

黏弹性复合材料 激光超声理论与技术

孙宏祥 著



科学出版社

黏弹性复合材料激光超声理论与技术

孙宏祥 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了黏弹性复合材料中激光超声的基本理论与检测技术。主要包括:激光超声的研究进展,激光超声的基本理论,黏弹性复合材料中激光激发兰姆波与瑞利波的传播特性,纤维复合材料中激光激发超声波的传播特性,激光超声技术检测黏弹性复合结构的微缺陷以及激光激发温度场分布对超声波传播路径的控制。

本书可作为高等院校声学、无损检测及复合材料等专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为从事激光超声、无损检测及复合材料等领域的研究工作者和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黏弹性复合材料激光超声理论与技术/孙宏祥著. —北京:科学出版社, 2017. 2

ISBN 978-7-03-051742-5

I. ①黏… II. ①孙… III. ①复合材料-超声检测-无损检测②复合材料-激光检测-无损检测 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 025601 号

责任编辑:孙伯元 刘宝莉 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 2 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:265 000

定价:145.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

激光超声学起步于 20 世纪 60 年代,主要研究激光超声波的激发、传播、接收及应用,属声学的一个分支。激光超声学具有较强的交叉性与延伸性,它与光学、无损检测及材料学等多个学科相互交叉,逐渐发展成为一门新兴的交叉学科。与传统超声技术相比,激光超声技术具有非接触、宽频带、高分辨率、可远距离操作等特点,尤其可以在高温高压及不良环境条件下实现在线检测。因此,激光超声技术已成为材料力学性能评估及结构缺陷无损检测的有效手段,并广泛应用于物理、化学、微电子学、表面科学、材料科学、工程学、环境科学及生物医学等领域。

经过五十余年的发展,利用激光超声技术检测金属弹性材料的方法已取得了丰硕成果。随着新技术与新工艺的发展,各种新型聚合物及聚合物基复合材料不断涌现,复合材料的各向异性及黏弹性会改变超声波的频散及衰减特性,从而严重影响黏弹性复合材料激光超声技术的应用。因此,研究黏弹性复合材料中激光激发超声波的传播理论,可以有效推动复合材料检测技术的发展。

此背景下,本书作者从 2006 年起就开展了黏弹性复合材料激光超声理论与检测技术的研究,特别系统研究了黏弹性复合材料中激光激发超声波的传播特性。通过整十年的潜心钻研,在该领域积累了较丰富的研究成果,具有鲜明的研究特色,可谓十年磨一剑,将其成果系统整理出版显得非常必要和及时。该书系统讲述了黏弹性复合材料中激光激发超声波的传播特性,主要包括:激光超声研究进展、激光超声基本理论、黏弹性复合材料中激光激发兰姆波与瑞利波的传播特性、激光超声技术检测黏弹性复合结构微缺陷、激光激发温度场分布对声波传播路径控制等,内容非常丰富,几乎涵盖了黏弹性复合材料激光超声研究的各个方面。

本书问世后必将对激光超声与复合材料检测领域的研究起到积极的推动作用,这是可以拭目以待的。

袁寿其

2016 年 9 月于江苏大学

前 言

激光超声技术具有非接触、高分辨率及宽频带等特点,在材料力学性能评估及结构微缺陷无损检测等方面有广阔的应用前景,并广泛应用于物理、化学、微电子学、表面科学、材料科学、环境科学及生物医学等领域。近年来,各种新型聚合物及聚合物基复合材料不断出现,并广泛应用到半导体器件、平板显示器、太阳能电池、微机电系统及航空航天等领域。复合材料具有各向异性及黏弹性特性,能改变超声波传播特性,从而影响超声波对黏弹性复合材料的性能评价及无损检测。因此,研究黏弹性复合材料激光超声理论有十分重要的学术意义,可有效推进激光超声技术在黏弹性复合材料工业检测中的应用,具有重要的工程应用价值。

针对该研究背景,在国家自然科学基金重点项目(51239005)等资助下,课题组针对不同类型的黏弹性复合结构中激光激发超声波传播理论进行了长期、系统、深入的研究。作者在江苏大学校长袁寿其研究员的建议下,将课题组自2006年以来对黏弹性复合材料激光超声技术的研究进展进行整理与总结,选择较为成熟的研究成果,同时兼顾该方向国内外最新研究进展撰写此书,以供激光超声、无损检测及复合材料等领域的同行参考。

本书共分七章。第1章讲述激光超声技术、激光激发兰姆波、激光激发瑞利波及激光超声技术检测结构缺陷等方面国内外研究进展。第2章基于平面应变与热弹耦合理论,介绍不同类型结构的时频域波动方程、有限元方程及建模方法、势函数解析解表达式及色散特征方程推导过程,为激光超声研究提供理论基础。第3章讲述单层与多层黏弹性平板中激光激发兰姆波传播特性,介绍激发源参数与结构的力学参数对兰姆波传播特性的影响。第4章讲述黏弹性平板、不同类型的涂层/基底结构及近表面层黏性梯度变化平板中激光激发瑞利波传播特性,介绍激发源参数与结构的力学参数对瑞利波传播特性的影响。第5章讲述单层与多层黏弹性纤维复合平板中激光激发兰姆波传播特性,介绍平板横观各向同性、黏弹性、纤维排列与层数对兰姆波传播特性的影响。第6章讲述激光激发瑞利波与表面缺陷的作用机理,介绍激光激发瑞利波检测结构表面缺陷的位置、深度及倾斜角度的各种机制,分析材料黏性与缺陷宽度对缺陷检测的影响。第7章讲述基于两个或多个恒温热源温度场分布的宽带热声聚焦透镜及热声非对称传输透镜,介绍热源温度、界面空间分布、热源位置、空气衰减、热源温度不对称分布等因素对声聚焦及声非对称传输性能的影响;分析激光辐照移动平板产生的温度场分布,介绍平板移动速度、表面热对流及激光光斑半径等因素对温度场分布的影响。

在撰写本书的过程中,得到作者的三位导师张淑仪院士、袁寿其研究员及许伯强教授的多方面指导与悉心帮助,江苏大学卢殿臣教授、冯军副教授、王善民老师、孙梅教授、李医民教授、张九如副教授、王亚伟教授、韩广才副教授、曹国荣教授、王正岭教授、王纪俊教授、王国余副教授、谢秉川副教授、潘波老师、徐晨光老师及徐桂东老师等也曾给予许多支持与帮助,课题组管义钧老师、葛勇老师、硕士生夏建平与李鹏等也参与了其中部分工作,在此深表谢意。同时非常感谢比利时鲁汶大学 Christ Glorieux 教授,加拿大多伦多大学 Andreas Mandelis 教授,法国波尔多大学 Michel Castaings 教授,法国曼恩大学 Vitalyi Gusev 教授,南京大学刘晓峻教授、刘晓宙教授、徐晓东副教授、张辉副教授及范理副教授,武汉大学刘正猷教授,东南大学丁德胜教授,南京理工大学倪晓武教授、沈中华教授、袁玲副教授及倪辰荫副教授,同济大学钱梦騄教授,苏州大学赖耘教授与王钦华教授,《声学学报》籍顺心副主编等的支持与帮助。

在撰写过程中,作者力求认真严谨,但还存在着不足之处,热忱期待着读者的批评与指正。愿我们共同为激光超声领域的发展尽一份微薄之力。

孙宏祥

2016年9月于江苏大学

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 激光超声技术研究现状	2
1.2 激光激发兰姆波研究现状	2
1.3 激光激发瑞利波研究现状	5
1.4 激光超声技术检测结构缺陷研究现状	8
1.5 本书主要研究工作	9
参考文献	10
第 2 章 激光超声基本理论	19
2.1 平面应变理论	19
2.1.1 固体平板	19
2.1.2 多层固体	23
2.1.3 流固耦合结构	24
2.2 热弹耦合理论	25
2.2.1 固体平板	25
2.2.2 流体介质	26
2.3 有限元数值方法	27
2.3.1 有限元法简介	27
2.3.2 平面应变有限元形式	28
2.3.3 热弹耦合有限元形式	30
2.3.4 有限元模拟稳定性和精度	32
2.3.5 吸收区域	33
2.3.6 激光激发源	36
2.4 有限元数值求解	39
2.4.1 平面应变有限元求解	39
2.4.2 热弹耦合有限元求解	42
2.5 热弹耦合解析求解	45
2.5.1 热弹波动方程势函数形式	45
2.5.2 固体平板势函数解析求解	47

2.5.3	流固半无限大空间结构势函数解析求解	50
2.5.4	色散与衰减曲线	55
	参考文献	56
第3章	激光激发兰姆波传播特性	59
3.1	单层固体平板中兰姆波传播特性	59
3.1.1	平面应变三维模型	59
3.1.2	平面应变二维模型	62
3.1.3	热弹耦合二维模型	65
3.2	多层胶黏平板中兰姆波传播特性	74
3.2.1	三层胶黏平板	74
3.2.2	双层胶黏平板	79
	参考文献	80
第4章	激光激发瑞利波传播特性	81
4.1	单层固体平板中瑞利波传播特性	81
4.1.1	平面应变二维模型	81
4.1.2	热弹耦合二维模型	84
4.2	涂层/基底结构中瑞利波传播特性	89
4.2.1	黏弹性涂层/基底结构	89
4.2.2	透明胶黏涂层/基底结构	96
4.2.3	浸没在流体中涂层/基底结构	110
4.3	近表面层黏性梯度变化固体平板中瑞利波传播特性	114
	参考文献	120
第5章	纤维复合材料中激光激发超声波传播特性	122
5.1	单层纤维复合平板中兰姆波传播特性	122
5.1.1	平面应变三维模型	122
5.1.2	平面应变二维模型	124
5.2	多层纤维复合平板中兰姆波传播特性	130
5.3	纤维复合材料涂层/基底结构中瑞利波传播特性	136
	参考文献	140
第6章	激光超声技术检测结构表面微缺陷	142
6.1	激光激发瑞利波与结构表面裂痕作用机理	142
6.2	激光激发瑞利波检测黏弹性平板表面缺陷深度	148
6.3	激光激发瑞利波检测结构表面倾斜缺陷	154
6.4	激光激发体波检测结构内部微缺陷	161
	参考文献	163

第 7 章 基于温度场分布对超声波传播路径控制.....	164
7.1 热声控制基本理论	164
7.2 基于两个恒温热源温度场分布的声聚焦效应	165
7.3 基于多个恒温热源温度场分布的声聚焦效应	180
7.4 基于多个恒温热源温度场分布的声非对称传输效应	197
7.5 激光辐照移动平板产生的温度场分布	205
参考文献.....	210

第 1 章 绪 论

1962 年, White^[1] 和 Akaryan 等^[2] 在首次试验上探测到脉冲激光激发超声波。自此以后, 激光超声技术蓬勃发展起来, 逐渐形成一门新兴的学科——激光超声学。激光超声学主要研究激光超声激发机理、激光超声在介质中的传播特性、激光超声接收机理及激光超声技术应用。与传统的超声技术相比, 激光超声技术具有非接触, 可远距离操作, 易实现扫描, 尤其可以在高温、高压及不良环境条件下实现检测及在线检测微缺陷等优点^[3,4]。因此, 激光超声技术得到越来越多的关注, 并广泛应用到物理、化学、微电子学、表面科学、材料科学、环境科学及生物医学等领域^[5]。

随着新技术与新工艺的发展, 各种新型高性能聚合物及聚合物基复合材料不断出现, 并广泛应用到半导体器件、平板显示器、太阳能电池、微机电系统及航空航天等工业领域。复合材料具有黏弹性及各向异性, 黏弹性是指材料发生形变时, 表现出弹性储能及能量耗散的特性, 导致超声波在传播过程中发生衰减^[6,7], 极大阻碍了超声波对黏弹性复合材料的性能评价及无损检测。因此, 研究黏弹性复合材料中超声波的传播特性具有十分重要的意义。目前, 激光超声技术在黏弹性复合材料工业检测中的应用较少, 这主要由于黏弹性复合材料中激光激发超声波不再是弹性兰姆波与瑞利波, 而是黏弹性兰姆波与瑞利波。因此, 研究黏弹性复合材料中激光激发超声波的传播特性, 可以有效推进激光超声技术在黏弹性复合材料工业检测中的应用。

在激光超声领域, 针对超声波的激光激发与检测问题, 已提出多种物理模型, 如点源模型^[8]、面内正交力偶模型^[9]及表面中心扩展源模型^[10]等。在激光超声的理论研究方面, 主要有双积分变换法^[11]、格林函数法^[10]、本征函数展开法^[12,13]等解析方法及有限差分法^[14]、有限元法^[15~18]等数值方法。其中, 有限元方法建立在严密的数学理论基础上, 能够处理复杂的几何结构, 对各种物理问题具有可应用性, 适合计算机实现的高效性等特点。有限元频域模型^[19,20]对时域波动方程进行傅里叶变换, 转化为频域波动方程进行求解, 不仅能够灵活处理各向异性材料等复杂结构中超声波的传播问题, 还能够有效处理黏弹性复合材料中超声波的衰减问题, 这些理论方法为发展激光超声技术提供了可行性思路及理论基础。经过近六十年的摸索, 激光超声领域已取得了丰硕的成果, 但是对黏弹性复合材料中激光超声技术的探索仍存在一定局限。因此, 本书开展激光超声技术在黏弹性复合材料力学性能的评估及结构缺陷的无损检测等方面研究工作。

1.1 激光超声技术研究现状

自 20 世纪 60 年代激光超声被提出以来,该领域就一直蓬勃发展,80 年代后,国内外研究学者开始关注激光超声技术在无损检测领域的应用,并展开大量的理论与试验研究。激光超声领域主要经历以下三个发展阶段:

第一阶段,White^[1]与 Ready^[21]提出一维激光超声的模型,考虑激光辐照区域均匀分布,基于一维热传导方程及弹性波动方程研究激光辐照能量密度与热弹性位移之间的关系。该模型没有考虑激光热源的空间与时间分布,且忽略材料的切变模量,无法得到剪切波和瑞利波的波形。

第二阶段,Scruby 等^[9]基于格林函数提出表面应力偶极子点源模型,得到与试验结果一致的位移波形。该模型将激光辐照区域看成一个点,激光辐照引起结构的体积突然变化,从而将激光激发源看成作用在结构表面三个相互正交的偶极子应力。Rose^[10]基于双积分变换法提出半无限大空间点源模型,忽略热扩散的过程,将脉冲激光激发看成表面中心扩展力源,能有效计算激光激发超声波的传播特性,且与试验结果一致,该模型在高度聚焦光源与短脉冲激光的情况下尤为适用。然而,点源模型忽略热扩散过程,无法分析激光的辐照空间与时间分布对超声波频率的影响,也无法解释试验结果中的前驱小波。

第三阶段,Doyle^[22]考虑热扩散效应,理论研究激光激发超声波波形。将激光辐照产生的热扩散等效为结构表面体膨胀应力,数值模拟得到对心波形中的前驱小波,并分析脉冲激光上升时间对前驱小波的影响。McDonald^[11]基于经典的热弹性理论和双曲型热传导方程,分析激光参数对激光激发对心波形的影响。Wu 等^[12]采用本征函数展开法,基于经典的热传导方程计算脉冲激光热弹激励超声波的波形,提出前驱小波是由激光能量沉积形成的体力源与结构表面的热弹位移模式形成的表面力源共同作用产生,该模型有效地揭示温度场、应力场及位移场之间的关系,理论与试验波形吻合很好,为进一步完善激光超声科学奠定良好的基础。

近年来,随着新型材料及微结构器件的不断出现与激光超声技术飞速发展,皮秒与飞秒脉冲激光与结构热作用的过程已无法用经典热传导方程描述,有学者提出双温热扩散模型^[23],将结构中电子与晶格看成两个温度耦合的子系统,这些成果进一步拓展激光超声的研究范围。

1.2 激光激发兰姆波研究现状

兰姆波是固体平板中传播的一种弹性波,如图 1.1 所示。20 世纪初,Lamb^[24]最早研究这种特殊的弹性波。近年来,关于兰姆波的理论与试验研究已取得了很

大的发展,特别是在板状结构的无损检测中有广泛的应用前景,如板状结构的厚度、弹性模量及缺陷检测等。

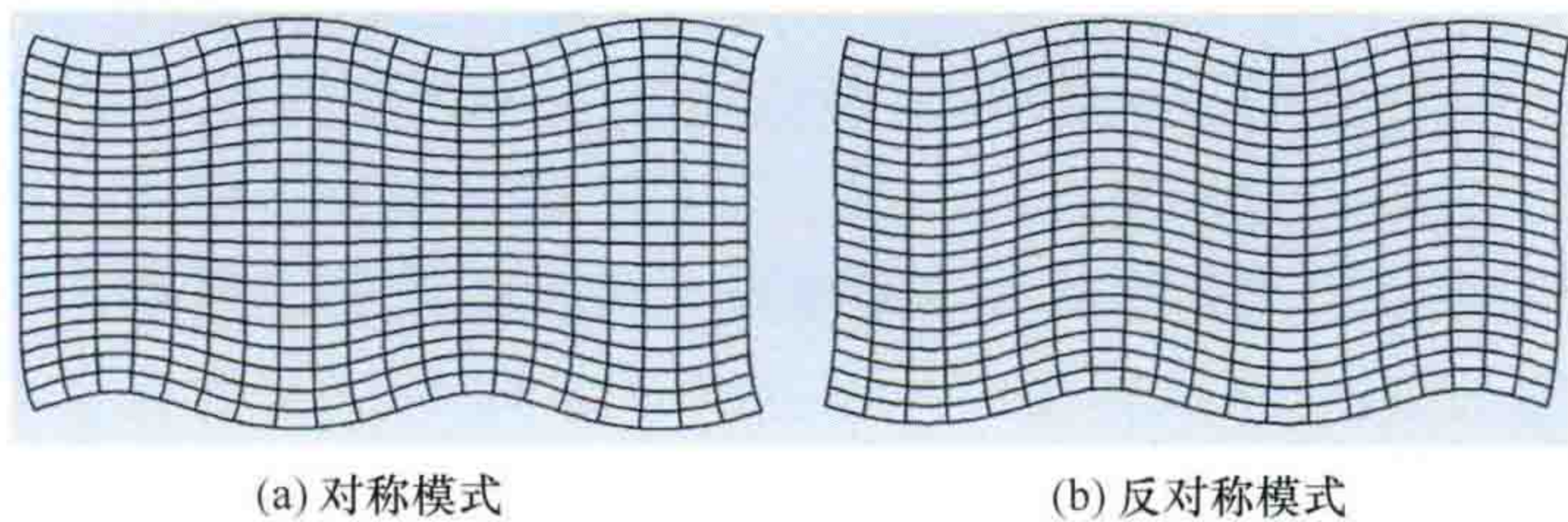


图 1.1 两种兰姆波模式

激光激发的兰姆波能量集中在结构的上下表面内,具有非接触式激发、传输能耗低、能够远距离传输、多模式与宽频带等优点,这使得激光激发兰姆波在板状结构的性能评价及缺陷无损检测方面受到广泛关注。在此领域,Dewhurst 等^[25]采用激光干涉仪检测脉冲激光在厚度为 $30\mu\text{m}$ 金属薄膜中激发产生的对称模式与反对称模式兰姆波(S_0 模与 A_0 模),通过分析兰姆波的传播特性测量金属薄膜的厚度,精度可达 2% ;Hutchins 等^[26]利用脉冲激光在玻璃平板的表面激发产生兰姆波 S_0 模与 A_0 模,通过分析 A_0 模的色散特征与 S_0 模的传播速度得到薄片的厚度及弹性模量;Spicer 等^[27]分析激光激发兰姆波的理论及试验波形,反演各向同性板的弹性模量及厚度;Bobbin 等^[28]利用脉冲激光激发厚度为 $1\sim 25\mu\text{m}$ 金属薄膜产生的兰姆波,通过干涉法检测兰姆波,进而分析 A_0 模的特征,得到金属薄膜的弹性模量;Johnson 等^[29]采用激光干涉仪检测复印纸中激光激发兰姆波信号,研究激光的能量密度及光斑大小等参数对 S_0 模与 A_0 模传播特性的影响;Ghosh 等^[30]在理论与试验上研究激光激发兰姆波检测板状结构的内部缺陷,结果表明不同模式的兰姆波对结构缺陷的敏感度不同;Kundu 等^[31]利用激光激发泄漏兰姆波检测结构接触面的缺陷,试验与理论结果吻合很好;Heller 等^[32]研究含缺陷的粘接结构中兰姆波的色散曲线,分析粘接层性质的变化;Hayashi 等^[33]研究激光激发兰姆波多个模式,从兰姆波模式中提取出有用的信息;Valle 等^[34]利用激光激发兰姆波检测铝板的缺陷,基于谱图法对兰姆波进行分析得到缺陷特征;Silva 等^[35]利用干涉仪检测含缺陷的铝材中激光激发的兰姆波,并基于小波变换时频分析法对兰姆波进行分析,通过 S_1 模的色散特征,得到铝材中的缺陷特征;Gao 等^[36]利用脉冲激光在薄铜板中激发兰姆波,通过二维傅里叶变换得到兰姆波的色散曲线,将其与理论计算的色散曲线进行拟合,得到薄铜板的厚度、体波波速及弹性模量;Zhang 等^[37]利用激光激发兰姆波测量复印纸不同方向的弹性模量;Clorennec 等^[38]研究兰姆波 S_1 模与 A_2 模,得到泊松比与频厚积关系曲线,并基于共振频率得到样品的泊松比与体波速度;Lefevre 等^[39]利用脉冲激光在薄铜板中激发产生

多模式兰姆波,基于神经网络算法进行二维傅里叶变换得到兰姆波色散曲线,并与理论计算的色散曲线对比,得到薄铜板厚度及弹性模量;Wu等^[40]利用线源脉冲激光在结构中激发产生的窄带兰姆波,分析 S_0 模与 A_0 模的反射系数,检测得到样品结构的缺陷大小;Dixon等^[41]采用扫描激光源在金属锡板中激发产生兰姆波,对锡板中的缺陷进行检测;Maslov等^[42]利用激光激发兰姆波检测复合平板的缺陷,结果表明缺陷周围的兰姆波清晰度与兰姆波的模式及频率密切相关;Pierce等^[43]利用激光分别在碳纤维、玻璃纤维及碳纤维/玻璃纤维的混合平板中激发产生兰姆波,结果表明兰姆波的模式与复合材料密切相关;Drinkwater等^[44]研究一面有强衰减橡胶负载时,玻璃平板中 S_0 模和 A_0 模的传播特性;Simonetti^[45]根据线性黏弹性理论,研究黏弹性薄膜涂层/金属基底系统中兰姆波衰减与色散特征;Hosten等^[46]提出兰姆波有限元数值模型,检测各向异性黏弹性材料的结构缺陷;Xu等^[47]研究浸没在不同液体的复合平板中兰姆波的速度、衰减及传播方向,并在试验上进行验证。

国内学者针对激光激发兰姆波进行系统地研究,Zhu等^[48]从弹性波传播理论出发,对有黏滞液体负载时兰姆波微传感进行系统研究;Wu等^[49]在试验上测量激光激发的兰姆波波形,得到单向纤维增强复合平板的弹性模量;王小民等^[50]利用兰姆波及泄漏兰姆波对板状复合材料进行无损检测及评估,对各向异性材料的检测具有较高的灵敏度和可重复性;Cheng等^[12,51]基于本征函数扩展方法,研究板状结构中激光激发兰姆波的传播特性,得到板状结构弹性模量与兰姆波之间的关系;Du等^[52]采用双层正交模式展开法,研究粘接板状结构中激光激发兰姆波的传播特性,研究表明该方法对粘接板状结构性能评估方面具有一定的可靠性;章肖融^[53]利用激光激发兰姆波测量铜基碳复合材料及纳米三氧化二铝复合材料弹性模量,同时介绍激光超声评价复合材料的方法;刘镇清等^[54]对平板中兰姆波模式进行试验研究;倪晓武等^[55]采用光纤耦合反射式光束偏转方法对金属平板中兰姆波传播特性进行试验检测,将试验结果与有限元数值结果进行比较分析;赵艳等^[56]在理论与试验上研究激光在气-固及流-固界面激发泄漏兰姆波,分析泄漏兰姆波的相位与频谱,研究泄漏兰姆波的色散与衰减特性;袁玲等^[57,58]研究弹性性质连续变化功能梯度材料中激光激发兰姆波的传播特性,讨论弹性模量及分布函数对兰姆波传播特性的影响;许伯强等^[59,60]研究各向异性复合平板中激光激发兰姆波的瞬态波形及色散曲线,结果表明,复合平板的各向异性与兰姆波的色散特征密切相关;Ding等^[61,62]研究准周期性复合结构板中激光兰姆波的带隙特性,并对兰姆波带隙进行试验检测,为兰姆波功能器件设计与开发提供理论基础。

在上述文献中,关于激光激发兰姆波的研究均局限于弹性材料,或忽略材料的黏性。然而,材料的黏性会引起超声波能量耗散与衰减。在处理黏弹性复合材料激光超声问题时,不能忽略材料的黏性。现阶段,对激光激发黏弹性兰姆波的研究

还十分欠缺。因此,黏弹性复合材料中激光激发兰姆波研究已成为当前亟需开展的重要内容。

1.3 激光激发瑞利波研究现状

1885 年,英国物理学家 Rayleigh 最早提出瑞利波,它由结构形变产生的内部应力与应变形成^[63]。由于结构表面的应力自由,固体结构表面的瑞利波振幅与波形恒定,沿结构的表面传播,而在结构的深度方向,瑞利波的振幅迅速衰减。瑞利波是由纵波和横波相互耦合产生,可看作沿表面作椭圆偏振的超声波,如图 1.2 所示^[64,65],瑞利波的传播速度比横波慢 5%~13%。

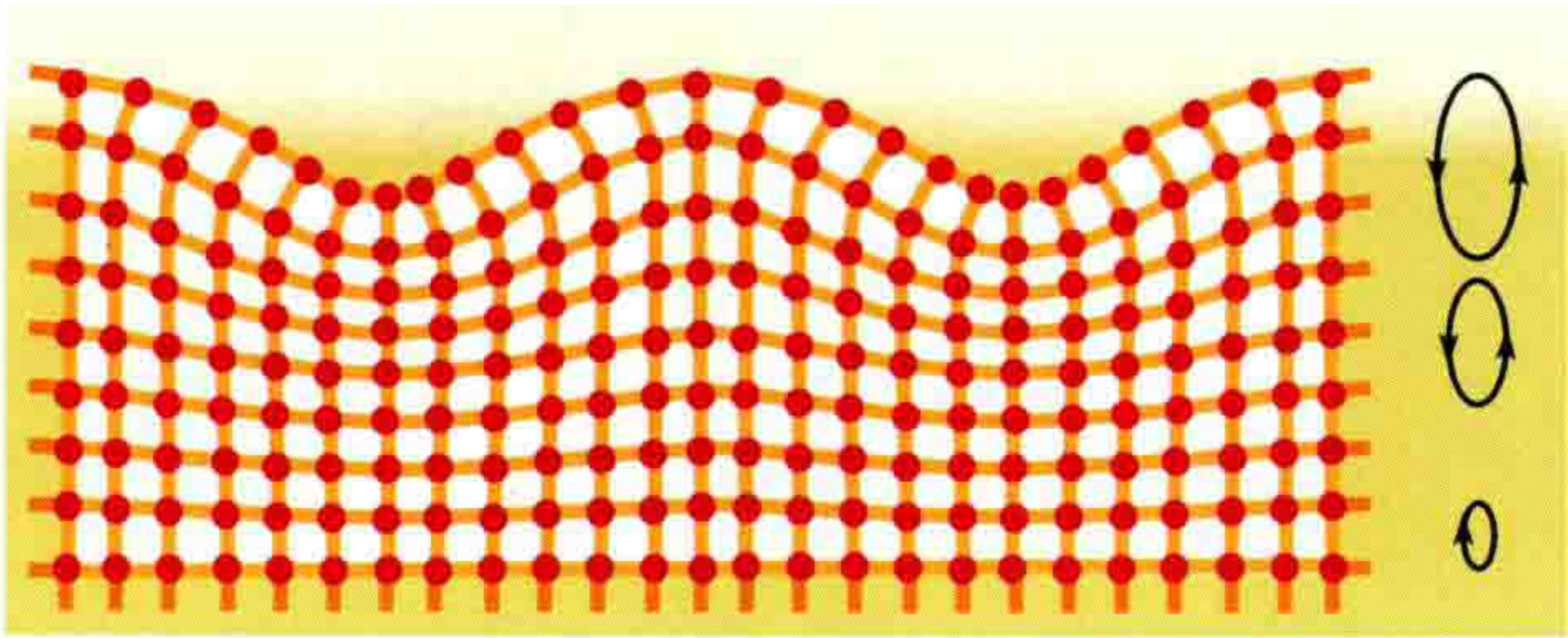


图 1.2 瑞利波

瑞利波可用来检测结构的表面缺陷及亚表面缺陷,评价层状复合材料的力学性能及涂层材料的厚度。瑞利波沿着应力自由的固体表面传播时,具有恒定的振幅及波形特征,如遇到结构缺陷,瑞利波的一部分能量发生衰减,从而引起瑞利波的频率与波形发生改变。因此,利用瑞利波检测结构缺陷非常适合。激光激发瑞利波具有激发效率高、衰减小及易于检测等优点,可以实现结构表面缺陷与亚表面缺陷的无损检测。

图 1.3 显示了几种不同类型结构的瑞利波与界面波^[65]。其中,图 1.3(a)为各向同性半无限大空间固体表面的瑞利波(红实线),瑞利波的振幅随着深度呈指数衰减,当深度达到几个波长时,振幅衰减为零。质点运动可以分解为两个互相垂直的分量,一个沿表面波传播方向运动,另一个沿垂直自由表面方向运动,即在垂直表面的平面内运动,瑞利波是非色散的,具有恒定的振幅及波形特征。而广义瑞利波(红虚线)在各向异性的固体结构表面传播,传播速度依赖于传播方向,一般情况下,能量传播速度与相速度的方向不一致,只有在特定方向一致。在涂层/基底结构中,如图 1.3(b)所示,近表面层瑞利波的传播特性与涂层的力学性质相关,随着深度加深,瑞利波能量进入基底结构,振幅随着深度呈指数衰减,且传播特性与基底的性质密切相关。此外,瑞利波可以沿着固-固分界面传播,称为斯通利波,如图 1.3(c)所示,斯通利波约束在固体分界面传播,进入固体内部呈指数规律衰减。在

固-液分界面传播的界面波为 Scholte 波,即沿着液体与固体分界面传播的超声波,如图 1.3(d)所示。此外,在固-液分界面,还存在泄漏瑞利波,其能量逐渐耗散到液体中。

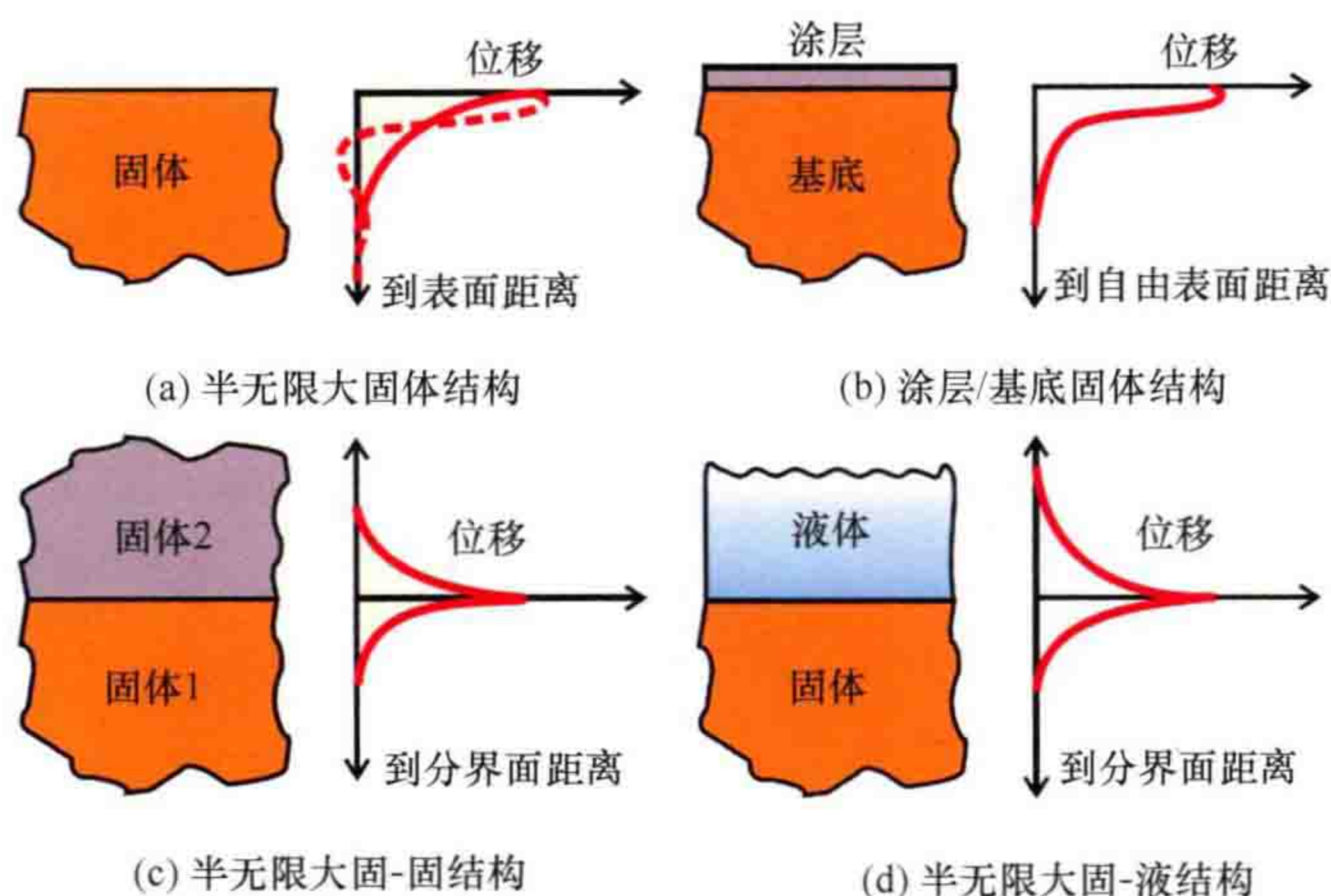


图 1.3 几种不同类型结构的瑞利波与界面波

近年来,国内外研究学者致力于开展激光激发瑞利波的研究。如 Aussel 等^[66]研究圆柱形铝材中激光激发纵波、横波、头波及瑞利波,结果表明瑞利波不随着激光能量的变化而改变;Scala 等^[67]研究高斯分布的脉冲激光在各向同性铝材表面激发瑞利波的时域波形与频谱,分析瑞利波与激光光斑的关系;Coufal 等^[68,69]利用激光激发瑞利波测量硅、铝、钢、铜及单晶硅等材料的相速度;Doyle 等^[70]忽略远场声学衍射,研究脉冲线源激光激发近场瑞利波的传播特性;Schneider 等^[71]利用激光激发瑞利波测量金刚石膜的弹性模量、密度及厚度;Royer 等^[72,73]研究脉冲线源激光激发近场及远场瑞利波,并用解析法得到瑞利波位移的封闭形式解;Temsamani 等^[74]利用激光激发瑞利波评价材料的力学性能;Zerwer 等^[75]研究瑞利波与表面缺陷相互作用及能量转换的关系;Hassan 等^[76]研究瑞利波与缺陷的相互作用机理,当缺陷深度与瑞利波波长接近时,利用瑞利波的反射系数可检测结构缺陷的参数;Fomitchov 等^[77]通过扫描激光源激发瑞利波技术检测复合材料的结构缺陷;Murray 等^[78]利用激光激发瑞利波研究薄膜/基底结构中薄膜的厚度与瑞利波的关系;Pan 等^[79]研究脉冲线源激光在圆柱形金属中激发瑞利波的传播特性;Hess 等^[80]研究一维与二维楔形结构中激光激发线性与非线性表面波的传播特性及应用。

国内同济大学胡文祥等^[81]分别在理论与试验上研究脉冲线源激光在半无限大空间铝材表面激发的位移场,采用拉普拉斯变换与汉克变换将弹性波动方程变换到频率-波数坐标系进行求解,通过逆变换获得位移场积分表达式,并得到表面

位移场解析解,与试验结果比较,验证数值结果的正确性;孟振庭^[82]研究梯形脉冲激光辐照半无限大固体结构激发超声脉冲信号传播特性;高会栋等^[83]利用三维轴对称模型,理论研究脉冲激光脉冲时间宽度与光斑半径对层状结构中激光激发瑞利波传播特性的影响;韩庆邦等^[84]采用双积分变换法推导黏弹瑞利波的特征方程及位移表达式,研究激光激发黏弹瑞利波衰减与色散特征;Xu等^[18,85]建立有限元数值模型,模拟金属平板及各向异性复合平板中激光激发瑞利波的传播特性;袁玲等^[57,86~88]研究近表面层弹性性质连续变化的弹性平板表面激光激发瑞利波的传播特性,分析近表面层弹性性质与厚度对瑞利波传播特性的影响,并将其应用到牙齿的无损检测领域。

当半无限大固体结构表面覆盖涂层材料形成涂层/基底结构时,结构表面同样出现瑞利波。然而,由于涂层存在,瑞利波是色散的,即瑞利波相速度与频率相关。与涂层的厚度相比,波长较长的瑞利波能量进入基底,其相速度与基底材料的瑞利波速度接近;而波长较短的瑞利波主要在涂层中传播,相速度与涂层材料的瑞利波速度接近。当瑞利波中高频信号传播速度比低频信号传播速度快,即软涂层/硬基底系统,瑞利波表现为正常色散特征;相反,在硬涂层/软基底系统中,瑞利波表现为反常色散特征。涂层/基底结构中瑞利波色散波形包含涂层与基底材料的力学性能,可以用来检测涂层及基底材料的力学性能及界面的粘接质量。Neubrand等^[89]首次利用激光激发瑞利波研究金属或半导体涂层的力学性能,对时域位移进行傅里叶变换得到瑞利波相速度与频率之间的关系,进而利用最小二乘法拟合得到材料的力学参数;Knight等^[90]利用激光激发瑞利波分析金属钽与铁分别在焊接或环氧聚树脂粘接两种情况下粘接强度的差异;Hernandez等^[91]研究纳米颗粒涂层/基底系统中激光激发瑞利波测定涂层力学性能与残余应力;Schuessler等^[92]利用激光激发瑞利波测量多晶不锈钢材料的线性与非线性弹性模量。

国内学者在该领域也开展大量的研究工作,Wu等^[93,94]研究粘接层厚度对瑞利波的波形与色散特征的影响,采用激光激发瑞利波检测铜/环氧树脂/铝基底结构中的粘接层厚度及弹性模量;陈晓等^[95]研究弱界面固体涂层中类瑞利波的传播特性,分析刚性粘接界面、滑移粘接界面及弱界面三种情况下类瑞利波的色散特征,进而对涂层结构进行检测与评估;沈中华等^[96]采用光穿透与热扩散模型对涂层/基底结构中激光激发瑞利波进行系统研究,讨论涂层材料的光穿透系数,热扩散系数及涂层与基底阻抗比对激光激发瑞利波的影响;王培吉等^[97]采用压电光声技术检测非均匀材料热物理性质;徐晓东等^[98]利用激光激发瑞利波及光差分检测技术研究基底表面涂层材料的力学特性,得到涂层材料弹性模量、密度及厚度等力学参数;Xu等^[99]基于热弹耦合理论,研究金属涂层/基底结构中激光激发瑞利波的传播特性,得到瑞利波正常与反常的色散特征。

到目前为止,关于激光激发瑞利波均局限于弹性材料层状结构或忽略复合层

状材料的黏性,激光激发黏弹性瑞利波的研究还十分欠缺。在黏弹性复合材料中,激光激发瑞利波的能量会发生耗散,表现为衰减与频散。因此,黏弹性复合材料中激光激发瑞利波已成为当前亟需开展的研究内容。

1.4 激光超声技术检测结构缺陷研究现状

工件的结构表面应力突变会产生裂纹,裂纹初始尺寸较小,随着裂纹底部集中应力的作用,表面裂纹会向结构内部生长,并最终导致整个工件毁坏。很多工件会随着使用时间增长出现不同程度的裂纹缺陷,如果不能及时检测裂纹缺陷,裂纹就会不断扩展,导致整个工件报废。结构表面的微裂纹是缺陷发展的初期阶段,为了延长机械设备及零部件的使用寿命,需要对结构表面、亚表面以及内部的微缺陷进行实时检测,及时消除安全隐患。

超声无损检测利用超声波传播过程中遇到结构缺陷发生的透射、反射及折射现象,对超声波进行分析,获取缺陷的信息。常用的超声检测方法有透射法、反射法及共振法。与其他方法相比,超声检测方法具有以下优点:超声波传播引起的应力远低于结构弹性极限,不会造成结构的二次损伤;可以检测结构的缺陷尺寸、位置及取向等信息;超声检测的设备轻,便于携带,对人体及环境无害;针对不同检测对象,可选择不同模式的超声波,如纵波、横波及瑞利波等。超声波与结构缺陷相互作用产生的回波幅值、到达时间、衰减、声速及阻抗等特性包含相关的缺陷信息。Viktorov^[100]在试验上检测含缺陷铝板表面瑞利波,提出通过计算瑞利波反射与透射系数检测裂纹深度;Tittmann等^[101]观测瑞利波在表面裂纹处的反射回波,利用回波信号的反射系数与反射角,确定表面裂纹的尺寸及形状;Kawasaki等^[102]采用边界扰动法模拟瑞利波在表面裂纹处发生反射及透射的过程;Portz等^[103]研究瑞利波在平板侧面发生反射、透射及模式转换的过程;Hirao等^[104]利用压电换能器激发及接收超声波,研究超声波的反射及透射系数与裂纹深度的关系;Crane等^[105]研究低频弹性波与裂纹之间的散射过程,利用反射系数定量地表征裂纹特征对超声波的影响;Bernstein等^[106]观测瑞利波与裂纹之间的散射过程,对瑞利波进行傅里叶变换,利用瑞利波频谱表征裂纹特征。

激光激发瑞利波对结构表面缺陷与亚表面缺陷的敏感度很高,因此,激光激发瑞利波广泛应用到裂纹检测中。目前,常见激光超声检测方法有脉冲回波法与投捕法^[107,108]。在检测中,脉冲激光远离结构裂纹,通过检测分析瑞利波的传播特性表征裂纹的特征。然而,由于瑞利波的波长限制,与入射波相比,反射波的能量十分微弱,此外,脉冲激光激发点、检测点连线与裂纹取向垂直,从而造成裂纹检测较为困难。

2000年,Kromine等^[109]提出基于扫描激光源技术的裂纹检测方法。它改变