
6.1.1 锚杆锚固段的扭转导波频散方程 …… 115
6.1.2 扭转导波频散曲线的计算 …… 117
6.2 数值模拟 …… 119
6.2.1 数值模拟的实现 …… 119
6.2.2 锚固介质强度的扭转导波评价 …… 124
参考文献 …… 126

7 充填体强度的导波监测试验 …… 129

7.1 充填体导波监测试验方案 …… 130
7.1.1 试验原理 …… 130
7.1.2 试件的制备 …… 130
7.1.3 测试系统 …… 132
7.1.4 测试系统参数设置 …… 134
7.2 试验过程 …… 135
7.2.1 导波试验前的准备工作 …… 135
7.2.2 导波测试试验步骤 …… 135
7.3 试验结果 …… 136
7.3.1 自由杆的频散曲线 …… 136
7.3.2 激励波周期数优化 …… 137
7.3.3 激励波频率优化 …… 139
7.3.4 单轴压缩强度对胶结充填体频散曲线影响 …… 146
参考文献 …… 150

第1篇 入门篇

1 绪 论

随着科学和工业技术的快速发展，工业现代化日新月异，高温、高压、高速度和高负荷，无疑已成为现代化工业的重要标志。但它的实现是建立在材料（或构件）高质量的基础上[1]。一旦材料（或构件）出现损伤破坏，便会导致事故发生，造成人民生命和财产的损失。1952 年 10 月～1954 年 4 月，世界上最早投入使用的喷气式飞机，英国“彗星”客机，先后发生 8 起飞行事故。从深海打捞出的机体残骸上找到最早破坏的结构件，经机身疲劳水槽试验验证，确定是机身结构构件发生疲劳损伤，最终导致飞机坠毁。

1977 年，一架载满乘客的大型载人飞机坠毁于赞比亚的卢萨卡机场，在之后的事故原因调查中发现其右水平机翼出现大面积的疲劳断裂区。2003 年的“哥伦比亚号”航天飞机失事也是由于机体部位发生损伤导致在返回大气层时航天飞机解体，宇航员死亡。因此，对材料（或构件）的状态进行检测，保证材料（或构件）的安全可靠具有重要意义（见图 1-1）。

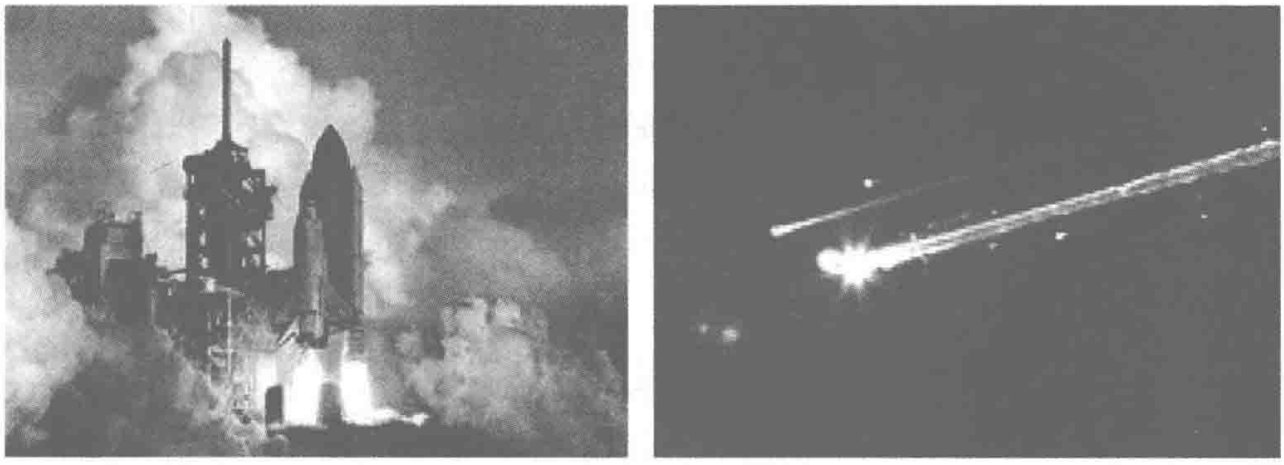


图 1-1 “哥伦比亚号”航天飞机失事

无损检测技术是利用物质的某些物理性质因存在缺陷或组织结构上的差异而使其物理量发生变化的现象，在不损伤被检物使用性能、形状及内部结构和形态

的前提下，应用物理方法测量这些变化，从而达到了解和评价被检测的材料、产品和设备构件的性质、状态、质量或内部结构等目的的技术[2]。目前，无损检测技术已经在机械设备制造、冶金、化工、船舶、航空航天、建筑以及食品加工等领域都获得了广泛的应用，成为极其重要的检测和测试方法。

超声检测、射线检测、涡流检测、磁粉检测和渗透检测是几种传统的无损检测技术。超声检测利用了超声波在介质中的传播特性，当超声波在介质中传播时，会发生反射、透射与折射、衍射与散射、干涉、衰减、谐振以及声速等的变化，检测、分析经过介质的超声波即可实现对介质的检测。当试件的表面或内部存在缺陷时，采用X射线或其他射线对其进行检测，缺陷会对射线的传播造成影响，使得透射过试件的射线强度发生变化。不同尺寸、形状的缺陷对射线强度的影响程度不一，通过对射线强度变化的分析，可以实现对缺陷的检测。利用电磁感应原理，通过测定被测工件内感生涡流的变化来无损地评定工件的某些性能，或发现工件内存在的缺陷的检测手段称为涡流检测。当试件的表面或内部存在缺陷时，其磁力线的分布会发生变化。此时，若将试件磁化，缺陷部位会产生漏磁场。磁粉检测就是利用漏磁场会吸引磁粉的特点，根据磁粉的分布特征判断缺陷的位置、大小和尺寸。渗透检测采用渗透剂渗入工件表面开口缺陷，在清除工件表面的渗透剂后，从缺陷回渗的渗透剂可显示缺陷的位置、形状和大小[3]。

导波检测技术作为一种新兴的无损检测技术，广泛应用于油气管道，锚杆、锚索、轨道等结构的损伤检测。在固体中传播的导波，由于本身的特性，沿传播路径衰减很小，所以可以进行长距离、大范围的损伤检测。与传统超声波技术相比，导波检测技术具有两个明显的优势。第一，导波检测技术每次检测的区域是一条线，而不是一个点。导波沿传播路径的衰减很小，可以在构件中传播非常远的距离，因此激励点和接收点之间的距离也可以变得较远，它们之间的连线就是导波检测的区域。第二，由于导波在构件的内外表面和构件内部都有质点的振动，波动遍及整个构件，因此整个构件都可以被检测到，这就意味着既可以检测构件的内部损伤也可以检测构件的表面损伤。导波检测技术在无损检测领域中的应用前景广阔，在国内外学者的研究下，导波检测技术在理论方面不断发展、完善。

1.1　国外导波理论及应用研究进展

20世纪初，国外陆续有人开展导波理论的研究。针对不同形式的波导，学者们进行了导波的理论分析。研究领域不断扩展，从无限介质中波的传播理论到板中导波的传播理论，再到与实际应用更为接近的柱面导波的传播理论[4]。

J. Rayleigh[5]和H. Lamb[6]研究了不受约束条件下各向同性板中弹性波的传播特性，推导得到在平面应变假设下单层、各向同性自由板的Rayleigh-Lamb超越

方程，从此拉开研究导波技术理论的帷幕。J. Ghosh[7]对导波在空心圆柱体中的传播进行求解，得到纵向轴对称模态的数值解，但他没有进行数值分析和对得到解的正确性的验证。Gazis[8,9]在已有成果的基础上，提出自己的线弹性理论。他假设空心圆柱体处于平面应变状态，推导出了导波在空心圆柱体中传播的频散方程。之后，Gazis[10]研究了导波在无限长、各向同性的圆柱壳中的传播，推导出纵向和扭转模态导波的频散方程，并进行数值计算，得到了导波的频散曲线和各模态的截止频率。Jing Mu[11]采用半解析有限元（SAFE）方法求解了黏弹性涂层自由空心圆柱中的导波传播问题，给出了轴对称和弯曲模式的导波色散曲线和衰减特性。并通过一种模式分类方法，给出了黏弹性涂层空心圆柱中导波模态正交性的理论证明。F. G. Yuan 等[12]在三维圆柱各向异性弹性理论的框架内，给出了复合材料层合圆柱壳中自由简谐波传播的精确解。

随着微机技术的发展和各种新的数值分析方法的出现为导波理论研究注入新鲜血液，增添新的活力。Alleyne 等[13]采用有限元法对 Lamb 波与钢板裂纹状缺陷的相互作用进行了数值和实验研究。结果表明，当波长与缺陷深度之比达到 40 时，兰姆波可以用来检测缺陷。Robert Seifried 等[14]结合分析模型，瞬态有限元模拟和实验测量，定量分析 Lamb 波在多层复合结构组件中的传播。Rose 等[15]用边界元方法研究了平板结构中不同缺陷对导波散射过程的影响，提取并比较了具有这些缺陷类型的板的 Lamb 波反射和透射过程的几个特征。Chunhui Yang 等[16]讨论了用显式动力分析有限元模型对复合材料层合板中 Lamb 波传播进行数值模拟的若干问题。采用连续单元（三维实体单元）和结构单元（三维壳单元）对 Lamb 波在各向同性板和准各向同性层合材料中的激发、收集和传播的不同有限元模型进行了评估。Xiaoliang Zhao 等[17]通过边界元法（BEM）和正态模式扩展技术实现的波散射分析研究波导中二维形状缺陷的尺寸。Mingfang Zheng[18]利用基于商用软件 ABAQUS 的有限元方法进行了大量的数值模拟实验，分析了空心圆柱体的传播特性和规律的纵向模式和扭转模式，并通过信号研究了最佳激励模式和频率处理算法。

在导波传播理论研究不断涌现出新成果的同时，许多学者为了验证得到的理论成果，开展实验进行研究。Fitch[19]给出了空心圆柱轴对称和非轴对称纵波群速度的实验测量结果，并与理论值进行了比较，实验结果与计算值吻合较好。M. G. Silk[20]利用压电超声探头对薄壁金属管中导波的生成进行了实验研究。结果表明，能够在金属管中以可接受的效率生成 L(0, 1) 模态的波，而 L(0, 2) 模态的波的生成效率较低，而且由于 L(0, 2) 模态的波的群速度更大，往往会增强由此引起的分辨率问题。Shin 等[21]研究了空心圆柱轴对称和非轴对称表面载荷作用下产生的导波，对轴对称和非轴对称激励产生的导波进行了理论和实验研究。

国外的许多学者对导波在损伤检测方面的应用进行了研究。Jin Kyung Lee等[22]采用激光导波检测技术检测不锈钢钢管的焊缝缺陷，并对比分析了有无焊缝缺陷状态下的模态转换情况、回波幅值与能量的变化，结果表明超声导波检测技术能够检测出管道焊缝区是否存在缺陷。H. Reis[23]研究了一种无线嵌入式传感器系统来监测和评估钢筋混凝土中的腐蚀损伤，制作了带缺陷的钢筋砂浆试件来模拟腐蚀损伤。利用钢筋的波导效应，使用超声波方法对这些试件进行了测试。采用相同的超声波方法，在加速腐蚀试验期间，也对无缺陷的试样进行了监测。研究结果表明，钢筋与周围混凝土的黏结强度损失是可以检测和评价的。Chong Myoung Lee等[24]提出可以使用恰当模态和频率的导波来检测脱轨，特殊的模式和频率也可以用来检测钢轨的腹板或底座的缺陷。

1.2　国内导波理论及应用研究进展

国内在导波方面的研究较国外起步晚，但在科研工作者们探索研究下，取得了一定的成果。何存富、吴斌等[25]综述了无损探测中的柱面导波技术及其应用研究进展，着重评述了导波的模态和频率选择、导波的激励和接收方法、导波与缺陷的相互作用、信号处理与特征提取及导波技术在无损检测中的应用前景。程载斌、王志华等[26]综述了导波监测技术及其应用研究进展，重点评述了导波技术在管道损伤监测中的应用，主要内容涉及应力波在管道中的传播特性、试验检测方法及对接收信号的处理方法。焦敬品等[27]研究了管道中导波的传播特性，试验检测方法以及数值模拟。李衍、强天鹏[28]介绍了超声导波技术在长距离管道检测的应用。何存富、李隆涛等[29]研究了薄壁管道内周向导波的传播及其频散特性，并且通过对比薄壁板与薄壁管道内的导波，找出了一个比较简便研究周向导波的方法，并通过实验验证了周向导波的频散现象以及激励模态与斜探头楔型角的关系。刘镇清[30]介绍了圆管中导波的传播形式，并对无损检测中使用方便、容易识别的L(0，2）模式导波在各种圆管中的传播及缺陷检测能力给出了实验测试例子。刘青青[31]利用有限元特征频率法对钢轨中超声导波传播特性进行了数值分析，计算得到了超声导波在钢轨中的频散曲线，并对钢轨中典型导波模态振型进行分析。同时，考虑到计算的成本，单独选择了钢轨的轨头部分进行频散计算，并对其典型的导波模态振型进行分析。王成等[32~35]分析了锚固锚杆中导波的产生机理，并通过数值模拟的方法，研究了低频导波在锚固锚杆中的传播特性，确定了在端锚锚杆锚固段上界面有明显反射回波信号的频率范围。

参 考 文 献

[1] 李喜孟. 无损检测 [M]. 北京：机械工业出版社，2001.

[2] 夏纪真. 无损检测导论 [M]. 广州：中山大学出版社，2010.

[3] 曾琼，肖江文，袁建辉. 浅谈无损检测技术的发展与展望 [J]. 计量与测试技术，2006 (12)：9～10.

[4] 宋志东. 导波技术在管道缺陷检测中的研究 [D]. 天津：天津大学，2006.

[5] Rayleigh J. The theory of Sound. Vol. Ⅰ and Ⅱ [M]. Dover Publications, New York, 1945.

[6] Lamb H. On waves in an elastic plate [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1917, 93: 114.

[7] Ghosh J. Longitudinal vibrations of a hollow cylinder [J]. Bulletin of the Calcutta Mathematical Society, 1923, 24 (14): 31～40.

[8] Gazis D. Exact analysis of the plane-strain vibrations of thick-walled hollow cylinders [J]. Journal of the Acoustical Society of America. 1958, 30: 786～794.

[9] Gazis D. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. Ⅰ. Analytical foundation [J]. Journal of the Acoustical Society of America. 1959, 31: 568～573.

[10] Gazis D. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. Ⅱ. Numerical results [J]. Journal of the Acoustical Society of America. 1959, 31: 573～578.

[11] Mu Jing, Rose Joseph L. Guided wave propagation and mode differentiation in hollow cylinders with viscoelastic coatings. [J]. Acoustical Society of America. Journal, 2008, 124 (2).

[12] Yuan F G, Hsieh C C. Three-dimensional wave propagation in composite cylindrical shells [J]. Composite Structures, 1998, 42 (2).

[13] Alleyne D N, Cawley P. The measurements and prediction of Lamb wave interaction with defects [P]. Ultrasonics Symposium, 1991. Proceedings. , IEEE 1991, 1991.

[14] Robert Seifried, Laurence J Jacobs, Jianmin Qu. Propagation of guided waves in adhesive bonded components [J]. NDT & E International, 2002, 35 (5).

[15] Rose J L , Zhu W , Cho Y. Boundary element modeling for guided wave reflection and transmission factor analyses in defect classification [C]. Ultrasonics Symposium. IEEE, 1998.

[16] Chunhui Yang, Lin Ye, Zhongqing Su, et al. Some aspects of numerical simulation for Lamb wave propagation in composite laminates [J]. Composite Structures, 2006, 75 (1).

[17] Xiaoliang Zhao, Rose J L. Boundary element modeling for defect characterization potential in a wave guide [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40 (11): 2645～2658.

[18] Mingfang Zheng. Modeling Three-dimensional Ultrasonic Guided Wave Propagation and Scattering in Circular Cylindrical Structures using Finite Element Approach [A]. Information Engineering Research Institute, USA. Physics Procedia 2011 International Conference on Physics Science and Technology (ICPST 2011) [C]. Information Engineering Research Institute, USA: 智能信息技术应用学会，2011: 7.

[19] Fitch Arthur H. Observation of Elastic-Pulse Propagation in Axially Symmetric and Nonaxially Symmetric Longitudinal Modes of Hollow Cylinders [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35 (5): 706～708.

[20] Silk M G. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves [J]. Ultrasonics, 1979, 17 (1): 11～19.

[21] Shin H J , Rose J L. Guided waves by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on

hollow cylinders [J]. Ultrasonics, 1999, 37 (5): 355 ~ 363.

[22] Lee J K, Bae D, Lee S P, et al. Evaluation on defect in the weld of stainless steel material using nondestructive technique [J]. Fusion Engineering and Design,2014, 89 (7 ~ 8): 1739 ~ 1745.

[23] Reis H. Estimation of corrosion damage in steel reinforced mortar using waveguides [J]. 2015.

[24] Chong Myoung Lee, Joseph L Rose, Younho Cho. A Guided Wave Approach to Defect Detection under Shelling in Rail [J]. NDT & E International, 2009, 42 (3): 174 ~ 180.

[25] 何存富, 吴斌, 范晋伟. 超声柱面导波技术及其应用研究进展 [J]. 力学进展, 2001, 31 (2): 203 ~ 214.

[26] 程载斌, 王志华, 马宏伟, 等. 管道应力波检测技术及研究进展 [J]. 太原理工大学学报, 2003, 34 (4): 426 ~ 431.

[27] 焦敬品, 吴斌, 王秀彦, 等. 管道导波探测技术研究发展 [J]. 实验力学, 2002, 17 (1): 1 ~ 9.

[28] 李衍, 强天鹏. 管道长距离超声导波检测新技术的特性和应用 [J]. 无损探伤, 2002, 14: 1 ~ 3.

[29] 何存富, 李隆涛, 吴斌. 周向超声导波在薄壁管道中的传播研究 [J]. 实验力学, 2002, 17 (4): 419 ~ 424.

[30] 刘镇清. 圆管中的导波 [J]. 无损检测, 1999, 21 (12): 560 ~ 562.

[31] 刘青青. 钢轨中超声导波传播特性研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013.

[32] 王成, 宁建国. 锚杆锚固中导波传播的数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (增2): 3946 ~ 3953.

[33] 魏立尧, 王成, 孙远翔, 等. 导波在锚固金属杆中传播机理的研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (12): 1437 ~ 1441.

[34] 何文, 王成, 宁建国, 等. 导波在端锚锚杆锚固段上界面的反射研究 [J]. 煤炭学报, 2009, 34 (11): 1451 ~ 1455.

[35] Wang Cheng, He Wen, Ning Jianguo, et al. Propagation properties of guided waves in the anchorage structure of rock bolts [J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 3 ~ 4: 131 ~ 139.

2 波动理论基础

波是扰动（例如力或者位移的扰动）以一定的速度在介质中的传播，而介质包括固体、液体和气体。波在介质中的传播是一种非常复杂的现象，并受到多种因素的影响（例如介质的材料属性、尺寸、波的频率等）。

本章主要对弹性介质中的波动理论知识进行介绍和回顾。在2.1节中，推导了波在无限大的各向同性弹性介质中的传播方程；在2.2节中，介绍了三维导波的概念、形成及特点。

2.1 无限大各向同性介质中的波动方程及体波

2.1.1 波动方程的推导

刚体动力学假定一个运动中的物体受到的合力可以集中于物体中的任一点，换一句话说，刚体动力学假定物体的弹性模量趋于无穷大。而对于任何实际物体，它们的弹性模量的值都是有限的，并且波动方程可以通过对物体中的微小的质量单元分析得到。根据牛顿第二定律，在受力的情况下，微小的质量单元将产生加速度，因此微小单元的位置将会发生改变，这也造成了与微小单元邻近单元的位置发生改变，其结果是应力持续在物体中传递，并最终形成了波的传播。

图2-1为应力作用于物体中一微小六面体单元的示意图。为了便于分析，我们只考察 x 方向的力。

图2-1中有6个面力分量和一个体力分量X。为了得到 x 方向的运动方程，只需将达朗贝尔原理应用于微小单元。在不考虑体力分量X的情况下，x 方向的运动方程可以表示为

$$\rho \mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \frac{\mathrm{d}^2 u_x}{\mathrm{d}t^2} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{2-1}$$

化简式（2-1）得

$$\rho \frac{\mathrm{d}^2 u_x}{\mathrm{d}t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \tag{2-2}$$

式中，ρ 为材料的密度；u_x 为微小单元在 x 方向的位移。同理可得 y 和 z 方向的运动方程：