

Ultrasonic Test Theory and Technology
for Multilayered Bonding Structure

多层结构超声检测 理论与技术

艾春安 李剑 刘瑜 尼涛 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

多层结构超声检测理论与技术

Ultrasonic Test Theory and Technology
for Multilayered Bonding Structure

艾春安 李剑 刘瑜 尼涛 著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书内容涉及多层粘接结构超声传播理论、检测方法、缺陷识别与定征、成像技术等方面的新理论、新方法及新应用实例。系统介绍了多层结构的超声传播模型建模方法,粘接强度超声斜入射检测技术,超声 Lamb 波检测基本理论,基于能量泄漏的 Lamb 波缺陷检测方法,声—超声检测的基本概念、缺陷模态识别的时频分析方法和应力波因子(SWF)构建方法,超声干耦合探头的设计原理、设计准则和设计方法,超声定距发送/接收干耦合检测的原理、方法等。

本书理论联系实际紧密,具有很好的针对性,主要面向材料科学和机械工程专业的博士和硕士研究生,亦可供从事无损检测及相关领域研究人员、工程技术人员和高校教师参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

多层结构超声检测理论与技术/艾春安等著. —北京:国防工业出版社,2014.9
ISBN 978-7-118-09580-7

I. ①多... II. ①艾... III. ①多层结构—超声检测
IV. ①TB553

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 207949 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 24 $\frac{1}{4}$ 字数 482 千字
2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

在航空、航天和军工领域,越来越多地使用新材料和新结构。粘接结构由于具有比强度、比模量高,减震性能优越和工艺简单等特点,已被广泛使用,如固体发动机壳体、喷管、导弹发射筒、弹头天线罩等结构。粘接结构是一种复合结构,一般由胶层和被粘层构成,在其制造和使用过程中有多种因素会影响其粘接质量,从国内外导弹武器的贮存和使用情况看,近 1/3 的事故原因是发动机结构界面脱粘造成的,可以说粘接结构界面是大型结构可靠性中最薄弱的环节之一,必须在制造及使用过程中进行质量监测跟踪和缺陷检测,以便及早发现隐患,保证产品质量。

针对各种装备结构的缺陷检测,现已发展了许多成熟的无损检测技术,如高能 X 射线检测、超声检测、微波检测、红外检测以及激光检测技术等,但遗憾的是,这些技术对间隙甚微(或贴合)平面脱粘缺陷和粘接强度弱化检测并不是很有效。由于粘接结构各层声阻抗间高低差异存在很大的错配度,以及基体材料的高声衰减性和频散特性,致使复合结构多层界面间粘接质量的无损检测现在仍是一个难题。本书针对这一问题,基于作者多年来在复合材料、粘接结构界面缺陷的超声检测理论与技术方面开展的研究工作,系统论述多层粘接结构超声检测理论与技术,深入阐述在超声传播理论、检测方法、缺陷定征、自动化与成像技术等方面的新理论、新方法和实践应用。

本书共分 5 章。第 1 章绪论,简要概述了粘接结构常见的缺陷与特点,以及主要的无损检测方法和技术。第 2 章粘接强度超声斜入射检测技术,从建立多层结构的改进全局矩阵传播模型出发,系统深入地论述了多层粘接结构的超声波斜入射传播规律,界面强度弱化的反射、透射特性以及斜入射检测的基本策略,介绍了基于入射角度、频率组合的界面强度弱化检测应用实例。第 3 章界面脱粘超声 Lamb 波检测技术,从建立单层板及多层板中 Lamb 波特征方程出发,论述了层状介质中 Lamb 波的频散和多模式特性,以及 Lamb 波波结构特点,重点介绍了基于能量泄漏的 Lamb 波脱粘检测方法及其检测应用实例。第 4 章粘接质量声—超声检测技术,论述层状各向异性粘

接结构声—超声检测的共振波模型和导波模型的建立、脱粘缺陷对粘接结构共振波模态和频散特性的影响,重点介绍声—超声检测缺陷模态识别的时频分析方法、应力波因子(SWF)构建方法及其检测应用实例。第5章复合材料干耦合检测技术,概述主要的超声干耦合检测技术及发展,论述超声干耦合探头的设计原理、设计准则和设计方法,重点介绍超声定距发送/接收干耦合检测的基本原理、方法和主要影响因素,复合材料粘接结构缺陷定征方法及其检测应用实例。

本书主要内容均为作者在博士期间本领域研究工作的总结,将本书贡献给大家;是为了将作者在复合材料粘接结构检测技术的研究心得和成果与大家分享,以期盼对我国无损检测技术的研究发展和自主开发起到有益的作用。

本书主要面向材料科学和机械工程专业的硕士、博士研究生和高年级本科生,亦可作为从事无损检测相关专业高级人员理论参考和实践指导。

由于作者水平有限,再加上时间仓促,错误与不当之处在所难免。诚恳地欢迎广大读者批评指正。

编者

2014年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 粘接结构的缺陷与特点	1
1.2 粘接结构主要无损检测方法和技术	3
参考文献	9
第 2 章 粘接强度超声斜入射检测技术	10
2.1 超声斜入射传播理论模型	10
2.1.1 超声波在介质中的传播方程	10
2.1.2 多层结构中超声传播的子波表达式	16
2.1.3 多层结构中超声波传播的改进全局矩阵模型	21
2.1.4 有限探头激发条件下的超声场	26
2.1.5 理论模型的算例验证比较	31
2.2 超声斜入射传播特性仿真与检测策略	33
2.2.1 多层粘接结构物理模型	33
2.2.2 粘接结构超声斜入射传播特性仿真计算	34
2.2.3 超声斜入射时强度弱化的检测策略	65
2.3 界面强度弱化超声斜入射检测	66
2.3.1 金属粘接试件设计	66
2.3.2 金属粘接结构纵波入射反射特性仿真	68
2.3.3 金属粘接试件水浸超声纵波斜入射检测实验	73
2.3.4 复合材料粘接试件设计	80
2.3.5 复合材料粘接结构反射特性仿真	86
2.3.6 复合材料粘接试件水浸超声纵波斜入射检测实验	93
参考文献	100
第 3 章 界面脱粘超声 Lamb 波检测技术	102
3.1 概述	102
3.2 层状介质中 Lamb 波传播理论及特性	103
3.2.1 弹性介质中超声波传播理论分析	103
3.2.2 层状介质中质点位移及应力分析	113

3.2.3	层状介质中 Lamb 波特征方程分析	115
3.2.4	层状介质中 Lamb 波特性研究	120
3.2.5	Lamb 波的激励与接收	125
3.3	基于能量泄漏的 Lamb 波脱粘检测方法	128
3.3.1	超声波的能量	128
3.3.2	刚性边界条件下 Lamb 波能量泄漏模型	130
3.3.3	Lamb 波脱粘检测原理分析	131
3.3.4	Lamb 波脱粘检测灵敏度分析	133
3.4	SRM 壳体 Lamb 波脱粘检测技术仿真	134
3.4.1	SRM 壳体脱粘缺陷 Lamb 波检测方法	134
3.4.2	SRM 壳体 Lamb 波脱粘检测仿真	136
3.4.3	检测参数影响分析及优化策略	138
3.4.4	缺陷的定量分析	142
3.5	脱粘缺陷 Lamb 波检测实验	143
3.5.1	实验设备及试样	143
3.5.2	Lamb 波激励与接收实验	146
3.5.3	Lamb 波基本特性实验	154
3.5.4	SRM 壳体 Lamb 波脱粘检测实验	164
3.6	Lamb 波模式识别技术	175
3.6.1	波速法	175
3.6.2	二维 Fourier 变换法	177
3.6.3	平滑伪 Wigner - Ville 分布法	180
	参考文献	182
第 4 章	粘接质量声—超声检测技术	184
4.1	概述	184
4.1.1	声—超声检测的基本原理	184
4.1.2	声—超声检测技术应用与发展	187
4.2	层状各向异性粘接结构声—超声传播理论	189
4.2.1	层状各向异性粘接结构共振波传播模型	190
4.2.2	脱粘缺陷对超声共振波频率特性的影响	196
4.2.3	层状各向异性粘接结构超声导波传播模型	196
4.2.4	层状各向异性周期结构等效模量	202
4.2.5	脱粘缺陷对层状各向异性粘接结构频散特性的影响	207
4.3	基于时频分析理论的声—超声信号模态识别	217

4.3.1	声—超声信号的预处理方法	217
4.3.2	声—超声信号的时频分析方法	221
4.3.3	直入射声—超声检测信号的模态识别	227
4.3.4	斜入射声—超声检测信号的模态识别	239
4.4	正交纤维复合材料粘接结构直入射声—超声检测	244
4.4.1	脱粘缺陷试件的设计	244
4.4.2	检测参数对结果的影响	245
4.4.3	脱粘缺陷直入射声—超声检测	248
4.4.4	脱粘缺陷直入射声—超声检测特点	264
4.4.5	应力波因子定义及检测效果分析	265
4.4.6	脱粘缺陷直入射声—超声检测策略	272
4.5	正交纤维复合材料粘接结构斜入射声—超声检测研究	273
4.5.1	检测角度的选择	273
4.5.2	脱粘缺陷斜入射声—超声检测	274
4.5.3	脱粘缺陷斜入射声—超声检测特点	291
4.5.4	应力波因子及检测效果分析	292
4.5.5	斜入射声—超声检测策略	298
	参考文献	299
第5章	复合材料干耦合检测技术	302
5.1	概述	302
5.1.1	干耦合检测技术分类	302
5.1.2	定距发送/接收技术的检测原理	306
5.2	干耦合探头的设计原理	307
5.2.1	探头的结构设计	307
5.2.2	弯曲压电振子的瑞利分析方法	308
5.2.3	弯曲压电振子的重要参量的推导	315
5.3	干耦合探头参数优化设计	318
5.3.1	压电振子材料的选择	318
5.3.2	尺寸对压电振子性能的影响	323
5.3.3	压电振子设计参数的优化策略	327
5.3.4	干耦合探头的研制与测试	328
5.4	基于能量泄漏原理的干耦合检测方法	332
5.4.1	干耦合检测实验系统的组成	332
5.4.2	检测信号的预处理方法	334

5.4.3	检测参数对结果的影响	342
5.4.4	SRM 壳体脱粘的干耦合检测实验	351
5.5	声—超声干耦合检测技术与缺陷定征方法	361
5.5.1	波形指数定征方法	361
5.5.2	分形维数定征方法	369
5.5.3	时域幅值定征方法	375
5.5.4	时域能量定征方法	376
5.5.5	定征方法对比分析	378
	参考文献	379

第 1 章 绪 论

固体火箭发动机(SRM)是当今各种导弹武器的主要动力装置,在航空航天领域也有非常广泛的应用。它具有结构简单、高机动性、高可靠性、易于维护等一系列优点,非常适合现代战争和航天事业的需要。SRM 的壳体结构为多层粘接结构,这种结构在加工、生产过程中容易受到各种工艺因素和人为因素的干扰,在其内部会出现孔隙、夹杂、分层、脱粘、强度弱化等缺陷。同样,这种结构在使用过程中由于过载、疲劳、环境退化等因素会导致已有缺陷的扩展、各层材料(尤其是粘结剂层)的老化,最终导致强度和刚度的急剧降低,大大降低装备的使用寿命,甚至造成灾难性的后果。从国内外装备的贮存和使用情况看,近 1/3 的事故原因是发动机界面脱粘造成的,可以说 SRM 是导弹武器可靠性中最薄弱的环节之一。

此外,连接火箭发动机壳体和喷管的柔性接头也是多层粘接结构,对其粘接质量的检测也是 SRM 生产中产品质量控制的关键工序,而这种复合材料构件的超声波探伤又是一个薄弱环节。

SRM 与其检测方法几乎是同步发展起来的。迄今为止,已出现了多种无损检测手段,其中包括高能射线照相、微波检测、X 射线切线照相、红外线以及超声无损探伤等。但 SRM 结构具有其特殊性,由于金属的高声阻抗和绝热层、衬层、推进剂等橡胶基材料的低声阻抗间存在很大的错配度,加之橡胶基材料的高声衰减,致使复合结构多层界面间粘接质量的无损检测现在仍是一个难题。较易检测的仅局限于发动机壳体与绝热层界面的脱粘,而对多层包覆质量检测一直缺乏有效的技术。国内外多采用 CT 技术,但遗憾的是 CT 技术对间隙甚微但未粘合的平面脱粘缺陷的检测并不是很有效,并且检测费用高昂,相对检测速度较慢,从而限制了 CT 技术的应用。

因此,SRM 多层粘接结构的粘接质量的无损检测,对保证导弹武器的高效性与可靠性具有重大意义,是国防导弹武器建设的重点和难点。

1.1 粘接结构的缺陷与特点

粘接工艺是现代工业尤其是国防工业中应用越来越广泛的工业技术,其中包括金属—金属、金属—非金属、非金属—非金属等各类粘接结构,如 SRM 壳体—绝热层—包覆层—药柱各界面、飞机上蒙皮—衬层—蜂窝各界面以及各种

复合材料制造的部件和结构等。粘接结构具有连接件重量轻、外形光滑、结构整体应力分布均匀等优点,但粘接结构的缺点也是明显的,主要表现在:①大多数粘接件在湿热、冷热交变、冲击以及受力条件下工作寿命有限,但目前还缺乏充分的实验资料;②有机胶粘剂构成的粘接接头耐温性不高,一般不超过 350℃,只有个别品种可在 500℃ 下工作一定时间;无机胶粘剂可耐 1000℃ 高温;陶瓷胶粘剂耐温达 2000℃ 以上,但较脆;③粘接件虽有较高的剪切强度、拉伸强度,但剥离强度很低;④粘接质量目前尚无可靠的检测方法。尽管在粘接工艺和粘接质量方面投入了大量的人力物力,但粘接接头仍然是力学完整性中最薄弱的环节之一。此外多层粘接结构在加工、生产过程中容易受到各种工艺因素和人为因素的干扰,在其内部会出现孔隙、夹杂、分层、脱粘、强度弱化等缺陷。而且这种结构在使用过程中由于过载、疲劳、环境退化等因素会导致已有缺陷的扩展,材料尤其是胶粘剂层的老化,最终导致强度和刚度的急剧降低,大大降低其使用寿命。

通常层状粘接结构中可能存在三大类基本失效模式,如图 1.1 所示。

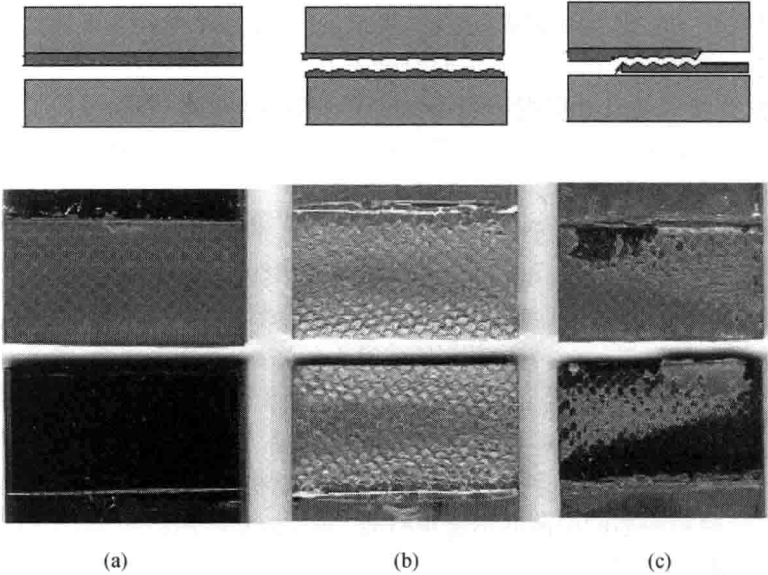


图 1.1 粘接结构失效模式
 (a) 粘附失效; (b) 内聚失效; (c) 混合模式失效。

- (1) 界面破坏失效,或称粘附失效。即粘接界面粘附强度低,胶粘剂与被粘接件结合不良。
- (2) 胶层破坏失效,或称内聚失效。即胶层内聚强度低,胶粘剂本身发生破坏,此时粘接强度取决于胶粘剂的力学性能。
- (3) 混合破坏,或称混合失效。即胶层破坏、界面破坏与被粘物破坏同时存

在或兼而有之。

粘附强度低的主要原因是表面准备不好,与表面可能存在的污染有关。由于粘附只是在很薄一层材料($<100\mu\text{m}$)上的界面现象,所以很难对粘附强度进行无损检测。因此,生产上往往通过保证粘接前被粘接件表面的清洁质量来间接控制粘附质量。

内聚强度不足主要是因为混合不均匀,工艺规范不正确,以及胶粘剂固化不足,对于内聚强度,目前只能对两层粘接结构在有限的精度范围内估计,对于多层粘接结构,由于多种因素的影响,检测效果较差。

多层粘接结构最常见的缺陷形式是脱粘、孔洞、微孔隙和强度弱化,微孔隙是因为卷入空气或胶层中的挥发气体不能溢出而形成的,胶层中大都不同程度地存在微孔隙。孔洞的形成原因是因为“欠胶”或施胶时卷入了气体,胶粘剂挥发出的气体不可能形成大的孔洞,除非胶粘剂本身有严重问题。失粘是孔洞的另一种形式,如果因胶厚不均而引起欠胶,以及粘接前胶粘剂已有一定程度的固化都有可能产生这种缺陷。如果被粘接件表面有污染,如油污,则会导致脱粘或机械贴合型脱粘。脱粘处的两表面非常接近,甚至有可能紧贴,但不能传递切向载荷。机械冲击、胶层以及胶层与被粘接件之间界面层的退化也有可能产生脱粘。

1.2 粘接结构主要无损检测方法和技术

如何有效地解决粘接结构的无损检测问题,一直是国内外无损检测领域的热点和难点。粘接质量检测的困难主要来自两方面原因。一是粘接是一种界面现象,一般发生在几十到几百微米之间,粘接界面很薄,这就使获得粘接界面的信息变得非常困难,也使得如射线检测效果大大削弱。二是粘接理论还不是很成熟,目前普遍认可的理论是由粘接强度和粘附强度构成,但对这两种强度的具体来源及其变化规律还不甚了解,这就为检测信号的解释带来了困难。但是,由于粘接质量的重要性,对其检测的研究一直都未停止。现在主要的检测方法有X射线法、光学法、热波法、超声法等。

射线检测是目前应用广泛且有效的粘接结构无损检测技术。被检测工件由于成分、密度、厚度的不同,对射线产生不同的吸收或散射特性。主要有高能X射线切线照相法和CT技术。射线切线照相法的检测灵敏度很高,可以检测出大于 0.05mm 的脱粘缺陷,但对间隙更小的脱粘、紧贴型脱粘和弱粘接缺陷则无能为力。CT技术是当前无损检测的高新技术,可以获得直观的三维物体图像,也可从任意角度观察结构,检测精度甚至高于照相法,但对于紧贴型缺陷和粘接强度弱化同样不能有效检测。

光学检测技术主要有激光全息照相和电子剪切散斑技术。它们通过在结构

件上施加一定的外力,然后测量粘接件表面的微量位移来判定它的内部质量。国内三七二厂中心实验室曾用激光全息照相技术对胶接铝蜂窝结构进行了检测,刘宝会等人也曾利用电子剪切散斑干涉技术对多层粘接板结构进行实时检测。但是光学检测对于环境要求较为严格,不适合现场检测,且其对于厚度较大的粘接结构检测效果不好。

热学方法用于粘接结构检测已有多年历史,它是利用脱粘缺陷区和粘好区的热性能存在差异所引起的构件表面温度变化来进行检测。该技术对于近表面的气孔、分层以及完全脱粘缺陷检测效果非常理想,可实现非接触检测,检测效率高,是粘接结构质量检测的一个发展方向,但其理论模型尚不完善,目前主要停留在实验室研究上,此外其对于紧贴型脱粘和弱粘接的检测效果尚无可靠结论。

声学方法一直是粘接结构无损检测的重要技术,也是目前普遍认为解决粘接结构无损检测的一种行之有效的方法。其检测方法很多,有敲击法、声振法、常规超声法、斜入射超声法、导波法、声发射法、声—超声法等。敲击法是一种最古老的无损检测方法,也可以说是检测胶接质量的最简单的方法,至今仍在广泛应用。它依据被敲击部分组件的谐振原理来工作,脱粘很容易从声调和频率的变化分辨出来。敲击法优点是操作简单;缺点是只适用于薄板粘接件大面积的脱粘缺陷的粗检,并且检测结果受检测人员主观因素影响较大。声振法有声阻抗法和共振法,二者都是通过超声换能器激发被检测样品发生振动。声阻法把反映粘接质量的振动阻抗作为换能器的负载,通过对换能器特性的测量,来检测粘接质量,而共振法只测量样品的共振频率,此时被测样品的厚度为超声传播半波长的整数倍,所以共振法可以看作声阻法的一个特例。声振检测的优点是:设备成本低,适应性强,操作方便;缺点是要求粘接件厚度不能太大,一般小于2mm。常规超声法是利用超声波在缺陷不连续处会发生反射和散射,从而引起超声波能量(幅值)的变化,由此对缺陷进行检测。超声检测技术成熟,设备费用不高,粘接件的厚度和不连续性的深度对检测结果影响不大。声发射检测技术是利用材料局部因能量快速释放的弹性波来对材料内部性能进行检测的技术。声发射主要是检测动态缺陷,因此一般不用于静态的脱粘缺陷的检测,但是可以用它来监测脱粘缺陷的扩展。声—超声技术又称为应力波因子技术,它不是直接接收发射声波的发射信号,而是使用超声换能器等激发装置在试件中激发出应力波,应力波在试件内部与微机构、缺陷等作用,应力波信号被接收后,通过频谱分析、标定和计算机处理,获得试件的性能信息。实践已经证明,声—超声方法对复合材料叠层和胶接结构的粘接强度变化很灵敏。

上述这些无损检测方法在许多文献中已有较为详尽的介绍,综合来看,目前对于多层粘接结构超声检测技术研究的热点有:

(1) 超声导波法(Guide Wave Technique)。即采用在胶粘剂层中传播的

Lamb 波、漏 Lamb 波等导波或在胶粘剂层和被粘接板界面中传播的 Stonely 波,通过它们的模态特性来判断粘接质量。

(2) 超声斜入射法 (Oblique - incidence Ultrasonic Wave Technique)。又称超声响应特性法,即通过检测斜入射到结构中超声波的反射特性来判断粘接质量。

(3) 声—超声技术 (Acousto - Ultrasonic Technique)。又称为 SWF 技术或 AU 技术,通过对接收到的应力波进行分析,获得试件内部的粘接质量信息。

1. 超声导波法

导波是由声波在介质中的不连续交接面间产生多次往复反射,并进一步产生复杂的干涉和几何弥散而形成的。超声导波检测技术是当前国内外无损检测领域研究的一个新亮点。它具有检测速度快、单点激励就可实现长距离检测等优点,因此特别适合用于常规检测方法无法达到的区域构件的检测。超声导波在检测这些构件时有以下优势:①从检测特定材料的灵敏度上看,纤维增强型复合材料的损伤与缺陷用超声反射方法探测很难检测到,导波在单面检测这类材料与构件时有良好的效果;②从检测的工作效率上看,用常规超声扫查方式检测大型结构件相当费时、费力,而用导波检测这类设备却快速有效。

由于导波检测技术选择参数的特殊性,使得它的应用范围很广泛。一方面,频散现象作为超声导波检测的重要参数,超声导波的频散曲线对分层和脱胶等严重危害复合材料结构性能的现象较灵敏,利用若干模态超声导波频散曲线的变化可判断被测物体的内部状况。另一方面,分层或弱胶可使超声波在固体声腔中传播的边界条件改变,造成其频率分量的变化,因此超声波在波导中传播一定距离后的频谱及其变化也成为评价被测体的一个参量。采用人工神经网络技术则可准确有效地对复杂的频散曲线及频谱曲线进行反演,即由获得的超声参量推算出被测体的各种状况。

导波在材料中传播的频散特性会受粘接界面缺陷的影响,导波法就是利用这种关系来检测粘接界面的。由于导波是材料内纵波和横波在界面上相互耦合的结果,因而选取合适的导波模态和频率可以得到较高的检测灵敏度。Lamb 波、漏 Lamb 波及广义 Rayleigh 波等多种导波,均可用于粘接界面的检测。

漏 Lamb 波是板波的一种,它沿板状结构有衰减的传播。当其在板状粘接结构中传播时,其波长、速度等特性取决于该结构的力学特性。因此,胶粘剂层、被粘接构件以及它们的边界条件的改变都会在漏波传播特性中得到体现。对于理论研究,常采用带有界面缺陷的被粘接件/胶粘剂/被粘接件三层结构,理论预测的结果为表示声速—频率关系的频散方程。在实验研究中,常采用一种浸于水中的可调节角度装置来激发和接收漏 Lamb 波,通过该装置激发特定模态的漏 Lamb 波来验证理论结论。很多研究者希望运用漏 Lamb 波技术评价粘接结

构质量,尤其是其粘接界面的粘接质量,但是,到目前为止,他们得到的结果仅仅是初步的、理论的,离实际应用还有较大距离。

巴黎大学的课题组在 Quentin 和 de Billydeng 的领导下采用漏 Lamb 波技术研究了铝合金板粘接在铜基座和铜板粘接铝合金基座两种实验构件。研究表明:大部分实验标定和理论预测产生的频散曲线不符。该小组建议以后的研究必须考虑衰减对漏 Lamb 波的影响。Guy 领导的另一课题组研究钢—环氧—钢结构,在该研究中考虑包括界面油污在内的各种粘接前界面预处理情况。研究表明:漏 Lamb 波技术对钢—环氧界面状况的检测灵敏度很低。

Rokhlin 等采用漏 Lamb 波技术研究了铝—环氧树脂—塑料—环氧树脂—铝五层结构,其中环氧树脂为胶粘剂。在该研究中,Rokhlin 等对环氧树脂固化的过程(即铝—塑料间的粘接状况由弱到强的过程)进行实验,虽然对很多实验现象没有解释,但其结果与理论预测基本一致,并且,该结果表明:漏 Lamb 技术对胶粘剂层的性能变化具有较好的灵敏度,适合内聚强度检测。

导波技术,在这里所谓导波与漏 Lamb 波技术中的漏 Lamb 波不同,它仅指在多层粘接结构中胶粘剂层中传播的板波。在这里胶粘剂层作为仅有的波导,导波的能量也完全集中于波导中。纯导波的任何模式都不会与周围介质的体波相耦合,通过被粘接体不能激发和接收导波,因此基本上不适合无损检测(NDT)。一种可行的方法是在被粘接板界面上激发 Rayleigh 波,使该波在传播过程中发生模式转变,转化为检测用导波。理论和实验的初步研究结果都表明导波无论是对粘附质量还是对内聚质量的检测灵敏度都好于漏 Lamb 波。

Nagy 和 Adlers 采用导波技术对粘接结构进行了研究,他们在粘接前先在被粘接体的界面涂一薄层能使胶粘剂弹性模量降低物质的方式来改变胶粘剂层的特性,然后在经过处理的结构上激发导波来研究导波的传播特性。结果表明是胶粘剂层模量的改变而非理论预测中的频率改变导致导波各模式幅度的变化。

界面波在粘接界面上传播时,其能量主要集中在界面层及其上下表面附近,因此其传播特性取决于粘接界面的特性,也就是说,粘接界面质量的变化可以在界面波中得到很好的体现,所以界面波在粘接界面质量检测上很有潜力。虽然如此,目前界面波应用的界面粘接质量检测上的文献却是很有限的,且实验研究结果激发界面波的方式都是先在被粘接件上激发瑞利波,通过模式转换的方法获得,这很大程度限制了这一很有前景的方法的推广和实用化。

2. 反射系数法

反射系数法在结构上激发体波,通过接收反射波的强度变化判断粘接结构的粘接质量。该法可以采用垂直入射和斜入射两种方式,它们在不同频率时的反射特性不同,因此,采取何种组合是该方法需要解决的问题。

Tattersall 建立了模拟带有缺陷的胶粘剂层的简单一维弹簧模型。基于该模型研究了超声波垂直入射低密度聚乙烯板粘接于铝块这一结构的频率特性,结

果表明超声垂直入射的反射系数与频率相关。由于简单明了,该模型很快被应用到原来“薄层”模型应用的地方。

Rokhlin 和 Maron 采用超声斜入射法对粘接界面固化过程进行检测。他们采用超声纵波检测了两钢板胶粘和钢板与树脂玻璃板粘接的固化过程。在固化周期里,两板间的胶粘剂逐渐固化,且他们的研究表明理论预期与实验结果非常吻合,可以采用超声斜入射法监测胶粘结构胶粘界面的固化过程。

Pilarski 和 Rose 在 Rokhlin 和 Maron 基础上对超声斜入射方法进行进一步的研究。他们对铝—铝粘接结构进行研究,并将其结果同超声垂直入射法进行比较。由于超声垂直入射反射系数的变化仅与垂直于界面的刚度相关,而如果界面缺陷与横向刚度相关时就无法得到体现,因此相对于垂直入射,超声斜入射法灵敏度更高。Pilarski 的课题组基于二维弹簧模型计算了铝—环氧树脂胶粘结构在粘接完好和界面滑移两种界面边界条件下的纵—纵、纵—横、横—纵、横—横(纵—纵表示纵波入射,纵波接收,其余类推)的反射系数,并设计实验进行实验研究。结果表明无论是理论还是实验,该方法都有很好的灵敏度。虽然理论与实验一致且灵敏度较好,但是这些还都是初步研究,且他们的研究仅限于粘接完好和界面滑移两种极端情况,因此他们的研究结果不是很系统、很完整,无法胜任界面质量的精确评估。

3. 声—超声法

声—超声技术 (Acousto - Ultrasonic Technique) 又称为应力波因子技术 (Stress Wave Factor Technique), 简称 AU 技术或 SWF 技术, 是近十几年国外发展起来的一种无损检测新方法, 它集超声和声发射的优点于一身, 为无损检测开辟了一个崭新的领域。声—超声法的原理与常用的声学方法不同, 它不是直接接收发射声波的发射信号, 而是使用超声换能器等激发装置在试件中激发出应力波, 应力波在试件内部与微机构、缺陷等作用, 由接收装置接收到的应力波从而与试件的力学性能有关, 应力波信号被接收后, 通过频谱分析、标定和计算机处理, 便可获得试件的性能信息。对评价粘接件的粘接质量, 粘接强度是最能说明问题的参数, 利用声—超声法不仅可以检测界面有空隙的脱粘缺陷, 还可以检测界面粘接强度大大下降和胶粘剂失效(机械紧贴)等问题, 而后两种情况, 就目前来说, 是其它无损检测方法还不能检测的, 这个问题也正是发动机粘接界面检测急需解决的问题。

AU 技术最初是针对复合材料设计的一种检测方法, 自 Alex Vary 成功地将该技术用于复合材料性能评价和内部缺陷检测后, 不少国外的科研机构和著名大学相继开展了此项技术的相关研究工作。

早期, 限于应力波与材料相互作用的微观机理很不明确, 研究主要集中在实验方面。通过完善检测手段, 如信号的有效激发与接收等, 提高检测效率和检测结果的可重现性。这一时期, 检测水平基本停留在使用各种应力波因子标定方

法对复合材料整体性能、缺陷状态和冲击损伤评估的层面上。

随着计算机技术的快速发展和信号处理手段的不断丰富,神经网络、频谱分析和模式识别等各种新技术也被应用到对应力波信号的分析上来。

克利夫兰大学的 Laura M. Cosgriff、Richard E. Martin 和 NASA Glenn 研究中心的 George Y. Baaklini 在对运载火箭上使用的一种陶瓷基复合材料碳纤维增强碳化硅(C/SiC)完成应力和疲劳测试后,使用 AU 技术对其进行检测,利用统计方法标定应力波波形的衰减状况;结合频谱分析技术计算出接收信号的能量和中心频率,用以上三个指标对试件的整体性能做出评价。并对测试时耦合压力对波形的影响深入探讨,自行设计制作了自动化的压力控制装置,较好地解决了 AU 检测结果重现性差的应用难点。从他们最新的研究成果可以看出,AU 技术已经由静态检测走向实时动态监测。

经过多年的发展,AU 技术在应用对象上已突破了复合材料的范畴,逐步转向缠绕压力容器、粘接接头、木材以及混凝土结构等。

韩国仁川大学的 Oh - Yang Kwon 和 Seung - Hwan Lee 使用各种频率的猝发波对 CFRP 和航空铝板的胶接件进行实验研究。他们通过在频域上的分析发现,随着胶接接头内部缺陷的增大,信号能量降低而中心频率升高。

在大量实验研究的基础上,也有不少学者开始转向理论研究。英国谢菲尔德大学的 B. C. Lee 和 W. J. Staszewski 对应力波在板状结构中的传播行为建模,使用“局部相互作用”的仿真方法(Local Interaction Simulation Approach)对应力波在传播过程遇到缺陷后的模式转换机理深入研究,并通过实验对仿真结果加以验证。

正如 Alex Vary 所言,鉴于应力波是一种“综合波”,而非单一频率波,其组成很可能是体波、板波等的叠加;将其合理分解,对各组成成分分别加以研究,将有望从理论上全面揭示应力波的本质。

国内在 AU 技术方面的研究起步较晚,目前为止,仅有少数几家单位就该项技术开展了研究工作。

同济大学的刘镇清教授通过大量实验研究就不同厚度材料中的应力波成分做了大致分类,他认为在较厚板状材料中可以用驻波共振模型和频域方法对实验现象做出解释;而在较薄的板中应力波信号本质上就是板波中的 Lamb 波,并通过实验对薄铝板中的应力波成分进行研究。随着两探头之间距离的增大,应力波在时域波形上明显分成两个波包,对其传播速度的分析表明,这与 Lamb 波理论中的 A0 和 S0 两种模式取得了较好的吻合,在一定范围内揭示了应力波的本质。

重庆后勤工程学院的邓明晰教授在固体非线性声学理论方面持续开展了近十年的研究,对几种具有传播特性的 Lamb 波模式在单层固体板、复合固体板中的发生和传播进行了深入分析,并借助 Ritec 非线性声学实验系统对理论分析