

航空复合材料无损检测与评估 技术研究进展回顾*

刘松平¹, 刘菲菲^{1,2}, 李乐刚¹, 杨玉森¹

(1. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 针对近 10 余年来航空复合材料无损检测与评估 (Nondestructive Testing and Evaluation, NDT & E) 领域涌现出来的新研究新进展, 分 3 个部分进行了回顾: 在第 1 部分, 重点回顾了近年航空领域复合材料 NDT & E 技术及其研究进展, 给出了部分代表性的研究结果回顾; 在第 2 部分, 简要地回顾了不同 NDT & E 方法在航空复合材料结构制造、服役、维修过程中的实际应用情况; 在第 3 部分, 结合航空复合材料的研发与应用对 NDT & E 技术的新需求, 分析了目前和今后在航空复合材料 NDT & E 所面临的技术挑战。涉及超声、X 射线、红外、ESPI (激光电子剪切)、THz (太赫兹)、涡流、电阻法、声振法等方法在复合材料方面的研究与应用新进展。

关键词: 无损检测; 缺陷评估; 复合材料; 超声检测; X 射线检测; 红外检测; 电子散斑干涉法

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.014



刘松平

理学博士, 研究员, 航空工业特级专家, 全国无损检测学会副理事长。主要从事复合材料及焊接等先进无损检测与评估新方法新技术研究和新仪器新设备新换能器研发与应用, 先后获省部级科技发明奖、科技进步奖 20 余项, 国家发明专利 30 余项, 出版专著 1 部, 发表学术论文 100 余篇。

随着复合材料在航空领域的不断扩大应用, 复合材料的无损检测与评估 (Nondestructive Testing and Evaluation, NDT & E) 技术已成为业内高度关注的技术热点方向和应用方向, 特别是碳纤维增强树脂基复合材料在飞机机身、机翼等非常重要的关重结构部位的应用^[1], 人们对 NDT & E 技术不断提出了更高要求。由此, 不断吸引和激发业内专家和技术人员不懈地努力研究和开发新的复合材料 NDT & E 技术。近 10 余年来, 许多国内外研究人员先后报道了在该领域的研究结果和研究新进展, 特别是针对不断装机应用的各种新的航空复合材料、新的复合材料成型工艺、新的复合材料结构和新的检测与缺陷评估要求, 先后涌现出

* 基金项目: 国家自然科学基金 (61571409、60727001)。

了许多有关复合材料 NDT & E 技术方面的新研究新进展, 一些有关复合材料 NDT & E 的新方法、新技术、新仪器设备相继问世, 相关的研究文献报道也比较多。从其中部分复合材料 NDT & E 方面的研究文献和实例来看, 近年复合材料 NDT & E 技术的研究进展, 从检测方法分类上, 主要体现在: 超声、X 射线、红外、电子散斑干涉法 (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)、太赫兹 (Terahertz Testing, THz)、涡流、电阻法、声振法等方面。其中, 超声仍然是近年复合材料 NDT & E 技术的热点和焦点方向, 包括经典的超声纵波反射 (R/T) 法、穿透 (R-T) 法^[2-10]、阵列超声检测技术^[11-15]、超声 Lamb 波检测方法^[16-19]、激光超声检测方法^[20-24]、超声导波检测方法^[14,25-26] 和超声显微

法^[27-28]。其中,超声纵波 R/T、R-T 检测技术是目前最为普遍采用的航空复合材料 NDT & E 方法与技术,在航空工业领域得到了最为广泛的工程应用;阵列超声检测技术近年也正在不断地被引入到一些简单形状和便于实现声学耦合的复合材料结构或制件的无损检测与评估中;红外^[29-31]和 ESPI^[32-34]作为非接触面扫描 NDT & E 方法,针对一些特种复合材料结构或试样中的缺陷或损伤的检测,近年也有业内专家在开展这方面的试验研究和可检性试验探索;基于 X 射线衰减和散射原理的 DR (Digital X-ray) 和 CT 检测方法^[35-37],也在某些特殊复合材料和缺陷 NDT & E 方面取得了显著的研究进展和部分实际应用;超声显微作为一种甚高分辨率的声学检测方法,近年在用于复合材料微结构、微缺陷、微损伤 NDT & E 方面也有了可喜的研究与应用进展^[27-28]; THz^[38-39]、涡流和电阻法作为碳纤维复合材料缺陷表征与检测新方法探索,近年也有作者在开展这方面的实验室研究;声振检测方法仍然是一种复合材料胶接结构廉价且快速的检测方法。

针对近年复合材料 NDT & E 技术方面的研究进展,本文主要从近 10 余年的文献中精选了部分文献,结合作者长期研究心得与部分研究新进展,在文献分析和研究总结基础上,简要地回顾了复合材料 NDT & E 技术领域的部分研究进展,从技术研究角度上,介绍了其中的部分研究现状、结果、应用、特点以及面临的技术挑战。本文分为 3 个部分进行了 NDT & E 技术回顾:在第 1 部分,从检测方法角度,回顾了近年航空领域复合材料 NDT & E 技术及其研究与进展,给出了部分代表性的研究结果回顾;第 2 部分从工程应用角度,简要地总结了不同 NDT & E 方法和技术在复合材料结构制造、服役、维修中的应用情况;在第 3 部分,主要是

结合航空复合材料的研发与应用对 NDT & E 的新需求,简要分析了目前和今后在复合材料 NDT & E 领域面临的技术挑战。

复合材料 NDT & E 技术研究进展

1 超声检测技术的研究与进展

1.1 声波时域行为的研究与进展

与金属材料相比,复合材料自身的材料、工艺、结构以及缺陷形成机制等都具有几乎完全不同的特点,对于超声而言,其最为不同的特征有:(1)界面行为,复合材料的铺层特征和增强纤维与树脂基体之间的结合特征,会在复合材料内部形成无数的物理界面,从而参与入射声波在其内部传播机制的形成;(2)各向异性,复合材料中的纤维与树脂基体属于两种具有完全不同的物理、化学、力学、微结构、成分的材料,而纤维本身的各向异性也非常明显,因此,作为一种各向异性声学介质,将会显著影响入射声波在其内部的传播行为;(3)声衰减特性,正是由于复合材料具有非常独特的内部微结构和各向异性的特点,会使入射声波在其内部的衰减变得非常突出,这会影响到不同频率和模式的声波在其内部的传播行为;(4)缺陷及其信号形成机理,由于复合材料自身的材料、微结构和成型工艺的特点,缺陷成因、几何特征、物理特性等非常不同,而入射声波在其内部的传播行为与这些差异均存在数理上的联系,因此,带来与金属材料非常不同的缺陷信号规律和识别机制。如此等等,从而激励和驱动业内人士对复合材料的超声 NDT & E 技术研究的广泛认知和高度关注,进而在不断地开展复合材料超声 NDT & E 新方法新技术的研究和新仪器设备的研发,以支撑和推动复合材料技术的整体发展,形成产业链和规模效益。因此,近 10 余年来,在复合材料超声 NDT & E 技

术研究方向,涌现出了许多非常活跃的研究。

从已有的研究文献分析,超声仍然是目前最为广泛应用的复合材料 NDT & E 方法,近年在这方面的研究可分为两大方面:一种是声波时域行为研究与应用,主要是基于超声波在复合材料中形成的各种声波信号的时域特性,利用来自复合材料中的超声回波或穿透信号的幅值、传播时间、衰减等时域特征及其变化,构建缺陷表征、判别与评估方法,而且基于超声信号的时域变化规律,可以实现复合材料缺陷的定性定量评估、复合材料结构的可视化成像检测^[2-10],也是目前复合材料超声检测领域最为广泛的实用方向,这方面的研究和应用最为流行;另一种是声波频域特性的研究与应用,基于超声波在复合材料中传播时,形成的声波信号的频域特性及其变化,进行复合材料缺陷表征与评估^[40-42],以实验室试样研究为主,由于复合材料内部微结构和材料自身的特殊性,超声波在复合材料中的频散现象比较明显,从检测方法角度,可以通过研究入射声波在复合材料中传播行为的频域特性及其变化进行缺陷表征和评估,不过,单纯利用声波频域特性进行复合材料 NDT & E,其应用非常受限,目前在复合材料 NDT & E 中,往往是将声波信号频域行为研究与时域行为相结合进行研究,毕竟时域信号的检测应用要更为直观和快捷得多。

因此,基于声波时域行为开展复合材料超声 NDT & E 新方法新技术研究和新仪器设备研发方面的研究文献报道非常多,也是复合材料超声检测与评估方向的最大热点,其中超声纵波法又是复合材料超声 NDT & E 技术研究方向的热点。这是因为,利用超声纵波法可以解决复合材料 NDT & E 中的许多共性问题,具有最为广泛的工程检测应用能力和价值。

利用超声纵波在复合材料中的传播行为,通过记录和分析声波回波信号的时域特征,包括声波在被检测复合材料中的传播时间、信号幅值、相位信息,通过超声 A-scan 实时显示,基于超声回波信号技术的 A-scan 检测技术,还可以得到被检测复合材料零件的厚度、缺陷深度的准确位置,进行缺陷的定性定量评估。在此基础上,配备各种不同的换能器扫描机构,通过不同的声束(即换能器)扫描方式和数据重构方法,可以实现超声 C-scan、B-scan 的 2D 扫描成像检测。利用先进的信号处理技术、扫描技术和成像技术,还可以实现复合材料 3D 扫描成像检测,从而可以实现复合材料结构的可视化检测和缺陷的定性定量评估,如图 1 所示。而且可以针对不同的复合材料结构及其特点、检测要求、检测应用的环境条件等,选择采用超声反射法和/或者穿透法,用于不同目的的航空复合材料结构的超声检测与缺陷评估。此外,利用超声纵波检测方法,被检测的复合材料结构的厚度 H 和被检出缺陷的深度 h 可以非常易于通过式(1)和式(2)准确地给出。

$$H = \frac{1}{2}v \times t_H \quad (1)$$

$$h = \frac{1}{2}v \times t_h \quad (2)$$

式中, v 为声波在被检测复合材料中的传播速度; t_H 为声波在被检测复合材料表面和底面之间的单次往返传播时间; t_h 为声波在被检测复合材料表面和缺陷表面之间的单次往返传播时间。

基于超声回波信号可以判别缺陷的基本性质,如图 2 中是本文作者团队得到的来自实际复合材料结构中的分层(D)和富树脂(D_1)的超声回波信号特征,其相位和对应的回波信号 D 和 D_1 具有显著不同的特征。不过,这需要采用高质量的复合材料超声检测仪器技术,图 2 中的结果是

采用作者所研发的 FCC 和 MUT 系列复合材料超声检测仪器及其换能器得到的实际检测结果。

从激发超声波的声源个数角度,可以将用于复合材料超声检测的 NDT & E 技术分为基于单声源的超声检测技术和基于阵列声源的超声检测技术。

1.2 基于单声源的超声检测技术的研究与进展

基于传统的单声源换能器的超

声检测方法仍然是目前最为普遍采用的复合材料检测方法,在这方面的研究久经不减。这是因为基于这种方法发射/接收的超声波,所获取的检测信号与被检测复合材料内部结构、缺陷、不连续性等存在非常清晰和明确的数理表达关系。基于此关系,既可以实现复合材料缺陷、损伤的定性定量表征、评估,且易于实现工程化检测应用;又可以用于复合材料内部微结构、成分(如纤维含量)

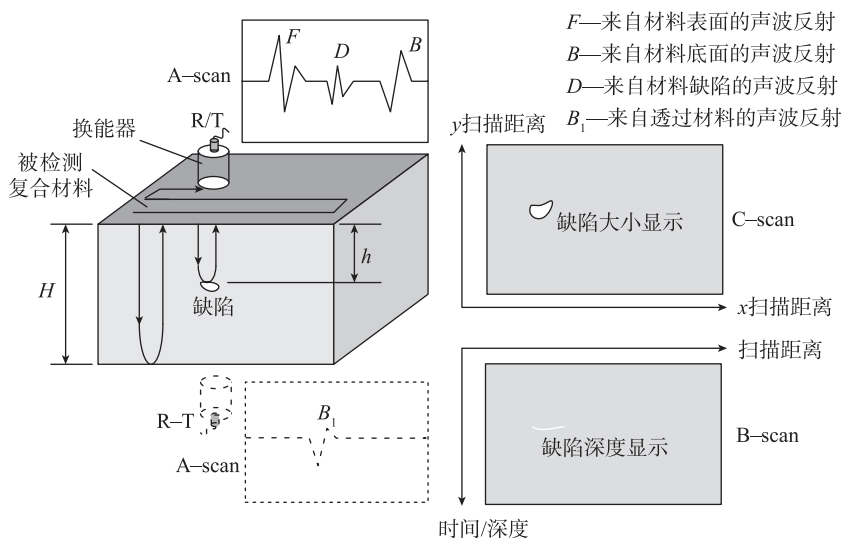
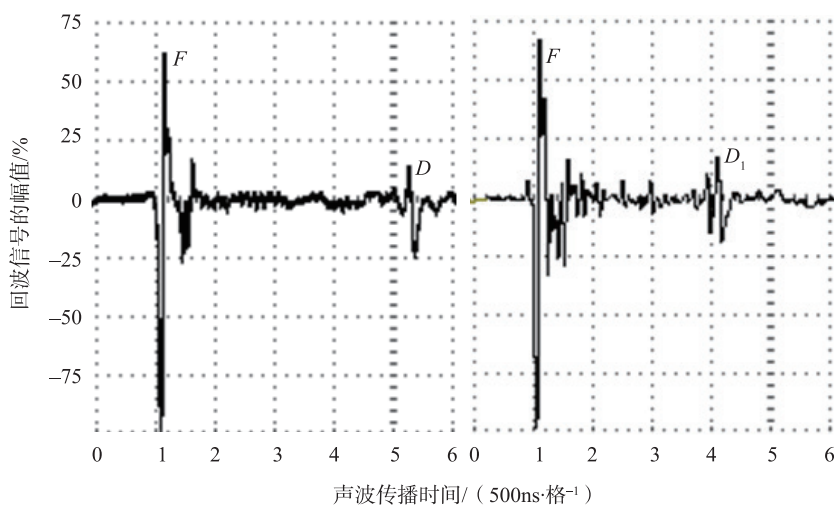


图1 复合材料超声纵波检测技术基本原理

Fig.1 Principle of ultrasonic longitudinal wave inspection for composites



注: F 所指示的回波信号来自被检测复合材料表面的声波反射; D 所指示的回波信号来自被检测复合材料内部分层的声波反射; D_1 所指示的回波信号来自被检测复合材料内部富脂的声波反射。

图2 典型复合材料分层与富树脂的A-scan信号特征

Fig.2 Typical echo signals from practical delamination and resin-rich zone in composites by A-scan

分布、弹性性能等表征；还可以方便地应用于各种实际复合材料结构、零部件与制品的超声可视化、自动化 NDT & E,也是最有可能实现复合材料智能化检测的一种重要的检测方法^[43],有大量的文献报道了这方面的研究,其主要研究与进展包括以下3个方面。

(1) 缺陷超声表征与评估技术。

超声波在材料中的传播与材料中的缺陷、损伤、材料的微结构、成分、密度、弹性性能、各向异性、材料均匀性等许多因素有关。这就需要研究哪些声波行为的改变是来自缺陷,哪些声波行为的变化是来自材料自身的属性。因此,复合材料缺陷表征与评估始终是该方向的活跃和重要的研究方向。

利用超声方法可以进行复合材料中不同类型缺陷的表征与评估,例如,复合材料孔隙率的表征与评估。因为孔隙的存在会使入射声波的衰减增加^[44-48]和声速发生变化^[42,48-49],而衰减的变化与频率有关^[42],其试验结果表明,随着复合材料中的孔隙含量的增加,超声波频率增加,声波衰减会明显增加。就复合材料试样中的声衰减特性,文献[42,48-49]采用超声水浸穿透法,开展了碳纤维增强复合材料试样中超声波衰减和声速变化行为的试验分析,测试试样包括单向预浸料铺层(16层)和织物预浸料铺层(16层)两种,采用10MHz、 $\phi 6.35\text{mm}$ 平探头,试验结果表明:复合材料层压板试样中,气孔的含量对超声衰减存在显著的影响;孔隙含量增加,声衰减会增加;频率增加,声衰减也会增加。不过,由于通常航空复合材料结构厚度变化非常明显,同一制件的局部厚度也不尽一致,由此引起的声速变化可能远大于气孔含量的变化引起的声速测量变化。而利用频率-声衰减的变化,则可能会受不同大小、形状的气孔,在高频

率时,引起的声衰减更明显;而同样的频率,在不同气孔周围,引起的散射衰减也不尽相同^[49]。

由于气孔是一个非常强的弹性声波散射体,其含量增加与声波衰减之间存在一定声学联系,基于此原理,笔者及团队经过30余年的研究和不断积累、完善,在多项专利技术基础上(如发明专利 ZL201310648141.X),构建了基于超声波原理的孔隙率数值评估方法及仪器设备,目前涵盖了十几种不同材料体系和不同厚度的复合材料孔隙率超声数值评估与检测,一直在航空领域得到了十分重要的实际检测应用。因此,超声方法已经成为复合材料孔隙率表征与检测的一种非常重要的无损检测方法。

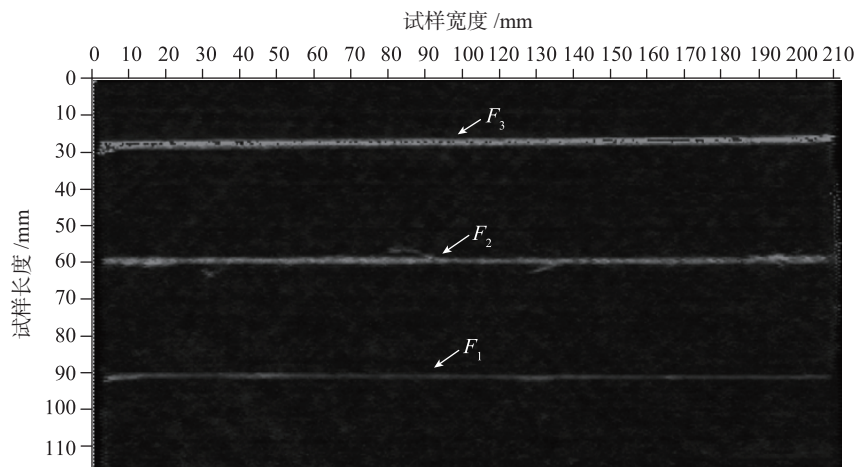
El-Sabbagh等^[2]开展了聚丙烯复合材料超声纵波缺陷表征方法的试验研究,通过研究超声纵波在聚丙烯复合材料中的传播声速,探究纤维含量与声速的相关关系,采用超声水浸法,对 $80\text{mm} \times 220\text{mm} \times 4\text{mm}$ 矩形复合材料板开展了试验研究,其研究结果表明,纤维重量每增加7%,纵波声速增加1%^[2]。刘菲菲等针对碳纤维复合材料层压结构,采用高分辨率超声纵波方法,开展了系列的线性缺

陷超声表征与评估方法研究,图3是厚4.5mm、大小约 $200\text{mm} \times 120\text{mm}$ 的碳纤维复合材料层压结构试样中3个不同线性缺陷 F_1 、 F_2 、 F_3 的超声扫描成像结果,采用作者及其团队自主研发的CUS-21J超声检测系统及FJ-1换能器,结果表明, F_1 的宽度分布在1.0mm左右, F_2 的宽度分布在1.5mm左右, F_3 的宽度分布在2.0mm左右,但其长度几乎贯穿整个试样的宽度方向,具有非常明显的“线性”分布特征,目前该方法得到非常好的推广应用^[8]。

利用超声方法还可以检测复合材料疲劳过程中引起的内部微结构变化及微损伤^[28,50]。不过,目前主要是限于复合材料试样在不同疲劳载荷作用下引起的内部结构变化和损伤的试验研究。

(2) 超声C-扫描检测技术。

超声C-扫描检测技术是一种非常广泛和重要的复合材料无损检测与评估方法,基于超声C扫描、B扫描成像原理,可以实现复合材料结构的超声可视化 NDT & E。目前用于复合材料超声C-扫描检测方法包括传统的C扫描^[2,3,5-10]、超声极扫描^[4],也包括(基于单声源)常规超声和非线性超声的各种C扫描检测方法、



注: F_1 、 F_2 、 F_3 所指示的高亮度灰度带为被检测复合材料试样内部的线性缺陷。

图3 不同线性缺陷的高分辨率超声C扫描表征与评估结果(mm)

Fig.3 C-scans of linear defects by high resolution ultrasonic technique

基于(多声源)阵列超声C扫描检测方法。每种超声C扫描检测方法都有各自的技术优缺点。总体上,基于单声源的超声C扫描成像检测技术是迄今为止获得最为广泛工业应用的复合材料检测技术,因其检测数据解读和分析简单,可以获得复合材料中的不连续、缺陷、损伤的几何分布和位置的定量信息,也可以对复合材料中的气孔、分层、疏松等缺陷进行定位、定性检测。但超声C扫描通常不能直接提供有关材料的机械弹性性能方面的力学信息。此外,对于厚度-波长比小的制件,传统超声C扫描反射技术因其难以区分来自试样表面和底面的回波信号,从而难以实现对其进行检测,而高分辨率超声检测技术是一种很好的解决方法^[7-8]。

(3) 超声可视化检测技术。

主要是集中开展基于超声扫描成像原理的不同检测方法,与缺陷可视化检测技术的研究,这方面研究和文献报道非常多。例如,文献[3-7]等,近年先后都报道了相关的研究成果,包括基于超声2D、3D扫描的可视化检测技术研究,这也是实现复合材料工程自动化、可视化、智能化NDT & E的主流方向,在今后很长的一段时间内,都将是该领域的研究热点方向和应用研发方向,借此用于解决各种复合材料及其结构的无损检测,对接未来复合材料智能制造。目前作者及其团队正在开展面向15m×6m这类的巨型复合材料结构的超声可视化技术研究,已经取得了较好阶段性研究成果,同时也在开展超声3D、4D方面的NDT & E技术方面的试验探索,以对接复合材料智能评估与未来复合材料智能制造。不过,基于单声源的超声检测技术,其主要的不足是,检测效率的提升受到一定的限制。一种可能的解决方法就是增加声源的数量,提高超声单次扫描的有效覆盖面积,

实现检测效率的提升。

1.3 基于阵列声源的超声检测技术的研究与进展

为了改进传统单声源超声检测的效率和手动扫描可视化程度,基于多个压电晶片的超声检测技术是近年再次研究推出的一种复合材料超声检测方法。从超声探测声束形成机理和超声换能器构成及超声电子与信号处理方式等角度,基于阵列声源的超声检测技术可以分为两大类:(1)相控阵超声检测技术(Phased Array Ultrasonic Testing Techniques, PAUT),有时也称超声相控阵(Ultrasonic Arrays^[15]);(2)阵列超声检测技术(Array Ultrasonic Testing Techniques, AUT)。PAUT与AUT的最主要区别在于,前者需要通过不同的脉冲激发时序控制阵列压电晶片的激发过程,以实现不同晶片的激发/接收组合,从而形成不同方向、不同类型、不同模式的声束,其最大的优点是,通过一个相控探头,即可以得到不同角度、不同类型和不同模式的入射声波,以适应不同的被检测对象的超声检测要求,同时可以进行阵列晶片的时序扫描,既可以提高检测效率,也可以提高超声手工检测结果可视化程度,对于自动化扫描,还可以简化扫描机构;后者不需要复杂的时序扫描控制,信号处理的速度和扫描速度可以更快,可以实现每个晶片的单独跟踪耦合,灵活性更好,但探头阵列可能会比较大。总体上,基于阵列声源的超声检测技术受困于阵列探头与被检测曲面复合材料零部件或制件表面之间的声学耦合问题不好解决,PAUT与AUT目前还主要是适合简单形状的复合材料结构的超声检测。

在复合材料制造、维修和服役过程中,超声检测技术常用于确定飞机结构的完整性,随着复合材料在飞机上大面积装机应用,复合材料的无损检测正日益要求更高的检

测效率,以提升质量和较少检测时间及检测成本,特别是大面积飞机复合材料结构的无损检测,其“质量-检测成本”方面的要求尤为讲究。因此,PAUT被认为是一种非常可行和有发展潜力的检测方法。近年来这方面的研究文献报道也非常多,例如, Freemantle等^[11]报道了针对复合材料试样的大面积复合材料快速PAUT成像方面的试验研究结果,采用了1MHz、2MHz、5MHz和10MHz相控阵滚轮探头,探头的宽度达到50mm,128阵元、32阵元同时激发。Nageswaran等^[12]利用PAUT扫描方法,开展了碳纤维增强复合材料试样中的人工缺陷和冲击损伤的可检性试验研究,试样由12K碳纤维制成的航空级预浸料制成的复合材料单向和多向层压板构成,试样厚度1~8mm不等,试样长度分布在210~280mm之间,试样宽度分布在90~210mm之间,其试验结果表明,采用PAUT扫描方法,可检出试样中的人工缺陷和冲击损伤。Li等^[15]利用PAUT进行复合材料缺陷成像表征与评估的试验研究,主要是针对复合材料各向异性,基于全聚焦(Total Focusing Method)方法改进PAUT对复合材料中缺陷的可检性,对试样中直径为1.5mm、深度分别为4mm、10mm、16mm的侧面钻孔缺陷分别进行了可检性研究,采用全聚焦方法,来自侧面钻孔缺陷的超声信号比试样中的结构噪声高出15dB左右。Yu^[13]还针对小的复合材料平板试样,开展了复合材料导波PAUT方法的试验研究。对几何特征复杂的航空复合材料结构的PAUT可检性,尚有待进一步深入研究。在复合材料AUT检测技术研究方面,近年也取得了可喜的进展。例如,作者及其团队研究的AUT技术较好地实现了飞机复合材料翼类蒙皮结构的高效扫描成像检测,并且基于其系列的国家发明专利(如ZL201110053880.5、

ZL201110171425.5、ZL201110199057.5、ZL201110171424.0等)研制成功了CUS-6000超大型复合材料结构高效超声自动扫描成像检测系统(见图4),一直在飞机复合材料结构中得到非常重要的实际应用。

不论是基于单声源的超声检测技术,还是基于多声源的阵列超声检测技术,目前主要还是利用压电换能器产生超声波,然后通过适当的耦合介质将入射声波传入到被检测复合材料中。因此,声学耦合问题一直是这类超声检测方法的棘手问题。因为用于复合材料检测的超声波尚不能在空气中远距离地传播(即使是空气耦合超声,也受限于声波的频率和传播距离)。为此,激光超声检测技术一度被推出。

1.4 激光超声检测方法的研究与进展

传统的超声检测技术是利用压电换能器超声波,声波需要从被检测复合材料体外,通过合理的耦合介质引入到被检测复合材料中,然后通过压电换能器接收来自被检测复合材料中的声波信号,借此研究声波信号的特征,从中构建可以用于缺陷表征、评估和产品检测的信号规律或模型或者识别方法等。其最为显著的特点是:(1)换能器与被检测复合材料样品或制件之间需要耦合介质;(2)声束入射方向需要与样品或制件每个当前检测位置点法向保持较为严格的一致性。如果这两个因

素或其一出现了不可接受的偏离,均会影响超声检测结果的正确性和可靠性。为此,在传统的超声检测研发过程中,花了很长时间和大量的人力与财力一直在研究相关的更好的解决技术途径、方法、手段等。激光超声就是基于这一实际需要被推出来的,其基本技术思想就是利用能够在空气中传播的激光脉冲与被检测复合材料瞬时热相互作用产生的热应力,在材料内部激发超声波,同时,如果能实现激光方法接收来自材料内部的超声信号,且能达到与传统超声检测技术相近的检测灵敏度,那将会给超声检测技术带来质的飞跃。为此,先后有不少的业内人士开展了这方面的探索和研究。例如, Karabutov等^[20]基于激光激励超声波的光声(Optoacoustic-OA)方法,利用OA信号进行石墨-环氧复合材料中的贴紧型分层和孔隙的表征与评估,为了提高激光超声对复合材料中近表面缺陷和厚度方向的相邻缺陷的分辨能力,采用了波长为 $1.064\mu\text{m}$ 、能量约 30mJ 、脉宽 $10\sim 12\text{ns}$ 的激光短脉冲激发超声波,尽量减少超声脉冲的宽度,所研究的复合材料试样厚度达到 22mm ,采用压电原理的换能器接收来自复合材料试样中的OA信号,其试验研究表明,当试样中存在缺陷时,在时域上会产生可识别的OA脉冲信号,且来自孔隙的OA信号比贴紧型缺陷的信号

更明显。刘松平等^[21-22]也开展了激光超声检测方面研究,尝试了激光激励-激光接受的方法,其研究表明,利用合理能量的激光脉冲可以比较容易地在复合材料中激发窄脉冲超声信号,而且此超声信号与复合材料中的缺陷完全存在与传统超声相一致的时域特性和缺陷识别方法,但当采用激光干涉原理接收来自复合材料中的超声信号时,其灵敏度会变得非常低,而且对试样或制件的扫描检测效果和适用性等远不如传统的超声检测。Sun等^[23]也尝试过将激光超声用于复合材料缺陷表征的实验探索,Lee等^[24]还开展过激光超声在复合材料修理补片评估方面的试验探索,对实验室的样品有一定的试验级的研究效果。

总体上,上述超声检测方法是基于入射声波在被检测复合材料厚度方向的传播,获取超声检测信号,进行缺陷的判别,当要获取每个不同位置的检测信号时,就需要移动换能器,对被检测复合材料零件进行覆盖扫描。理论上,这在一定程度上,影响了超声检测效率的提高。针对这一技术不足,导波(如Lamb波)可能是一种潜在的解决方法。

1.5 超声导波检测方法的研究与进展

超声导波(Ultrasound Guided Wave)作为一种有可能提高某些特殊复合材料结构超声检测效率的潜在方法,近年来,也有一些这方面的研究,特别是在兰姆(Lamb)波检测方法研究方面,近年也涌现出了比较多的业内研究报道,包括基于传统超声波激励Lamb波的方法和基于激光超声激励Lamb波的方法。例如,Su等^[17]回顾了利用Lamb波表征和评估复合材料中损伤方面的研究进展。总体上,目前在航空复合材料Lamb波NDT & E方面,还是以缺陷可检性和复合材料中Lamb波基本行为及其潜在应用的实验室探索为主。例如,Toyama等^[16]针对复合



图4 适用于大型航空复合材料翼类结构的CUS-6000 AUT超声检测系统
Fig.4 CUS-6000 AUT system for large aero-composites wing-type structures

材料层压结构中的冲击引起的分层,开展了利用 Lamb 波检测分层方法的试验研究,旨在提高复合材料中分层的检测效率,其试验研究结果表明,利用 Lamb 波方法对试样中的冲击引起的分层有一定的检出能力。Yashiro 等^[18]专门研究了复合材料中的 Lamb 波传播基本行为,开展了基于可视化的 Lamb 波复合材料 NDT & E 方法的试验研究。Ochôa 等^[19]针对复合材料板中的低能量冲击损伤,也开展了 Lamb 波方法的试验研究,并将 Lamb 波的检出结果与 10MHz 超声 C 扫描结果、ESPI 检出结果、光学显微结果进行了比对,试样采用 M30SC/120DT 碳纤维/环氧单向预浸料热压罐固化成型,试样为多向铺层,共 14 个铺层,检测试样大小为 400mm × 200mm × 2.24mm,试验测得的纵波声速为 7200m/s,横波声速为 3368m/s,采用 1.2kg、 ϕ 12.7mm 半球形冲击头,以 3J、5J、10J 冲击能量分别冲击 3 个不同的试样,以模拟低能量冲击损伤,试验结果表明,在 500kHz 时, S0 模式的回波信号存在明显的不同(图 5^[18]),冲击能量越大,回波信号越小。但由于 Lamb 波检测受被检测复合材料中声衰减和试样几何特征变化的困扰,在航空复合材料结构上的应用有一定的局限和困难。

Chakraborty 等^[25]利用超声导波方法开展蜂窝夹芯结构试样中损伤的检测试验研究。Putkis 等^[26]研究了超声导波在复合材料中的传播基本行为。总体上,超声导波目前在航空复合材料中的应用还是非常受限的。一方面,复合材料中的声衰减远比金属材料强烈,这会严重影响导波在复合材料中的传播距离,降低声波的频率,又会显著降低声波在复合材料中的缺陷检出能力和分辨率;另一方面,航空复合材料结构的几何特征往往是不断变化的,这会明显改变导波在复合材料中的传播行

为,进而产生可能影响缺陷判别的干扰信号。此外,超声导波还难以做到对复合材料中的缺陷类型的确切定性分析和评估。因此,现阶段,超声导波主要还是作为一种声学方法选项,处于实验室试样探索阶段。限于超声导波检测的原理,与金属材料中的超声导波检测相似,这种方法对几何特征相对不变的对象,有一定的检测可行性。例如, Raišutis 等^[51]研究了超声导波在直径为 3mm 的碳纤维复合材料细棒试样中传播的基本规律,在模拟计算分析基础上,通过超声导波试验,探讨了利用超声检测其中的分层的可行性,在试验研究中,将复合材料细棒浸在水槽中,利用 400kHz、 ϕ 4mm 的探头,产生纵波模式的导波,其试验测得的纵波相速为 9600m/s,试验结果表明,通过检测来自复合材料细棒的漏波,对试样中预置的冲击引起的分层有一定的检出效果。不过,导波的传播对试样的厚

度非常敏感,因此,导波方法对厚度或直径单一的复合材料试样有一定的潜在效果,对变厚度的复合材料结构,因存在非常复杂的波形变换,会造成超声信号解读非常困难。此外,由于复合材料的各向异性和强烈衰减,也会增加超声导波检测的难度。因此,目前超声导波尚不太适用航空复合材料结构的检测。

总体上,超声是目前复合材料最为普遍和广泛应用的检测技术,但有些特殊的复合材料结构或结构部位的缺陷,例如,复合材料蜂窝芯本身的微结构变化、变形、开裂等,利用常规超声检测方法,就显得有一定的困难。为此,近年来,推出了 X 射线检测技术。

2 X 射线检测技术的研究与进展

目前在复合材料 X 射线检测方法和检测技术方面的研究主要集中在微结构的表征、蜂窝夹层结构中的蜂窝芯的检测,以及某些非常特殊

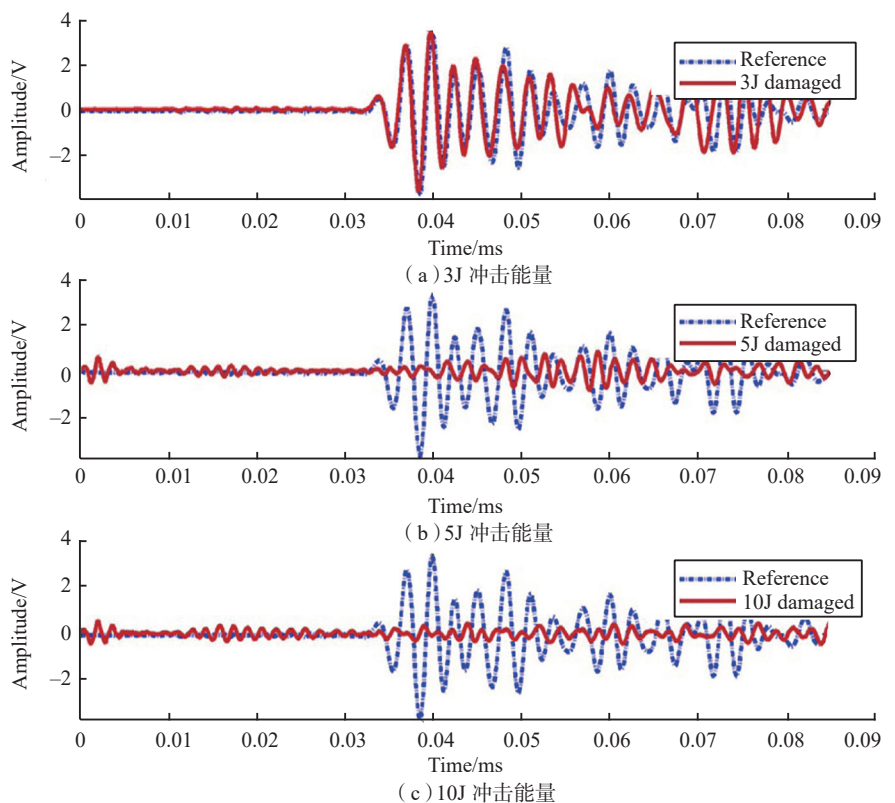


图5 不同冲击能量Lamb波检测结果

Fig.5 Experimental results by using Lamb wave

和复杂的复合材料结构部位的缺陷表征与评估。例如,复合材料中的纤维取向的表征,Prade等^[35]就报道了最近在这方面的试验研究结果,采用了一种X射线向量照相法(X-ray Vector Radiography)表征短纤维增强复合材料中的纤维取向,取得了较好的试验研究效果。Revolv等^[36]报道了利用X射线散射成像方法,开展了碳纤维增强树脂基复合材料层压纤维结构表征的试验研究,对4种不同织物碳纤维增强树脂基复合材料试样进行了试验研究,并与高分辨率X射线CT结果进行了对比,结果表明,利用X射线散射成像方法可以观察到织物图形结构和分析碳纤维束的大小。Dietrich等^[37]报道了蜂窝夹芯微观和介观结构的3D层析试验研究结果,采用 μ -CT(Computed micro-Tomography)方法,试验结果表明, μ -CT方法对试样中夹芯结构的蜂窝芯的微观、介观结构和冲击变形有较好表征效果,利用3D图像分析技术可以表征蜂窝芯的几何变化和面板纤维的取向。这种方法主要适用于小样品的微结构或变形、微缺陷表征和分析。

目前在航空复合材料结构的X射线检测技术方面,获得最为广泛应用的还是蜂窝夹层中芯格缺陷的检测、部分密度与复合材料本体密度差异较大的外来物的检测和评估,目前基本上是以DR检测方法为主,但对于复合材料中的分层,基于X射线衰减原理的CT、DR等方法则难以检出。FR-160是笔者及其团队所在的中航复合材料有限责任公司研制的一款专门用于复合材料DR检测的自动扫描检测系统,一直在复合材料蜂窝夹芯结构的自动化扫描检测中发挥十分重要的应用,与胶片法X射线检测相比,检测效率有了巨大的飞跃。

以上检测方法,总体上还是属于“点”或“点阵”式的扫描检测方

法,检测效率的提高还是存在一定技术制约。为此,近年来推出了红外、ESPI等“面扫描”的检测方法,尽管这类检测方法目前对复合材料的缺陷检出能力和实用的检测结构非常有限,但作为复合材料NDT & E技术的补充,近年也有了不少的试验研究进展。

3 红外热像检测方法的研究与进展

有关复合材料红外热像检测方法的可检性研究,近年比较活跃,例如,文献[29-31,52]先后报道了相关的试验研究结果。不过,在航空复合材料结构制造阶段,目前红外检测方法研究主要还是更多地位于实验室试样研究层面,但在民航飞机复合材料的维护检测中,红外热像有用于复合材料升降舵蜂窝积水的原位检测案例^[53]。目前可用于复合材料缺陷、损伤表征与评估的红外热像方法可分为两种:被动红外(Passive Thermography)和主动红外(Active Thermography)。前者适用于试样本身与周围物体、环境不同温度的场合的检测;后者需要对试样进行外部热加载。用于复合材料无损检测的红外方法,通常需要外部热源加载。其中,有可能用于复合材料缺陷表征与评估的主动红外检测方法,又可分为两种:锁相红外方法(Lock-in Thermography)和脉冲红外方法(Pulsed Thermography)。前者是施加周期性热能量波对试样表面加热,然后测量和分析试样表面温度的变化,借此进行试样的检测和缺陷评定;后者用热激励脉冲对试样加载,然后,聚焦每个图像点的温度衰减曲线,借此分析试样中是否存在异常。例如,文献[29-31,51]针对复合材料试样,开展了不同红外热像法(Infrared Thermography)检测试验研究,探讨了用红外热像法表征复合材料中的缺陷、损伤的可检性,包括采用穿透法和反射法的红外热像方法,以及红外检出结果与超声检

出结果的比对。Zheng等^[52]采用一种改进后的脉冲红外热像方法检测碳纤维复合材料试样,试验研究结果表明,对于复合材料无损检测,脉冲红外检测方法会更合适些。因为它的检测速度可以更快些,但存在测量噪声和来自热像中的非均匀背景的影响。为了改进脉冲红外这一不足,一种方法是利用傅里叶变换对热像进行处理,利用相位数据提取,借助数学形态法(Mathematical Morphology, MM),改进脉冲相位热图法(Pulse Phase Thermography)的图像质量,在文献[52]中报道了部分相关试验研究结果(图6^[52]),研究用的复合材料试样为VARTM,大小约120mm×95mm×2.6mm,方形人工缺陷位于试样中单个铺层和两个铺层深度位置,缺陷类型为Teflon贴膜分层,缺陷B、C、D一个铺层深,缺陷边长依次为16mm、8mm、4mm,缺陷E、F、G两个铺层深,缺陷边长依次为16mm、8mm、4mm,缺陷A一个铺层深,大小14mm×6mm,采用闪光灯加热,NEC TAS-G100EXP红外摄像机采集图像,320×240像素,试验结果表明:红外检测方法对复合材料中非常薄和近表面缺陷有一定的检出效果,不过,边长为4mm的缺陷未能清晰检出。即使采用了MM降噪,其展现的图像质量仍然有待改进。

复合材料红外检测方面的研究,主要还是以脉冲红外热像方法为主,研究工作多限于带有较大尺寸的人工缺陷、损伤的检测试验研究,对于复合材料制造阶段,目前红外热像检测方法的适用性还非常受限。

4 ESPI检测方法的研究与进展

电子散斑干涉法(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)用于某些特殊复合材料结构和特殊场合下的缺陷或损伤的检测与评估,近些年,也有过相关的研究报道^[32-34]。其中,Choi^[33]针

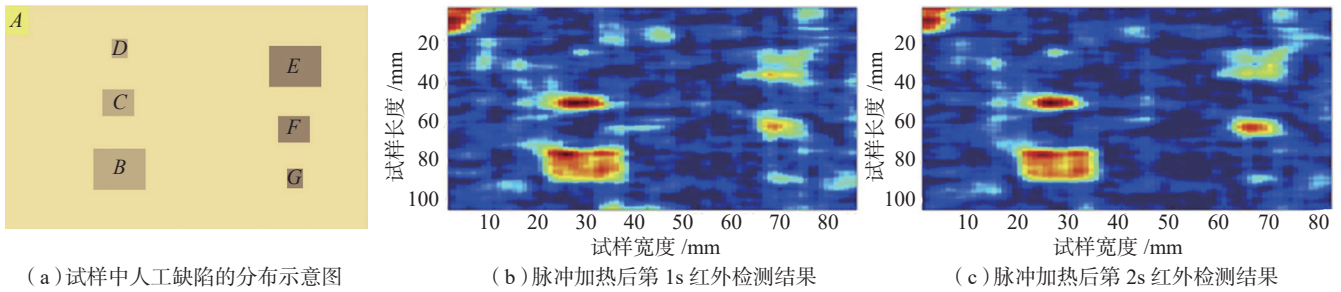


图6 VARTM复合材料试样中人工缺陷红外检测结果

Fig.6 Experimental results of man-made defects in VARTM composite specimen by using IR

对复合材料蜂窝结构中冲击引起的分层开展了 ESPI 方法的可检性试验研究,并与红外和超声检出结果进行比较,其中,ESPI 检测试验用的激光源为 Nd : YAG 532nm 激光器,采用 4 步相移技术测量试样的面外位移(Out-of-Plane Surface Displacement),通过解调所记录的相位,提取试样表面的位移,采用热加载方式。采用 SC2000 红外摄像机,试样为 100mm × 100mm × 8mm 的碳纤维复合材料蒙皮 + 铝蜂窝芯 + 碳纤维复合材料蒙皮结构,其中之一含有 $\phi 30\text{mm}$ 蒙皮 - 芯 Teflon 薄膜脱粘,缺陷大小由超声 C 扫描确定大小为 $\phi 30.7\text{mm}$;另一缺陷为冲击损伤,其大小由超声确定,在冲击点一侧,损伤大小为 $16.4\text{mm} \times 4.7\text{mm}$,在冲击点背面,损伤大小为 $14.1\text{mm} \times 20.8\text{mm}$ 。其试验结果表明,蜂窝形状也能清晰可见,而在 ESPI 和红外检出结果中,则无此指示。图 7^[33] 是 3 种方法对 $\phi 30\text{mm}$ 蒙皮 - 芯 Teflon 薄膜脱粘的检出结果比对。

除了上述检测方法外,是否有其他更好的复合材料 NDT & E 技术或者方法,一直是近年来困惑业内外专家的技术问题,许多研究者都渴望在这方面进行技术创新。为此,也有一些这方面的探索与研究。

5 其他检测方法的研究与进展

碳纤维本身具有一定导电性,但当碳纤维与基体树脂固化在一起形成复合材料结构整体时,尽管其结构

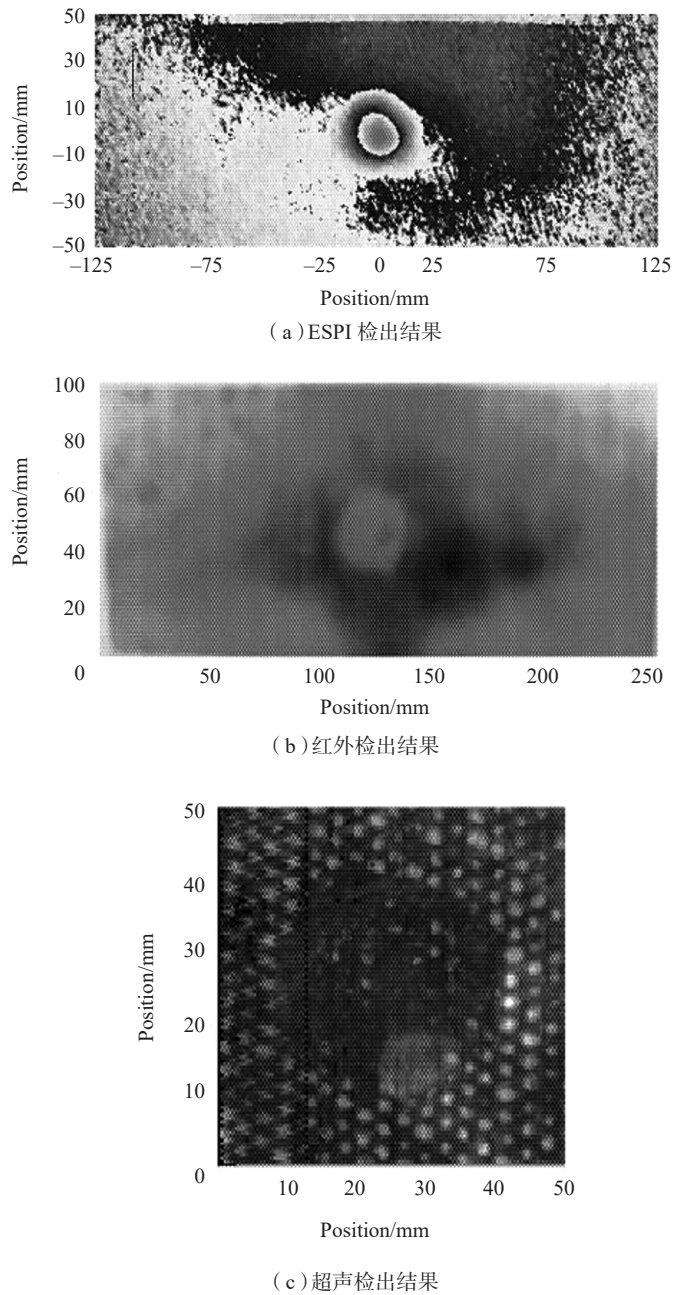


图7 $\phi 30\text{mm}$ 蒙皮-芯Teflon薄膜脱粘ESPI、超声、红外检测结果对比

Fig.7 Comparison of experimental results of $\phi 30\text{mm}$ delamination by ESPI, UT and IR

的导电性会变得非常弱,但仍属于一种弱导电介质,而且复合材料的弱导电行为与纤维分布和取向有关,可以将碳纤维复合材料视为由电阻和电容构成的弱导电介质,当复合材料内部存在缺陷或纤维取向、密度等亚结构性变化时,会改变复合材料中的阻容特性,基于此物理现象,近年也有人在探索碳纤维复合材料电阻法检测的可检性,但主要是停留在针对样品的原理性方法试验研究阶段。因为毕竟复合材料的导电性非常弱,可提取到的可识别的检测信号也非常不明显,但作为一种可能的检测方法探索,还是可以一试。

此外,高频脉冲涡流作为一种检测方法,近年也有这方面的研究报道,对纤维铺层阶段的一些材料缺陷有一定的检测效果。但通常检测深度会非常受限。目前这方面的研究和应用还不多。利用声波在复合材料中引起的微振动效应的声振检测方法,对缺陷的存在会引起被检测部位刚度显著变化的复合材料有较好的检测效果,目前比较成功的案例就是用于复合材料胶接结构的无损检测,非常实用和廉价。空气耦合超声为解决一些不能使用液体耦合剂检测的场合提供了检测方法的可能选择。THz 作为某些特殊复合材料的无损检测解决方案,也有部分这方面的研究报道,例如,Abin 等^[38] 利于 THz 方法开展了隔热材料的结构表征方面的试验研究;Zhang 等^[39] 也开展了 THz 波在碳纤维复合材料试样中的反射与透射特性的试验分析,旨在研究利用 THz 进行复合材料缺陷表征与检测的可行性。不过,目前在这方面的研究进展和预期效果尚非常有限。

复合材料 NDT & E 技术应用

1 复合材料 NDT & E 技术应用方向

复合材料 NDT & E 技术研究主

要包括 3 个大的方面:(1) NDT & E 新机理新方法研究;(2) NDT & E 新技术研究;(3) NDT & E 应用研发,包括新仪器设备、新工艺标准等。围绕这些研究,其应用方向主要包括以下 4 个方面。

(1) 面向复合材料研发过程中的 NDT & E。主要是结合各种复合材料的研发,利用所研究的 NDT & E 方法、技术等,进行材料内部缺陷的表征和评估,用于复合材料缺陷判别方法的构建和缺陷基础判据的建立,而且利用超声原理的 NDT & E 方法和技术,还可以用于揭示材料内部的微结构和弹性性能。

(2) 面向复合材料结构制造过程中的 NDT & E。主要是针对各种复合材料成型工艺及其结构、制造过程(包括切边、制孔、装配)等,利用适用的 NDT&E 技术,进行复合材料结构的无损检测,用于解决复合材料结构内部缺陷的无损检测与评估,复合材料结构的质量控制和工艺改进与提升,其主要的应用特点和要求是:通常需要在制造原位或现场,采用技术成熟度很高的 NDT & E 技术。

(3) 面向复合材料服役过程中的 NDT & E。主要针对航空产品在服役过程中的定期检测和监测要求,利用适用的 NDT & E 方法和检测技术,对各种复合材料结构进行原位检测,及时发现复合材料结构在服役期间可能产生的损伤,以便及时进行损伤修理,确保复合材料结构安全服役。其最为基本的应用特点和要求是便携、快速、简洁,适合外场环境下的 NDT & E。

(4) 面向复合材料修理、试验等过程中的损伤 NDT & E。主要是针对航空产品维护、修理、试验等过程,利用各种适用的 NDT & E 方法和技术,对经过一段使用或试验后的复合材料结构进行 NDT & E,及时发现复合材料结构在承载环境下可能产生的损伤,以便做出进一步后续使用

或修理或更换的决策。通常要求使用高技术成熟度的 NDT & E 技术,包括检测方法和检测仪器设备等。

从技术上,通常很难构建一种检测方法或检测技术能够完全很好地解决所有问题和对象的 NDT & E。但综合而言,超声方法和基于超声原理的检测技术是目前最为普遍适合复合材料的 NDT & E 技术,也是目前在复合材料领域得到最为广泛工程应用的检测方法和检测技术,而且以超声 C 扫描为代表的自动化检测程度也越来越高,已成为复合材料结构制造阶段无损检测技术应用的重要标志。因此,超声检测技术方向仍将是今后一个非常活跃的复合材料 NDT & E 研究与应用方向,其中,基于各种阵列超声、高分辨率超声方法的 NDT & E 技术仍是今后的重要发展方向。

2 超声检测技术的应用

利用超声波在复合材料中的传播行为及其变化规律,可以揭示复合材料中的分层、气孔、疏松、夹杂、孔隙、贫胶、富树脂、脱粘等绝大部分复合材料缺陷和损伤,而且,利用构建合理的缺陷判别技术和检测技术,可以非常有效地进行复合材料检出缺陷和损伤的定性定量定位分析。因此,目前超声方法和超声检测技术在复合材料 NDT & E 方面的应用最为广泛。目前基于超声原理的各种检测方法和检测技术在复合材料方面已得到了广泛的应用,包括:

(1) 用于复合材料的缺陷表征与评估。

(2) 用于复合材料工艺研究过程中的缺陷检测与评估。

(3) 用于复合材料结构研制期间的 NDT & E。

(4) 用于复合材料及其结构量产过程中的 NDT & E。

(5) 用于航空产品服役、维修、试验等期间的复合材料结构 NDT & E 等。

从检测应用角度,基于超声纵波反射法的 A 扫描方法及其检测技术仍然是很多场合下,包括复合材料制造阶段的检测、外场检测、修理检测等,一种被广泛使用的快捷检测方法和检测技术。对于批量复合材料结构,特别是大尺寸复合材料结构,基于超声纵波反射和穿透原理的 C 扫描检测技术普遍受到青睐,目前已在复合材料结构制造阶段得到了显著的实际应用。其中,基于单声源的超声检测技术目前仍然是航空复合材料 NDT & E 的主要技术应用方向;基于阵列超声的检测技术已不断地推广应用到大型复合材料结构和几何规则的复合材料结构部位的快速无损检测;在激光超声和导波检测方法应用方面,目前总体上还是以实验室试样级研究和方法研究为主。

3 X 射线检测技术的应用

目前 X 射线检测技术在航空复合材料 NDT & E 方面的应用主要包括:(1)面向试样试片级微结构分析与表征,例如,基于 CT 和微 CT 原理和方法的复合材料微结构表征、微气孔的分析、蜂窝芯的变形分析等;(2)复合材料中高密度夹杂物的检测;(3)复合材料蜂窝夹芯结构的 NDT & E。

总体上,X 射线检测技术在复合材料蜂窝夹芯结构无损检测方面已有了比较好的工业级应用,也是目前复合材料蜂窝夹芯结构无损检测的重要手段,其中 DR 检测技术目前已经得到了很好的实际检测应用效果,检测效率高,无废液废物排放,在航空复合材料结构无损检测应用方面,DR 检测技术将会不断地得到普及和替代传统的胶片照相法。CT 主要用于某些不便使用超声检测方法的特殊结构部位的检测,通常不适合复合材料中分层等面积型缺陷的检测,也不适合复合材料翼身类壁板结构以及现场和较大尺寸的复合材料板类制件的检测。但 CT 作为一种能

够获得被检测物体三维特性的成像技术,在一些特殊的复合材料结构或者结构部位中、具有合理密度差的缺陷表征与检测分析方面,具有较好的检测应用效果。

4 其他检测技术的应用

声振检测方法在复合材料胶接结构方面一直有良好的检测应用,也是复合材料蜂窝胶接结构(如雷达罩)的一种快捷廉价的检测方法,有很好的实际检测应用效果。红外、ESPI 作为非接触检测方法,在外场某些复合材料结构(如蜂窝夹芯结构)中的损伤检测方面,有一些潜在的应用前景和部分应用案例。不过,通常检出的结果需要借助超声方法进一步确认细节。

THz 检测方法目前尚不适用航空复合材料结构的检测应用,目前主要是对一些泡沫类的隔热结构有一定的检测效果。涡流、电阻法等主要还是作为一种碳纤维复合材料检测方法尚处于原理性探索期,其中基于高频涡流检测方法对碳纤维复合材料预浸料试样在铺放阶段可能引入的“缺陷”有一定的检出效果,但检测的厚度非常受限。

复合材料 NDT & E 技术发展面临挑战

来自航空复合材料的发展对 NDT & E 技术带来的需求和挑战可分为以下 4 个方面:

(1)随着复合材料进一步在航空领域规模化应用水平的提升,将会不断推出各种基于复合材料的航空新结构,特别是随着一些关重复合材料结构的推出和工程化应用,将会对无损检测和质量控制方面的技术要求比以往更高更严,更加需要一些检测效率和自动化程度更高、检测结果的可视化程度更好的先进的无损检测与评估方法、检测技术等,这将会给无损检测与评估技术研究与创新提出新的挑战。

(2)随着各种新复合材料、工艺及结构的推出,需要业内外专家联合开展技术创新和技术研究,探索能够用于各种新型复合材料、新工艺、新结构缺陷表征、评估与检测的新方法、新技术,支撑新的复合材料研究、新的成型工艺研发、新的结构设计与制造、新的复合材料的安全服役。

(3)随着大量复合材料在航空领域的应用,复合材料服役结构的无损检测与损伤评估、复合材料结构寿命评估与预测,在未来都将面临非常现实的研究与应用需求。

(4)随着复合材料进一步的工程化应用和智能制造的全面推进,复合材料智能化检测与评估技术将会比以往任何时候都要吸引业内的眼球,且会不断成为该方向的研究热点。

从航空复合材料 NDT & E 技术自身发展需求,其面临的主要发展需求和技术挑战可包括以下 4 个方面。

(1)在超声检测技术方面:面向不断推出的各种新型复合材料、复合材料工艺、复合材料结构,如何构建新的缺陷识别机理、缺陷判据、检测新方法、新技术仍是该领域面临的技术挑战;面向不断大型化、复杂化的复合材料结构,研究如何建立具有多维特征的快速可视化检测方法,形成工业级的可视化与智能化检测技术及其系统,将会成为今后较长一段时期内该领域的技术挑战和发展方向。

(2)在 X 射线检测技术方面:主要是发展环境友好、低废液废物排放的复合材料检测技术,为此,DR 将会逐步替代胶片照相法,但这可能需要不懈地改进 DR 的检测分辨率。

(3)在红外、ESPI 检测、声振等检测技术方面:需要结合适合检测的复合材料及其结构对象、检测应用环境,不断地研发可更好的量化控制且易于操作、易于实现的加载方法、加载技术,研发能够快速实现检测与提供高质量图像的缺陷评估技术。

(4) 在新方法新技术探索方面: 主要是结合未来复合材料产业链的发展和智能制造, 开展可视化、智能化友好的无损检测与评估新方法、新技术、新装备。与未来复合材料智能制造和全寿命设计进行无缝对接。

总之, 不论哪种无损检测方法的研究和检测技术的研发, 未来复合材料 NDT & E 技术将会在很长的一个时期, 一直继续沿着“检测→评估→智能检测→智能评估→智慧检测→智慧评估→智慧预测”的技术轨迹发展, 也将会成为该领域的一个非常重要和极富挑战性的研究方向。

结论

(1) 近年的研究表明, 超声仍然是复合材料领域最为活跃的热点方向, 包括传统的单声源超声检测技术和基于多声源的阵列超声技术, 因为利用合适的超声方法和超声技术, 既可以实现缺陷的表征、评估与定性定量检测, 还易于实现航空复合材料结构的自动化、可视化及智能化的 NDT & E。但面临不断推出的复合材料新材料、新工艺、新结构和新的检测需求, 仍然有许多超声 NDT & E 技术问题和难题有待研究和攻克。

(2) X 射线检测方法(包括 DR 和 CT)对于一些特殊的结构或者部位有较好的检测效果, 但通常不是复合材料各种缺陷 NDT & E 的首选方法, 除非用超声检测技术有困难。

(3) 红外、ESPI 检测方法, 作为非接触面积型扫描检测方法, 对于一些特殊的结构或者部位、场合, 特别是表面和近表面缺陷, 有望成为复合材料 NDT & E 的补充, 不过, 要形成成熟度的复合材料无损检测技术, 还需要不断地开展相关的创新性研究与可检性研究。

(4) 声振检测方法, 作为一种非常廉价的无损检测方法, 在复合材料胶接检测方面, 仍然会继续得到使用。

(5) THz、涡流、电阻法等, 对于某些适用的复合材料, 作为检测方法探索, 有一定的研究意义。

(6) 智能检测与评估将会成为未来复合材料 NDT & E 的技术发展方向。

致谢

通常进展回顾方面的综述性文章不太好写, 既要查阅大量的文献, 并分析总结提炼, 又要有一定的技术高度和技术心得, 还得对目前本领域的国内外团队的研究进展情况有一定了解和交流, 非常耗时间, 篇幅和技术内容上都不太好拿捏。好在有北京航空航天大学的周正干教授的不断监督和鞭策, 才能在忙中力促此文。在此, 非常感谢周老师的策划和学术支持。也要感谢两位论文评审专家的审稿建议和指点以及《航空制造技术》编辑部的帮助, 使此文有了进一步修改的动力。

参考文献

- [1] ZHANG X S, CHEN Y J, HU J L. Recent advances in the development of aerospace materials[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22–34.
- [2] EL-SABBAGH A, STEUERNAGEL L, ZIEGMANN G. Characterisation of flax polypropylene composites using ultrasonic longitudinal sound wave technique[J]. Composites: Part B, 2013, 45: 1164–1172.
- [3] HASIOTIS T, BADOGIANNIS E, TSOUVALIS N G. Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 57(3): 192–203.
- [4] KERSEMANS M, MARTENS A, ABEELE K V D, et al. Detection and localization of delaminations in thin carbon fiber reinforced composites with the ultrasonic polar scan[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(4): 522–534.
- [5] HARIZI W, CHAKI S, GÉRARD

D, et al. Mechanical damage characterization of glass fiber reinforced polymer laminates by ultrasonic maps[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 70: 131–137.

[6] POST W, KERSEMANS M, SOLODOV I, et al. Non-destructive monitoring of delamination healing of a CFRP composite with a thermoplastic ionomer interlayer[J]. Composites: Part A, 2017, 101: 243–253.

[7] 刘菲菲, 刘松平, 周正干, 等. 蜂窝共固化结构高分辨率超声 C 扫描方法及应用[J]. 无损检测, 2018, 40(8): 1–5.

LIU Feifei, LIU Songping, ZHOU Zhenggan, et al. High resolution ultrasonic C-scan method for cocured honeycomb structures and its applications[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(8): 1–5.

[8] 刘菲菲, 刘松平, 周正干, 等. 复合材料层压结构中线性缺陷的超声评估方法研究[J]. 无损检测, 2018, 40(S): 139–143.

LIU Feifei, LIU Songping, ZHOU Zhenggan, et al. Ultrasonic evaluation of linear defect in composite laminates[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(S): 139–143.

[9] RUZEK R, LOHONKA R, JIRONC J. Ultrasonic C-scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification[J]. NDT & E International, 2006, 39(2): 132–142.

[10] BALASUBRAMANIAM K, WHITNEY S C. Ultrasonic through-transmission characterization of thick fibre reinforced composites[J]. NDT & E International, 1996, 29(4): 225–236.

[11] FREEMANTLE R J, HANKINSON N, BROTHERHOOD C J. Rapid phased array ultrasonic imaging of large area composite aerospace structures[J]. Insight, 2005, 47(3): 129–132.

[12] NAGESWARAN C, BIRD C R, TAKAHASHI R. Phased array scanning of artificial and impact damage in carbon fibre reinforced plastic (CFRP)[J]. Insight, 2006, 48(3): 155–159.

[13] YU L Y, TIAN Z H. Guided wave phased array beam forming and imaging in composite plates[J]. Ultrasonics, 2016, 68:

43–53.

[14] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. *NDT & E International*, 2006, 39(7): 525–541.

[15] LI C, PAIN D, WILCOX P D, et al. Drinkwater, imaging composite material using ultrasonic arrays[J]. *NDT & E International*, 2013, 53: 8–17.

[16] TOYAMA N, TAKATSUBO J. Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(9): 1293–1300.

[17] SU Z, YE L, LU Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295(3–5): 753–780.

[18] YASHIRO S, TAKATSUBO J, TOYAMA N. An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(15–16): 3202–3208.

[19] OCHÔA P, INFANTE V, SILVA J M, et al. Detection of multiple low-energy impact damage in composite plates using Lamb wave techniques[J]. *Composites Part B*, 2015, 80: 291–298.

[20] KARABUTOV A A, PELIVANOV I M, PODYMOVA N B. Nondestructive evaluation of graphite-epoxy composites by the laser ultrasonic method[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2000, 36(6): 497–500.

[21] 刘松平, 郭恩明, 刘菲菲, 等. 激光超声检测碳纤维增强树脂基复合材料的缺陷评估技术研究[J]. *无损检测*, 2007, 29(7): 396–398.

LIU Songping, GUO Enming, LIU Feifei, et al. Evaluation of defects in carbon fiber-reinforced composites by laser ultrasonic technique[J]. *Nondestructive Testing*, 2007, 29(7): 396–398.

[22] 刘松平, 刘菲菲, 郭恩明, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料中激光脉冲能量对超声L波的影响[J]. *航空制造技术*, 2007, 50(11): 85–87.

LIU Songping, LIU Feifei, GUO

Enming, et al. Effect of laser pulse energy on ultrasonic L-Wave in carbon fiber reinforced composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2007, 50(11): 85–87.

[23] SUN G K, ZHOU Z G, CHEN X C, et al. Ultrasonic characterization of delamination in aeronautical composites using noncontact laser generation and detection[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(26): 6481–6486.

[24] LEE Y J, LEE J R, BEOMIHN J. Composite repair patch evaluation using pulse-echo laser ultrasonic correlation mapping method[J]. *Composite Structures*, 2018, 204: 395–401.

[25] CHAKRABORTY N, RATHOD V T, MAHAPATRA D R, et al. Guided wave based detection of damage in honeycomb core sandwich structures[J]. *NDT & E International*, 2012, 49: 27–33.

[26] PUTKIS O, DALTON R P, CROXFORD A J. The anisotropic propagation of ultrasonic guided waves in composite materials and implications for practical applications[J]. *Ultrasonics*, 2016, 65: 390–399.

[27] LIU S P, GUO E M, LEVIN V M, et al. Application of pulse acoustic microscopy technique for 3D imaging bulk microstructure of carbon fiber-reinforced composites[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44: 1037–1044.

[28] PETRONYUK Y, MOROKOV E, LEVIN V, et al. Study of failure mechanisms of CFRP under mechanical load by impulse acoustic microscopy[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2017, 57(7): 703–708.

[29] K A L Y A N A V A L L I V, ABILASHARAMADHAS T K, SASTIKUMAR D. Long pulse thermography investigations of basalt fiber reinforced composite[J]. *NDT & E International*, 2018, 100: 84–91.

[30] MAIERHOFER C, MYRACH P, REISCHEL M, et al. Characterizing damage in CFRP structures using flash thermography in reflection and transmission configurations[J]. *Composites: Part B*, 2014, 57: 35–46.

[31] MEOLA C, BOCCARDI S, CARLOMAGNO G M, et al. Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites

with infrared thermography and ultrasonics[J]. *Composite Structures*, 2015, 134: 845–853.

[32] RICHARDSON M O W, ZHANG Z Y, WISHEART M, et al. ESPI non-destructive testing of GRP composite materials containing impact damage [J]. *Composites Part A*, 1998, 29: 721–729.

[33] CHOI M Y. Inspection of impact damage in honeycomb composite by ESPI, thermography and ultrasonic testing[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2008, 22(9–11): 1033–1038.

[34] YAN P Z, WANG Y H, SUN F Y, et al. Shearography for non-destructive testing of specular reflecting objects using scattered light illumination[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 112 : 452–457.

[35] PRADE F, SCHAFF F, SENCK S, et al. Nondestructive characterization of fiber orientation in short fiber reinforced polymer composites with X-ray vector radiography[J]. *NDT & E International*, 2017, 86: 65–72.

[36] REVOL V, PLANK B, KAUFMANN R, et al. Laminate fibre structure characterisation of carbon fibre-reinforced polymers by X-ray scatter dark field imaging with a grating interferometer[J]. *NDT & E International*, 2013, 58: 64–71.

[37] DIETRICH S, WEIDENMANN K, ELSNER P. 3D tomographic characterization of sandwich structures[J]. *NDT & E International*, 2014, 62: 77–84.

[38] ABIN A, UROŠ PUC, ANTON JEGLI, et al. Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging[J]. *NDT & E International*, 2016, 77: 11–18.

[39] ZHANG J, SHI C C, MA Y T, et al. Spectroscopic study of terahertz reflection and transmission properties of carbon-fiber-reinforced plastic composites[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(5): 054106.

[40] SCOTT W R, GORDON P F. Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation of layered composite materials

- [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1984, 62(1): 108–116.
- [41] KARABUTOV A A, MURASHOV V V, PODYMOVA N B, et al. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1998, 3396: 103–111.
- [42] NAIR S M, HSU D K, ROSE J H. Porosity estimation using the frequency dependence of the ultrasonic attenuation[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1989, 8(1): 13–26.
- [43] 刘松平, 刘菲菲, 杨玉森, 等. 复合材料结构超声智能化检测与评估技术进展浅谈[J]. 无损检测, 2018(40): 145–150.
- LIU Songping, LIU Feifei, YANG Yusen, et al. Preliminary review of intelligent ultrasonic NDT & E for composite structures[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(S): 145–150.
- [44] STONE D E W, CLARKE B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fibre reinforced plastics[J]. Non-Destructive Testing, 1975, 8(3): 137–145.
- [45] MARTIN B C. Ultrasonic attenuation due to voids in reinforced plastics[J]. NDT International, 1976, 9: 242–246.
- [46] HALE J M, ASHTON J N. Ultrasonic attenuation in voided fiber-reinforced plastics[J]. NDT International, 1988, 21: 321–326.
- [47] DANIEL I M, WOOH S C, KOMSKY I. Quantitative porosity characterization of composite materials by means of ultrasonic attenuation measurements[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1992, 11(1): 1–8.
- [48] REYNOLDS W N, WILKINSON S J. The analysis of fiber-reinforced porous composite materials by the measurement of ultrasonic wave velocities [J]. Ultrasonics, 1978, 16: 159–163.
- [49] JEONG H, HSU D K. Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites[J]. Ultrasonics, 1995, 33(3): 195–203.
- [50] KARABUTOV A A, PODYMOVA N B. Nondestructive evaluation of fatigue-induced changes in the structure of composites by an ultrasonic method using a laser[J]. Mechanics of Composite Materials, 1995, 31(3): 301–304.
- [51] RAIŠUTIS R, KAŽYS R, ŽUKAUSKAS E, et al. Application of ultrasonic guided waves for non-destructive testing of defective CFRP rods with multiple delaminations[J]. NDT & E International, 2010, 43(5): 416–424.
- [52] ZHENG K Y, CHANG Y S, WANG K H, et al. Improved non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites using pulsed thermograph[J]. Polymer Testing, 2015, 46: 26–32.
- [53] 刘松平, 刘菲菲. 先进复合材料无损检测技术 [M]. 北京: 航空出版社, 2017.
- LIU Songping, LIU Feifei. Advanced NDT & E techniques for composites[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2017.
- 通讯作者: 刘松平, E-mail: liusp2014@163.com.

Review of Research Progress on Nondestructive Testing and Evaluation Techniques for Aero-Composites

LIU Songping¹, LIU Feifei^{1,2}, LI Legang¹, YANG Yusen¹

(1. AVIC Composite Co., Ltd., Beijing 101300, China;

2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The new researches and progresses on nondestructive testing and evaluation (NDT & E) for aero-composites have been reviewed in this paper, including three parts. In part 1, the progresses on researches of NDT & E methods for aero-composites were reviewed, giving a typical experimental research results. The practical applications and their feasibilities in aero-composites manufacturing, in-service, repair were summarized in part 2. In part 3, the new challenges in aero-composite NDT & E area were analyzed according to the new requirements from current and future material development, research and application. The review in this paper included the new progress on researches and applications of ultrasonic testing (UT), X-ray testing (RT), infrared ray (IR), electronic speckle pattern interferometry (ESPI), terahertz testing (THz), eddy current (ET), sonic testing etc.

Keywords: Nondestructive testing; Defect evaluation; Composites; Ultrasonic testing (UT); X-ray testing (RT); Infrared ray (IR); Electronic speckle pattern interferometry (ESPI)

(责编 铃兰)