

学校编码: 10384

学号: 22320141151381

密级_____

厦门大学

硕士学位论文

多层碳纤维复合板超声导波无损检测

Nondestructive inspection of carbon fiber reinforced plastic
(CFRP) laminates using ultrasonic guided wave

吴秉正

指导教师姓名: 汤立国 教授

专业名称: 海洋物理

论文提交日期: 2017 年 5 月

论文答辩时间: 2017 年 5 月

2017 年 5 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人提交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(CFRP蒙皮/聚合物泡沫夹芯复合板瞬态响应及其导波无损检测机理研究)课题(组)的研究成果,获得

(汤立国) 课题(组)经费或实验室的资助,在
() 实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

碳纤维增强复合材料因其优良的物理性质，在现代工业，尤其是航空及船舶工业中得到了广泛的应用。该材料具有密度小、高比强、高比模、抗腐蚀、热膨胀系数小等一系列优点，被广泛用于制造飞机机身、机翼、发动机舱等结构。多层碳纤维增强复合板在生产或者使用过程中，可能会出现开裂，脱层和脱粘等现象，若不及时地检测出这些缺陷，将可能导致严重后果。目前，对多层碳纤维增强复合材料的检测方法主要有目视检查法、经典 C 扫描法，非线性超声法，光栅检测法，射线成像法等。

超声导波无损检测法近年来越来越受到重视。该方法可以同时是一片区域进行检测，因此效率高且实施代价低。但是，与各向同性板中导波传播相比，碳纤维增强复合板中导波传播更为复杂，因为复合板具有强各向异性。本研究首先对多层碳纤维增强复合板中的导波传播特性进行理论推导，并对频散方程进行数值求解，在此基础上，对不同层数不同铺层方向复合板导波传播频散特性进行了详细分析。之后，利用有限元法对多层碳纤维增强复合板中导波与缺陷的相互作用机理进行探讨，研究不同因素对导波激发和传播的影响，确立导波模式的选取与激发。

本论文结构如下：

第一章为绪论，综述本文研究背景和意义，介绍国内外多层碳纤维增强复合材料超声导波无损检测的研究现状。

第二章介绍多层碳纤维增强复合板中导波传播理论，导出多层碳纤维增强复合板中导波传播频散方程，并对其进行数值求解得到了多层碳纤维增强复合板导波传播频散曲线。

第三章是利用有限元方法，模拟导波在多层碳纤维增强复合板中的激发与传播，研究其与板内缺陷的相互作用，分析复合板层数变化、缺陷种类、缺陷尺寸等对导波散射的影响。

第四章是总结和展望。总结了本文的研究内容和成果，并对以后的工作提出

改进方案和建议。

关键词：弹性导波；复合材料；无损检测；频散特性

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates are widely utilized in modern aircraft and ship industries due to their excellent physical properties. They have the advantages of low density, high strength rate, high modulus rate, corrosion resistance, low coefficient of thermal expansion. Therefore, they are often used to manufacture the fuselage, wing and nacelle of an airplane. Note that the defects caused by fracture and interfacial debonding may occur during the manufacture of laminates or they are in service. The defects may lead to serious results if they could not be detected in time. The traditional methods for CFRP laminates include visual testing, C-scan testing, nonlinear ultrasonic testing, grating testing, X-ray imaging, and so on.

In recent years, the technique of ultrasonic guide waves for CFRP laminates has received a lot of interests. This technique has the advantages of high efficiency and low cost. It can inspect a large area of a laminate simultaneously. However, compared with the propagation of guided waves in a homogeneous plate, that of guided waves in a CFRP laminate is far more complex because of the strong anisotropy of the laminate. In this study, the dispersion equation of guided waves in the CFRP laminate is derived by using the technique of partial waves. Then the equation is numerically evaluated. Moreover, the dispersion characteristics of guided waves in the laminates with different plies and ply-orientations are investigated. The interaction between the guided wave and different defects in the laminate are simulated by the finite element method (FEM). The influence of kinds of factors on the guided waves is studied based on the simulation and the mode used in the section is determined.

The contents of this dissertation are arranged as the following.

Chapter I is the introduction of the background of this dissertation. The progress about the nondestructive inspection of CFRP laminates is introduced.

Chapter II introduces the theory on the propagation of guided waves in CFRP laminates. The dispersion equation of guided waves in CFRP laminates is derived. In addition, the dispersion curves of the guided wave in CFRP laminates are obtained by

calculating the dispersion equation.

In chapter III, the excitation and propagation of guided waves in CFRP laminates are simulated by the finite element method (FEM). The interaction between guided waves and the defects in CFRP laminates is investigated. The influence of the factors such as the ply number, the defect types and defect sizes on the scattering of the guided waves is studied.

Chapter IV is conclusions and prospects. The contents and achievements of this dissertation are summarized. The plans of our future work are presented.

Key words: elastic guided wave; CFRP laminates; nondestructive inspection; dispersion

目 录

摘 要.....	I
目 录.....	V
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 超声导波无损检测技术研究现状.....	1
1.3 论文的主要工作及内容安排.....	3
第二章 多层碳纤维复合板中导波传播理论	5
2.1 多层碳纤维增强复合板中导波传播基本理论	5
2.2 多层碳纤维增强复合板中导波传播的频散特性.....	12
2.3 频散方程的理论验证	21
2.3.1 时频分析理论简介	21
2.3.2 时频分析结果	22
第三章 碳纤维复合板中导波与缺陷的相互作用模拟.....	27
3.1 有限元显式算法简介	27
3.2 五层碳纤维增强复合板中导波与缺陷相互作用模拟	29
3.3 十层碳纤维增强复合板中导波与缺陷相互作用模拟	39
3.3.1 铺层方向为{45/-45/0/90/0}s 的十层碳纤维增强复合板有限元模拟结果及分析	41
3.3.2 铺层方向为{0/90}s 的十层碳纤维增强复合板有限元模拟结果及分析	48
3.4 本章总结	49
第四章 总结与展望	51
参考文献.....	53
致 谢.....	57

附录 频散方程各元素表达式..... 59

厦门大学博硕士论文摘要库

Table of Contents

Abstract	III
Table of contents	VII
Chapter I Introduction	1
1.1 Background and significance	1
1.2 Researches on ultrasonic guided wave NDT	1
1.3 Main contents of this dissertation	3
Chapter II The Theory of guided waves in CFRP laminates	5
2.1 Guided waves in carbon fiber reinforced plastics laminates	5
2.2 Dispersion characteristic of guided waves in CFRP laminates	12
2.3 Verification of the dispersion equation	21
2.3.1 Brief introduction of time-frequency analysis	21
2.3.2 Result of time-frequency analysis	22
Chapter III Interaction between guided waves and defects in CFRP laminates	27
3.1 Brief Introduction of dynamic explicit	27
3.2 Guided waves in 5-ply CFRP laminates with defects	29
3.3 Guided waves in 10-ply CFRP laminates with defects	39
3.3.1 Simulation results and analysis of 10-ply [+45/-45/0/90/0] _s CFRP laminates	41
3.3.2 Simulation results and analysis of 10-ply [0/90] _s CFRP laminates	48
3.4 Summarization	49
Chapter IV Conclusions and prospects	51
Reference	53
Acknowledgement	57
Appendix Element Expressions of Dispersion Equation	59

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

碳纤维增强复合材料（CFRP）具有许多优秀的物理性质，如高比强度、高比模量、耐高温、抗蠕变等，因此碳纤维增强复合材料被广泛应用于航空航天、汽车、电子、机械、医疗、海底油田等产业中^[1]。1986年，美国使用 CFRP 占比达 90% 的“旅行者号”飞机完成了绕地球飞行一周的壮举，其所载燃料重量是飞机自重的 4.8 倍，足以体现 CFRP 材料与传统飞机制造材料相比的巨大优势。目前，CFRP 的应用已经深入到了若干制造工业领域，并发挥着愈来愈大的作用。实际使用中往往采用经过 z 向增强的多层碳纤维增强复合材料，其各层纤维取向角一般为 0° 、 90° 及 $\pm 45^\circ$ ^[2]。

多层碳纤维增强复合材料虽然拥有诸多优秀性质，但是其在生产过程中，或在长期使用过程中难免会因冲击、疲劳等原因产生内部缺陷与损伤，如开裂，脱粘和脱层等。这些缺陷如不及时发现，就是潜在的安全隐患，可能会引发重大事故，造成生命财产的损失。所以，研究如何及时有效地检测出多层碳纤维增强复合材料中的缺陷与损伤非常必要^[3]。

目前，碳纤维增强复合材料损伤的检测方法主要有经典 C 扫描法^[4,5]，非线性超声法^[6,7]，光栅检测法^[8,9]，射线成像法^[10]等。本文将围绕碳纤维增强复合板的超声导波检测技术展开研究。超声导波可以同时在大片区域进行损伤探测，其效率远高于传统的超声检测法，潜力巨大^[11-12]。

1.2 超声导波无损检测技术研究现状

弹性导波是指在弹性波导中传播的弹性波。其中，在薄板结构中的导波一般称为 Lamb 导波^[13]。1967 年，Worlton^[14]通过实验证明了 Lamb 导波可用于检测结构损伤。此后，在无损检测方面，Lamb 导波越来越受到重视，其相关研究也不断发展至今。Cho 与 Rose^[15]使用混合边界元法研究了钢板中的弹性导波与钢板表面损伤的相互作用，结果显示导波的散射受到入射波模式、频率，缺陷的形

状和尺寸的影响。Clézio^[16]等使用了模式分解方法研究了单模式导波与铝板中缺陷的相互作用。Su 与 Ye^[17]详细总结了 2009 年以前的基于 Lamb 波的无损检测原理和方法, 并对 Lamb 波在复合材料领域无损检测中的应用做了探讨。

单层碳纤维增强复合材料在理论上可视作横向各向同性介质, 其有 5 个独立的弹性常数^[18]。Abubakar^[19] 最早对单层横向各向同性板的自由振动问题进行研究, Baylis 与 Green^[20]对弯曲波在横向各向板中传播作了详细研究, Solie 与 Auld^[21]提出利用子波技术研究各向异性板中波传播, 即将各向异性板中波分解为三个上行平面波(一个准纵波与两个准横波)和三个下行平面波进行研究。对于多层横向各向同性复合材料中弹性波传播, Nayfeh^[22]在其著作中作了较为全面的阐述。国内, 南京大学声学所王耀俊与许明翔^[23]对层状各向异性媒质的声反射和声透射问题进行了研究, 同济大学刘镇清^[24]研究组将 Nayfeh 的传递矩阵法进行推广, 提出利用全局矩阵法研究层状各向异性复合板中 Lamb 波传播。

超声导波在海底油气管道无损检测领域的研究发展迅速, 并取得了巨大成功^[25-27]。在复合材料的无损检测领域, Bunget^[28]等尝试使用基于超声导波的 IDT 传感器对为铝/碳纤维-丁基橡胶-复合聚合物三层复合材料板中的缺陷进行了检测。Carboni^[29]等使用一种实验统计的方法对较低频导波与碳纤维复合板中的人造缺陷的相互作用进行了研究分析。Murat^[30,31]课题组通过有限元方法研究了碳纤维复合飞机部件中的导波传播并使用激光探头对碳纤维板中的导波进行激发和接收。Rogge 和 Lechey^[32,33]使用局部傅里叶域分析方法对半各向同性碳纤维复合板中的导波进行分析, 检测复合板中损伤的位置和深度。Micheals^[34]使用激光测振仪和二维频率-波数分析方法对玻璃纤维复合板中导波与缺陷的相互作用进行了观测和分析。Lissenden^[35]介绍了一种结合超声导波和相控阵波束成形来检测复合板中的缺陷的方法。一些研究者还尝试利用导波对航空工业中广泛使用的蜂窝状结构复合材料进行无损检测。Hay^[36]等提出了一种确定蜂窝夹层复合板中导波模式, 使用导波对蜂窝夹层板其进行无损检测的方法。Renaldas^[37,38]等利用有限元法探讨了优化使用超声导波探头对蜂窝夹层板进行检测的方法并进行了相关实验。Song^[39]等利用有限元法模拟了超声导波在蜂窝夹层复合材料表面的激发与控制, 探讨了超声导波在蜂窝夹层复合板中的部分规律。对比国外, 国内在导

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库