

航空航天领域中先进超声检测技术的发展和应用*

周正干^{1,2}, 李文涛¹

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100083)

[摘要] 第12届欧洲无损检测会议于2018年6月在瑞典哥德堡召开,会议汇集了世界各地的无损检测技术人员对不同领域无损检测技术的最新发展和应用进行了交流。航空航天领域中的构件常具有型面结构和材料属性复杂等特点,使得传统超声检测方法难以对其内部缺陷进行有效的无损评价。主要从航空航天领域中无损检测技术的研究和应用出发,介绍阵列超声、空气耦合超声和激光超声等先进超声检测技术的最新研究和发展成果,探讨了航空航天领域中先进超声检测技术的未来发展方向和趋势,总结了当前超声检测技术的关键技术和研究难点。

关键词: 超声检测; 航空航天; 复合材料; 机器人辅助检测; 无损检测

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.19.034



周正干

工学博士, 现任北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授、博士生导师、副院长; 兼任中国机械工程学会无损检测分会副理事长。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150余篇。

欧洲无损检测会议(ECNDT)是世界上最大规模的无损检测技术交流大会之一。2018年6月,来自世界各地约47个不同国家和地区的近1800名代表参加在瑞典哥德堡召开的第12届欧洲无损检测会议。本次大会收到论文约700篇,口头宣读和交流488篇^[1],大会报告涵盖了超声技术、红外热像技术、激光技术、射线技术和自动化检测技术等多个专项技术专题,包含了航空航天、核电、油气、船舶、汽车和土木工程等行业领域无损检测技术的最新动态和未来展望,很大程度上反映了世界无损检测技术的最新研究进展和发展趋势。

超声检测技术作为使用最为广泛的无损检测技术之一,是本次大会主要交流和讨论专题。本文针对航空航天领域中无损检测技术的发展

和应用,简要分析和总结了大会所涵盖的先进超声无损检测技术,探讨了相关的研究难点和未来发展方向,对航空航天领域中涉及的复合材料、复杂结构和自动化等方面检测技术的进一步发展提供参考。

阵列超声检测技术

1 相位延时控制成像检测

阵列超声检测技术是一种多通道的无损检测技术,采用相位延时控制方法由于实时性好、检测效率高和便于开发自动化检测系统等特点成为应用最为广泛的阵列超声检测方法,近年来在航空航天领域中的复合材料、大型复杂构件等方面的检测应用中有了很大的发展。

在复合材料阵列超声检测方面,德国的Blankschän等^[2]对航空复合材料的阵列超声检测关键技术进行

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775026)。

了研究,分析了基于纤维和树脂等不同材料特性所引起的各向异性声学行为,并对纤维层的物理布局导致的复杂声学响应进行了分析,最后基于特定设计的试样对阵列超声检测方法的检出率和检测阈值进行了测试,通过对比发现阵列超声检测方法能更加高效高精度地评价航空复合材料中的典型缺陷。法国的 Terrien 等^[3]研制了一种一体化的阵列超声在线检测系统,能够实现热塑性复合材料带拉挤成型生产过程中各类缺陷的连续快速检测,如图1所示,该系统能够对复合材料孔隙率和树脂浸渍程度进行检测和评价,通过对系统性能、可靠性和缺陷敏感性进行测试,相比于成品检测该在线检测系统能显著提高复合材料带的检测效率并大大降低了质量控制成本。德国 Standop 等^[4]针对高应力和高阻尼复合材料的检测提出了一种基于2D阵列超声换能器的检测方法,避免了需要使用不同换能器进行布置扫描覆盖的传统解决方案,大大缩短了检测时间,结合动态聚焦算法将检测信噪比从15dB增大到了20dB。加拿大的 Grondin 等^[5]提出了基于自适应聚焦的阵列超声检测技术,并将其应用于航空复杂复合材料缺陷的精确检测,如图2所示,该方法能够轻松补偿和适应生产过程中零件几何形状的变化所引起的阵列超声聚焦法则的变化,可根据构件形貌校正合适的合成声束波阵面,无需开发

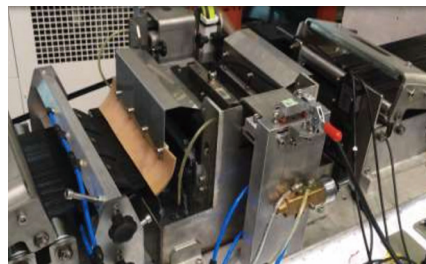


图1 热塑性复合材料带阵列超声在线检测系统

Fig.1 On line ultrasonic array inspection system for thermoplastic composites

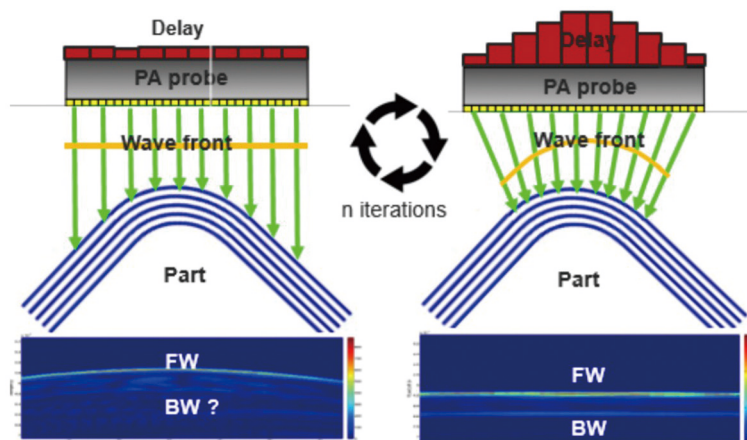
复杂的机械解决方案,同时简化了校准和分析过程。

在大型复杂构件检测方面,西班牙泰纳通(Tecnatom)的 Ojeda^[6]将红外视觉跟踪技术应用于航空生产环境下的阵列超声手动检测方法,能够实现复杂几何形状构件的高质量高可靠的C扫检测图像,在检测效率和可靠性方面有着显著优势,成本远低于同等的自动化检测方案,未来计划将增强现实(AR)等技术应用于C扫图像的3D显示。意大利航空发动机公司的 Tosti^[7]研制了一套自动化阵列超声检测系统对火箭固体推进剂绝缘结构的圆柱形部分和液体推进剂的管道进行检测,如图3所示,所设计的专用的构件旋转支撑

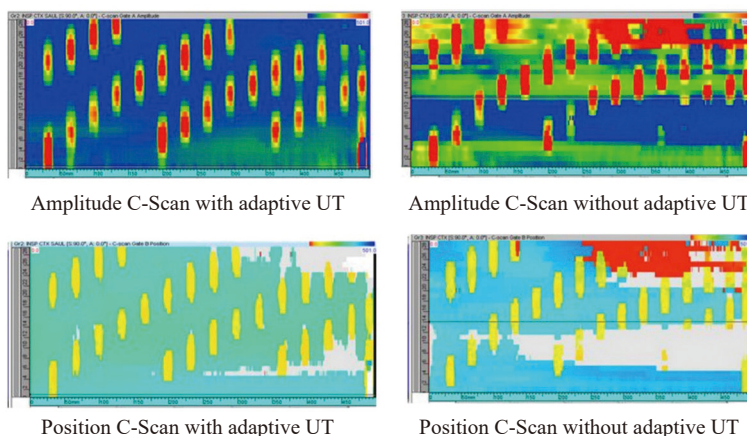
系统和水耦合循环系统能使得换能器在固定位置自动实现检测区域的C扫描检测,很大程度提高了大型结构构件的检测效率和可靠性。

2 全聚焦成像检测

全聚焦成像检测技术(TFM)是一种利用全矩阵数据在试样特定区域进行虚拟聚焦得到各离散点回波幅值进行成像的技术,相比常规相位延时的成像检测方法具有更高的缺陷成像精度。在复合材料检测方面,法国的 Aschy 等^[8]对复合材料的各向异性和衰减特性进行了分析,根据各向异性分析结果对阵列超声的TFM算法和平面波成像(PWI)算法分别进行了修正,并在含有人工预埋缺陷的30mm厚的CFRP板中



(a) 校正前后自适应聚焦的阵列超声波阵面



(b) 采用自适应聚焦(左)与直接发射(右)的检测结果对比

图2 阵列超声的自适应聚焦技术及其应用

Fig.2 Adaptive focusing technology for ultrasonic array and its application

进行了试验对比验证,针对4种不同材料特性讨论了算法的性能和局限性;德国的 Grager 等^[9]通过分析复合材料的各向异性和阵元在其内部的透射和发散性质,将一种改进的TFM算法成功应用于20mm厚度的CFRP层压板实现了不同深度直径1mm和3mm缺陷的检测,并对重建图像的信噪比和空间分辨率进行了评价和优化,该方法能有效提高复合材料检测图像的信噪比和近表面的检测能力。

在新型TFM算法及其应用方面,法国达索航空的 Holette 等^[10]利用多模式的全聚焦方法(Multi model Total focusing Method, MTM)对航空领域复杂构件紧固孔周围的裂纹进行了检测,分析了在不同的波形转换和反射等条件下采用MTM对孔壁不同位置的裂纹缺陷检测的影响,根据研究结果采用相应的反射接收模式对不同深度处孔壁周围的裂纹进行了检测,均得到了较好的结果,如图4所示;中国的 Zhou 等^[11]通过分析不同类型阵列换能器的三维聚焦声场,提出了一种基于环形阵列超声换能器的TFM方法,该方法能实现沿换能器中心轴线的任意数量点的虚拟聚焦,很大程度上提高了构件内部的声场分布能量,并结合增材制造钛合金试样各向异性分析结果对TFM算法进行修正实现了试样内部缺陷的精确扫查成像,如图5所示,结果表明相对于常规的动态聚焦算法,该算法在高衰减、大厚度材料检测方面具有良好的应有前景。

空气耦合超声检测技术

在空气耦合超声检测技术方面,德国的 Hillger 等^[12]介绍了空气耦合超声检测技术在航空航天中夹芯部件、复合材料等构件的检测成像难点与进展,介绍了用于整流罩、空客直升机机尾桁等大型航空航天构件空气耦

合超声检测系统所涉及的关键技术,所研制的单侧阵列式的空气耦合检测系统能在4min内实现1m²构件的检测。德国的 Steinhausen 等^[13]为了避免使用不同频率换能器对CFRP板中各类可能存在缺陷(夹杂、分层、脱黏等)的多次检测,提出了一种基于多阵元空气耦合换能器的检测方

法,各个阵元以不同的频率激发,在检测时同时激励所有阵元来增加带宽,进而提高检测效率,并分析了声压分布、声束扩散和可达焦距等参数对检测结果的影响;德国的 Essig 等^[14]搭建了空气耦合方法检测复合材料热塑性基体材料的试验系统如图6所示,采用锥形设计提高了

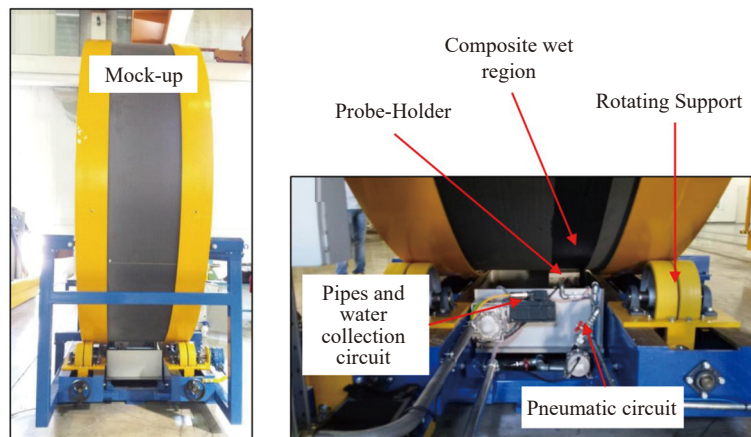


图3 用于大型火箭结构的阵列超声自动化检测系统
Fig.3 Ultrasonic array automatic detection system for large rocket structure

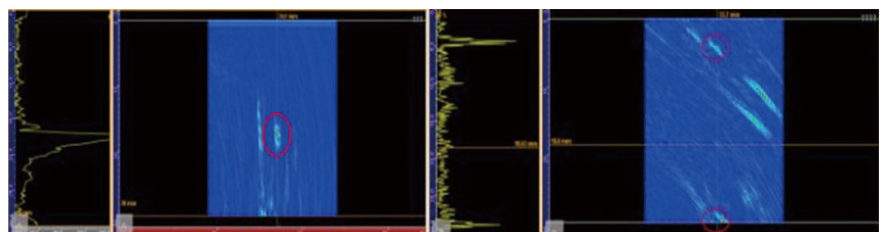
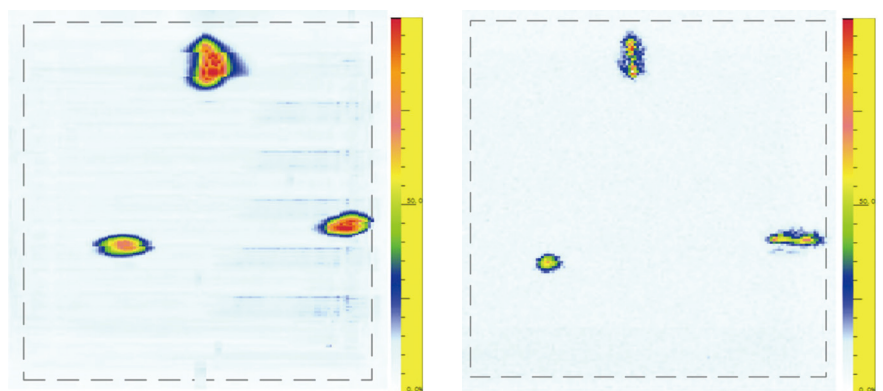


图4 紧固孔不同深度裂纹的MTM检测结果
Fig.4 Crack detection results around fastener holes with MTM



(a) 线阵动态聚焦扫描结果 (b) 环阵 TFM 扫描结果

图5 增材制造钛合金试样的阵列超声检测结果对比
Fig.5 Comparison of ultrasonic array detection results of AM titanium alloy

换能器的分辨率,研究了 120℃下热塑性带的超声特性并进行了 POD (Probability Of Detection) 分析,试验结果表明该方法对基体材料中的裂纹有良好的探测性。

激光超声检测技术

在激光超声检测技术方面,俄罗斯的 Karabutov 等^[15]研究了接触式激光超声评价技术在夹持接头失效检测中的应用,设计了特定的激光超声换能器并对直径 3mm 和

4mm 的夹持接头进行检测测试,介绍了超声信号中夹持接头失效的具体表现性质,可得到有效信号的最小缺陷尺寸达到了 0.1mm²; 日本的 Nakahata 等^[16]利用短脉冲激光在材料表面的热弹效应产生高带宽超声波,采用光声显微镜在 X 和 Y 方向以 50μm 的间距进行扫查对 CFRP 试样中的表面缺陷的深度和尺寸进行了评价并对交叠层中人工分层缺陷进行了三维重建,如图 7 所示,成像结果中能精确显示分层的位置和

大小,还在一定程度上反映了各个纤维层的取向。

复合材料超声检测技术

复合材料结构作为航空航天领域广泛使用的主要构件之一,除上述先进超声检测技术之外,对不同结构和不同生命周期下复合材料各类缺陷检测中涉及到的其他超声检测方法的研究和应用进行介绍。

在复合材料黏接结构检测方面,立陶宛的 Yilmaz 等^[17]分析了采用超声体波评价航空航天工业中采用黏合剂连接的铝合金和碳纤维增强复合材料 (CFRP) 接头质量的关键技术,通过半解析和有限元方法模拟了不同质量的粘接界面,对界面处的超声信号参数评估黏接质量的方法进行了分析; 芬兰的 Patronen 等^[18]针对战斗机中碳纤维翼板和钛附件之间的多层阶梯搭接结构的检测,分析了超声波在界面处的相位和幅值变化,利用相位变化可以检测到大于 4mm 的缺陷,利用不同的回波幅值变化和增益调整实现了外侧和内侧脱粘缺陷的扫描检测,如图 8 所示。

针对复合材料制造和使用过程

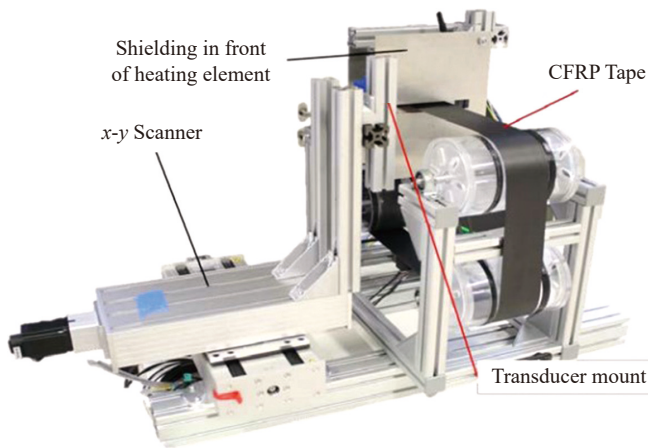
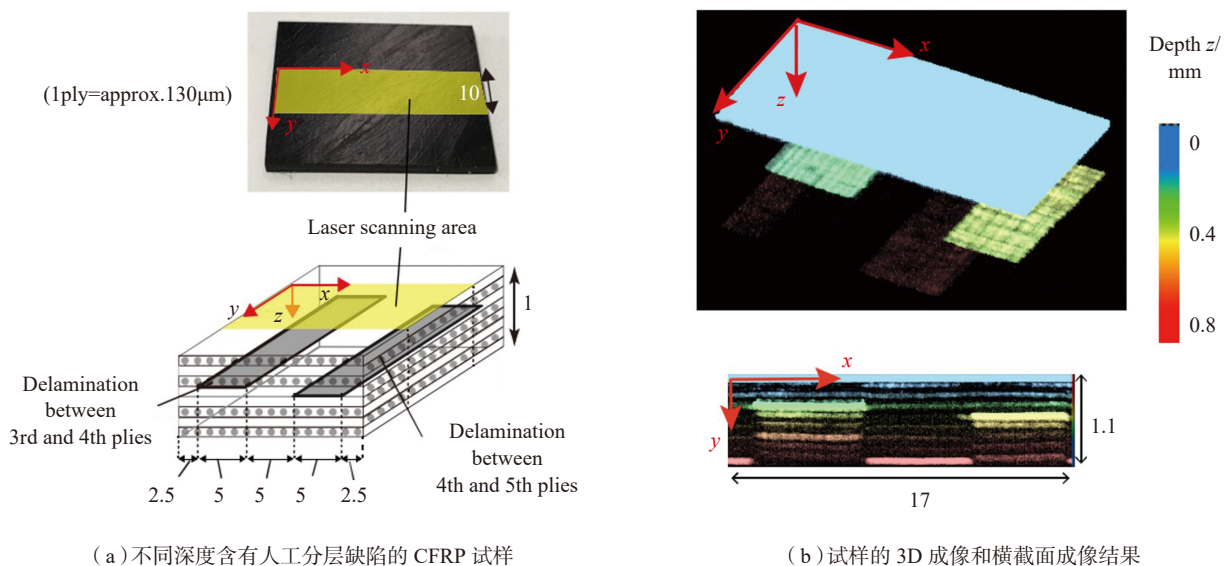


图6 高温条件下连续复合材料基体带空耦超声检测装置

Fig.6 Experimental set-up for testing continuous tapes under elevated temperature

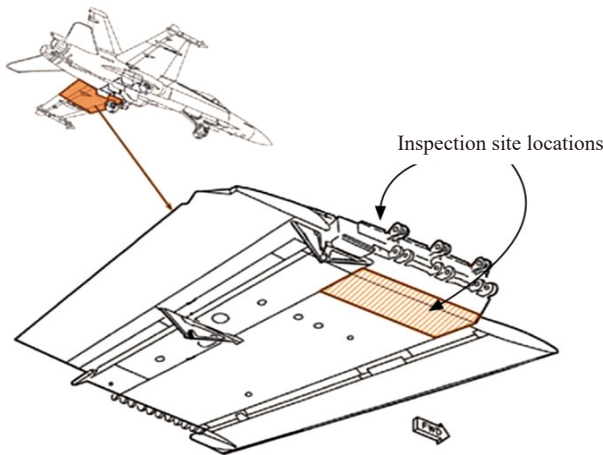


(a) 不同深度含有人工分层缺陷的 CFRP 试样

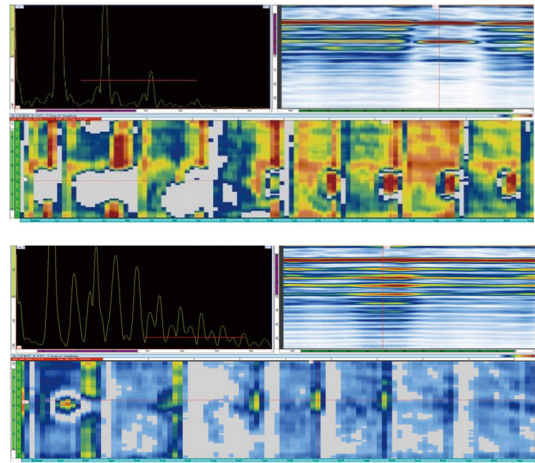
(b) 试样的 3D 成像和横截面成像结果

图7 基于光声显微技术CFRP的三维成像结果

Fig.7 Three-dimensional imaging of subsurface defect in CFRP using photoacoustic microscopy



(a) 战斗机钛-碳纤维阶梯式搭接黏接结构



(b) 外側脫黏(上)和內側脫黏(下)的超声检测结果

图8 碳纤维-钛的多层阶梯黏接结构的超声检测

Fig.8 Ultrasonic inspection of carbon fiber-titanium-carbon fiber stepped-lap structure

中的分层、冲击损伤等各类缺陷的超声检测方面,西班牙的 Dominguez 等^[19]提出了一种基于超声兰姆波监测可变曲率复合材料部件在弯曲拉压制造工艺中材料固化程度的方法,研究了兰姆波的相速度和衰减与材料固化程度的表征函数,试验结果证明利用兰姆波监测 CFRP 板的固化程度有很大的应用潜力;伊朗的 Alavijeh 等^[20]研究了一种 4 层玻璃纤维环氧树脂复合板的超声兰姆波检测分层缺陷的方法,采用半解析有限元方法提取特定试样的相速度和群速度,对不同模式的色散曲线进行了分析,最后采用 100~300kHz 不同的频率信号进行了试验,发现数值结果与试验结果有较好的吻合;Ratassepp 等^[21]将换能器阵列排布在待检测区域周围,利用导波信号的反演来重构导波的速度变化,然后将其转换为弹性常数映射关系来检测复合材料层压板中的低速冲击缺陷;德国的 Szewiczek 等^[22]建立了 50MHz 高频超声局部浸没式的检测系统,设计了弹性装配和直接水耦合接触的适配器能在检测曲面构件的同时避免后壁的干扰反射和阻尼效

应,并且能在检测过程中实现水的真空循环利用,在航空航天 CFRP 构件中微小缺陷和孔隙的高分辨率检测中进行了应用和验证,如图 9 所示。

在复合材料纤维层褶皱等缺陷的先进成像技术方面,英国的 Nelson 等^[23]利用脉冲回波超声技术获得 CFRP 层压板各个纤维层的性质和

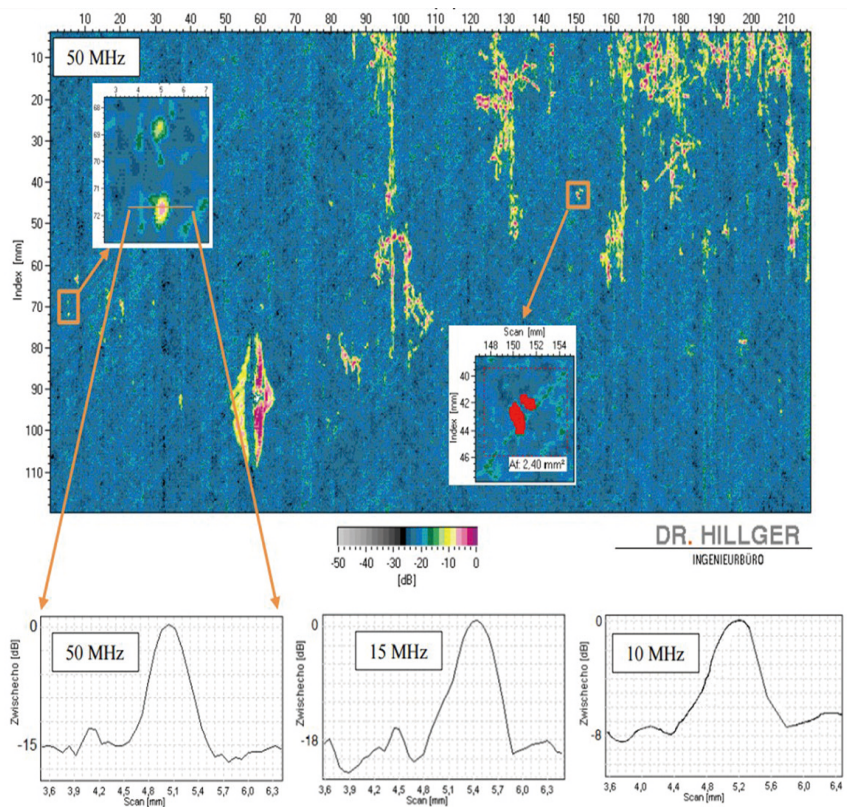


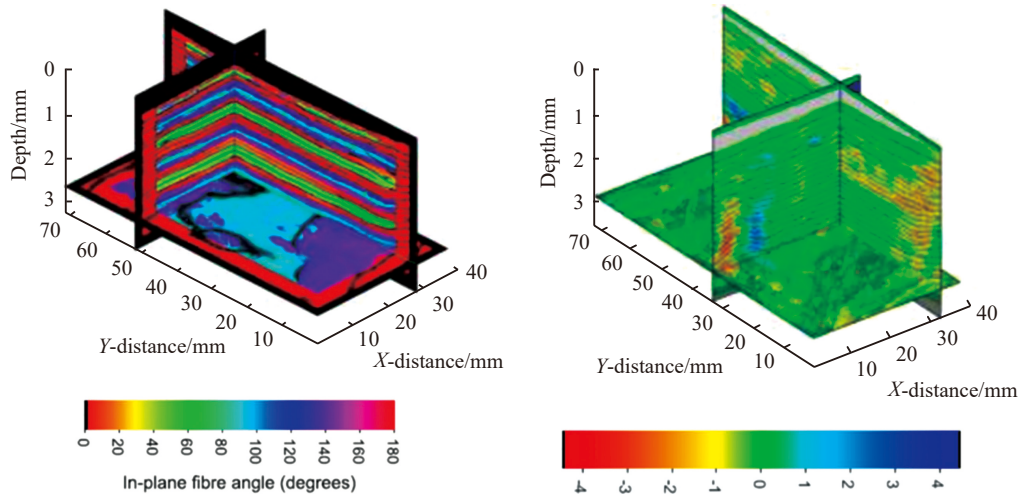
图9 CFRP的微小孔隙的高频超声C扫描结果

Fig.9 C-scan result of tiny pores in CFRP with high frequency probe

取向,利用 Radon 变换方法从瞬时振幅数据中确定了面内纤维取向及其堆叠顺序,如图 10 (a)所示;将面内纤维取向与利用结构张量法测量的面外层角度相结合得到每个层相

关联的纤维轴 3D 显示结果,如图 10 (b)所示,这种类型的数据和分析结果能用于 CFRP 有限元模型的输入,用来对含有纤维层褶皱和纤维波纹的复合材料内部性能进行无损评估;

英国布里斯托大学的 Smith 等^[24]同样利用 CFRP 层压板中的超声脉冲回波响应信息反演了实际材料属性的三维图像,如图 11 所示,通过不同的数据转换方法实现了层位图、平面



(a) 复合材料面内纤维取向及各层堆叠顺序的成像结果

(b) 相对于 X-Z 切面的各层角度变化的成像结果

图10 超声波数据中CFRP的纤维和层板取向3D成像结果

Fig.10 3D imaging result of fiber and ply orientation in CFRP from ultrasonic data

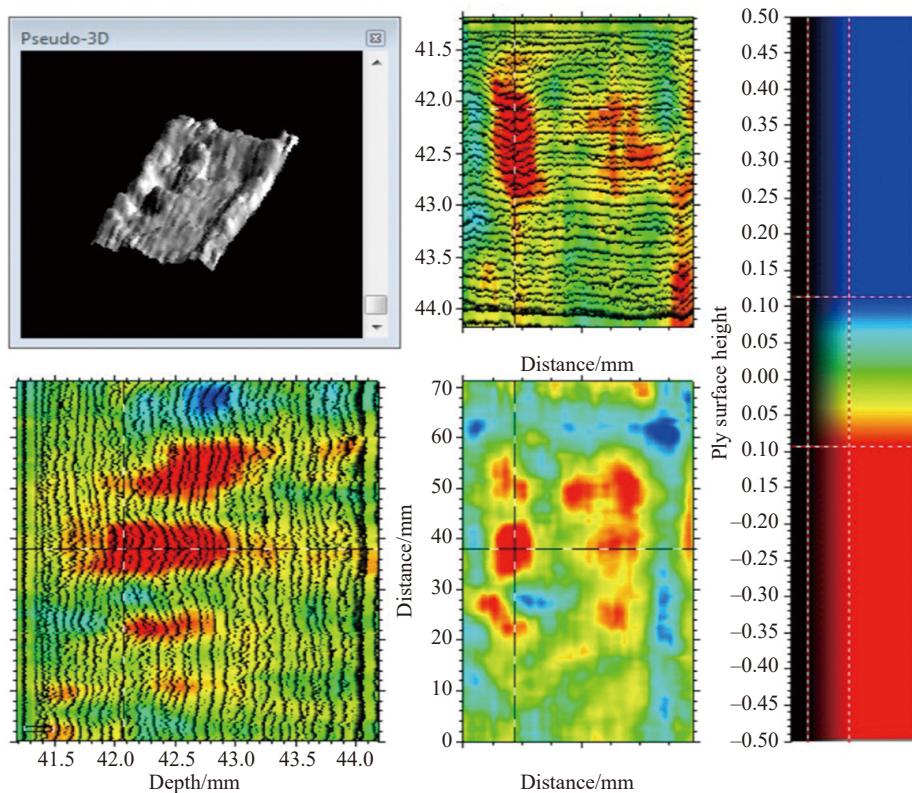


图11 CFRP层压板中每层的高度和起皱变化的成像结果(左上方为起皱最严重处的3D图像)

Fig.11 Imaging results of height and wrinkling change in each layer of CFRP laminates (upper left is 3D image of the most serious wrinkle)

层角度图和纤维取向图等结果的直观显示,揭示了试样内部微观结构细节,包括层板下沉、面内层的波纹褶皱等。

针对复合材料开裂等损伤模式的声发射检测技术,德国的 Kelkel 等^[25]将声发射技术与被动热成像技术结合对 CFRP 板静态加载过程中的损伤进行检测,试验发现层压板中的横向基体开裂主要由低频分量进行表征,在后续的研究中可将此方法进行扩展使其适用于其他断裂的检测如纤维断裂;意大利 Nardoni 等^[26]利用声发射技术检测碳纤维和玻璃纤维复合材料在 3 点弯曲负载下的断裂行为,对延迟裂纹载荷进行了分析;比利时的 Kalteremidou 等^[27]基于声发射技术将毫米波光谱和在线显微镜结合用来监测玻璃纤维增强复合材料 (GFRP) 的静态载荷下的损伤,如图 12 所示,结果表明采用声发射技术能定性地估计一种损伤模式到另一种损伤模式的转变,且与在线显微镜的厚度监测和裂纹处密度测量的结果相吻合。

复杂结构机器人辅助检测技术

在机器人检测系统的位置精度和可靠性方面,英国的 Riise 等^[28]介绍了一种改进的可量化自动检测系统位置精度的方法,基于阵列超声换能器改进了工业机器人工具中心点的标定方法,如图 13 所示,试验表明采用此方法平均定位误差小于 0.5mm,所采用的基于球形参考的测量方法和阵列超声探头校准方法能更精确地确定大体构件扫查的准确性和避免复杂路径带来的影响;德国的 Schulenburg 等^[29]介绍了自动检测系统和自动缺陷识别系统的不同应用情况,通过动态地定义不同缺陷度量阈值实现了缺陷大小、缺陷位置和密度等参数的自动识别,如图 14 所示,以 ASTM、VDI、EN 等国际

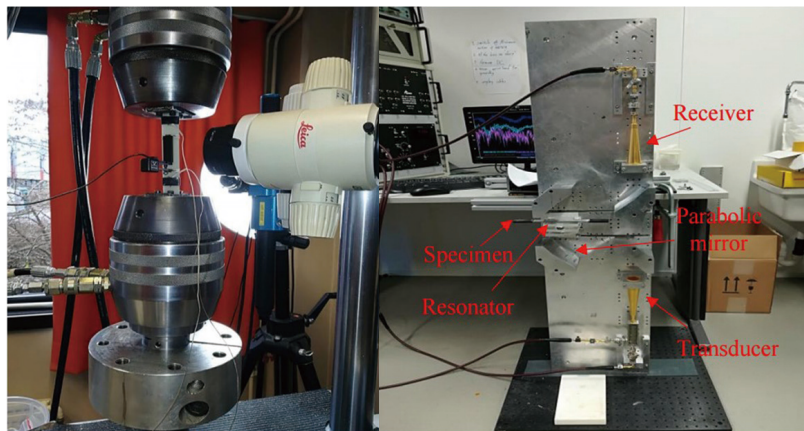
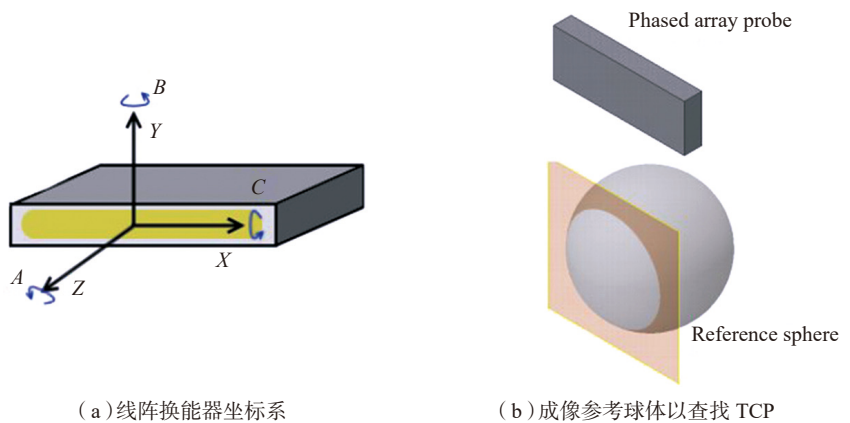


图12 用于损伤测试的设备(左)和毫米波设备(右)
Fig.12 Set-up used for testing (left) and MMW equipment used (right)



(a) 线阵换能器坐标系 (b) 成像参考球体以查找 TCP

图13 一种基于线阵换能器的工业机器人的工具中心点标定方法
Fig.13 Calibration for tool center point (TCP) of industrial robot based on linear transducer

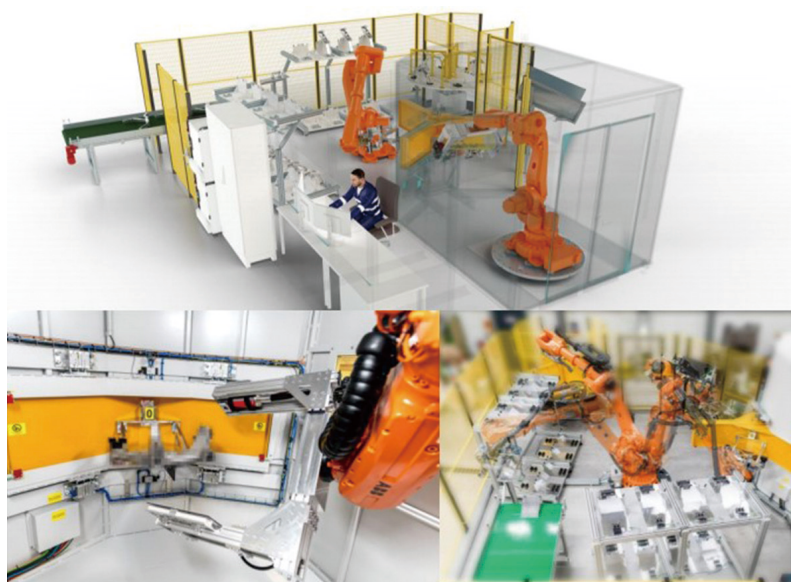


图14 用于在线检测的高端机器人系统
Fig.14 High-end robot system for online inspection

质量标准为目标对涉及到的自动测量、检测或密度测量技术和自动图像处理技术进行了分析,降低了生产成本并提高了检测可靠性和工艺安全性。

针对复杂构件的轨迹规划和生成方面,西班牙的 Acebes 等^[30]将阵列超声技术与机器人运动技术相结合建立了复合材料的自动化检测系统,该系统在不损失信号的情况下能跟踪零件的轮廓,实现典型曲面和复杂形状工件的快速全覆盖检测;澳大利亚的 Eitzinger 等^[31]提出了一种基于树形的轨迹规划方法,使得机器人在扫查复杂形状构件时能自动更新路径同时避免发生碰撞,节省了当零件形貌变动时重新规划全局扫描路径的时间,如图 15 所示。通过预先定义的矢量场,机器人连续移动时能实时更新路径并确定下一个扫描覆盖位置,试验结果表明这种方法能达到与全局规划相近的扫查时间。

目前存在的问题及未来发展方向

在航空航天等尖端工业领域,存在大量型面和材料特性复杂的构件,同时对构件使用性能和可靠性的要求不断提高,这就对其相关的无损检测技术提出了新的发展要求和方向。高精度、自动化、智能化已成为未来

无损检测技术的主要发展方向,以下针对航空航天领域常采用的几项先进超声检测技术进行简要分析。

1 阵列超声检测技术

阵列超声检测技术由于其检测精度高、灵活性好等优点近年来已经成为航空航天领域主要发展的无损检测技术之一。根据检测时声波发射接收模式的不同,阵列超声检测技术主要分为基于波束合成控制的相控阵检测技术和基于全矩阵数据的全聚焦检测技术。目前不同的阵列超声检测技术已经逐步替代常规单通道超声检测方法而广泛应用于航空航天领域中复杂结构和特殊材料的无损检测和评价。

现有基于电子扫描的相控阵超声自动检测系统已经在大型结构的自动化检测中初步得到了应用,相对于常规单通道超声检测系统的检测效率和灵活性方面有了极大提高。然而,在透射法和多自由度自动扫查检测方面阵列超声还未能较好地替代常规单通道超声检测方法,需要针对阵列超声声束控制与自动扫查系统的同步控制技术、检测时位置信息实时反馈和自动补偿技术以及大型复杂型面的扫描轨迹自动规划技术等方面进行深入研究,建立高效可靠的阵列超声自动化检测系统。此外,由于基于声束合成控制的相控阵超声检测技术其具有检测参数多样、声

束控制算法复杂等特点,当检测对象的结构和材料发生变化时需专业检测人员花费一定的时间重新设计和配置相应的检测参数和声束控制方案,因此未来利用光线追踪、自适应识别等技术根据检测对象的形貌和材料属性自动生成换能器和楔块参数配置、声束控制算法和校正补偿算法等相关检测方案对进一步发展相控阵超声检测技术有重大意义。

在基于全矩阵数据的 TFM 成像检测技术方面,目前虽在航空航天领域中得到了成功应用,但成果主要集中于线阵换能器直接耦合的各向同性材料的检测,对于矩形阵列、环形阵列等其他类型换能器、多层介质耦合及各项异性材料的 TFM 研究较少。向量全聚焦方法(VTFM)和散射系数矩阵等缺陷定征算法还无法应用多介质复杂结构的检测中。因此在未来应对全矩阵数据模型及虚拟聚焦相关的参数优化匹配等问题展开更深入的基础研究。此外,基于全矩阵数据的 TFM 成像算法能否和常规基于波束合成控制的相控阵超声检测一样进行实时检测也是近年来 TFM 的主要发展方向之一,当前已有研究院所将 GPU 加速、多线程采集、查询表、FPGA 等现代计算机科学技术与阵列超声后处理成像技术相融合初步实现了 TFM 算法的实时成像。随着航空航天领域构件的

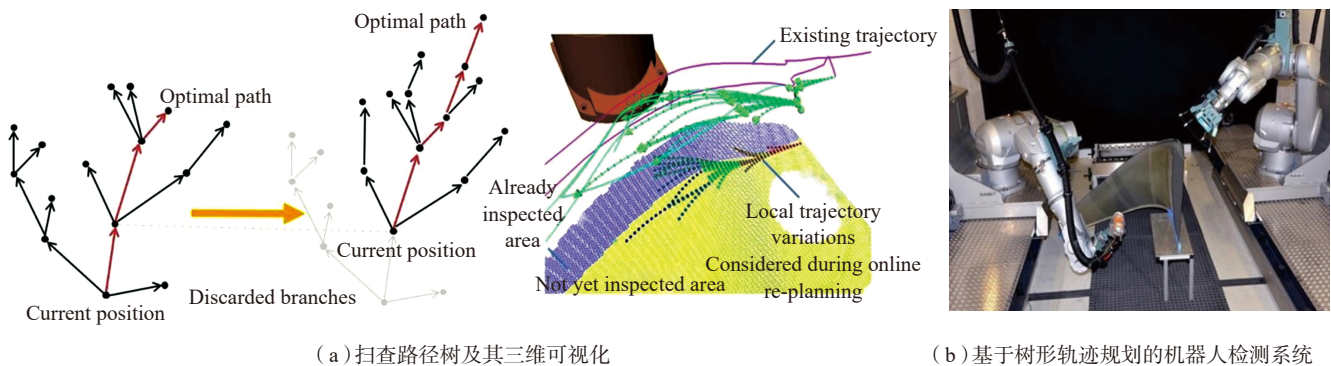


图15 复杂零件的机器人实时路径规划方法及其应用
Fig.15 Reactive coverage planning for robotic NDT of complex parts and its application

不断更新和对无损检测技术的需求日益提高,通过将医学、地质勘测等其他领域先进成像算法相结合,产生更高分辨率和更高精度 TFM 成像算法对弹性系数、孔隙率和均匀性等更加多样的材料性能进行成像评价也势必成为新的研究热点。

2 非接触超声检测技术

航空航天领域应用的非接触超声检测技术主要包括空气耦合超声检测技术和激光超声检测技术。

空气耦合超声检测技术与常规超声检测技术基本只存在耦合介质的区别,其缺陷判别方式直观且易于实现自动化。近年来,随着换能器、信号处理、检测方法、检测系统、检测规范等关键技术的长足发展,空气耦合超声检测技术已被逐步应用于航空航天领域解决禁用液体耦合剂的结构件(如蜂窝夹芯材料)以及在役部件(如直升机尾桁)的检测难题。由于空气的声衰减系数较大、声阻抗较小,换能器的中心频率一般低于 1MHz,需要采用多周期调制脉冲串作为激励信号以提高能量,导致激发超声声场具有较大的波长和焦斑,横向和纵向分辨力较低,主要采用穿透法对薄壁、低阻抗材料(复合材料等非金属)进行检测。为提升检测的横向、纵向分辨力和大壁厚构件检测信号的信噪比,需要:(1)基于先进二维材料、纳米材料理论设计并研发具有更优阻抗匹配性质的高换能率空气耦合换能器;(2)设计专有信号处理新算法;(3)借鉴阵列超声检测思想,建立多通道、多频率的空气耦合检测新方法以提高空气耦合超声检测的效率。此外,对于一些构件和应用环境并不适用,例如飞机原位检测时蜂窝夹芯复合材料构件冲击损伤和蒙皮脱黏的快速扫描检测,需结合脉冲反射法、兰姆波法和声共振法等方法的检测原理,研究同侧布置空气耦合超声换能器的检测方法。

激光超声检测技术通过激光诱

发被测试件表面的热弹或热蚀现象产生超声波,通过对激光干涉仪测量得到的表面振动位移信号进行滤波获得相应的检测超声信号,其具有远距离非接触、高分辨力等特点,被应用于航空航天飞行零部件的高精度无损检测以及高温、核环境压力容器的远距离在线监测等领域。激光超声检测技术的检测质量容易受激光器的波长、功率、激光干涉仪灵敏度、材料表面粗糙度以及外界环境振动等因素影响,检测系统的成本、使用及维护成本都远远高于常规水浸式超声检测技术。目前,为了提高激光检测系统的鲁棒性,扩展激光超声检测技术的应用范围,针对不同被测材料的激光激励控制和优化方法、高灵敏度和高响应的激光干涉仪的研制、表面振动位移信号处理方法、激光超声与不同类型缺陷的作用响应机理以及检测系统的集成是该技术的主要研究重点。此外,如何结合导波检测、阵列超声检测的思想,构建全新的激光超声检测基础研究和检测方法也是未来主要的研究方向。

3 复合材料超声检测技术

以 CFRP 为代表的复合材料广泛应用于航空航天领域关键构件的制造和应用,在制造过程中到在役使用中会产生孔隙、分层、开裂、纤维层褶和冲击损伤等多种类型的缺陷,因此复合材料无损检测技术的发展不可避免地涉及到多种超声无损检测技术和成像技术的交叉与融合。此外,不同于金属结构,复合材料由于其特殊的制造工艺使其具有各向异性、高衰减等声学特性,缺乏完善的理论研究和相关检测模型导致现有复合材料检测技术发展受到限制,在此基础上研究先进的信号处理技术和成像技术实现复合材料不同类型缺陷的直观、精确成像与评价。

4 复杂结构机械臂自动检测技术

近年来,随着多自由度机械臂在自动化检测系统中的研发和应用,大

型复杂结构的无损检测效率和可靠性不断提高,同时采用机械臂自动扫描的检测结果相对于人工手动检测更加整体和直观,检测数据便于存储和读取。但是,多自由机械臂在检测复杂曲面构件时需要较多的准备时间设计扫描路径且扫描精度低于多轴数控系统,后者由于其系统体积庞大和灵活性不高在无损检测系统方面应用较少。

在采用机械臂进行自动化检测时需要实时反馈当前的位置信息以精确定征缺陷,同时缺乏无损检测相关的多自由度机械臂的位置精度的测量和标定方法会影响自动化检测时的定位精度和可靠性。针对不同类型复杂构件检测时,研究从零件 CAD 模型到检测方案制定实施的数据交换解决方案,实现换能器选择、灵敏度校准和材料衰减分析等过程的自动化,利用相应的模型识别和参数提取等方法实现复杂型面构件扫描路径的自动规划生成,能有效提高航空航天产品的产能、质量和产量并降低成本,这是多自由度机械臂自动化检测系统的一个重要研究方向^[32]。另一方面,现有机器臂自动超声检测系统大多基于单阵元换能器进行开发,针对变曲率、变厚度等大型复杂构件的自动检测时还存在一定难度,将先进检测技术如阵列超声检测技术与机械臂系统相结合,同时研究开发基于多套机械臂系统穿透法、并行检测的运动控制技术以进一步提高检测效率和检测灵活性。

结论

(1) 航空航天领域中的构件常具有结构复杂、材料特殊和升级更新快等特点,对其相应的阵列超声、空气耦合超声和激光超声等先进超声无损检测技术和设备提出了更高的要求,高精度、自动化、智能化和工程化逐步成为未来先进超声检测技术的发展趋势。

(2) 复合材料的检测是航空航天领域无损检测技术的难点和重点, 针对复合材料全生命周期的各类缺陷的检测需要结合各类先进超声检测和成像技术, 同时开展复合材料声学特性和检测模型等基础研究, 提高复合材料的检测精度和可靠性。

(3) 针对阵列超声、空气耦合超声和激光超声的自动化检测技术方面, 需要根据被检复杂构件研究相关的位置标定和测量方法、扫查轨迹规划生成方法和并行控制技术, 并结合多声束发射接收、全聚焦等先进超声检测方法进一步提高自动化检测的精度和效率。

(4) 为针对航空航天领域不同构件的检测需求快速制定相应的检测方案, 同时形成高可靠性、低成本的检测系统, 研究具有自主知识产权和高开发性的先进超声检测硬件设备和成像软件具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 李敬元. 第12届欧洲无损检测会议纪要 [EB/OL]. [2018-07-10]. <http://www.chsndt.org/interconference/3108.html>.
- [2] BLANKSCHÄN M, BRACKROCK D, GAAL M, et al. Comparison of the performance of ultrasonic non-destructive testing methods on inspection of fibre reinforced plastics[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [3] TERRIEN N, COLAS O. Non-destructive testing of composite structures: from prototype qualification to online production inspection[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [4] STANDOP S, KOERS D, FALTER S, et al. Ultrasonic testing of aviation materials with 2D arrays applying DDF in transmission and reception[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.
- [5] GRONDIN E. Adaptive focusing technology for the inspection of variable geometry composite material[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [6] OJEDA F. Wireless 3D localization applied to the manual ultrasonic inspection of complex-geometry composite components[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [7] TOSTI E. UT in phased array applications for control of structures and piping of stages in the European space launchers[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [8] ASCHY A, TERRIEN N, ROBERT S, et al. Ultrasonic phased array imaging of heterogeneous composite structures[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [9] GRAGER J C, MOOSHOFER H, GROSSE C U, et al. Evaluation of the imaging performance of a CFRP-adapted TFM algorithm[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [10] HOLETTE M, TRÉTOU H, VOILLAUME H, et al. Crack detection around fastener holes with total focusing method ultrasonic system[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [11] ZHOU Z G, LI S N, LI Y, et al. Research on total focusing method based on ultrasonic annular phased array[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [12] HILLGER W, SZEWIECZEK A, ILSE D, et al. Challenges and new developments for air coupled ultrasonic imaging[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [13] STEINHAUSEN R, KIEL M, BODI A, et al. A new approach to air-coupled broadband measurement effective testing of composite laminates by using a new multi-element transducer[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.
- [14] ESSIG W, RITTMANN J, KREUTZBRUCK M, et al. Probability of detection analysis of air-coupled ultrasound inspection of thermoplastic CFRP tapes[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.
- [15] KARABUTOV A A, KHIZHNYAK S A, SHIPSHA V G. Contact laser-ultrasonic evaluation of clamping joint[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.
- [16] NAKAHATA K, OGI K, NAMITA T, et al. Three-dimensional imaging of subsurface defect in CFRP using photoacoustic microscopy[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.
- [17] YILMAZ B, JASIUNIENE E, MAZEIKA L, et al. Evaluation of bonding quality by using ultrasonic waves[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.
- [18] PATRONEN J, STENROOS C, VIRKKUNEN I, et al. Inspection of carbon fibre-titanium-carbon fibre stepped-lap joint[C]//Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.
- [19] DOMINGUEZ M A, SAENZ I, ABETE J M, et al. In-process ultrasonics inspection method for ultraviolet (UV) out of die curing pultrusion process[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing. Gothenburg, 2018.
- [20] ALAVIJEH M S, SOORGE M H. Lamb wave attenuation study through delamination in a WGF/epoxy composites, numerical and experimental investigation[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

2018.

[21] RATASSEPP M, RAO J, YU X. Evaluation of elastic constants in composite laminates with guided wave tomography[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[22] SZEWIECZEK A, BÜHLING L, HILLGER W, et al. High frequency and mobile testing without component immersion[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[23] NELSON L J, SMITH R A. Fibre and ply orientation measurement in carbon fibre composites from ultrasonic data[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[24] SMITH R A, NELSON L J. Full 3D characterization of composite laminates using ultrasonic analytic signals[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[25] KELKEL B, POPOW V, GURKA, M. Combining acoustic emission with

passive thermography to characterize damage progression in cross-ply CFRP laminates during quasi-static tensile loading[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[26] NARDONI D, NARDONI G, NARDONI P, et al. Ultrasonic Testing of aviation materials with 2D arrays applying DDF in transmission and reception[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[27] KALTEREMIDOU K A, POURKAZEMI A, EL IDRISI Y. The combined use of millimeter wave imaging and acoustic emission for the damage investigation of glass fiber reinforced polymer composites[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[28] RIISE J, FARR L, LINDOP M, et al. Methods for improving the accuracy of automated NDE systems[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[29] SCHULENBURG L. Increased

process safety and efficiently through automated defect recognition (ADR) in X-ray inspection[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[30] ACEBES M, GUERRO J C, FLÓREZ P, et al. Application of the PA technology to the automatic inspection of elements with complex geometry by robotized trajectory tracking[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[31] EITZINGER C, WALCH A, PALFINGER W, et al. Reactive coverage planning for robotic NDT of complex parts[C]// Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

[32] MILTREYGER A, BRON M, SAITOWITZ S, et al. Simultaneous increase of productivity, capacity and quality in NDT of engine components[C]. Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, 2018.

通讯作者: 周正干, E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn。

Development and Application of Advanced Ultrasonic Testing Technology in Aerospace

ZHOU Zhenggan^{1,2}, LI Wentao¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. The Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100083, China)

[ABSTRACT] The 12th European conference on non-destructive testing was held in Gothenburg, Sweden, in June 2008. The conference brought together non-destructive testing technicians from all over the world to exchange the latest development and application of non-destructive testing technology in different fields. Components in the aerospace field often have the characteristics of complex surface structure and material properties, which makes it difficult for traditional ultrasonic testing methods to effectively evaluate the internal defects. Aiming at the research and application status of ultrasonic non-destructive testing technology in aerospace field, the latest research and development achievements of ultrasonic array, air-coupled ultrasonic and laser ultrasonic et al are introduced. The future development direction and trend of advanced ultrasonic testing technology in aerospace field are discussed. The key technologies and research difficulties of current ultrasonic testing technology are summarized.

Keywords: Ultrasonic testing; Aerospace; Composites; Robot-assisted detection; Nondestructive testing

(责编 铃兰)