

航空复材构件R区相控阵超声检测研究进展*

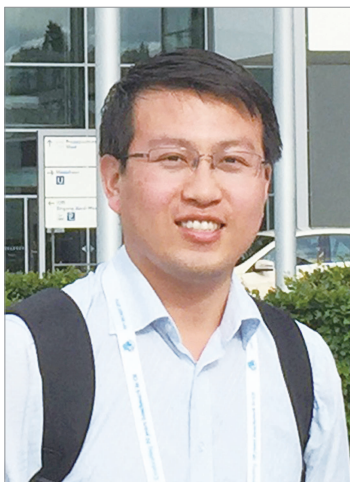
罗忠兵,曹欢庆,林 莉

(大连理工大学无损检测研究所,大连 116085)

[摘要] 航空碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)构件通常具有几何形状复杂的R区结构,提高该区域缺陷检测质量对于保证航空构件的承载性能至关重要。本文结合声学建模及声传播规律仿真分析,确认了CFRP构件R区同时存在叠层、曲面及弹性各向异性3方面特点,导致超声波垂直入射难、声传播路径扭折、结构噪声强和声耦合效果差等问题。基于相控阵超声检测(Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT)技术,针对R区尤其是变厚度、变曲率和变角度情况下缺陷检测难题,重点综述了换能器研发、基于信号后处理的超声成像、固体柔性耦合介质及辅助工装研发等方面的研究进展,分析了当前研究存在的主要问题及未来发展方向。

关键词: 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP); R区; 曲面; 弹性各向异性; 相控阵超声检测; 缺陷

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.067



罗忠兵

博士,副教授,从事材料无损检测及力学损伤评价研究。曾获省部级科技奖2项,发表论文约40篇。

随着航空等重要领域结构一体化技术的不断发展,碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)以其高比强度、高比刚度、耐疲劳、耐腐蚀、易于大面积成型等特点,得到广泛应用^[1-2]。复合材料用量已成为衡量飞机等重要结构先进性的标志之一。例如,波音787复合材料用量为50%,空客A350 XWB为52%,我国自行研制的C919也达到了12%^[3]。其应用部位从整流罩、方向舵等受力较小的构件向水平尾翼、机翼、中央翼等承力构件拓展^[4]。同时,为满足结构设计要求,获得更高的气动效率,这些构件通常具有复杂的外形结构

区,如L形、T形、 Ω 形等,统称为R区^[5-6]。在一些部位其截面尺寸也是变化的,以某型号飞机C型梁为例,长3.7m范围内,R区厚度范围为4.9~13.8mm,内侧半径范围为7~12mm,角度范围为92°~101°,是典型的变厚度、变曲率和变角度区域。在纤维铺放、热压固化、加工和装配等过程中,存在着复杂多变的化学场、热场和力场等之间的耦合,工艺质量控制难度大,不可避免在R区产生缺陷^[5-8]。同时,R区多会发生应力集中,对缺陷的容忍度小,这些缺陷会严重降低CFRP构件承载性能,威胁结构服役安全。因此,必须对R区缺陷进行有效的无损检测。

以超声A扫描和C扫描为代表的超声检测技术检测灵敏度高、指向性好、方便灵活,已经广泛应用于

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划(201408046505);大连市高层次人才创新支持计划(青年科技之星)(2018RQ40);中央高校基本科研业务费专项资金(DUTI4RC(4)18)。

国内外主机厂 CFRP 构件平板中分层等面积型缺陷检测,并已形成了相应标准,如国外 ASTM E2580^[9] 和 E2533^[10],我国 GJB 1038.1^[11] 和 HB 7825^[12] 等。然而,对于 CFRP 构件 R 区来说,常规超声方法检测效果并不尽如人意。图 1 所示^[13] 为现在工程上采用的小尺寸探头,R 区检测过程中需实时调节探头角度保证声波垂直入射,不利于缺陷的检出、定量和定位,且探头声束截面小,检测效率低^[13-15]。

近年来相控阵超声检测(Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT)技术的发展为解决这一难题提供了新的思路和方法。通过控制探头中多个晶片的发射、接收延时,实现超声波束的聚焦和偏转,从而可以进行多角度扫查及成像显示,提高了缺陷检出率和检测效率^[14,16-18]。这一技术已经在国外主机厂 CFRP 平板检测中大面积应用。如波音公司大多数复合材料结构都是基于 PAUT 技术进行检测的,包括目前世界上尺寸最大的波音 777X 复材机翼翼梁(长达 32m)就是采用 PAUT 自动流水线进行作业^[19],空客 A400M 和 A350 型垂直尾翼或机翼蒙皮等大型复合材料结构也是利用 PAUT 进行检测^[13]。但对于 R 区结构,情况要复杂得多,很难获得有效的声学检测信号^[13]。国内外著名无损检测机构纷纷对此展开深入研究^[20-28],希望克服材料、

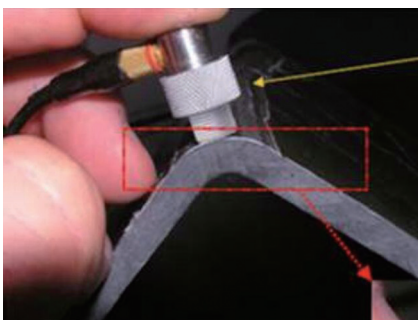


图1 使用常规超声探头对CFRP构件R区进行检测

Fig.1 Ultrasonic testing of CFRP radii with a conventional single element transducer

几何特性约束,为声束分布特征设计提供可能,或结合信号后处理成像算法,提高检测分辨率、灵敏度以及信噪比。相关研究发展迅速,在一些关键瓶颈问题上已经取得了一定突破。

本文针对航空 CFRP 构件 R 区缺陷 PAUT,基于声学建模仿真分析了检测难点及其解决思路,从换能器研发、基于信号后处理的超声成像、耦合介质及辅助工装研发等角度综述了相关研究进展。

CFRP 构件 R 区超声检测难点及对策

CFRP 构件通常是由预浸料按一定角度序列铺叠,经热压固化而成。高弹性模量、高强度纤维的取向性排布,使得 CFRP 内部的声传播行为呈现显著的各向异性。如图 2 所示,不同纤维取向 CFRP 平板对应的准纵波相速度随声传播角度的变化规律(上方蓝色和下方红色曲线)表现出明显差异,这意味着倾斜入射到 CFRP 层合板中的声波会在层界面处发生反射和折射,传播路径改变并伴随着能量损失^[29-31]。如何反映超声波特别是相控阵超声波束的传播过程,以及其对 R 区材料和几何特性的响应规律是阐明超声波散射衰减机制,实现高质量检测的前提和基础,其中声学仿真为解决这一问题的有效途径^[32-43]。一方面,通过模拟计算 PAUT 阵列换能器声场特性,分析

超声波束合成和延迟特性产生机理,阐明换能器参数对声场参数的影响规律;另一方面,基于 CFRP 材料微观组织和声学、弹性特性表征,定量计算 R 区三维弹性特性分布,建立考虑叠层、曲面和弹性各向异性的声学仿真模型,从而求解各向异性介质中波动方程,实现声传播过程的可视化。如图 3 (a) 所示^[40],以超声波在 R 区内侧(厚度 8.64mm)检测为例,相控阵超声阵元位于 R 区上方中心位置时声波几乎垂直入射至 R 区,波阵面最为完整清晰,即使传播至接近外 R 侧时,R 区波阵面形状依然十分完整,与 R 区几何形状相似性好。对于肋板区,情况有所不同,仅在声束垂直入射区域波阵面形状保持完好,两侧能量损失严重,且出现了较强的结构噪声。这主要是由于叠层结构、弹性各向异性导致声传播过程中路径扭折、散射衰减。同时,在 R 区也出现了一定的结构噪声,分析原因一方面是 R 区层间反射所致,另一方面是声传播速度的各向异性,肋板区入射波沿平行于板厚方向快速传播至两侧,对 R 区检测带来一定影响。当发射阵元偏离 R 区上方中心位置时(图 3 (b)),肋板区情况与上述类似,但 R 区波阵面严重变形,结构噪声水平提高;同时,肋板处形成明显的几何发射回波,与内 R 面/缺陷回波混叠,干扰缺陷信息识别^[38]。

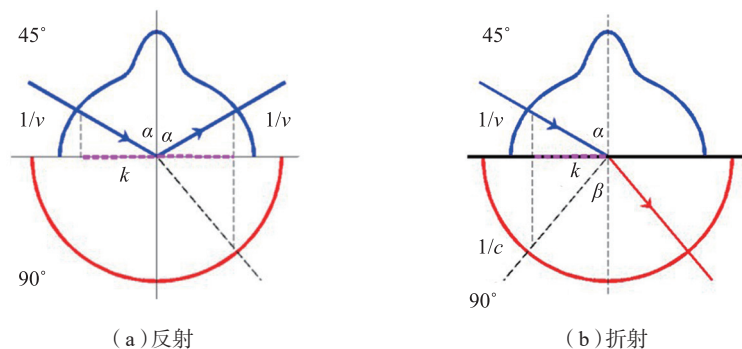


图2 超声波在不同纤维取向铺层相速度慢度线(蓝色和红色曲线)及界面处的反射和折射
Fig.2 Phase velocity slowness curves in plies of different fiber orientations (blue and red curves) and schematic demonstration of wave reflection and refraction at interfaces

从上述分析可以看出,实现CFRP构件R区缺陷的高精高效检测并非易事,尤其是变厚度、变曲率、变角度截面等特殊情况。基于PAUT技术仍需开展如下工作:

(1) 声波非垂直入射时,材料、几何的强烈作用导致声传播规律复杂,而垂直入射时的规律要相对简单。因此,根据R区几何形状开发相应的超声换能器,可以改善声波的入射情况,最大限度地避免叠层各向异性的影响。

(2) 由于超声波不可避免倾斜入射至层间界面,声传播路径发生扭转,透射声束也会出现能量损失。孔

隙和富脂区薄层等散射体及界面的存在,导致背反射噪声水平随检测频率增大而不断增强,缺陷反射信号易与构件表面/底面回波信号混叠,给材料内部尤其是近表面/底面缺陷的准确识别带来困难。因此,必须发展信号后处理技术实现检测效果及定量精度的提升。

(3) 实现稳定可靠的声耦合是缺陷检测的前提。作为工程中广泛使用的声耦合剂,水与CFRP材料之间声阻抗差异大,能量透射率低,反射信号复杂;同时,大型构件现场检测过程中,受限于温度和空间等问题,用水耦合并不方便,甚至无法进行检测。因此,发展新型的声耦合材料,研究固体柔性耦合介质,开发适应R区变截面的辅助工装,是提高大型构件现场检测能力的又一关键。

研究进展

1 PAUT 换能器的研制与开发

为实现R区声波的垂直入射,一些学者尝试通过改进超声换能器阵列的分布形式来提高检测效果。

2008年Olympus公司的Habermehl等^[44]针对CFRP构件R区检测设计了曲面阵列换能器,以及用来夹持探头的水浸切角楔块,如图4(a)所示。其优势在于利用探头自身曲面形状较好解决了R区声束难以垂直入射的问题。Boychuk等^[45]和张冬梅等^[28]在后续的研究中也证实了曲面阵列探头在R区缺陷检测方面的优势。早期研究认为:该类探头在使用过程中可不施加任何延迟法则,仅需利用切角楔块调整探头圆心与R区表面轮廓圆心重合,即可依靠自身曲面形状实现超声波垂直覆盖R区周向表面,最后根据几何相似关系定量计算缺陷真实尺寸,如图4(b)所示。近期模拟仿真和试验测试结果证实^[43]:受阵元指向性和“耦合层/试样”界面折射的影响,沿R区径向入射至试样内部的超声波分量显著强于其他路径,而且声传播路径不发生偏折,经缺陷反射后可原路返回而被有效接收。因此,相较于聚焦声束焦点位于R区表面(图5(a))和内部(图5(b))的情况,聚焦在R区

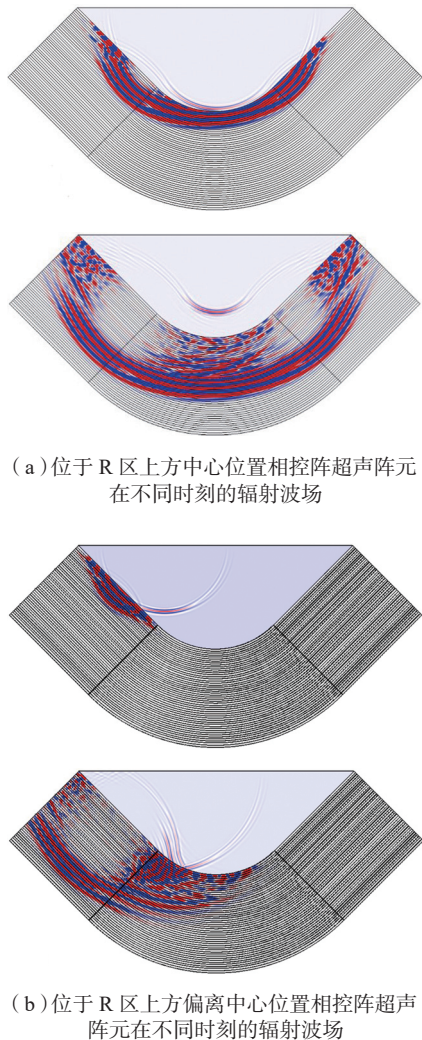
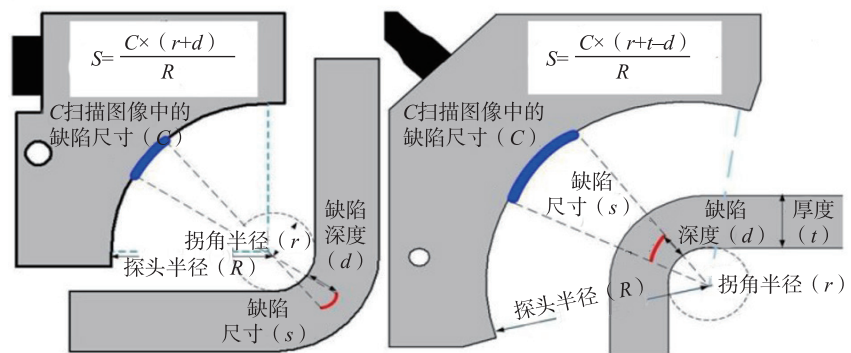


图3 CFRP层合板R区声传播过程仿真
Fig.3 Numerical modeling of wave propagation through CFRP radii



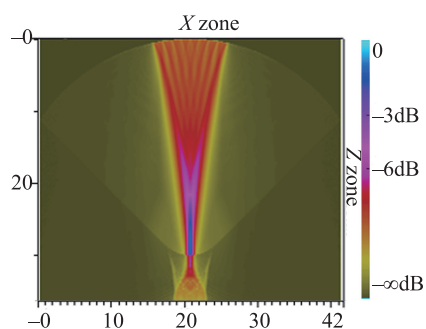
(a) 探头与水浸切角楔块



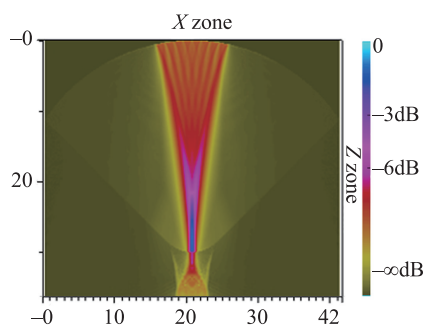
(b) 缺陷定量换算公式

图4 曲面阵列探头
Fig.4 Curved array probe

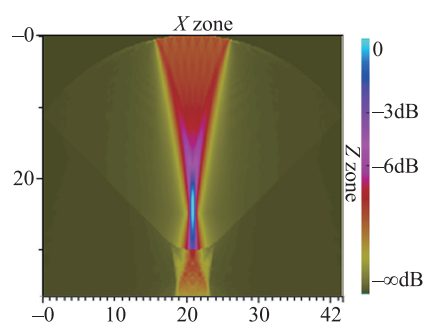
曲率中心(图 5 (c))的几何聚焦方式可获得更优的成像效果和检测灵敏度。此时,增大孔径所含阵元数,虽然在一定程度减小了探头周向覆盖范围,但可以明显提升缺陷检测灵敏度。因此,在满足检测范围要求的前提下,选用大孔径更为有利。需要指出的是,对于大尺寸 CFRP 构件, R 区截面的不规则变化要求探头位置必须相应调整,楔块形状和尺寸等



(a) 焦点在 R 区表面



(b) 焦点在 R 区表面以下



(c) 焦点在 R 区曲率中心

图5 曲面阵列探头在不同聚焦方式下的声压分布

Fig.5 Ultrasonic fields of curved array probe under different focal points

也要做出改变,上述曲面阵列探头适用性有待提升,很大程度上制约了变 R 区自动化超声检测的发展。

柔性探头的设计研发为解决变截面 R 区的检测提供了更为灵活的解决思路。2000 年,法国原子能与可再生能源委员会(CEA) Chatillon 等^[46]设计了柔性阵列换能器,并给出了相应的聚焦法则计算方法。2013 年英国 Phoenix 公司设计了一款名为 WrapIt 的可弯折柔性阵列探头,能够贴附复合材料凹面或凸面进行检测,通过更换探头外层的橡胶外壳可检测不同曲率半径的复合材料构件,如图 6 所示^[47]。后续研究者又相继报道了具有高频(中心频率 22MHz)高带宽(91%)^[48]、可伸缩^[49]等特征的柔性探头,在复杂形状表面随形方面取得较大进展。同时,也对相控阵超声聚焦法则设计提出了新的要求。2004 年来自 CEA 的 Casula 等^[50]模拟分析了利用柔性探头在不规则表面检测时的声场情况,不合适的聚焦法则容易导致聚焦声束的分裂,必须根据表面形状对聚焦法则进行修正。2016 年, Nakahata 等^[51]将信号后处理技术与柔性探头相结合来弥补探头频带较窄的缺点,引入基于信号权重函数的变迹技术(Apodization)来抑制探头的旁瓣,取得了较好的检测效果。相对于普通 PAUT 线型阵列探头而言,柔性探头的造价较高,不利于降低检测成本,应用受到一定限制。不过随着新

型传感器的研发和探头制造技术的提升,柔性探头有望在未来得到更加广泛的重视和应用。

2 基于信号后处理的超声成像技术

检测系统硬件的研发造价相对昂贵,普适性有待进一步提高,因此,一些学者尝试在现有商用 PAUT 系统基础上发展信号后处理算法,实现 R 区缺陷的实时成像检测。代表性工作之一为 2012 年来自 CEA 的 Robert 等^[52]提出的超声表面契合技术(Surface Adaptive Ultrasounds, SAUL)。该技术借助迭代算法感知被检曲面构件表面形状,从而重新计算聚焦法则,发射波阵面契合构件表面形状,能够垂直入射进入 R 区内部。如图 7 所示^[52],探头发射的波阵面在每次迭代后逐渐接近工件表面轮廓。利用 SAUL 技术, Cuevas 等^[53]对含人工缺陷的 CFRP 构件 90°R 区进行了检测,结果表明该方法的确具有一定优势。不过后续研究结果证实^[38]:检测参数选取不当容易造成试样两侧直板表面和层间界面反射回波过强,难以定量分层缺陷。通过调整检测频率或探头距 R 区圆心高度可以有效避免反射回波干扰,结合对阵元入射声压指向性校正,可以有效提高缺陷周向长度定量准确性;针对预埋于 3.0mm 厚度 R 区的分层缺陷(周向长度 4.5mm,深度 1.5mm),周向长度定量误差减小约 10%。值得注意的是,SAUL 检测过程中并没有发挥 PAUT 系统的聚



图6 WrapIt柔性阵列探头用于检测CFRP 构件不同曲率的R区

Fig.6 Inspection of CFRP components of different radius with WrapIt flexible array probe

焦优势,在缺陷的横向分辨力方面受到了一定限制,如能在这方面取得突破,对提高检测效果是十分有益的。

另一代表性工作为英国 Bristol 大学 Homles 等^[54-55]于 2004 年提出的全矩阵捕捉(Full Matrix Capture, FMC)信号采集技术,德国夫琅禾费无损检测研究所^[56]也于 2006 年提出了类似的采样相控阵技术(Sampling Phased Array, SPA)。该技术使用相控阵超声阵列探头进行数据采集,各阵元依次激励,同时所有阵元独立接收反射回波信号,最终获得包含所有发射/接收阵元组合的时域信号数据集,被认为能够获得最全的超声波数据。在此基础上,可进一步利用全聚焦(Total Focusing Method, TFM)信号后处理技术离线重建感兴趣区域的超声图像,提升分辨率、信噪比。因此,该方法也被认为是 PAUT 成像算法的黄金标准^[54]。

以晶片数为 N 的阵列探头为例(图 8^[56]),在完成一个完整全矩阵捕捉循环后,可获得包含 N^2 个超声波时域信号的数据集 A_{ij} ,其中 i 和 j 分别表示发射和接收阵元序号。全聚焦技术通过对时域信号执行延迟与叠加操作,从而实现检测区域任一点的动态聚焦。目标点超声成像灰度值 $I(x, y)$ 可由式(1)计算获得^[54-55]:

$$I(x, y) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h\{A_{ij}(\Delta t_{ij}(x_f, y_f))\} \right| \quad (1)$$

式中, h 表示 Hilbert 变换; Δt_{ij} 是超声波由发射阵元 i 传播至目标点随后返回至接收阵元 j 所需时间,其准确性是影响全聚焦图像重建效果的关键。

对于各向同性介质,声传播时间可通过阵元至目标点的直线距离除以材料恒定声速计算直接得到。而对于非均质各向异性 CFRP 复合材料,超声波传播路径在经过声阻抗失

配界面后偏离直线,在各铺层内部的传播方向和速度也并不尽相同,声时计算十分复杂。目前,国内外学者多通过简化 CFRP 内部的声传播行为来计算声时,以 CEA 于 2005 年提出的“基于声线理论的均质化”方法^[57]最具代表性。该方法认为可忽略铺层间界面影响,将 CFRP 层合板整体等效为均质各向异性介质。在此基础上,2013 年 Li 等^[58]提出了使用线性阵列探头直接测量均质化等效介质各向异性声速分布曲线的底面回波法和透射法;2012 年 Yan 等^[59]借助透射法测量 CFRP 弹性常数的旋转装置实现了在较大的角度范围内精确测量群速度;2016 年 Grager 等^[60]认为底面回波方法可在单侧施检,并

可直接使用全矩阵捕捉数据,因而检测效率更高;但是,该方法要求测试对象上下表面必须平行,而且有效测试角度范围受平板厚度及阵列探头晶片间距和数目影响,较大角度方向的群速度值难以有效测试,限制了其在工业领域的现场应用。2012 年徐娜等^[27,61]提出了基于线性阵列探头的各向同性介质 R 区相控阵超声扇形扫描检测方案及多层介质的延迟时间计算方法,并在铝合金、CFRP 材料上进行了测试;之后又提出了基于动态孔径聚焦的 L 形各向同性构件相控阵超声检测方法^[62]。林莉等^[39-40]在前人工作的基础上,尝试建立了同时考虑叠层、曲面和弹性各向异性的 CFRP 构件 R 区声学模型,

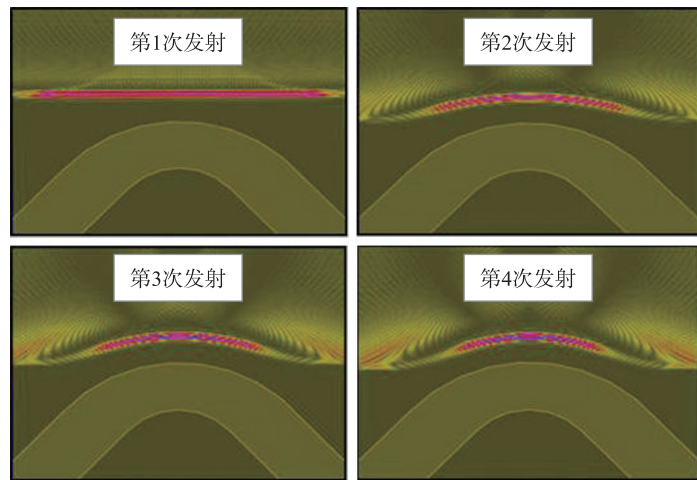


图7 SAUL检测迭代过程中波阵面变化

Fig.7 Incident wave front after each iteration of SAUL processing for CFRP radii inspection

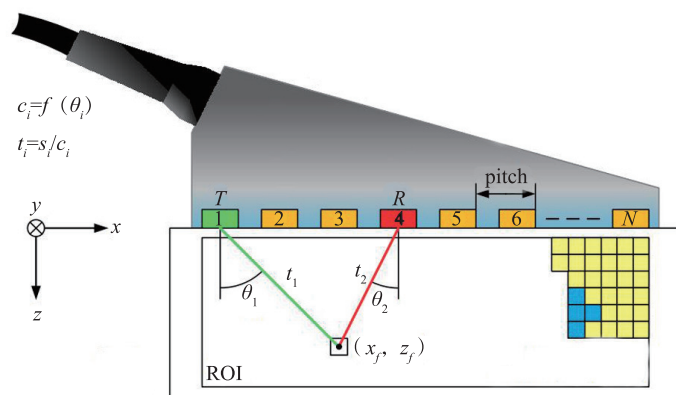


图8 全聚焦原理示意图

Fig.8 Schematic diagram of total focusing method

通过将组织分析、弹性测试与数值模拟相结合,发展了基于有限元模型和 Dijkstra 算法的声时计算方法,并在此基础上实现了使用线性阵列对 CFRP 构件 R 区执行 FMC 和 TFM 信号后处理超声成像检测。以某 L 形 CFRP 多向板 R 区(厚度 8.64mm, 圆心角度 90°, 内侧表面曲率半径 8.80mm)为例,对于埋深为 3.31mm, 周向长度为 3.49mm 的分层缺陷,线性阵列 TFM (图 9 (b)) 相较于曲面阵列探头施检的结果(图 9 (a)), 定长误差由 20.9% 降至 1.7%, 定深误差由 22.7% 降至 13.9%, 成像信噪比由 8.8dB 提高至 19.4dB。未来有望在软件算法计算效率、硬件系统开

发方面进一步深入。

3 柔性耦合介质及辅助工装研发

超声换能器与被检结构之间的有效声耦合,是实现大型航空 CFRP 构件 R 区现场超声检测的前提和基础。目前,水耦合(水浸或喷水)是工程中经常使用的一种声耦合方式,已在 CFRP 构件平板区域的超声 C 扫描成像检测中得到应用。对于单个分立构件中的 R 区,在某些情况下借助辅助工装也可以利用水耦合进行超声检测,但对于已装配结构或外场检测情况,水耦合不便,而且树脂吸湿易对 CFRP 结构造成损伤^[63]。沿用常规超声检测的耦合思路,根据 R 区的规格设计制作与之相匹配的

有机玻璃等固体楔块,目前在 CFRP 构件超声检测中也有应用,但刚性楔块对于大型 CFRP 构件变几何形状 R 区的适应性较差,实际应用效果不佳。为了提高 R 区超声检测的可操作性和适应性,实现良好的声耦合效果,新型耦合介质及其辅助工装的研发受到重视。2006 年 Rau 等^[64] 针对飞机双曲结构设计并比较了多种柔性声耦合方案,包括透声薄膜、橡胶包裹的水囊和高分子材料软质楔块,一定程度上解决了线性阵列相控阵超声探头与机身蒙皮弯曲表面之间空气隙带来的耦合难题,但上述声耦合介质变形能力有限,很难用于大曲率 R 区检测。大连理工大学同合作单位共同开发了一种弹性变形能力优异的固体柔性声耦合介质(图 10 (a)),借助配套设计的辅助工装(图 10 (b)),能够满足曲率半径 1~20mm、圆心角度 80°~120° 范围内的 R 区形状变化(图 10 (c))。试验证实利用该固体柔性声耦合介质得到的缺陷定量结果和检测信噪比能够满足工程检测要求。

大量试验研究和现场检测表明,图 10 所示的固体柔性耦合介质和扫查工装能够满足大型 CFRP 构件变厚度、变曲率和变角度区域相控阵超声检测的耦合需求,超声成像效果稳定,扫查效率高。图 11 为某飞机外

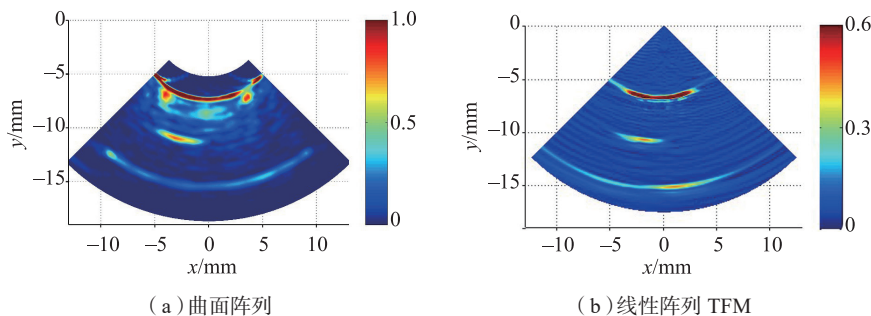


图9 CFRP构件R区分层缺陷相控阵超声成像结果
Fig.9 PAUT imaging of delamination in CFRP radii

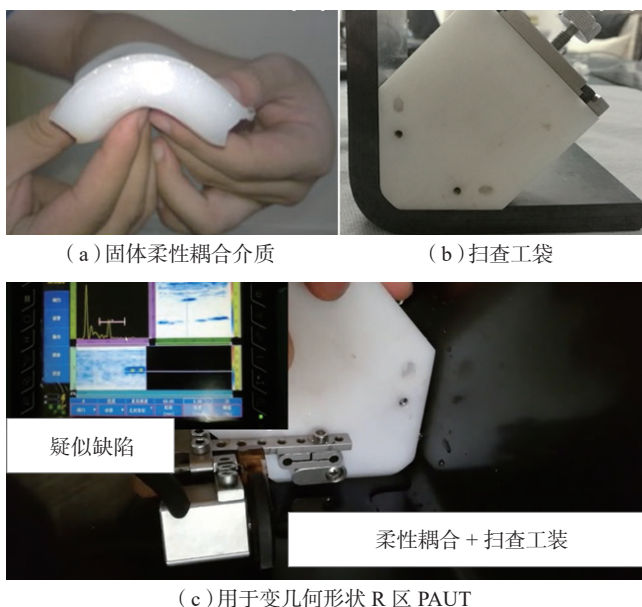


图10 固体柔性耦合介质及扫查工装

Fig.10 Solid flexible coupling medium together with probe holder adapted to PAUT of radii with varied geometry

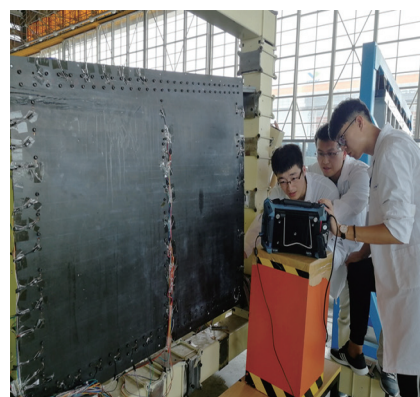


图11 某飞机外翼盒段试验件R区检测
Fig.11 Radii inspection of an aircraft wing box test sample

翼盒段试验件(1.3m × 1.2m) R区相控阵超声检测现场。

结论

本文针对大型航空 CFRP 构件复杂几何结构 R 区,特别是变厚度、变曲率和变角度情况的缺陷检测难题,结合声学建模及声传播规律仿真分析,确认了 CFRP 叠层、曲面及弹性各向异性等复杂的材料和几何因素,导致检测过程超声波垂直入射困难,声传播过程受到严重干扰,声耦合效果不理想等问题。基于 PAUT 技术,提出从换能器研发、基于信号后处理的超声成像、柔性耦合介质及辅助工装研发等方面开展相关研究,重点综述了相控阵超声换能器、超声表面契合与全聚焦成像、固体柔性耦合介质及工装的研究进展,分析了存在的主要问题及未来发展方向,并简要介绍了固体柔性耦合介质在大型航空 CFRP 构件 R 区相控阵超声检测中的应用情况。

参考文献

- [1] 益小苏,杜善义,张立同. 复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [2] YI Xiaosu, DU Shanyi, ZHANG Litong. Composite materials manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [3] SCOTT I G, SCALA C M. A review of non-destructive testing of composite materials[J]. NDT International, 1982, 15(2): 75-86.
- [4] 胡婷萍,高丽敏,杨海楠. 激光超声技术在航空复合材料无损检测中的应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(19): 50-57.
- [5] HU Tingping, GAO Limin, YANG Hainan. Design and experimental study of automated eddy current testing system for turbine blade crack[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(19): 50-57.
- [6] 汪萍. 复合材料在大型民用飞机中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2008(3): 11-15, 18.
- [7] WANG Ping. Application of composite materials in large civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2008(3): 11-15, 18.
- [8] SANDHU J S, WANG H, POPEK W J. Ultrasonic inspection of tight-radii in composites using acoustography[C]//Non-Destructive Evaluation Techniques for Aging Infrastructure and Manufacturing. San Antonio, 1998.
- [9] HOPKINS D, NEAU G, BER L E. Advanced phased-array technologies for ultrasonic inspection of complex composite parts[C]//International Workshop on Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace Conference. Montreal, 2011.
- [10] 陈超越,周晓军,杨辰龙,等. L型 CFRP 构件 R 区微观形态及孔隙特征[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(10): 1775-1780.
- [11] CHEN Chaoyue, ZHOU Xiaojun, YANG Chenlong, et al. Microstructure and feature of pores for corner of L-shaped CFRP components[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(10): 1775-1780.
- [12] 贾振元,毕广健,王福吉,等. 碳纤维增强树脂基复合材料切削机理研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 199-208.
- [13] JIA Zhenyuan, BI Guangjian, WANG Fuji, et al. The research of machining mechanism of carbon fiber reinforced plastic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23): 199-208.
- [14] ASTM COMMITTEE. Standard practice for ultrasonic testing of flat panel composites and sandwich core materials used in aerospace applications[S]. Philadelphia: ASTM International, 2017.
- [15] ASTM COMMITTEE. Standard guide for non-destructive testing of polymer matrix composites used in aerospace applications[S]. Philadelphia: ASTM International, 2017.
- [16] 国防科学技术工业委员会. GJB 1038. IA-2004 纤维增强复合材料无损检验方法第 1 部分: 超声波检验[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2004.
- [17] National Defense Science, Technology and Industry Commission. GJB 1038. IA-2004 Nondestructive testing methods for fibre reinforced composites Part 1: Ultrasonic testing[S]. Beijing: National Defense Science, Technology and Industry Commission, 2004.
- [18] 国防科学技术工业委员会. HB 7825-2007 复合材料制件无损检测对比试块制作与要求[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2007.
- [19] National Defense Science, Technology and Industry Commission. HB 7825-2007 Manufacture and requirement of non-destructive testing contrast test block for composite parts[S]. Beijing: National Defense Science, Technology and Industry Commission, 2007.
- [20] BULLINGER O, SCHNARS U, SCHULTING D, et al. Laminographic inspection of large carbon fibre composite aircraft-structures at Airbus[C]//19th World Conference on Non-Destructive Testing. Munich, 2016.
- [21] 何方成,王铮,史丽军. 复合材料制件拐角部位超声检测技术[J]. 材料工程, 2011(7): 80-84.
- [22] HE Fangcheng, WANG Zheng, SHI Lijun. Ultrasonic testing technique for the inspection of defects in the corner of composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(7): 80-84.
- [23] 张祥林. 复合材料 R 角部位缺陷检测技术与超声 C 扫描检测工艺技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [24] ZHANG Xianglin. Compound materials R angle spot flaw examination technology and supersonic C-scanning examination processing technology research[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [25] 林莉,杨平华,张东辉,等. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 12-20.
- [26] LIN Li, YANG Pinghua, ZHANG Donghui, et al. Review of phased array ultrasonic testing for thick wall cast austenitic stainless steel pipeline welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 12-20.
- [27] OLYMPUS NDT. Advances in phased array ultrasonic technology applications[M]. Waltham: Olympus NDT, 2007.
- [28] OLYMPUS NDT. Phased array testing: basic theory for industrial applications[M]. Waltham: Olympus NDT, 2012.
- [29] GEORGESON G. A century of Boeing innovation in NDE[M]. Seattle: Boeing, 2016.
- [30] BULAVINOV A, HANKE R, HEGEMANN J, et al. Application of sampling phased array technique for ultrasonic inspection of CFRP components[C]//International Symposium on NDT in Aerospace. Fürth, 2008.
- [31] DOMINGUEZ N, GRELOU O, VAN-DER-VEEN S. Simulation of ultrasonic NDT in composite radius[C]//10th European

Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010.

[22] JOURNIAC S, LEYMARIE N, DOMINGUEZ N, et al. Simulation of ultrasonic inspection of composite using bulk waves: Application to curved components[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 269: 012022.

[23] DOMINGUEZ N, REVERDY F. Simulation of ultrasonic testing of composite structures[C]//11th European Conference on Non-Destructive Testing. Prague, 2014.

[24] REVERDY F, MAHAUT S, DOMINGUEZ N, et al. Simulation of ultrasonic inspection of curved composites using a hybrid semi-analytical / numerical code[J]. AIP Conference Proceedings, 2015, 1650(1): 1047-1055.

[25] ITO J, BIWA S, HAYASHI T, et al. Ultrasonic wave propagation in the corner section of composite laminate structure: Numerical simulations and experiments[J]. Composite Structures, 2015, 123: 78-87.

[26] OKAHARA T, BIWA S, KURAISHI A. Nondestructive evaluation of porosity content in the curved corner section of composite laminates using focused ultrasonic waves[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems, 2018, 1(1): 011009.

[27] 徐娜, 周正干, 刘卫平, 等. L型构件R区的超声相控阵检测方法研究[J]. 航空学报, 2012, 34(2): 419-425.

XU Na, ZHOU Zhenggan, LIU Weiping, et al. Research on ultrasonic phased array inspection method for the corner of L-shaped components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 34(2): 419-425.

[28] 张冬梅, 于光, 周正干, 等. 复合材料构件R区的超声相控阵检测实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 688-692.

ZHANG Dongmei, YU Guang, ZHOU Zhenggan, et al. Ultrasonic phased array inspection for the corner of composite components[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 688-692.

[29] AULD B A. Acoustic fields and waves in solids[M]. New York: Wiley, 1973.

[30] ROKHLIN S I, WANG L. Ultrasonic waves in layered anisotropic media: characterization of multidirectional composites[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(21-22): 5529-5545.

[31] ROKHLIN S I, CHIMENTI

D E, NAGY P B. Physical ultrasonics of composites[M]. New York: Oxford University Press, 2011.

[32] 周伯堃, 罗忠兵, 曹欢庆, 等. CFRP相控阵超声检测声学建模与声场优化研究[J]. 无损探伤, 2015, 39(6): 1-4.

ZHOU Bokun, LUO Zhongbing, CAO Huanqing, et al. Study on modeling and acoustic field optimization of phased array ultrasonic testing of CFRP[J]. Nondestructive Testing Technology, 2015, 39(6): 1-4.

[33] LUO Z, CAO H, LIN L. Ultrasonic properties characterization and PAUT inspection of I-shaped CFRP component[C]//41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Boise: AIP Conference Proceedings, 2015, 1650(1): 1140-1145.

[34] CAO H, LUO Z, ZHOU B, et al. Study on focusing characteristics of curved phased array probe[C]//2015 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum. Zhuhai, 2015.

[35] 周伯堃. CFRP材料R区曲面阵列探头超声检测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

ZHOU Bokun. Ultrasonic inspection research of CFRP radius by curved array probe[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[36] 苏慧敏, 罗忠兵, 曹欢庆, 等. 提高碳纤维增强树脂基复合材料弹性常数超声表征精度的方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 207-213.

SU Huimin, LUO Zhongbing, CAO Huanqing, et al. Improve methods for elastic constants ultrasonic characterization accuracy of carbon fiber reinforced plastics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2510-2516.

[37] SU H, LUO Z, CAO H, et al. Focal law design for phased array ultrasonic testing of CFRP based on finite element modeling[C]//2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum. Nanchang, 2016.

[38] 苏慧敏. CFRP材料R区相控阵超声表面适应检测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.

SU Huimin. Surface adaptive ultrasonic testing of CFRP radius with phased array[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

[39] LIN L, CAO H, LUO Z. Total focusing method imaging of multidirectional CFRP laminate with model-based time delay

correction[J]. NDT & E International, 2018, 97: 51-58.

[40] LIN L, CAO H, LUO Z. Dijkstra's algorithm-based ray tracing method for total focusing method imaging of CFRP laminates[J]. Composite Structures, 2019, 215: 298-304.

[41] LUO Z, ZHANG S, CAO H, et al. Numerical modeling of ultrasonic wave propagation in CFRP radii[C]//2019 International Congress on Ultrasonics. Bruges, 2019.

[42] LUO Z, LI F, CAO H, et al. Focal law optimization and acoustic field simulation of PAUT on CFRP radii[C]//2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum. Xiamen, 2018.

[43] 曹欢庆, 罗忠兵, 李飞龙, 等. CFRP构件R区缺陷曲面相控阵超声定量检测[C]//第20届全国复合材料学术会议. 大连, 2018.

CAO Huanqing, LUO Zhongbing, LI Feilong, et al. Quantitative ultrasonic phased array inspection of CFRP radii parts using curved array probe[C]//20th National Conference on Composite Materials, Dalian, 2018.

[44] HABERMEHL J, LAMARRE A. Ultrasonic phased array tools for large area composite inspection during maintenance and manufacturing[C]//17th World Conference on Nondestructive Testing. Shanghai, 2008.

[45] BOYCHUK A S, GENERALOV A S, STEPANOV A V. Nondestructive testing of FRP by using phased array ultrasonic technology[C]//12th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing. Portorož, 2013.

[46] CHATILLON S, CATTIAUX G, SERRE M, et al. Ultrasonic non-destructive testing of pieces of complex geometry with a flexible array transducer[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1-8): 131-134.

[47] PHOENIX INSPECTION SYSTEMS LIMITED. WrapIt offers new way to test curved composites[EB/OL]. [2019-04-16]. <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=14977&content=1>.

[48] WONG C M, CHEN Y, LUO H, et al. Development of a 20MHz wide-bandwidth PMN-PT single crystal phased-array ultrasound transducer[J]. Ultrasonics, 2017, 73: 181-186.

[49] HU H J, ZHU X, WANG C, et al. Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging on complex surfaces[J]. Science Advances, 2018, 4(3):

ear3979.

[50] CASULA O, POIDEVIN C, CATTIAUX G, et al. A flexible phased array transducer for contact examination of components with complex geometry[C]//16th World Conference on Nondestructive Testing. Montreal, 2004.

[51] NAKAHATA K, TOKUMASU S, SAKAI A, et al. Ultrasonic imaging using signal post-processing for a flexible array transducer[J]. *NDT & E International*, 2016, 82: 13–25.

[52] ROBERT S, CASULA O, ROY O, et al. Real time nondestructive testing of composite aeronautical structures with a self-adaptive ultrasonic technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(7): 074011.

[53] CUEVAS E, HERNÁNDEZ S, CAMACHO J, et al. Fast scanning and adaptive beamforming: two innovative algorithms to improve ultrasonic inspections[C]//11th European Conference on Non-Destructive Testing. Prague, 2014.

[54] HOLMES C, DRINKWATER B, WILCOX P. The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2004, 46(11): 677–680.

[55] HOLMES C, DRINKWATER B

W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. *NDT & E International*, 2005, 8(38): 701–711.

[56] BERNUS L von, BULAVINOV A, JONEIT D, et al. Sampling phased array a new technique for signal processing and ultrasonic imaging[C]//9th European Conference on NDT. Berlin, 2006.

[57] DEYDIER S, GENGEMBRE N, CALMON P, et al. Ultrasonic field computation into multilayered composite materials using a homogenization method based on ray theory[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2005, 760: 1057–1064.

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

[59] YAN D W, SUTCLIFFE M, WRIGHT B, et al. Ultrasonic imaging of full matrix capture acquired data for carbon fiber-reinforced polymer[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2013, 55(9): 477–481.

[60] GRAGER J C, SCHRAPP M, MOOSHOFER H, et al. Ultrasonic imaging of carbon fiber-reinforced plastics using the full matrix capture data[C]//19th World Conference on Non-Destructive Testing. Munich, 2016: 1–11.

[61] XU N, ZHOU Z. Numerical simulation and experiment for inspection of corner-shaped components using ultrasonic phased array[J]. *NDT & E International*, 2014, 63: 28–34.

[62] 徐娜, 何方成, 周正干. 基于动态孔径聚焦的L型构件相控阵超声检测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(6): 1000–1006.

XU Na, HE Fangcheng, ZHOU Zhenggan. Ultrasonic phased array inspection of L-shaped components based on dynamic aperture focusing[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(6): 1000–1006.

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

[64] RAU E, GRAUVOGLE, MANZKE H, et al. Ultrasonic phased array testing of complex aircraft structures[C]//9th European Conference on NDT. Berlin, 2006.

通讯作者: 林莉, 教授, 博士生导师, 研究方向为材料无损检测与评价, E-mail: linli@dlut.edu.cn.

Progress in Study of Phased Array Ultrasonic Testing on CFRP Radii in Aerospace Component

LUO Zhongbing, CAO Huanqing, LIN Li

(NDT & E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

[ABSTRACT] Radii structures with complex geometries are commonly encountered in carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites in aerospace components. How to improve the corresponding nondestructive testing quality on defects is one key issue for the assurance of load-bearing properties. In virtue of numerical modeling and wave propagation analysis, the difficulties of ultrasonic testing in CFRP radii were clarified. Due to the intrinsically elastic anisotropy of CFRP material, the layered structure and the curved surface, the normal incidence of ultrasonic wave could not be easily realized and the wave propagation path kinks seriously. Moreover, the structural noise is obvious and the acoustic coupling is difficult. In view of this problem, the research progress in study of phased array ultrasonic testing (PAUT) was summarized, especially for the radii with a varied cross-section in plate thickness, curvature and included angle. The development of PAUT probe, the ultrasonic imaging based on signal post-processing technique, and the research of solid flexible coupling medium and probe jig were emphasized, respectively. The remaining issues and the future development trend were analyzed.

Keywords: Carbon fiber reinforced plastic (CFRP); Radii; Curved surface; Elastic anisotropy; Phased array ultrasonic testing (PAUT); Defect

(责编 铃兰)