

北京航空航天大学超声无损检测实验室

2021 年度工作进展

2021 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褶皱缺陷的超声检测方面，建立了含褶皱缺陷复合材料声场有限元仿真模型，分析了含褶皱缺陷复合材料声场的特点；提出了限制孔径瞬时相位法，实现了褶皱缺陷的超声检测。在碳纤维增强树脂基复合材料阵列超声传播路径计算方面，以单铺层为研究单元，使用 Viterbi 算法计算了非均质各向异性复合材料中的声波传播路线，为复合材料中缺陷的阵列超声检测提供了基础。在多层黏接结构的阵列超声检测方面，提出了多层介质试样的阵列超声检测工艺设计方法，建立了缺陷回波的频谱特征成像方法，实现了多层黏接试样的高效率检测成像。在复杂曲面部件扩散焊接界面的超声检测方面，提出了基于高频超声与线激光仿形的一体化定制检测方案，实现了对复杂曲面试件内部扩散焊接界面的超声扫描检测。在超声检测系统研发方面，研制了阵列超声盘环件检测系统和纤维缠绕壳体空气耦合超声检测系统，分别用于粉末冶金盘环件和小直径纤维缠绕壳体的自动化检测。

1 碳纤维增强树脂基复合材料褶皱缺陷的超声检测

褶皱缺陷在碳纤维增强树脂基复合材料（CFRP）内部引起的声阻抗差异较小，缺陷回波信号微弱，树脂基复合材料内部结构的非均匀

性致使其声学特性复杂，难以直接利用超声回波信号表征褶皱缺陷。为实现碳纤维增强树脂基复合材料褶皱缺陷的超声检测，综合考虑碳纤维直径、铺层厚度、褶皱缺陷特征与波长的关系，建立了含褶皱缺陷的 CFRP 复合材料二维仿真模型，进行了声场仿真，仿真结果如图 1 所示。

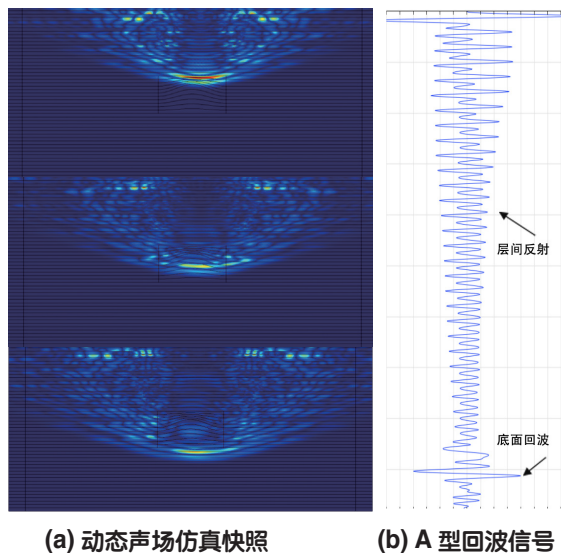


图 1 含褶皱缺陷的 CFRP 复合材料声场仿真结果

声场仿真分析发现：① 限制孔径可以抑制 CFRP 内部的不均匀性产生的大量结构杂波信号；② 褶皱缺陷反射的声波能量微弱，被淹没在结构杂波中；③ 仿真 A 型回波信号中含有微弱的层间反射信息。根据以上仿真分析，提出了限制孔径瞬时相位法，使用线阵换能器实现了铺层走向追踪和褶皱缺陷的检测（检测结果见图 2）。

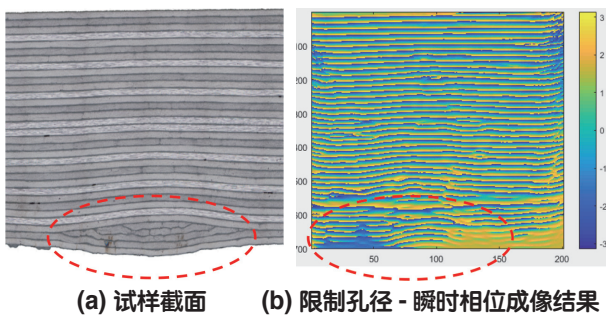


图2 CFRP褶皱缺陷的检测结果

2 碳纤维增强树脂基复合材料阵列超声传播路径计算

由于碳纤维增强树脂基复合材料（CFRP）的各向异性和内部结构的不均匀性，其不同纤维方向铺层之间的界面处发生声学特性失配，倾斜入射至该处的超声波将改变传播方向和声速。针对CFRP构件，传统的阵列超声检测采用“均值化”处理方法，即对于纤维铺层厚度远小于声波波长的情况，可以将CFRP构件等效为各向同性金属材料计算延时法则，然而这种方式存在一定的局限性，声波波长的增加导致对微小缺陷的检出能力下降，灵敏度降低。为了不影响检测灵敏度，准确计算阵列超声检测CFRP构件的延时法则，提出基于Viterbi算法的声线示踪方法计算CFRP构件中阵列超声的传播路径。

首先，由于CFRP构件单铺层内纤维方向一致，近似认为是均匀各向异性介质，将CFRP构件模型离散成网格状，建立不同纤维方向铺层内声波群速度和入射角度的关系曲线（见图3）。根据Fermat原理，使用Viterbi算法搜索CFRP构件内部任意两点间最短的传播时间及传播路径，计算目标点的延时法则。最后建立COMSOL仿真模型，在不同位置预设虚拟聚焦点，代入计算延时法则，对CFRP构件中合成声束的传播过程进行仿真，仿真结果如图4、5所示。

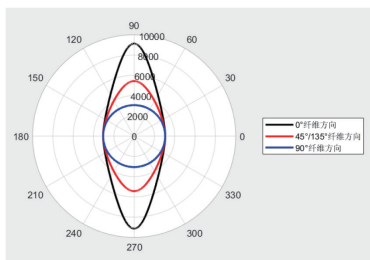


图3 不同纤维方向铺层内声波群速度与入射角度的关系曲线

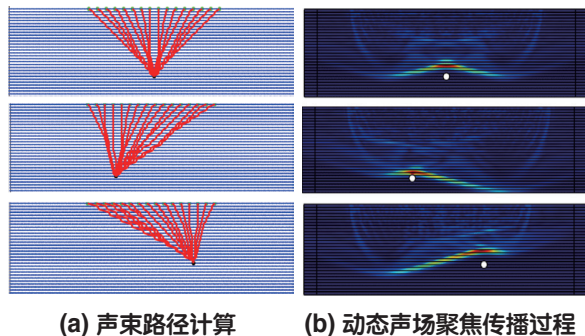


图4 碳纤维复合材料层压板中不同位置的声束路径仿真结果

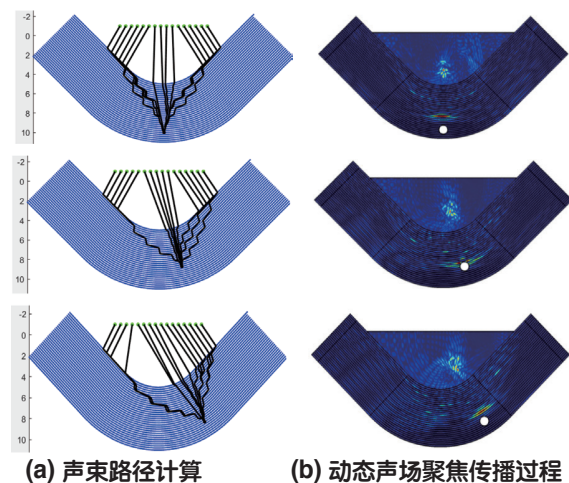


图5 碳纤维复合材料R区结构中不同位置的声束路径仿真结果

仿真结果表明，所提出的基于Viterbi算法的声线路径搜索方法可以有效计算CFRP中阵列超声传播路径（时间），实现合成声束在CFRP中的有效聚焦，为碳纤维增强树脂基复合材料的缺陷检测提供了基础。

3 多层黏接结构的阵列超声检测

在金属与橡胶等非金属材料组成的多层黏接结构中，各介质间声阻抗差异显著，橡胶等介质超声衰减系数大，致使该类结构的声学特性复杂。在采用常规超声检测方法时，由于深层界面回波信号微弱，所以脱黏缺陷特征识别困难，且检测效率低。为了提高多层黏接结构中脱黏缺陷的检出能力，提出了基于线性阵列超声换能器的超声检测评价新方法。

首先，依据声波在黏接界面的传播特性，建立了声波在金属和橡胶等非金属材料内部的反射系数频谱关系（见图6），基于瑞利积分方法和

波动方程建立了多层介质中的阵列超声声场分布模型。据此，以超声检测信噪比和阵列超声声场指向性为设计目标，建立了多层黏接结构的阵列超声检测工艺参数设计方法。

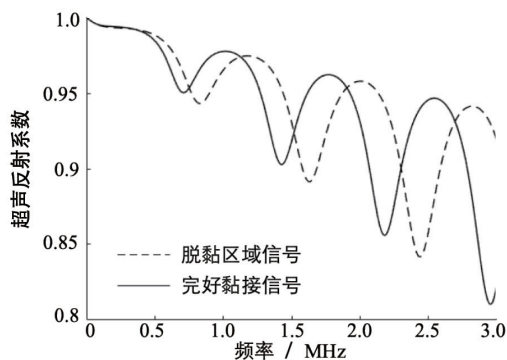


图6 多层黏接结构反射系数频谱

然后，基于多层黏接结构的三维 CAD 检测模型，建立了多层结构的阵列超声声束路径通用计算方法；依据多层介质的刚度矩阵传递模型，构建了数值仿真分析模型，实现了阵列超声聚焦方案和检测工艺的优化与验证，计算的阵列超声动态声场传播过程如图 7 所示。

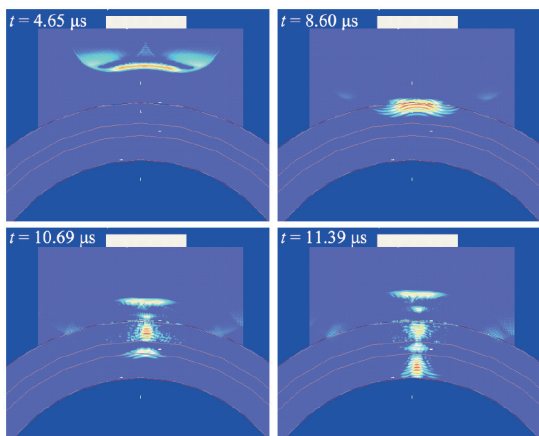


图7 阵列超声动态声场传播过程示意

最后，分析了不同黏接状态下界面回波信号的时频特性，提出了采用幅度谱特征进行 C 扫描成像的方法。预埋缺陷的多层黏接结构试样如图 8(a) 所示，在三元乙丙橡胶与钛合金层之间预埋聚四氟乙烯薄膜模拟脱黏缺陷，缺陷分布如图 8(b) 所示。检测结果（见图 9）表明，所提出的阵列超声检测方法可有效提升多层黏接结构的检测效率，提高检测信噪比，并避免了常规超声检测方法中介质层间信号对缺陷回波信号的干扰。

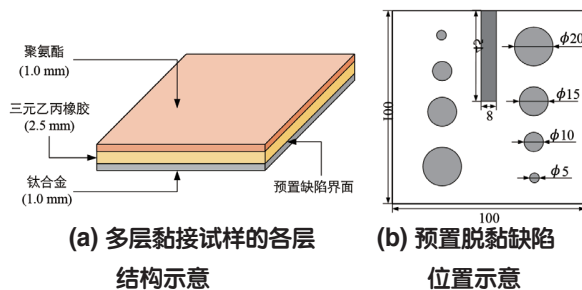


图8 预埋脱黏缺陷的多层黏接试样

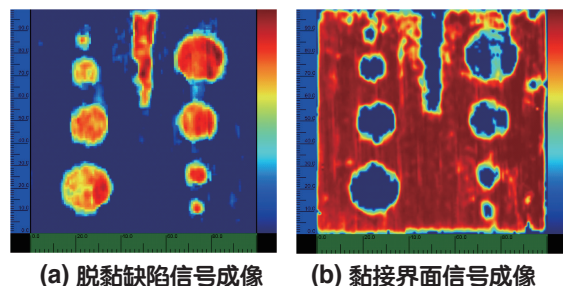


图9 多层黏接试样的 C 扫描成像结果

4 复杂曲面部件扩散焊接界面的超声检测

对航空发动机叶片等复杂曲面部件进行自动化超声检测，需要基于检测面几何信息、检测区域与缺陷类型综合制定超声检测方案。针对对开结构扩散焊接叶片制定的自动化检测方案如图 10 所示。为获取检测面数据，基于线激光三角测量原理，由机器人夹持线激光轮廓仪，对复杂曲面试件进行仿形扫描，基于采集的激光点云实现检测面的曲面 CAD 数模重建。为实现高精度超声扫描轨迹规划，以 NURBS 曲面表征激光仿形获得的检测面 CAD 数模，按照检测扫描需求参数化提取各扫描离散点的坐标、法向量并按照栅格扫描顺序排列，将其转化为机械扫描系统能识别的形式。为提高对扩散焊缺陷的检测能力，根据检测对象的材料及缺陷特性、检测覆盖区域需求，由静态声场计算评价优选换能器参数，并由缺陷响应仿真验证其有效性。在研制的激光仿形、超声检测一体化检测试验系统中，对复杂曲面扩散焊接叶片试样开展超声检测试验，发现了扩散焊接界面上的缺陷，为试样的后续处理及焊接工艺改进提供了评价依据。

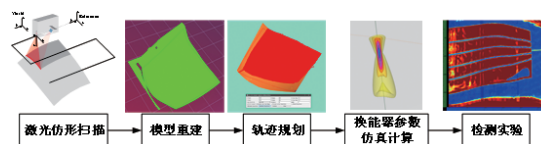


图10 对开结构扩散焊接叶片的超声检测方案

5 超声检测系统研发

采用常规超声水浸 C 扫描检测盘环件时，为了得到较高的检测精度，一般采用较小的扫描步距，且换能器聚焦深度不能改变，存在检测效率低、灵活性差等问题。为了提高超声水浸 C 扫描检测的速度、检测适用范围及灵活性，研制了阵列超声盘环件检测系统。检测系统采用六自由度机械臂加回转台的机械结构，由回转台的升降运动实现上下料，由机械臂完成工件回转过程中换能器的实时位姿调整，支持线阵换能器线性扫描和环阵换能器全聚焦扫描两种检测模式。检测软件集成工件仿形、轨迹规划、运动控制、3D 显示成像等功能，人机界面如图 11 所示。阵列超声盘环件检测系统的检测效率较原单通道检测设备的检测效率有显著提升，可实现粉末冶金盘环件 $\phi 0.4\text{ mm}$ 平底孔缺陷的检出。

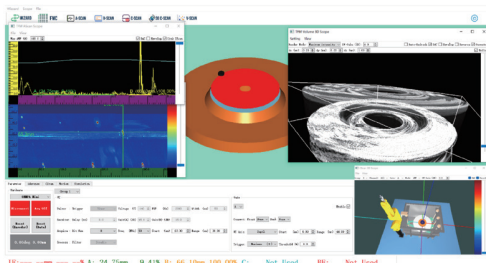


图 11 阵列超声盘环件检测系统人机界面

纤维缠绕材料具有质量轻、比强度高优点，常用于制作固体火箭发动机的外壳。受生产工艺水平的限制，纤维缠绕层和绝热橡胶层之间可能发生脱黏。为实现纤维缠绕壳体质量的无损检测

且满足工业自动化检测的需求，研制了一套适用于多种型号纤维缠绕壳体的穿透式空气耦合超声自动检测系统（见 12）。检测系统可根据设定的纤维缠绕壳体直径长度信息，自动实现工装到位、一键装卡、自动扫查、夹具卸载等工序。检测软件具有运动控制、A 型信号显示、C 扫描成像、缺陷统计分析、检测报告生成等常见功能，还具有三维运动显示、三维 C 扫成像显示等特色功能。纤维缠绕壳体空气耦合超声检测系统可实现厚度为 30 mm 的纤维缠绕壳体中 $\phi 10\text{ mm}$ 脱黏缺陷的有效检出，现已用于航天系统某部门的实际生产中。

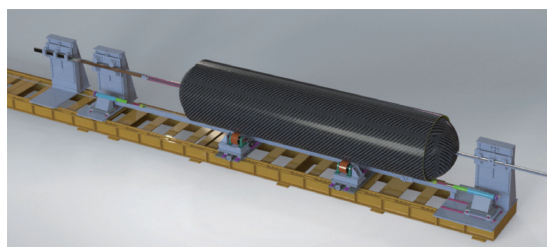


图 12 纤维缠绕壳体空气耦合超声自动化检测系统

北京航空航天大学 机械工程及自动化学院
周正干，李 洋，杨功鹏，马腾飞，王 俊，
朱甜甜，于敬涛 供稿

2022 年 4 月