

DOI: 10.3901/JME.2023.10.030

基于线阵和环阵换能器的 CFRP 层压板 超声成像特性研究分析*

王 俊¹ 周正干^{1,2} 王 进³ 刘雨生³

- (1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083;
2. 北京航空航天大学宁波创新研究院 宁波 315800;
3. 沈阳飞机设计研究所 沈阳 110035)

摘要: 针对碳纤维增强树脂基复合材料层压板结构超声检测中存在的信噪比差、检测效率低等问题,设计基于线性阵列和环形阵列换能器的超声检测方法和工艺,研究分析这两种换能器对复合材料层压板的检测效果。首先,制备预置有不同埋深分层缺陷的复合材料梯度平板试样,并基于有限差分仿真模型探究了复合材料平板结构中的超声传播特性。然后,依据材料的声学各向异性特征,对采用线阵和环阵换能器的超声检测成像算法进行修正,并制订检测工艺。最后,利用线阵和环阵换能器对试样进行 C 扫描超声检测成像,并结合声场特征,定性和定量地分析其检测结果。试验结果表明,采用线阵换能器可在具有较高信噪比的同时,对厚度较小(≤ 10 mm)的复合材料平板试样实现高效率检测,而环阵换能器对厚度较大的平板试样具有更高的检测精度以及更小的成像畸变。研究成果可为复合材料检测的声学表征提供理论依据,并为阵列超声检测的工艺方法设计提供有效参考和指导。

关键词: 无损检测; 复合材料; 阵列超声; 环形阵列

中图分类号: TB553

Research and Analysis on Ultrasonic Imaging Characteristics of CFRP Laminates Based on Linear and Annular Array Transducers

WANG Jun¹ ZHOU Zhenggan^{1,2} WANG Jin³ LIU Yusheng³

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083;
2. Ningbo Innovation Research Institute of Beihang University, Ningbo 315800;
3. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035)

Abstract: In the ultrasonic non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer laminate structure, aiming at the problems of poor signal-to-noise ratio and low detection efficiency, the ultrasonic testing method and process parameters using linear array transducer and annular array transducer are designed, and the detection effect of composite laminates is analyzed. First, delamination defects with different buried depths are preset in the composite material gradient plate specimen, and the ultrasonic propagation characteristics in the composite plate structure are studied with the finite difference simulation model. Then, according to the acoustic anisotropy characteristics of the specimen, the ultrasonic array testing algorithm based on linear array and annular array is modified, also the detection process parameters is formulated. Finally, the specimen is detected and imaged with C-Scan ultrasonic testing method, also the testing results of linear array and annular array are evaluated qualitatively and quantitatively, and analyzed combined with the characteristics of sound field. The results show that the ultrasonic echo has high signal-to-noise ratio with linear array transducer, as well as, the detection process is more efficient. It also indicates that the annular array method has higher detection accuracy and less imaging distortion for specimens with larger thickness. The research results can provide theoretical basis for acoustic characterization of composite material testing, and provide effective reference and guidance for the design of array ultrasonic

* 国家自然科学基金资助项目(51375027)。20220530 收到初稿, 20221230 收到修改稿

testing process.

Key words: non-destructive testing; composites; ultrasonic array; annular array

0 前言

碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有优越的材料和力学性能,逐步被应用于航空航天、高铁和汽车等关系国计民生的重要领域^[1]。复合材料的特殊制造工艺及其多铺层的特点,容易导致在制造过程中出现分层、夹杂、脱粘、空隙等制造缺陷,为此,需开展无损检测对试样中缺陷进行评估,以避免缺陷对材料结构和性能造成影响^[2]。阵列超声是一种多通道超声检测技术,采用相位延时激励实现超声声束在试样内部的偏转与聚焦,可有效提高试样厚度方向上检测分辨率,提升检测效率。因此,很多学者对复合材料的阵列超声检测方法展开了广泛研究^[3-4]。

在复合材料中阵列超声声束控制理论方面,ANAND 等^[5]针对各向异性介质建立了多高斯阵列波束模型来模拟阵列换能器产生的声场,可用于分析复合材料中的声场分布。KOLKOORI 等^[6]将各向异性材料中的不均匀性通过离散成几个均匀层来表示,提出适用于定量评估非均匀各向异性材料声场的二维声线追踪模型。DEYDIER 等^[7-8]提出了一种基于射线追踪理论对复合材料均质化的方法,从而计算声束的等效能量传播方向。JOURNIAC 等^[9]提出了一种在非均匀介质中基于射线模型计算的时间步长迭代法,依据 Eikonal 和 Christoffel 公式,建立起了声束在曲面复合材料中传播路径的解析模型。在复合材料的高精度阵列超声成像方面,张冬梅等^[10]提出了基于弧形阵列换能器和线性阵列换能器的两种检测方法来解决复合材料构件中 R 区的超声检测问题。李健等^[11]基于 BP 神经网络,对复合材料中分层、夹杂和脱粘的阵列超声检测结果实现了自动分析与识别,孙芳等^[12]在阵列超声检测系统对碳纤维复合材料试样进行检测的基础上,利用小波包变换方法进行分析,提出了用“频率-能量”法提取各类缺陷信号能量特征的方法。FREEMANTLE 等^[13]提出了针对大型复合材料航空结构的快速相控阵超声成像技术。当前研究主要集中在基于线阵换能器的 CFRP 平板试样检测,由于声波在复合材料的传播过程中伴随着显著的能量衰减、偏斜和扭曲,当前检测中依旧存在阵列超声聚

焦程度较低、缺陷图像畸变明显等问题^[14]。

针对上述问题,本文探究了 CFRP 层压板结构中的超声传播规律,设计了基于线阵和环阵换能器的阵列超声检测方法和工艺,结合声场特征分析了换能器形式对不同厚度复合材料试样中缺陷信噪比、畸变程度、检测速度等方面的影响,研究成果对复合材料层压板的高效率、高精度超声检测工艺设计具有一定的参考价值。

1 复合材料试样的声学特性研究

1.1 复合材料梯度平板试样

选用碳纤维/环氧树脂预浸料体系按特定铺层方式制备 CFRP 梯度平板试样,试样结构如图 1 所示。试样的厚度梯度变化为 20 mm/10 mm/4 mm,总体尺寸为 360 mm×140 mm。在试样的三个梯度区域,分别在距试样上表面 0.5 mm、中间区域、距下表面 0.5 mm 的位置预置直径为 $\phi 10$ mm 的聚四氟乙烯薄膜模拟复合材料的分层缺陷。

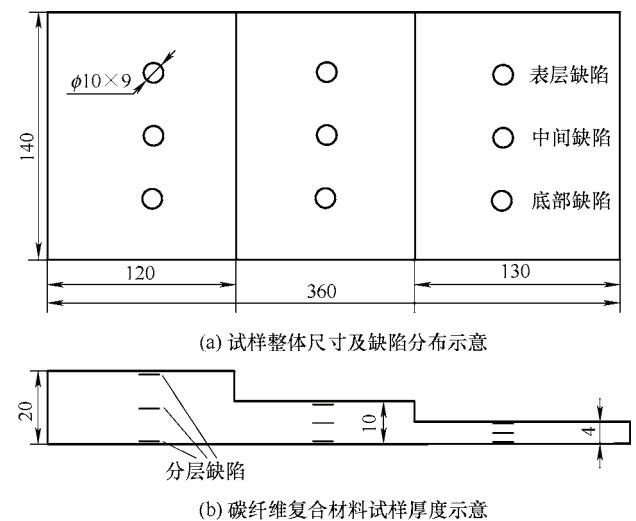


图 1 预置分层缺陷的碳纤维复合材料试样结构

在利用阵列超声检测方法对试样内部的缺陷信息进行检测表征时,超声波在复合材料中的传播特性与其在均匀各向同性的金属材料试样相比存在较大差异,主要体现在如下三个方面。① 声学各向异性强:复合材料的基体材料与增强体组合叠加,且增强体存在特定的铺放方向的物理结构特征,导致声波在介质中传播时其声速会存在明显的差异;② 声衰减系数大:由于复合材料的微观结构复

杂, 声波会与介质内部的与波长量纲相当的、阻抗特性与周围材料不同的非均匀介质产生散射衰减, 并与材料介质相互作用产生吸收衰减; ③ 结构噪声水平高: 纤维增强型复合材料是典型的层状各向异性介质, 由于该类材料为层压结构, 超声波在材料内部各层之间会出现反射和折射响应, 产生层间反射信号。

1.2 超声传播特性研究

由于 CFRP 单个铺层中纤维的方向唯一, 即可认为该铺层为正交各向异性的固体介质, 且可以等效为横观各向同性材料。设笛卡儿坐标系中, 复合材料的铺层平面为 X - Y 平面, X 方向与该铺层中纤维方向重合, 铺层的重叠方向为 Z 方向。假设超声在材料介质传播中无能量损失, 则材料应力张量 σ_{ij} 与应变张量 ϵ_{kl} 间满足 $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$ 的关系, C_{ijkl} 为刚度系数, 为一四阶张量^[15]。但由于应力张量和应变张量具有对称性, 则上述关系可简化为

$$\sigma_i = C_{ij} \epsilon_j \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

式中, $C_{ij} = C_{ji}$ 。对式(1)进行求逆可得 $\epsilon = S\sigma$, 其中 S 为柔度系数矩阵, 满足 $S = C^{-1}$ 。则三维空间内的波动方程采用工程弹性系数进行描述可表示为

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, E_i 为弹性模量, G_{ij} 为剪切模量, μ_{ij} 为泊松比, 三个弹性常数均可由材料力学试验进行确定。对于各向异性材料, 其刚度系数与坐标系的选取相关, 不同纤维方向铺层的刚度系数矩阵可由式(2)进行坐标系的旋转获得。

实际检测过程中, 一般声束沿复合材料层叠方向(Z 方向)进行发射, 为了简化计算, 忽略传播过程中声束在 Y 轴(或 X 轴)方向的能量变化, 此时波动方程可以简化为二维形式^[16]

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} v_x \\ v_z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \end{pmatrix} \\ \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \sigma_{xz} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} C_{11} & C_{13} & C_{15} \\ C_{13} & C_{33} & C_{35} \\ C_{15} & C_{35} & C_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \end{pmatrix} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

依据二维平面内的波动方程, 建立多层各向异性材料的有限差分仿真模型, 通过在换能器阵元位置设置超声激发点实现复合材料试样中的超声激励, 在点源激发声波的传播方向上, 设置一系列监测点并计算复合材料中纵波波前到达该点的时间, 以获取声波沿不同方向传播时纵波的声速变化规律, 如图 2 所示, 声速随角度变化曲线如图 3 所示。

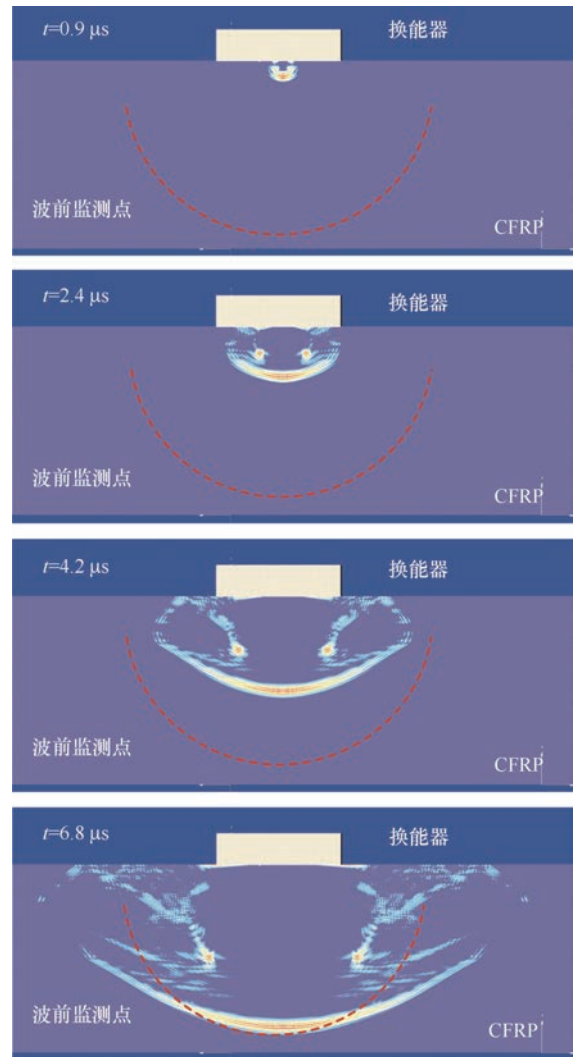


图 2 点源激发声波在复合材料平板试样中的传播过程

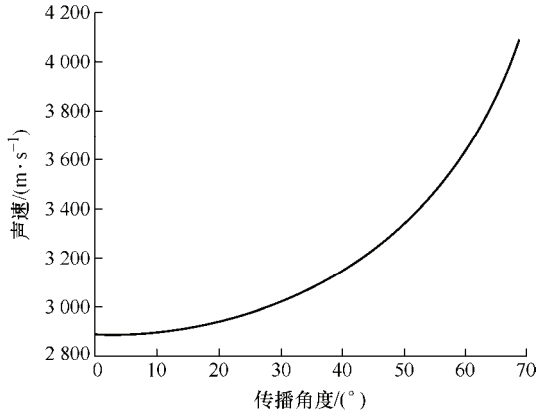


图3 纵波声速随传播角度变化曲线

2 阵列超声检测工艺设计

线性阵列换能器和环形阵列换能器由于阵元排布方式不同,如图4所示,其聚焦特性也存在明显差异,线阵换能器可以在二维平面上进行偏转聚焦,检测效率高且控制简单。环阵换能器能够采用较少的阵元数量实现比线阵换能器更优秀的聚焦能力,且环阵换能器三维声场沿径向方向对称分布,可实现换能器轴线方向上任意位置的准确聚焦,环阵换能器的这种声场特性可有效解决大厚度复合材料超声检测结果信噪比低,缺陷畸变大等难题。

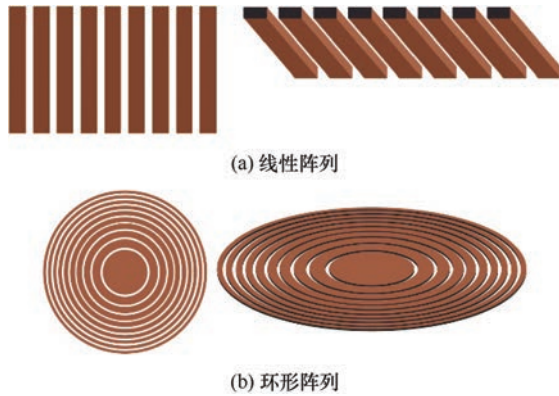


图4 线性及环形阵列超声换能器阵元排列

2.1 线性阵列超声检测方法

采用线阵换能器对复合材料平板的扫描检测,通常在水浸或平楔块耦合条件下,采用纵波进行垂直入射,通过脉冲反射法实现试样内部缺陷的成像。相较于常规单通道的超声检测方法,线阵超声检测采用动态聚焦技术改变声束在试样内部的聚焦深度,可有效提高超声检测在不同深度位置的聚焦声场强度,提高检测信噪比。用于控制激发线阵换能器的动态聚焦延迟时间计算如图5所示。

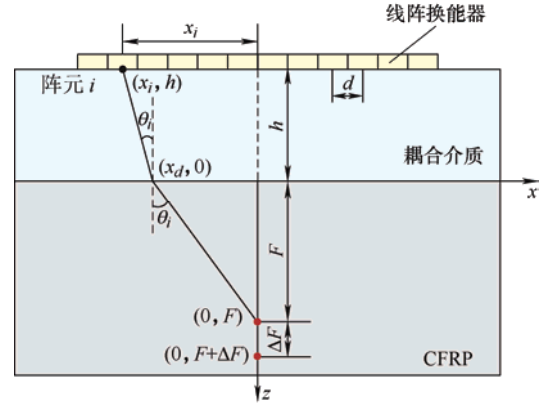


图5 线阵换能器的聚焦法则计算示意图

假设阵元间距为 d , 总阵元数为 n , 第 i 个阵元到换能器中心的距离 $x_i = |0.5(n+1) - i| \times d$, 由该阵元激发的声波传播至聚焦点 $(0, -F)$ 所需设置的延时激励时间为

$$\Delta t(F, x_i) = \frac{\sqrt{(x_i - x_d)^2 + h^2} - h}{c_1} + \frac{\sqrt{x_d^2 + F^2} - F}{c_2} \quad (4)$$

式中, c_1 、 c_2 为耦合介质和试样中的声速, h 为耦合介质的高度, 声束与耦合面交点 $(x_d, 0)$ 可依据斯涅尔定律进行求解。进一步考虑复合材料各向异性的影响, 依据复合材料中纵波声速随角度的变化关系对式(4)进行修正

$$\begin{cases} \Delta t(F, x_i)' = \frac{\sqrt{(x_i - x_d)^2 + h^2} - h}{c_1} + \frac{\sqrt{x_d^2 + F^2} - F}{c(\theta_r)} \\ \theta_r = \arctan\left(\frac{x_d}{F}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中, θ_r 为声束在试样中的传播角度, $c(\theta_r)$ 为群速度的角度变化函数。通过该方法对声束进行聚焦控制可有效增强合成声束的指向性。

阵列超声声场的能量分布是影响回波强度以及超声检测分辨率的关键因素, 为此, 基于超声在介质中传播的波动方程以及三维空间下的格林函数对阵列超声换能器在 CFRP 试样中的声场能量分布进行仿真分析。对于三维空间中任意位置点, 依据式(5)所计算得到的延时法则对特定孔径的阵元晶片声场进行叠加, 可以得到合成声束总声场, 图6为线阵在被测区域(聚焦深度 20 mm, 偏转角为 0°)的二维声场分布。其中 Z 轴方向为垂直于阵元晶片平面方向, X 轴方向为阵元排列方向, Y 轴方向为阵元长度方向, 图 6a

中 $Y=0$ mm, 图 6b 中 $Z=20$ mm。

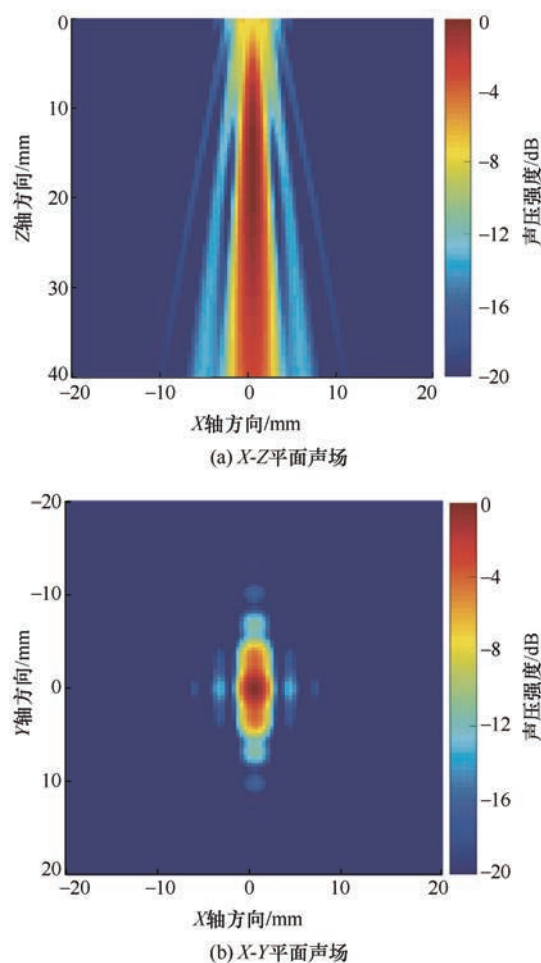


图 6 线性阵列超声换能器二维声场分布

在实际检测中,通过聚焦焦斑尺寸、声场旁瓣能量占比等因素来评价换能器聚焦性能的好坏,焦斑宽度 W_F 为焦点处回波幅值 F_{\max} 降至最大幅值的 50% (-6 dB) 时的横向距离,焦斑长度 L_F 为其纵向距离。为方便计算换能器在检测范围内的焦斑尺寸,对聚焦点处 X 轴线和 Z 轴向方向的一维声场分布进行计算分析,如图 7 所示。

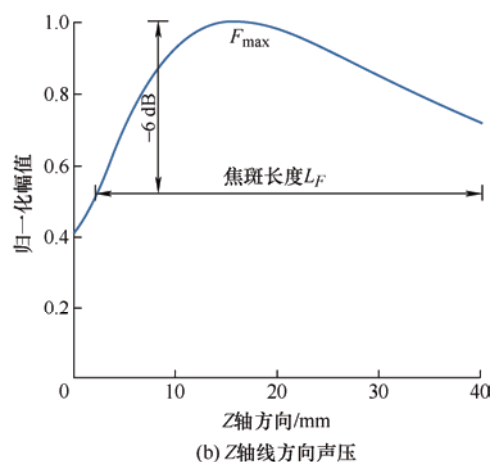
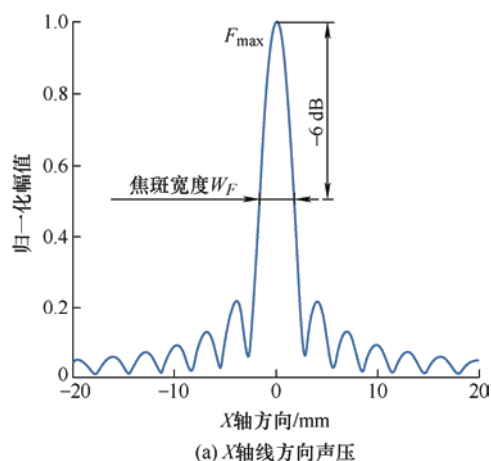


图 7 线性阵列超声换能器一维声压分布

一般而言,焦斑宽度越小,阵列超声换能器的检测分辨率越高,声场中旁瓣的存在使声场能量向外辐射,降低主声束能量,阵列超声声场的指向性越差,使检测效果下降。为此采用不同组合的阵元中心频率、阵元间距、耦合介质高度等参数进行声场分布仿真计算,并依据焦斑宽度和声场指向性进行检测工艺参数设计,试验所选取的阵列超声检测参数如表 1 所示。

表 1 主要线阵超声换能器检测工艺参数

频率/MHz	孔径	阵元间距/mm	阵元长度/mm	水距/mm
3.5	8	0.7	10	30

2.2 环形阵列超声检测方法

依据环阵换能器可在三维空间中轴向任意聚焦的特点,在对复合材料试样进行扫查时,将单次检测区域设置为沿换能器轴线的区域。利用全聚焦方法(Total focus method, TFM)可在成像区域理论上设置无限多个聚焦点,结合环阵全矩阵数据,对检测区域进行逐点虚拟聚焦。与基于线阵 TFM 类似^[17],首先,依次激发环阵超声换能器的阵元晶片进行声波的发射,并在每次的声波激发中,利用所有阵元晶片进行接收,假设换能器具有 N 个晶片,则该过程将产生 N 次超声波发射和 $N \times N$ 次 A 型信号接收,该 A 型信号集合称为全矩阵数据 $S_{ij}(t)$ 。其次,基于全矩阵数据,利用全聚焦算法对换能器轴线上的点进行虚拟聚焦成像,环阵全聚焦算法的原理如图 8 所示。轴线上特定聚焦点 $(0, z)$ 的像素幅值 $I(0, z)$ 可以表示为

$$I(0, z) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N U_{ij}(t_{ij}(0, z)) \right| \quad (6)$$

式中, $U_{ij}(t)$ 为时域全矩阵数据 $S_{ij}(t)$ 利用希尔伯特

变换后的复解析信号，以此消除激励信号振荡对成像造成的影响， $t_{ij}(0, z)$ 为第 i 个阵元 $(x_i, 0)$ 传播至 $(0, z)$ 后再传播至第 j 个阵元 $(x_r, 0)$ 所花费的时间，可以表示为

$$t_{ij}(0, z) = \frac{\sqrt{(x_i - x_r)^2 + h^2} + \sqrt{(x_j - x_r)^2 + h^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{x_i^2 + z^2} + \sqrt{x_r^2 + z^2}}{c_2} \quad (7)$$

式中， c_1 为耦合介质声速， c_2 为试样声速， h 为耦合介质的高度。

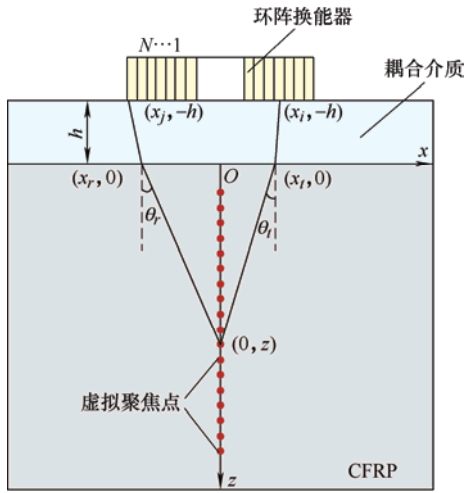


图 8 基于环阵换能器的 TFM 成像检测方法

在复合材料中，当声波的偏转角度小于 30° 时，声速变化差异较小，因此，在利用环阵全聚焦成像算法对复合材料进行检测时，需限制环阵换能器孔径，并采取适当的耦合高度。环阵换能器在检测区域的二维声场分布情况如图 9 所示，其中， Z 轴方向为垂直阵元晶片平面方向， X 轴方向为阵元径向方向，图 9a 中 $Y=0$ mm，图 9b 中 $Z=20$ mm。

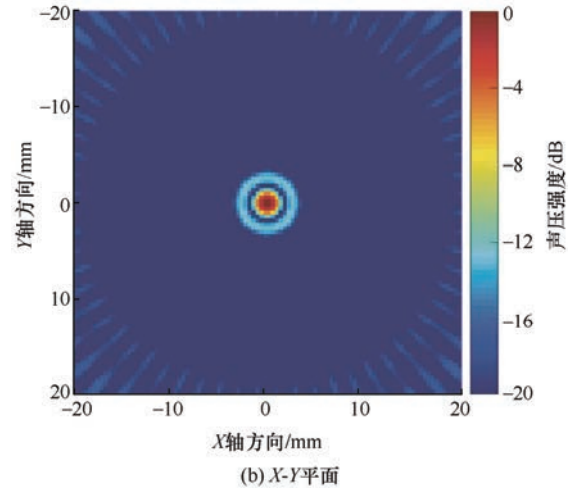
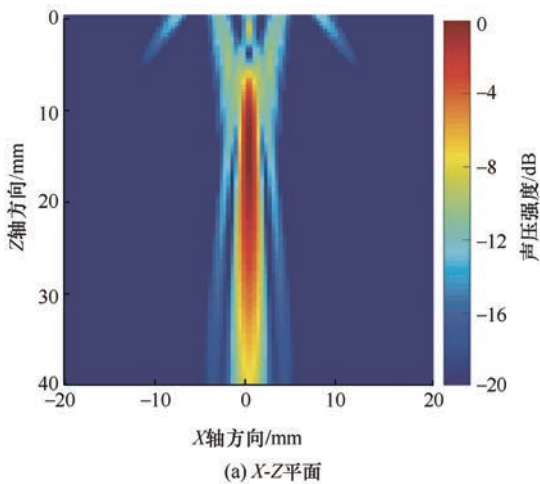


图 9 环形阵列超声换能器声场二维分布

仿真计算聚焦点位置 X 轴和 Z 轴的一维方向声压分布，如图 10 所示，获取环阵聚焦在不同深度的焦斑尺寸，并以此对换能器的中心频率、阵元数量、阵元内外径尺寸进行设计优化。依据仿真结果，采用中心频率为 5 MHz 的环形阵列超声换能器，其阵元尺寸信息如表 2 所示。

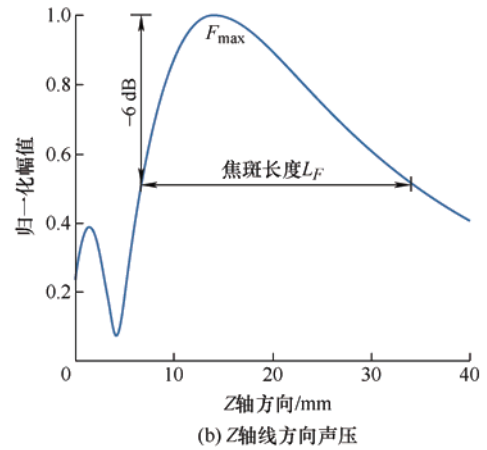
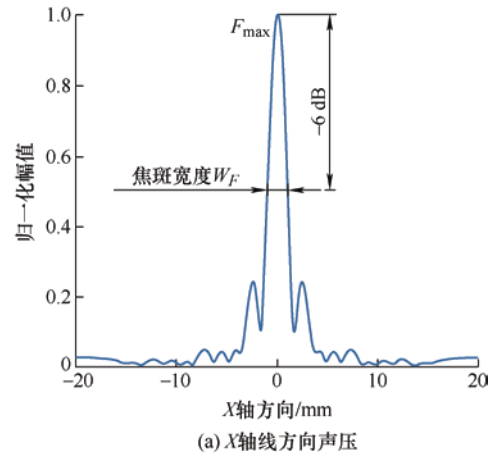


图 10 环形阵列超声换能器一维声压分布

表 2 环阵换能器的阵元参数信息

阵元编号	阵元内径/mm	阵元外径/mm
1	5.2	6.5
2	6.5	7.8
3	7.8	9.1
4	9.1	10.4
5	10.4	11.7
6	11.7	13.0
7	13.0	14.3
8	14.3	15.6

3 试验结果与分析

3.1 阵列超声检测试验

为探究线阵和环阵换能器超声检测方法对不同

厚度 CFRP 平板试样中缺陷的检测效果,依据第 2 节中的阵列超声检测工艺展开检测试验。采用 AOS OEM 128×128 超声板卡,研制开发线阵和环阵检测成像的阵列超声检测软件系统,基于三轴扫查架在水浸条件下进行阵列超声扫描检测。

基于线阵换能器采用单点发射-多点接收的动态聚焦线性扫查方法对 CFRP 梯度平板试样进行检测试验,采用底面回波信号幅值对试样中的缺陷进行表征。扫查过程中对 20 mm / 10 mm / 4 mm 厚度区域的增益分别为 15 dB、12 dB、10 dB,并采用独立成像闸门对各区域进行成像。检测过程中,扫查轴步距为 1 mm,发射聚焦点设置为试样中心位置,接收聚焦范围为试样厚度区域,聚焦点间隔为 2 mm,成像结果如图 11 所示。

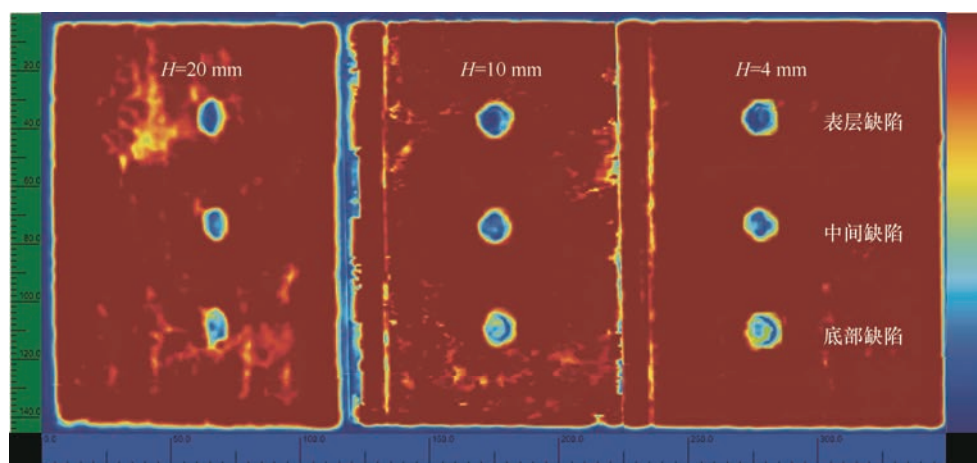


图 11 CFRP 梯度平板试样线阵 C 扫描图像

采用基于环阵换能器的全聚焦成像方法对试样进行扫描成像,首先依次激发换能器所有阵元,获取全矩阵数据,并依据环阵 TFM 算法对被测区域进行成像。轴线方向上聚焦点间隔设置为 0.2 mm,扫查轴和步进轴步距均为 1 mm,对于 20 mm/10 mm/

4 mm 厚度区域的增益补偿分别为 5 dB、2 dB、0 dB,并分别设置闸门进行成像,结果如图 12 所示。依据环阵 TFM 三维体数据,可以实现平板试样内部的三维成像,如图 13 所示,有利于实现对大厚度材料内部全方位检测评价。

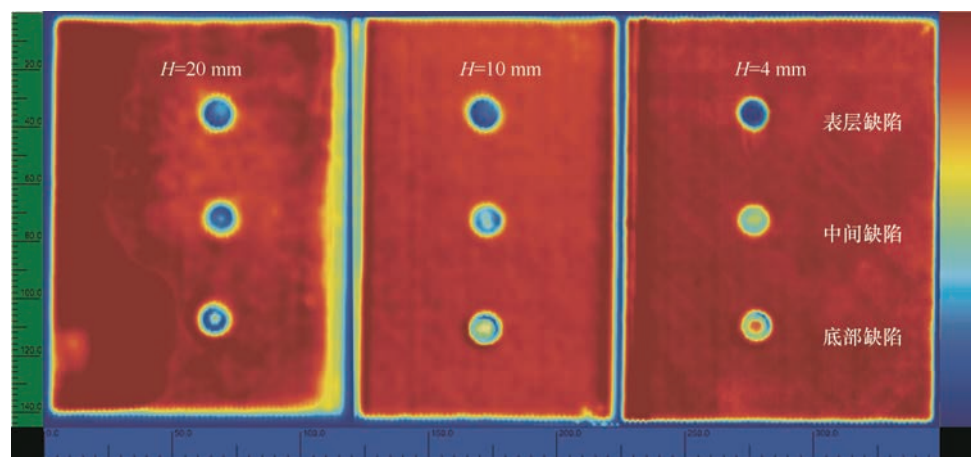


图 12 CFRP 梯度平板试样环阵 TFM 成像结果

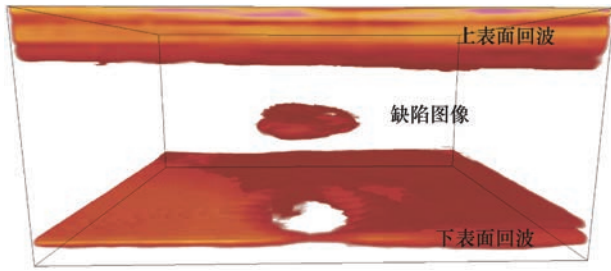


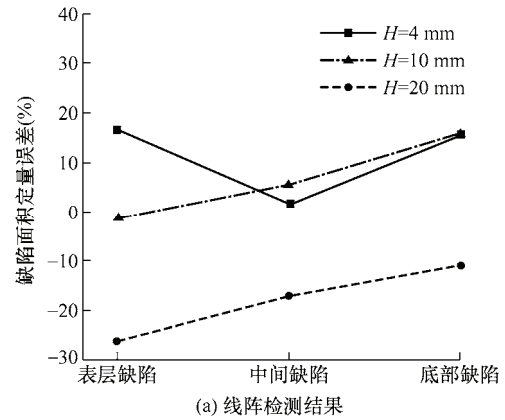
图 13 20 mm 厚区域局部三维成像结果

3.2 试验结果分析

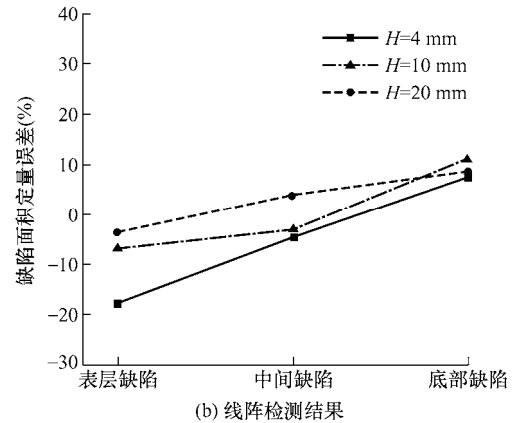
在采用阵列超声对复合材料试样进行检测时, 会存在超声近场区域的影响, 近场长度可近似表示为 $N = F_s / (\pi\lambda)$, 其中 F_s 为换能器激励面积, λ 为介质中超声波波长。加之 CFRP 结构噪声的影响, 阵列超声检测中存在约 2 mm 的近场盲区。由于上下表面所预置的缺陷均为 0.5 mm, 难以通过缺陷回波对所有的表面缺陷直接成像, 故间接采用底面回波进行 C 扫描成像。

采用 128 阵元线性阵列超声换能器对试样进行扫查时, 检测速度不小于 $900 \text{ mm}^2/\text{s}$, 相较单通道超声检测, 在采用相同扫查步进和脉冲重复频率时, 检测效率可提高 60 倍以上, 且信噪比无明显降低 (中间缺陷平均信噪比大于 19 dB)。但是, 由于线阵换能器的声场分布特性, 其焦斑形状近似矩形, 如图 6b 所示, 故缺陷 C 扫描图像均存在一定程度的畸变, 对于厚度较大区域 ($H=20 \text{ mm}$) 的缺陷, 其畸变效果更加明显。而且, 由于复合材料内部复杂结构和各向异性的影响, 试样大厚度区域的底面回波也存在较大程度的不均匀性。采用 -6 dB 法对图 11 中缺陷面积进行测量, 测量面积与实际缺陷面积的差异如图 14a 所示, 缺陷的线阵超声成像结果中, 测量面积普遍偏大, 厚度较大区域的缺陷面积定量测量结果误差明显。

采用环阵 TFM 可有效解决厚度较大的复合材料中聚焦声场能量过低、各区域分布不均等问题, $H=20 \text{ mm}$ 区域中中层缺陷和下表面缺陷的回波信号强度差异小于 2.1 dB。且由于其声场完全对称的特点, 缺陷图像不会产生畸变。采用 -6 dB 法对缺陷图像面积进行测量的结果如图 14b 所示。从测量结果中可以看出, 基于环阵全聚焦方法的 C 扫描成像能够比较准确的对缺陷尺寸和形状信息进行表征, 且在不同的深度范围内, 测量误差相差较小。但对于薄板区域 ($H=4 \text{ mm}$), 由于环阵换能器的近场影响相对明



(a) 线阵检测结果



(b) 线阵检测结果

图 14 C 扫描图像中缺陷的定量测量误差

显, 如图 9a 所示, 在近上表面区域处, 环阵的聚焦声场能量偏低, 且声束偏转角度过大, 使得环阵在较薄试样区域中缺陷回波的信噪比稍低。

4 结论

(1) 基于复合材料试样的刚度矩阵和波动方程所建立的超声检测仿真模型, 可以有效的对声波在试样中的传播过程进行表征, 进而可较便捷的获取多层各向异性材料的超声传播规律, 并依此对阵列超声声束路径的计算控制进行指导优化。

(2) 采用线性阵列超声检测方法可大幅提高 CFRP 平板试样的检测速度 ($>900 \text{ mm}^2/\text{s}$), 但由于线阵超声声场的不对称性, 扫查方向上检测误差高于步进方向, 导致阵列超声成像结果存在一定程度畸变, 在厚度较大区域畸变效果更为显著。

(3) 采用环形阵列超声检测方法使聚焦声场能量在试样厚度方向上分布更加均匀, 且聚焦点位置焦斑更为集中, 增加了 CFRP 试样的检测精度, 降低了缺陷成像畸变; 基于环阵 TFM 三维体数据, 可实现试样内部的三维成像表征, 是对大厚度复合材料试样进行高精度超声检测的有效手段。

参 考 文 献

- [1] 林德春, 潘鼎, 高健, 等. 碳纤维复合材料在航空航天领域的应用[J]. 玻璃钢, 2007, 1(1): 18-28.
LIN Dechun, PAN Ding, GAO Jian, et al. Application of carbon fiber composite materials in the aerospace field[J]. Fiber Reinforced Plastics, 2007, 1(1): 18-28.
- [2] GHOLIZADEH S. A review of non-destructive testing methods of composite materials[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 1(1): 50-57.
- [3] 周正干, 孙广开, 李洋. 先进无损检测技术在复合材料缺陷检测中的应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(4): 28-35.
ZHOU Zhenggan, SUN Guangkai, LI Yang. Application of advanced nondestructive testing technology in composite material defect detection[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(4): 28-35.
- [4] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.
JIN Shijiu, YANG Xiaoxia, CHEN Shili, et al. Development and application of ultrasonic phased array detection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28(9): 925-934.
- [5] ANAND C, ROVES R, ENEDICTUS R. A Gaussian beam based recursive stiffness matrix model to simulate ultrasonic array signals from multi-layered media[J]. Sensors, 2020, 20(16): 4371.
- [6] KOLKOORI S R, RAHMAN M U, CHINTA P K, et al. Ultrasonic field profile evaluation in acoustically inhomogeneous anisotropic materials using 2D ray tracing model: Numerical and experimental comparison[J]. Ultrasonics, 2013, 53(2): 396-411.
- [7] 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(1): 1057-1064.
- [8] DEYDIER S, LEYMARIE N, CALMON P, et al. Modeling of the ultrasonic propagation into carbon-fiber-reinforced epoxy composites, using a ray theory based homogenization method[J]. American Institute of Physics, 2006, 820(1): 972-978.
- [9] JOURNIAC S, LEYMARIE N, DOMINGUEZ N, et al. Simulation of ultrasonic inspection of composite using bulk waves: Application to curved components[C]// Journal of Physics: Conference Series. 9th Anglo-French Physical Acoustics Joint Conference, January 18-22 2010, Lake District, UK. Bristol: IOP Publishing, 2011, 269(1): 012022.
- [10] 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 testing experiment in R-zone of composite components[J]. Journal of Beihang University, 2013, 39(5): 688-692.
- [11] 李健, 郭薇, 杨晓霞, 等. 超声相控阵检测 CFRP 缺陷识别方法[J]. 天津大学学报, 2015, 48(8): 750-756.
LI Jian, GUO Wei, YANG Xiaoxia, et al. Identification method of CFRP defects detected by ultrasonic phased array[J]. Journal of Tianjin University, 2015, 48(8): 750-756.
- [12] 孙芳, 曾周末, 靳世久, 等. 碳纤维复合材料缺陷的小波包分析[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(13): 1-4.
SUN Fang, ZENG Zhoumo, JIN Shijiu, et al. Wavelet packet analysis of defects in carbon fiber composites[J]. Computer Engineering and Application, 2012, 48(13): 1-4.
- [13] FREEMANTLE R J, HANKINSON N, BROTHERHOOD C J. Rapid phased array ultrasonic imaging of large area composite aerospace structures[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2005, 47(3): 129-132.
- [14] CAMINERO M A, GARCÍA-MORENO I, RODRÍGUEZ G P, et al. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 165(1): 131-142.
- [15] 矫桂琼, 贾普荣. 复合材料力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
JIAO Guiqiong, JIA Purong. Composite mechanics[M]. Xi'an: Northwest University of Technology Press, 2008.
- [16] SATYANARAYAN L, SRIDHAR C, KRISHNAMURTHY C V, et al. Simulation of ultrasonic

phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, 84(12): 716-729.

- [17] 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.

作者简介：王俊，男，1994 年出生，博士研究生。主要研究方向为阵列超声检测与成像技术。

E-mail: sy1707512@buaa.edu.cn

周正干(通信作者)，男，1967 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为先进超声检测技术及系统。

E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn