

北京航空航天大学超声无损检测实验室

2022 年度工作进展

2022 年，北京航空航天大学超声无损检测实验室在超声检测基础理论研究、超声仿真系统设计以及超声检测系统研发上取得了系列成果。在碳纤维增强树脂基复合材料纤维褶皱缺陷的超声检测方面，建立了利用复合材料层间反射信号对褶皱缺陷进行表征的理论模型，针对层间信号微弱、超声信号相位敏感等特性，提出了利用线性相位滤波器缓解噪声引起错位的方法。在碳纤维复合材料的阵列超声检测方面，提出了基于 Viterbi 搜索算法的声线示踪方法，建立了 CFRP 材料阵列超声检测的声束路径计算模型，改进了 CFRP 材料的阵列超声全聚焦检测成像算法。在异种粗晶组织材料扩散焊界面的超声检测方面，建立了粗晶母材、扩散焊界面、复杂形面声学检测模型，实现了粗晶组织材料扩散焊界面静态声场计算与缺陷响应回波信号仿真，为异种粗晶组织材料扩散焊检测提供了理论基础。在超声检测仿真系统设计方面，建立了阵列超声声线路径仿真、超声声场分布仿真以及超声检测动态声场仿真等多个核心仿真模块，结合超声组件三维建模功能，可实现超声无损检测的快速仿真成像分析。在超声检测系统研发方面，研制了“5+1”轴水浸超声 C 扫描检测系统和双通道空气耦合超声检测系统，可分别应用于复杂曲面试样和复合材料板材的自动化检测。

1 碳纤维增强树脂基复合材料纤维褶皱缺陷的超声检测研究

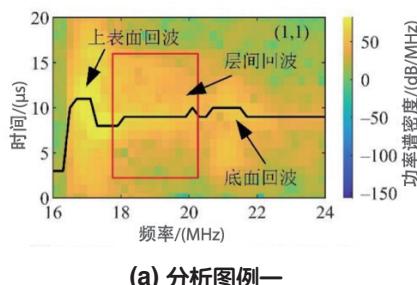
纤维褶皱缺陷是碳纤维复合材料中常见的几何形状缺陷。在碳纤维复合材料零部件制造过程中，由于预浸料滑移引起铺层弯曲变形，这种内部铺层偏离预设方向的缺陷称为褶皱缺陷。相关研究表明，碳纤维复合材料中的褶皱缺陷通常是应力集中点，严重降低了材料的力学性能。与分层、脱黏、夹杂等引起复合材料内部材料不连续的缺陷不同，褶皱缺陷基本上不改变局部材料的连续性，直接利用幅值信息的常规超声无损检测方法难以有效评估。

复合材料褶皱缺陷检测利用常规超声检测中视为结构噪声的层间反射信号反演褶皱缺陷的几何形态特征。褶皱缺陷是铺层连续变化的缺陷，褶皱的几何形态特征是影响力学性能的重要因素，褶皱检测需要利用超声信号反演出其几何形态特征。基于全矩阵数据的全聚焦方法 (TFM-FMC) 通过虚拟延时聚集成像，可以达到很高的空间精度。由于层间反射信号微弱，全聚焦检测结果易受到各种噪声的干扰，需要设计离散时间滤波器来消除噪声干扰。

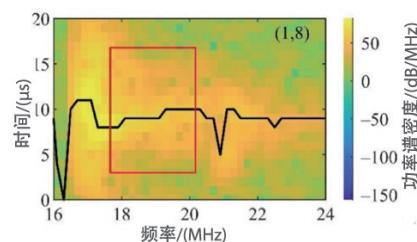
由于全聚焦算法是对全矩阵数据中 A 型信号进行延时叠加处理，所以要求滤波器对 A 型信号

的时间信息没有影响或可以校正。由于褶皱缺陷的几何形态特征是空间信息，其对信号的相位信息要求较高，应尽量避免相位失真，需要选择线性相位滤波器或者频域滤波器，因此，提出了一种使用线性相位滤波的超声阵列数据进行褶皱检测的方法。

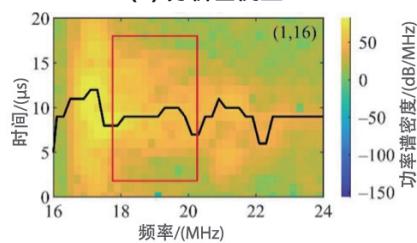
为了尽量减小层间反射回波之间的干涉影响，选择利用中心频率为 **10 MHz** 的线阵换能器（**10L64-0.3 × 5-D77 EJA557**）采集数据。利用短时傅里叶变换对全矩阵数据内的**A型信号**进行时频分析（见图1），确定层间回波信息主要集中在 **9 MHz** 附近，据此设计线性相位滤波器，其幅频特性与相频特性如图2所示。对含有随机孔洞的人工褶皱缺陷（见图3）进行检测，其滤波前、后全聚焦成像结果与全聚焦相位成像的余弦值如图4所示。对比图4(c)与图4(d)可知，滤波后成像结果中的错位现象明显得到改善。图5为滤波后全聚焦相位成像余弦值的峰值与褶皱横截面叠加对比图，可见，滤波后成像结果可以准确地反演出褶皱缺陷的几何形态特征。



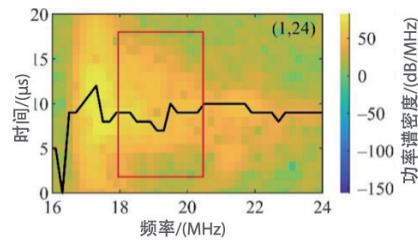
(a) 分析图例一



(b) 分析图例二



(c) 分析图例三



(d) 分析图例四

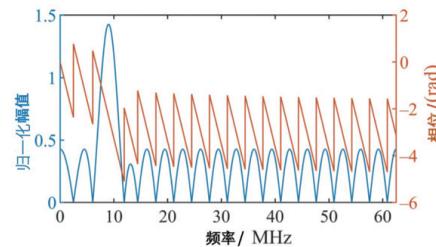
图1 全矩阵数据中部分**A型信号**时频分析图

图2 滤波器的幅频特性与相频特性

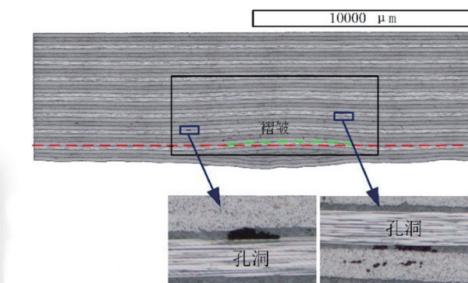
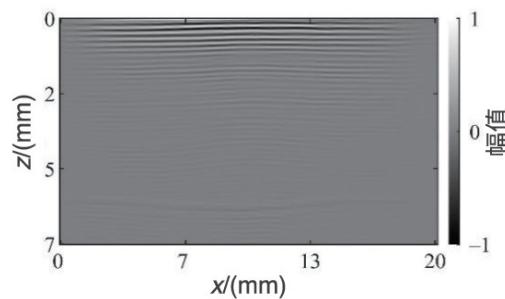
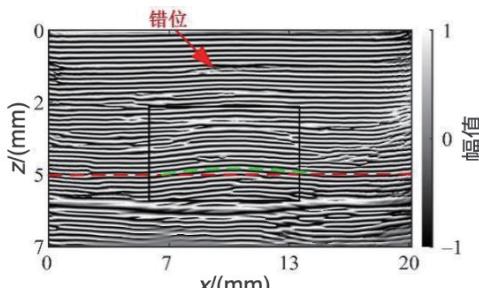


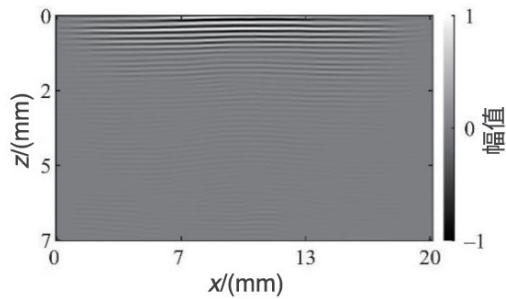
图3 褶皱试样图



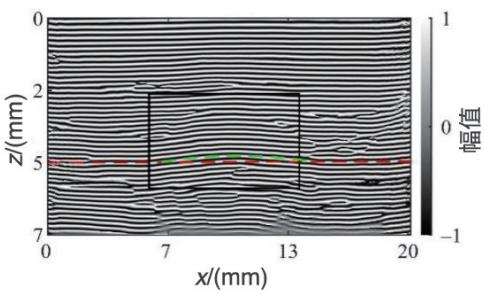
(a) 滤波前全聚焦成像结果



(b) 滤波前全聚焦相位成像的余弦值



(c) 滤波后全聚焦成像结果



(d) 滤波后全聚焦相位成像的余弦值

图 4 滤波前后全聚焦相位成像结果与全聚焦相位的余弦值

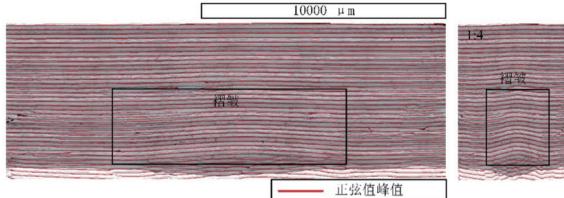
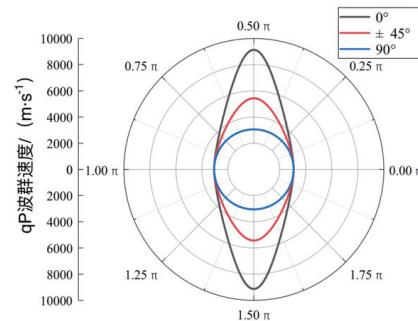


图 5 滤波后全聚焦相位成像余弦值的峰值与褶皱横截面叠加图

2 碳纤维增强树脂基复合材料缺陷的阵列超声全聚焦成像检测研究

在先进树脂基复合材料(**CFRP**)的超声检测中,常规超声检测效率低,而阵列超声全聚焦成像检测技术则依赖准确的声传播延时。针对**CFRP**中的各向异性和多层折射界面而导致声波延时计算困难的问题,提出了一种使用**Viterbi**搜索算法的声线示踪方法,用于计算阵列超声全聚焦成像检测的延时法则,从而实现对**CFRP**中典型缺陷的阵列超声全聚焦成像检测。

首先,通过分析碳纤维铺叠角度和不同角度铺层的弹性系数矩阵,计算**qP**波在 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 90° 纤维铺层内不同传播角度下的传播速度,如图6所示。

图 6 在 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 90° 单向铺层中**qP**波群速度随传播角度的变换

其次,通过费马原理和**Viterbi**搜索算法计算**CFRP**内部声传播路径和声传播时间,**CFRP**离散模型中,使用底面反射法(**BRM**)计算第1个阵元发射、不同位置阵元接收的声线路径示意图如图7所示。

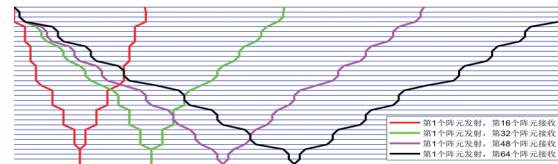
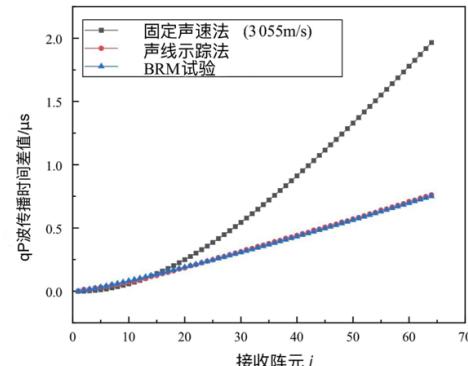
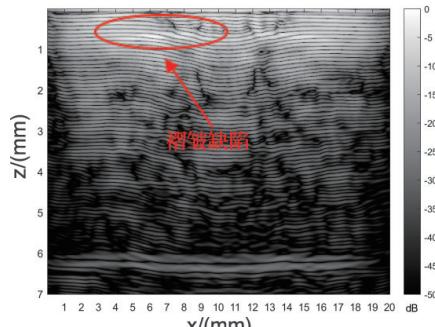


图 7 第1个阵元发射、不同位置阵元接收的声线路径示意意图

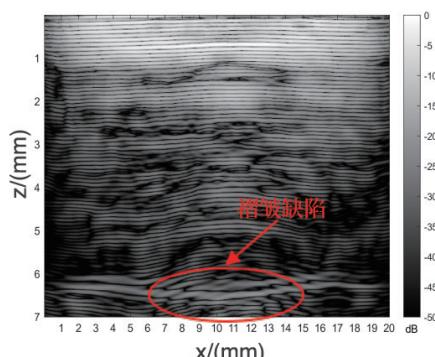
然后,为了验证声线示踪方法的准确性,使用**Viterbi**声线示踪法、**BRM**试验以及固定声速法分别计算3种方法的声传播时间差,如图8所示。结果表明,使用固定声速法,只有前16个阵元计算的声时接近**BRM**实验测量值,当接收阵元与发射阵元的距离更远时,两者差值迅速增加,说明**CFRP**试块中多层结构和层间各向异性对声波传播影响不可忽略,不能直接等效于在各向同性介质中传播;而声线示踪法计算的声时与**BRM**实验测量值接近,验证了声线示踪法的准确性。

图 8 三种不同方法计算的**qP**波传播时间差曲线

最后,根据Viterbi声线示踪法计算的延时法则,使用阵列超声全聚焦算法实现了对CFRP构件中典型缺陷的成像检测,如图9所示。结果表明,使用声线示踪法的阵列超声全聚焦图像,可以有效避免CFRP各向异性和层间反射的干扰,相干叠加的信号幅值增加,铺层显示连贯,可以有效检出复合材料中的缺陷。



(a) 成像一

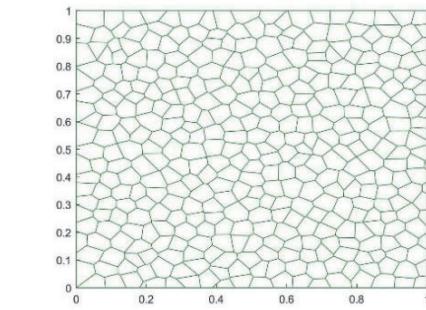


(b) 成像二

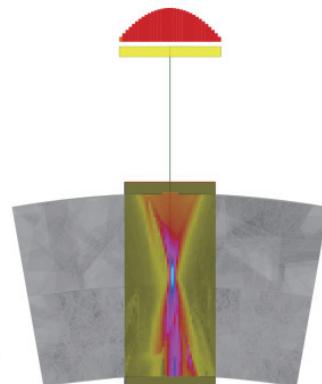
图9 Viterbi声线示踪法分别对CFRP构件上下表面的纤维褶皱缺陷进行全聚焦成像结果

3 异种粗晶材料扩散焊界面超声检测研究

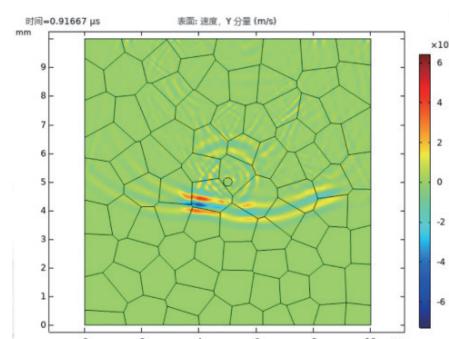
为满足航空航天极端环境的使用要求,异种粗晶组织材料常通过扩散焊连接在一起形成多功能复合材料。由于粗晶组织材料会引起强烈的超声散射衰减和波形畸变,使现有的用于细晶材料扩散焊界面检测的高频超声和非线性方法难以适用。为研究适用于粗晶组织材料扩散焊界面检测的新方法,建立了考虑晶粒特性的粗晶组织金属材料仿真模型,探究了超声波在各种类型粗晶组织材料中的传播规律,如图10所示。扩散焊缺陷尺寸远小于超声波波长,难以使用常规幅值方法进行表征,建立了扩散焊微孔缺陷、考虑复杂形面特性的声学模型,为后续粗晶扩散焊微小缺陷的识别分析提供了理论基础,如图11所示。



(a) 晶粒建模

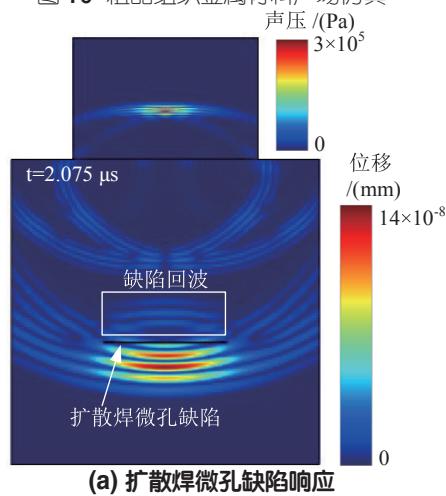


(b) 阵列超声声场仿真



(c) 动态声场仿真

图10 粗晶组织金属材料声场仿真



(a) 扩散焊微孔缺陷响应

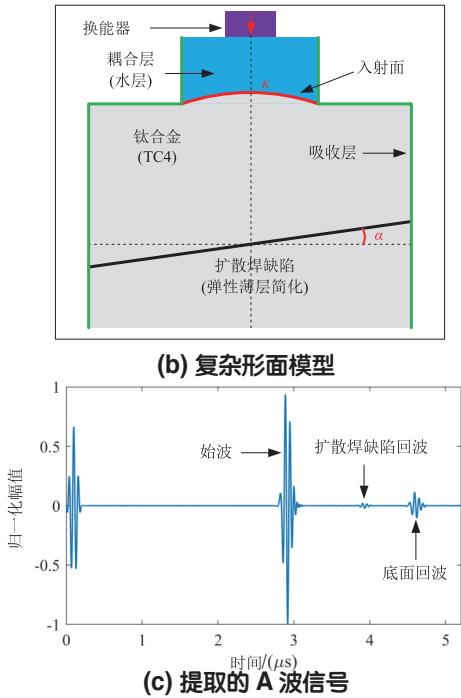


图 11 扩散焊界面声场仿真

4 超声检测仿真软件系统设计

通过超声检测仿真，可明确试样的超声传播特性，指导并优化超声检测工艺设计，显著提高超声检测效果。在采用有限元等通用仿真工具进行超声检测仿真时，存在操作繁琐、技术门槛高等局限性。为此，开发了超声检测仿真专用软件，可显著降低超声检测工艺设计过程的经济成本和时间成本。

首先，基于 **OpenCascade** 三维 CAD 建模库，开发了检测模型的三维建模模块，可实现多种类型换能器、多种复杂结构试样、楔块以及缺陷的建模、显示以及交互，允许用户自主定义组件的结构特征和声学特征，进而准确表征超声检测工况，检测模型如图 12 所示。此外，基于射线追踪算法和组件三维模型，建立了阵列超声声线仿真功能模块。

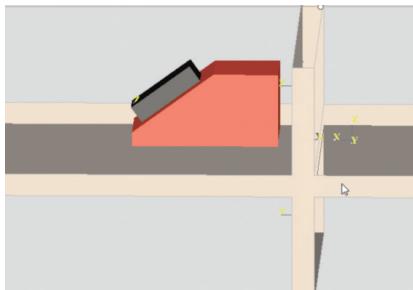


图 12 阵列超声检测三维模型

其次，基于 **Rayleigh-Sommerfeld** 方法，开发了基于半解析方法的超声声场分布计算模块，可快速计算超声换能器在试样中所激发声场的三维分布，并可据此分析超声检测参数与声场分布特征的映射规律，声场分布显示结果界面如图 13 所示。

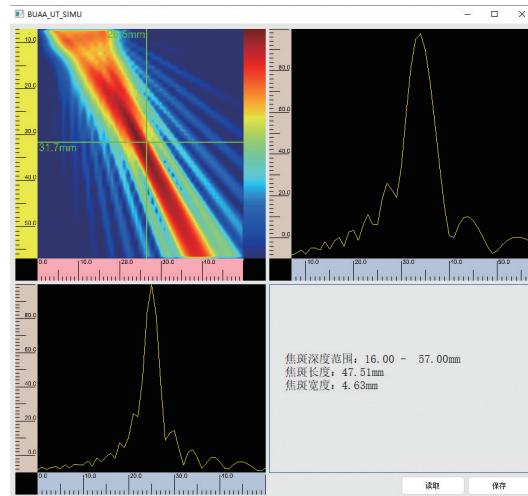


图 13 超声声场分布显示界面

最后，基于时域有限差分仿真方法，建立了动态声场仿真模块。该仿真模块通过三维检测模型交互的方式实现有限差分网格及阵列超声聚焦检测方案的设置，并利用 **GPU** 并行计算，极大地提升了仿真计算效率。通过计算并记录仿真区域和换能器晶片处应力和速度的变化，实现声场的动态传播过程和超声回波信号的仿真计算，如图 14 所示。在此基础上，基于超声回波计算结果，仿真系统提供了阵列超声扇形扫查、线性扫查以及全聚焦成像等多种检测仿真成像功能，可供用户进行仿真成像分析，软件界面如图 15 所示。

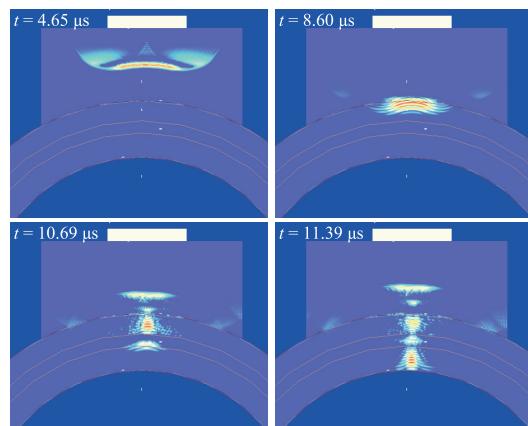


图 14 阵列超声动态声场传播过程

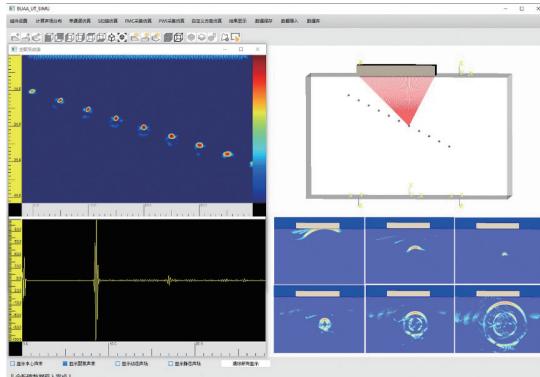


图 15 超声检测仿真软件界面

5 超声检测系统研发

针对曲面构件的无损检测需求,研制了“5+1”轴水浸超声C扫描检测系统,如图16所示。检测系统采用五轴加回转台的机械结构,可实现回转体构件和复杂曲面构件的自动化检测。支持常规单探头和阵列超声两种检测模式,检测软件具有工件仿形、轨迹规划、运动控制、C扫成像、3D显示成像等功能。系统现已进入检测实验测试阶段。

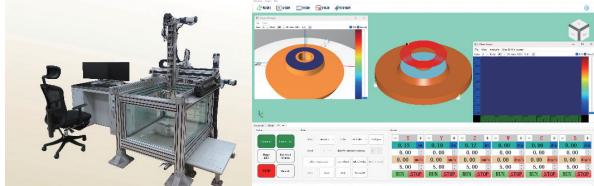


图 16 “5+1”轴水浸超声C扫描检测系统

碳纤维增韧碳化硅陶瓷基(C/SiC)复合材料是一种极具发展潜力的耐高温结构材料。为实现C/SiC复合材料的质量无损评估且满足工业自动化检测的需求,研制了一套适用于C/SiC复合材料的双通道空气耦合超声自动检测系统,如图17所示。系统的检测范围为 $3.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$,双通道模式下检测速度可达 1.0 m/s ,支持矩形、梯形、三角形工件的自动扫描。检测软件具有运动控制、A型信号显示、C扫成像、缺陷统计

分析、检测报告生成等功能。C/SiC复合材料空气耦合超声检测系统可实现厚度 20 mm 的C/SiC复合材料 $\pm 30\text{ mm}$ 分层缺陷的有效检出(尺寸误差小于15%),现已用于航天系统某部门的实际生产检测中。

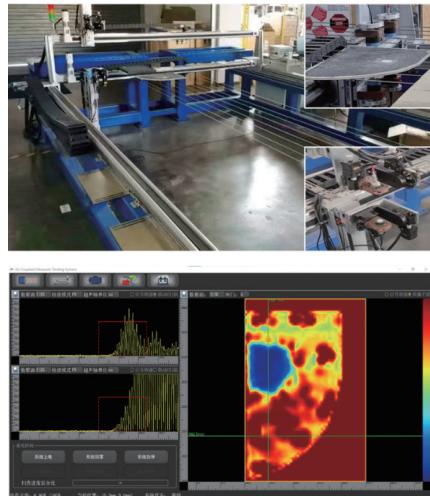


图 17 复合材料双通道空气耦合超声检测系统

6 结语

2022年北京航空航天大学超声无损检测实验室取得的成绩离不开国内同行的大力支持与帮助。未来,实验室继续保持与同行的深入交流与合作,攻克相关领域的无损检测难题,促进我国先进无损检测技术的发展!

北京航空航天大学 机械工程及自动化学院

周正干,马腾飞,朱甜甜,杨功鹏,

王俊,于敬涛 供稿

2023年5月