

航空复合材料先进超声无损检测技术

Advanced Ultrasonic Testing Technology for Aviation Composites

北京航空航天大学无损检测与机电工程研究所 周正干 肖鹏 刘航航



周正干

教授,工学博士,现任机械工程及自动化学院副院长,兼任机电工程及自动化系主任。主要研究方向为超声无损检测技术、计算机测控系统。作为课题负责人,主持完成国家自然科学基金项目5项、总装预研基金项目1项、“863”子课题1项、国家企事业单位合作项目30余项。曾获航天工业总公司科技进步二等奖1次,在国内外公开发表学术论文90余篇。

复合材料具有高强度、高硬度、密度小等优点,广泛应用于航空航天领域。由于其独特的制造工艺,在

相控阵超声检测技术、激光超声检测技术、空气耦合超声检测技术,以及基于水浸超声检测系统的孔隙率检测是目前国内外复合材料无损检测技术研究的热点。北京航空航天大学无损检测与机电工程研究所针对这几项技术开展研究,取得了一定的工作进展。

制造过程中不可避免地会形成缺陷。开裂、脱粘、孔隙(率)及多余物(夹杂)等缺陷是复合材料构件验收和质量监测时需要重点检测的缺陷类型^[1-2]。

超声检测方法作为一种方便、有效的检测手段,被广泛应用于复合材料构件的无损检测。空客公司采用多通道水耦合(水浸或喷水)超声检测系统进行垂尾、平尾等大型零部件或大型复合材料板壳的自动化或半自动化快速检测;采用空气耦合超声检测技术对不允许使用耦合剂的蜂窝部件、三明治零件及泡沫夹芯零部件进行检测;制定了关于复合材料激光超声检测与评价的技术方案和执行标准,并将该技术用于新型飞

机复合材料构件的检测,以提高产品的质量评价与保障能力。

相控阵超声检测技术、激光超声检测技术、空气耦合超声检测技术,以及基于水浸超声检测系统的孔隙率检测是目前国内外复合材料无损检测技术研究的热点。北京航空航天大学无损检测与机电工程研究所针对这几项技术开展研究,取得了一定的工作进展。

相控阵超声检测技术

相控阵超声检测技术是一种多声束扫描成像技术。其换能器是由多个相互独立的晶片组成的阵列单元,在发射电路激励下以可控的相位激发超声波,以调整声束的焦点位置

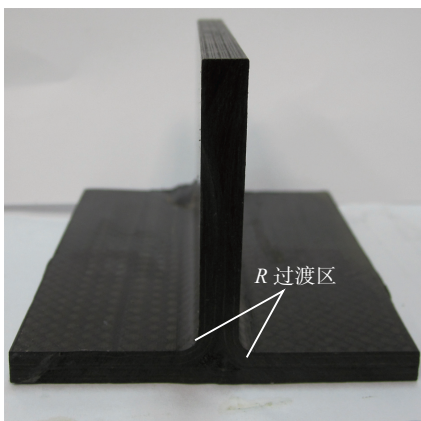
和偏转的方向,超声回波转化成电信号也以可控的相位合成,从而实现缺陷的检测^[3-6]。相控阵超声检测技术具有高速、高效,适合复杂工件以及能实时成像等优点,在工业无损检测领域具有良好的应用发展前景。

在国外,相控阵超声检测技术的研究与应用深入而广泛。在相控阵超声检测仪器设备方面,有较为成熟的商用产品,如 Olympus 公司推出了相控阵超声扫描检测仪,可以实现动态波束控制、电子扇形扫描、电子聚焦、图像处理 and 显示等功能;美国 GE 公司、英国 Technology Design、德国 SIEMENS 公司等,近年来也推出了商品化的相控阵超声检测仪器及相控阵换能器;德国 KrautKramer 公司在多通道系统设备的基础上,采用相控阵技术实现了管道的检测。Olympus 无损检测公司的 J. Habermehl 等人用该公司的超声相控阵检测系统 OmniScan PA 对飞机上碳纤维增强聚合物基复合材料平板构件进行检测,不仅比传统超声检测速度快而且成像效果好;J. Habermehl 等人还设计了专门检测弯管的弧形相控阵探头,为检测圆角联接的构件提供了快速可靠的方法。

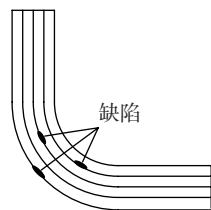
在国内,许多研究机构也开展了相控阵超声检测技术的研究,如北京航空航天大学、中国科学院声学研究所、上海材料研究所、清华大学、哈尔滨工业大学和中国石油天然气管道局等科研院所。北京航空航天大学与日本 KJTD 株式会社合作,研制了铁路货车轮对相控阵超声检测系统;中国科学院声学研究所张碧星等人研究了环形相控阵超声声场的基本特性,从理论上分析了环形相控阵各种参数对辐射声场的影响;上海材料研究所和汕头超声仪器研究所在 20 世纪 90 年代初就试制过线型阵列超声检测系统,但未投入实际应用。清华大学无损检测实验室施克

仁教授领导的课题组对相控阵自适应聚焦和三维成像等方面作了深入的研究。哈尔滨工业大学单宝华等人提出了海洋平台结构相控阵超声检测算法,研制开发了海洋平台结构相控阵超声检测成像系统。

北京航空航天大学无损检测与机电工程研究所利用自行搭建相控阵超声检测系统和自研软件对复合材料构件 R 区进行相控阵超声检测试验研究。以碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) T 型构件的 R 区(图 1)为检测对象,分析 R 区的检测难点,利用相控阵超声检测技术的优势,提出了采用相控阵弧阵换能器和线阵换能器两种检测方法(图 2);对复合材料 T 型试样的 R 区进行超声相控阵检测试验,试验结果验证了两种检测方法的正确性^[7];与常规超声检测方法进行对比,分析了相控阵超声技术检测 R 区的技术优势。研究结果表明相控阵超声检测技术具有适用性强、检测效率高等优势,可以满足复合材料构件 R 区的检测要求。

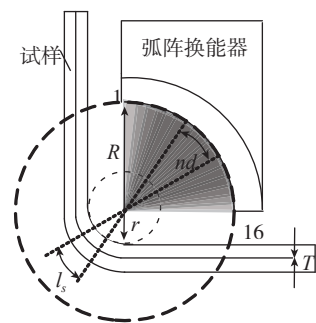


(a) T 型加筋壁板试样

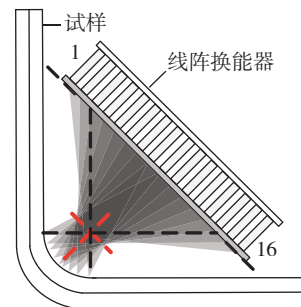


(b) R 过渡区的缺陷分布示意图

图 1 典型的复合材料 T 型加筋壁板试样及 R 过渡区的缺陷分布示意图



(a) 弧阵换能器检测方案



(b) 线阵换能器检测方案

图 2 R 区相控阵超声检测方案

激光超声检测技术

激光超声检测技术以激光激发并接收超声波实现材料缺陷检测,具有非接触、复杂结构适应能力强、缺陷灵敏度与分辨率高等特点,可以实现大型复杂结构的自动化检测,并且具备突出的快速检测和在线、现场检测能力,是一种快速、有效、可靠的航空飞行器结构制造质量控制手段^[8-9]。

用于航空复合材料质量评价的激光超声检测系统由脉冲激光器、连续激光器、干涉仪、光路系统、信号采集与处理系统、扫描运动控制系统等构成,具有完全非接触式的光学脉冲激光与干涉接收等特点,可实现脉冲反射法与穿透法等检测方法完成质量评价。

1963 年, White R. M. 提出,以脉冲激光束辐照材料表面产生超声波,激光超声技术由此诞生^[10]。之后,激光超声技术以其特有的多重优势,受到无损检测界的广泛关注^[11-20]。近 20 年来,国外为满足复合材料的应用发展需要,在先进复合材料的激光

超声检测与评价方面开展了大量的研究工作,研究的热点主要集中在以下5个方面:(1)复合材料中激光超声的激发控制方法研究;(2)复合材料缺陷、损伤的激光超声表征方法研究;(3)复合材料力学性能的激光超声表征方法研究;(4)复合材料激光超声检测系统的研究开发;(5)复合材料激光超声检测的评价方案及标准的制定。

国外在复合材料激光超声检测与评价方面的研究工作已经涉及到技术相关的基本理论、检测方法、系统开发和质量评价标准等方面,虽然存在一定的不足,但取得的研究成果是显著的,并且已经形成了科学研究和工业应用同步进行、相互转化与促进的良好局面。

国内在先进复合材料激光超声检测技术方面的研究工作很少。中航工业北京航空制造工程研究所的刘松平等,以 Nd:YAG 激光器在复合材料中激励了超声波,讨论了碳纤维增强树脂基复合材料缺陷的激光超声检测技术^[21];江苏大学的许伯强等,采用有限元仿真的方法研究了碳/环氧复合材料中的激光超声^[22-23]。

北京航空航天大学无损检测与机电工程研究所建立了一套用于航空复合材料质量评价的 BLUT 激光超声检测系统(图3),并利用该系统实现了碳纤维增强陶瓷基复合材料层压结构(试样由西北工业大学提供,图4)分层缺陷的激光超声 C 型扫描成像(图5)。

空气耦合超声检测技术

空气耦合超声检测技术是将空气作为耦合介质的新型检测方法,因其具有非接触、完全无损、检测高效和绿色环保等技术优势,已成为声学

无损检测 and 材料特性分析方面的有效手段^[24-26]。该技术近年来发展迅速,基于合适的检测手段及激励接收技术可以实现金属、复合材料、木材、混凝土等的缺陷评价,可以测量复合材料纤维取向、准确定量复合材料及天然材料中面内各向异性、分析弹性模量、表面仿形和测量涂层厚度等^[27-28]。针对空气耦合超声检测技术面临的接收信号强度低、信号信噪比差的问题,国内外主要从以下4方面开展相关研究:(1)高灵敏度、高信噪比的空气耦合超声换能器的研制;(2)新型检测方法及系统;(3)高输出的超声信号激励与接收技术及装备;(4)激励信号编码技术及接收信号数字化处理技术^[29-32]。

穿透法是空气耦合超声检测技术中的检测手段之一,穿透法不仅可以应用到不能使用耦合剂材料(蜂窝夹芯/泡沫夹芯复合材料、多孔陶瓷

材料等)的缺陷检测方面,也可以对传统复合材料(CFRP、GFRP等)实现高效率检测,因其检测结果直观、接收信号易于分析逐渐在工业领域获得认可,典型的穿透式空气耦合超声检测系统构成如图6所示。

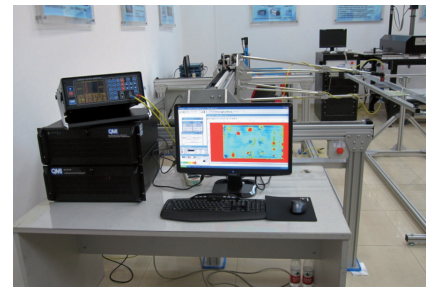


图6 穿透式空气耦合超声检测系统

穿透式空气耦合超声检测技术对分层敏感,因此对多层胶合板分层缺陷、蜂窝夹芯板脱粘/分层缺陷等获得高质量的检测结果,是目前该技术推广应用的重要领域,特种复合材料(陶瓷基复合材料、C/C板)的检测方面,也逐渐获得较好研究成果。北京航空航天大学无损检测与机电工程研究所利用 QMI AirScan 空气耦合超声检测系统对蜂窝夹芯板修补件、C 刹车盘部件等传统检测技术无法检测或检测精度难以达到要求的特种材料构件进行检测,并取得了较好的检测结果(图7、图8)。



图3 BLUT激光超声检测系统硬件平台

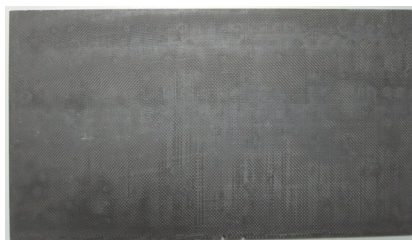


图4 碳纤维增强陶瓷基复合材料层压结构试样

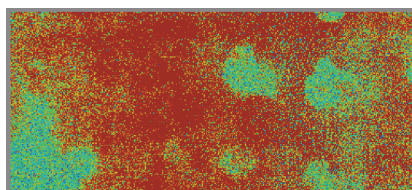


图5 激光超声C型扫描成像结果

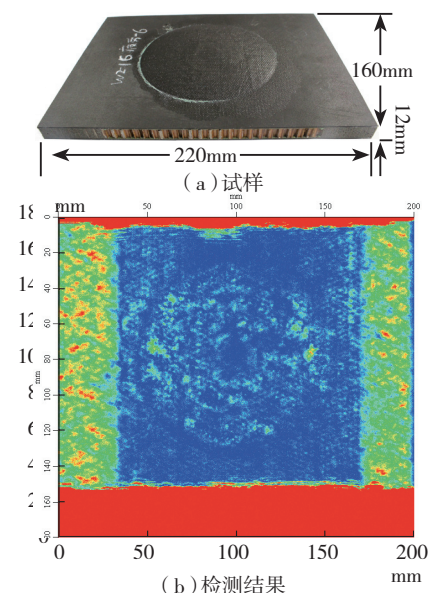


图7 蜂窝夹芯板修补件空气耦合超声检测

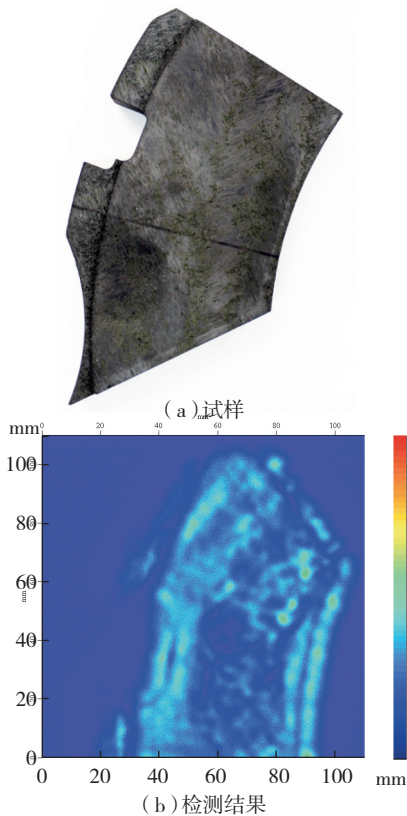


图8 C刹车盘空气耦合超声检测

复合材料孔隙(率)超声检测技术

孔隙是复合材料的常见缺陷之一。孔隙的存在会导致复合材料构件的层间剪切强度、纵/横向弯曲强度和模量、纵/横向拉伸强度等力学性能不同程度的下降。孔隙率是影响复合材料构件性能的重要指标,孔隙率检测是保障复合材料构件性能的重要检测内容。超声检测法是复合材料检测中应用最为广泛的无损检测技术。通过建立超声信号特征参数与孔隙率之间的关系,进而对复合材料孔隙率进行评估,是目前国内外学者的研究热点,也是经验针对解决孔隙率检测行之有效的研究方向。

为解决复合材料结构的孔隙率检测问题,国内外学者对孔隙率超声检测方法的理论模型、经验曲线、试验验证等方面进行了大量的研究。Martin、Hale等分别建立了超声衰减系数与孔隙率之间的关系模型;A.P.Mnortiz等对已提

出的理论模型进行了试验验证;Stone、H.Jeong、D.K.Hsu等分别建立了超声衰减与孔隙率之间的关系曲线或经验公式^[33-36]。在复合材料孔隙率检测工程化应用方面波音公司走在世界前列,制作了世界上仅有

的数块孔隙率检测标准试样,建立了孔隙率超声检测评价曲线,并基于超声C扫描检测系统建立孔隙率测试系统,可实现对大飞机复合材料孔隙率的检测。目前这项检测评判方法已经应用于波音787等复合材料的制造质量检测中。空客对复合材料孔隙率的要求体积百分比不超过2.5%;并借助扫描电镜等工具,建立试样底波衰减与体积孔隙率之间的对应关系,其中包括材料种类和试件厚度对结果的影响(图9)。

国内在复合材料孔隙率超声检测方面的研究成果较少。周晓军等人提出基于待定系数法的孔隙率超

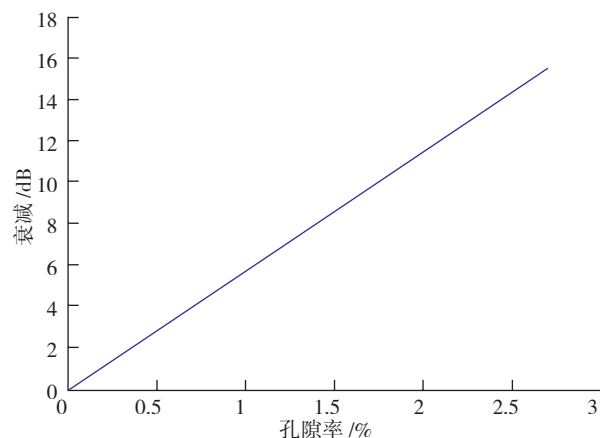


图9 空客建立的某一厚度试样底波衰减与体积孔隙(率)之间的关系

声检测经验公式,研制了孔隙率检测设备^[37-39];林莉对孔隙率超声检测的信号处理、仿真模拟方面进行研究,研究方案有可行性,但在试验验证及工程应用化推广方面仍面临较大困



图10 具有复合材料孔隙率检测功能的超声C扫描软件界面

难^[40-41]。

北京航空航天大学无损检测与机电工程研究所基于超声衰减原理,在水浸超声C扫描系统的基础上,开发了具备复合材料孔隙率检测功能的超声C扫描软件(图10)。

结束语

综上所述,相控阵超声检测技术、激光超声检测技术和空气耦合超声检测技术在复合材料构件检测方面各具优势,在航空无损检测领域有广阔的发展应用前景,波音、空客等知名航空公司致力于推广应用这些技术,并取得了显著成果。但

与国外相比,国内研究水平相对落后,尤其是激光超声检测技术的研究工作刚刚起步。复合材料孔隙率检测的必要性、采用超声方法对孔隙率进行检测的有效性和可行性已经获得国内外专家一致认可,但在工程应用方面仍处于经验主导阶段,缺少适用性强的检测评价方法。

本文共有参考文献41篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 三丰)