

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311340

基于二维等效声速的频域全聚焦超声成像研究*

陈学宽¹, 龙盛蓉^{1,2}, 宋奕霖¹, 邹越豪¹, 李志农^{1,2}

(1. 南昌航空大学江西省图像处理与模式识别重点实验室 南昌 330063;

2. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063)

摘要: 为了提高对碳纤维增强复合材料分层缺陷定位定量的精度, 提出了一种基于二维等效声速映射的精准频域全聚焦方法三维成像技术。该技术首先将子矩阵的划分标准从激励点位置变为激励-接收间距, 获得了一个新的全矩阵数据; 然后将变换后的二维子矩阵变换至频域, 根据深度和空间频率的变化推导出精准的二维等效声速映射, 来匹配子矩阵数据中的收发分离信号, 并结合角谱运算得到子矩阵频域重构图; 运用快速傅里叶逆变换得到子矩阵聚焦图并将其融合得到全聚焦图像; 最后运用多平面三维重构技术得到最终三维图像。结果表明, 与传统 F-TFM 和 F-SAFT 算法相比, 所提算法有效抑制了旁瓣效应的产生, 双缺陷间距的定量误差缩减了 20.31%, 缺陷宽度定量误差分别缩减了 5.43% 和 6.3%; 当缺陷深度和双缺陷间距发生变化时仍可保证较高的检测灵敏度。

关键词: 超声; 复合材料; 频率-波数法; 全聚焦方法; 成像

中图分类号: TG115.28 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on frequency-domain full-focus ultrasound imaging based on two-dimensional equivalent sound velocity

Chen Xuekuan¹, Long Shengrong^{1,2}, Song Yilin¹, Zou Yuehao¹, Li Zhinong^{1,2}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Image Processing and Pattern Recognition, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Nondestructive Testing Key Laboratory of the Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: To improve the accuracy of positioning and quantifying delamination defects in carbon fiber reinforced polymer, a precise frequency domain total focusing method three-dimensional imaging technology based on two-dimensional equivalent sound velocity mapping is proposed. This technique first changes the division standard of the sub-matrix from the excitation point position to the excitation-receiver spacing, and obtains a new full matrix data. Then, the transformed two-dimensional sub-matrix is transformed into the frequency domain. According to the change of depth and spatial frequency, an accurate two-dimensional equivalent sound velocity mapping is derived to match the transceiver separation signal in the sub-matrix data, and the sub-matrix frequency domain reconstruction diagram is obtained by combining the angular spectrum operation. The sub-matrix focusing image is obtained by inverse fast Fourier transform and fused to obtain the full focusing image. Finally, the final three-dimensional image is obtained by using multi-plane three-dimensional reconstruction technology. Compared with the traditional F-TFM and F-SAFT algorithms, the results show that the proposed algorithm effectively suppresses the generation of side lobe effect. The quantitative error of double defect spacing is reduced by 20.31%, and the quantitative error of defect width is reduced by 5.43% and 6.3%, respectively. When the defect depth and the double defect spacing change, the higher detection sensitivity can still be guaranteed.

Keywords: ultrasound; composite materials; frequency-wavenumber method; total focusing method; imaging

收稿日期: 2023-04-23 Received Date: 2023-04-23

* 基金项目: 江西省教育厅项目 (GJJ180525)、江西省研究生创新专项资金 (YC2022-s740)、江西省图像处理与模式识别重点实验室开放基金 (ET202008414) 项目资助

0 引言

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)得益于高强度、耐疲劳和质量轻等优点,被广泛应用于飞机的核心承力部件^[1-5]。由于生产和服役过程中的不稳定因素容易导致层间错位,从而产生分层缺陷^[6-8]。研究表明分层缺陷的扩展会严重降低 CFRP 的拉伸强度和疲劳极限,如不能及时的发现最终会造成重大事故和严重后果^[9]。超声相控阵成像检测方法是分层缺陷较为有效的检测方法之一,但目前相控阵成像大多是二维成像,图像只能获得缺陷的部分信息,无法获取分层缺陷在立体空间中的详细信息^[10-11]。CFRP 多层铺叠的制备工艺导致回波信号的规则复杂、衰减严重,这对成像与评估技术提出了更高的要求^[12-13]。全聚焦方法(total focusing method, TFM)能够对被检区域进行逐点聚焦,以获得更高的空间分辨率和信噪比,相较于传统相控阵检测方法,具有更高的检测定量精度和缺陷识别能力^[14-15]。

针对 CFRP 多层折射界面导致声波延时计算困难的问题, Lin 等^[16]基于 Dijkstra 算法成功推导出 CFRP 层压板中超声的传播路径,并借此实现通孔的 TFM 图像重构。周正干等^[17]采用了基于 Viterbi 的声线追踪算法,结果表明该方法能够有效检测出 CFRP 层压板中的褶皱缺陷。通过声线追踪法确实可以有效改善成像质量,但是在三维重构过程需要在时域中进行大量迭代计算,成像效率并不高。为了提高成像效率和成像质量,学者们考虑在频域中运算。Ylitalo 等^[18]首先论证了频域合成孔径技术理论上的可行性。Chang 等^[19]、Bertora 等^[20]将地震学的频域相位迁移技术运用在超声成像中。Olofsson 等^[21]成功对叠层结构进行基于相位迁移的合成孔径超声成像,该算法提高了横向分辨率。随后, Hunter 等^[22-23]和 Carcreff 等^[24]结合 Stolt 变换提出了基于频率-波数的频域全聚焦方法(frequency-domain total focusing method, F-TFM)成像技术,结果表明成像质量和效率均有所提高。Dolmatov 等^[25]基于傅里叶后处理技术实现了具有较高成像质量的相控阵三维成像。Marmonier 等^[26]提出了一种新的 F-TFM 三维重构方法,结果表明该算法可以提高成像质量和帧率并大大降低了对内存的需求。但在全矩阵-全聚焦数据中,包含了收发合置和收发分离两种阵元收发逻辑,在收发分离时实际超声路径并不等效于爆炸反射模型中的超声路径的一半,特别是在各向异性材料中所导致的偏差更大,因此,传统的 F-TFM 算法并不能直接应用。针对收发分离的情况, Ni 等^[27]提出了一种基于一维等效声速曲线的频域合成孔径聚焦算法(frequency-domain synthetic aperture focusing technology,

F-SAFT),但是该算法只是针对收发分离时深度相关的等效声速,在其他传播方向的能量却被忽略,导致成像质量有所下降。基于之前深度相关的等效声速的研究基础上, Dai 等^[28]提出了一种基于二维等效声速映射的精确 F-SAFT,并将其运用在激光超声检测,结果表明该算法在收发分离检测时不仅能够提高成像质量,而且缺陷定位更精准。

由于传统 F-TFM 三维成像技术中未经矫正的收发分离信号会对成像结果造成负面影响,无法满足 CFRP 超声检测的高灵敏度和高精度的需求。为解决上述问题,本文提出了一种改进的相控阵——精确频域全聚焦方法(accurate frequency-domain total focusing method, AF-TFM)三维超声成像技术,该技术将超声传播方向转化为空间频率,推导出基于检测深度和空间频率变化的二维等效声速映射,并将其应用在 F-TFM 算法中,有效解决了激励-接收分离所产生的像素点定位偏移问题,从而提高了三维成像质量和定位定量精度;同时该技术通过将子矩阵的划分标准从激励点位置变为激励-接收间距,因此避免了等效声速的重复计算,有效提升了成像效率。

1 AF-TFM 三维成像理论

1.1 二维等效声速映射推导

基于频率-波数的 F-TFM 成像是一种在频域中进行聚焦的方法。其核心思想是将全矩阵采集(full matrix capturing, FMC)的数据拆分为若干个子矩阵声场数据,并分别运用角谱法进行重建,最后将所有经过处理以后的子矩阵融合为一个完整的 F-TFM 图像。将接收到的声场数据经过二维快速傅里叶变换以后得到初始角谱如下:

$$P_i(\omega, k_x, z=0) = \iint p_i(x, z=0, t) e^{-i2\pi(k_x x - \omega t)} dx dt \quad (1)$$

其中, x 为每个传感器的位置, z 为深度方向的变化, t 表示超声传播时间。基于初始位置的角谱,利用角谱法推算出任意一层的角谱:

$$P_i(\omega, k_x, z_m) = P_i(\omega, k_x, z_{m-1}) e^{i2\pi k_z \Delta z} \quad (2)$$

式中: z_m 表示深度方向层编号, Δz 表示层与层之间的传播步长,由色散关系可以推导出频域中波数矢量在 z 方向的分量 $k_z = \sqrt{(\omega/c_{eq}^{f_{cv}})^2 - k_x^2}$, k_x 表示频域中波数矢量在 x 方向的分量, ω 表示垂直深度方向的变化率。

在传统 F-TFM 成像中,为了将声波的实际传播声程和等效声程的时间轴保持一致,一般采取的方法是将待测材料的纵波声速 c 变为同步固定等效声速(fixed coincided equivalent velocity, FCEV),记为 $c_{eq}^{f_{cv}}$ 。

如图 1 虚线箭头所示,在超声波接触缺陷时会产生散射回波和反射回波,其中包含原路径反射而被同一个

阵元所接收的收发合置信号,和部分回波角度发生偏移时而被其他阵元所接收的收发分离信号,整个过程为爆炸反射模型,将缺陷等效为 $t=0$ 时刻的激励源,阵元接收到的信号等价于激励源反射的信号。在 FMC 数据集中存在大量的收发分离的数据,使用未矫正的等效声速是成像质量下降的主要原因,为了保证以阵元作为激励源和以缺陷作为激励源这两种模型在时间轴上保持一致,需要等效声速满足以下公式:

$$c_{eq} = c \times q \quad (3)$$

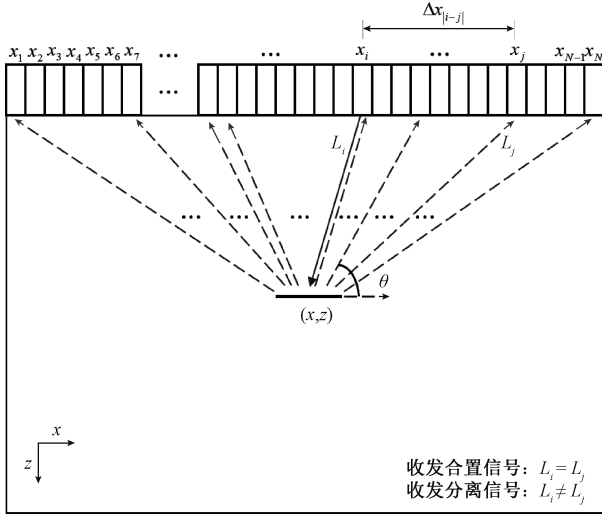


图1 爆炸反射声速等效模型

Fig.1 Equivalent model of explosion reflected sound velocity

式中: c 为 CFRP 材料中的纵波声速, $q = L_j / (L_i + L_j)$ 为等效因子^[27], L_j 为等效声程, L_i 为激励声程。当收发合置时等效因子 $q = 1/2$, 收发分离时 q 会随着超声的传播深度和方向发生改变。由于传统固定同步等效声速 $c_{eq}^{fsev} = c/2$ 已经无法使收发分离信号的实际传播声程和等效声程的时间轴保持一致, 从而导致成像质量下降。为了解决该问题, 本文提出了精准二维等效声速映射, 并形成了基于二维等效声速映射的 AF-TFM 成像算法。

当使用相控阵线性阵列探头进行检测时, 设定 x 为阵元位置坐标, z 为深度方向 (如图 1 所示), 当坐标为 $(x_i, 0)$ 的阵元激励出的超声波沿着实线方向 (激励声程为 L_i) 传播至缺陷中点 (x, z) 处, 再沿着与 x 轴夹角为 θ 的虚线方向 (激励声程为 L_j) 反射回波被所有阵元接收, 将其中任意一个接收阵元坐标记为 $(x_j, 0)$, 激励-接收间隔距离记为 $\Delta x_{|i-j|}$, 其中声程可以通过平面几何向量计算。

$$|\vec{L}_i| = |\vec{L}_j - D\vec{x}_{|i-j|}| = \sqrt{L_j^2 + \Delta x_{|i-j|}^2 - 2\Delta x_{|i-j|}L_j\cos\theta} \quad (4)$$

$$|\vec{L}_j| = \frac{z}{\sin\theta} = \frac{z}{\sqrt{1 - (\cos\theta)^2}} \quad (5)$$

式中: 余弦的频域表达式为 $\cos\theta = (\mathbf{k}_x c_{eq}) / \omega$, $\mathbf{k}_x$ 表示频域中波数矢量在 x 方向的分量, c_{eq}^{saeav} 表示垂直深度方向的变化率。将式 (4)、(5) 代入等效因子的计算公式可得:

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta x_{|i-j|}}{z}\right)^2 - \left(\frac{\Delta x_{|i-j|} c_{eq} \mathbf{k}_x}{z\omega}\right)^2} - \frac{2\Delta x_{|i-j|} c_{eq} \mathbf{k}_x}{z\omega} \sqrt{1 - \left(\frac{c_{eq} \mathbf{k}_x}{\omega}\right)^2}} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (3) 即可求出收发分离时任意聚焦点的频域精准等效声速表达式 c_{eq}^{saeav} , 也可以将式 (6) 中的 c_{eq} 替换为 $c/2$ 来避免求解复杂的超越方程, 从而达到提高计算速度的目的。

1.2 二维等效声速映射后的 AF-TFM 成像算法

由于传统子矩阵 AF-TFM 聚焦过程中包含着若干个激励-接收间隔不同的收发分离信号, 子矩阵聚焦过程中需要求解间隔不同时的 c_{eq}^{saeav} , 这会大大降低计算效率。针对以上问题, 本文中提出了一种改进的子矩阵聚焦过程, 该方法将所有激励-接收间隔相等的收发分离信号归为一组子矩阵数据, 子矩阵聚焦过程只要求解激励-接收间隔相同时的 c_{eq}^{saeav} 。将 FMC 数据以收发合置信号为中心进行重新展开。

$$\mathbf{A}(t, \Delta x_{|i-j|}) = \begin{bmatrix} 0 & & & & \mathbf{A}_{x_1 x_1}(t) & \mathbf{A}_{x_1 x_2}(t) & \cdots & \mathbf{A}_{x_1 x_{N-1}}(t) & \mathbf{A}_{x_1 x_N}(t) \\ & & & & \mathbf{A}_{x_2 x_1}(t) & \vdots & \cdots & \mathbf{A}_{x_2 x_{N-1}}(t) & \mathbf{A}_{x_2 x_N}(t) \\ & & & & \mathbf{A}_{x_{N-1} x_1}(t) & \cdots & \vdots & \mathbf{A}_{x_{N-1} x_{N-1}}(t) & \mathbf{A}_{x_{N-1} x_N}(t) \\ \mathbf{A}_{x_N x_1}(t) & \mathbf{A}_{x_N x_2}(t) & \cdots & \mathbf{A}_{x_N x_{N-1}}(t) & \mathbf{A}_{x_N x_N}(t) & & & 0 & \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $|x_i - x_j| = |i - j| \times \rho$ ($i, j = 1, 2, \dots, N$) $\Delta x_{|i-j|} =$, ρ 表示阵元中心距, $\mathbf{A}(t, \Delta x_{|i-j|})$ 表示在时间域和空间域内激励-接收间隔为 $\Delta x_{|i-j|}$ 抽样所得的 FMC 回波数据, 并将展开后的 FMC 数据 $\mathbf{A}(t, \Delta x_{|i-j|})$ 拆分为 N 个 $\Delta x_{|i-j|}$ 相等的子矩阵, 记为 $P_{\Delta x_{|i-j|}}(x, z=0, t)$ 。

将频域中的精准二维等效声速表达式 c_{eq}^{saeav} 和 $P_{\Delta x_{|i-j|}}(x, z=0, t)$ 代入式 (2) 得到任意一层的角谱 $P_{\Delta x_{|i-j|}}(\omega, \mathbf{k}_x, z_m)$, 将其中的 ω 利用式 (8) 变为 $\mathbf{k}_z$, 同时乘以一个振幅因子 $A(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_z) = c_{eq}^{saeav} \mathbf{k}_z / \sqrt{\mathbf{k}_x^2 + \mathbf{k}_z^2}$ 并进行二维快速逆傅里叶变换, 可以获得 $t=0$ 时, 子矩阵单层的聚

焦图,如式(9)所示。

$$\omega(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_z) = -\operatorname{sgn}(\mathbf{k}_z) c_{\text{eq}}^{\text{saen}} \sqrt{\mathbf{k}_x^2 + \mathbf{k}_z^2}$$

(8)

$$I_{\Delta x | i-j |}(x, z_m) = \iint P_{\Delta x | i-j |}(\mathbf{k}_z, \mathbf{k}_x, z_m) A(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_z) e^{i2\pi \mathbf{k}_z \Delta z} e^{i2\pi \mathbf{k}_x x} d\mathbf{k}_x d\mathbf{k}_z$$

(9)

将所有子矩阵聚焦图像通过全加的方式融合为完整的 AF-TFM 图像。

$$I_{AF-TFM}(x, z) = \sum_{\Delta x | i-j | = 0:\rho}^{(N-1)\cdot\rho} I_{\Delta x | i-j |}(x, z)$$

(10)

1.3 多平面三维重建算法

多平面三维重建算法利用二维平面数据构建三维立体模型。扫查过程如图 2 所示,将扫查获取的 $x-z$ 维度的平面原始数据经过 AF-TFM 算法处理后得到二维聚焦图像 $I'_{AF-TFM}(x, z)$,其中 $y = (k-1)d, k = 1, 2, \cdots, n$ 表示扫查方向二维聚焦图像的位置坐标, k 表示扫查方向二维聚焦数据的图像序号, d 表示扫描步进长度。如图 3 所示,将每个二维聚焦图像切片顺序排列建立三维体素数据 $D(x, y, z)$ 。

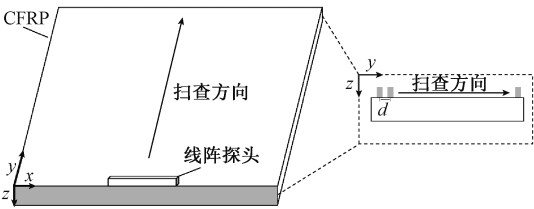


图 2 扫查过程
Fig. 2 Scanning process

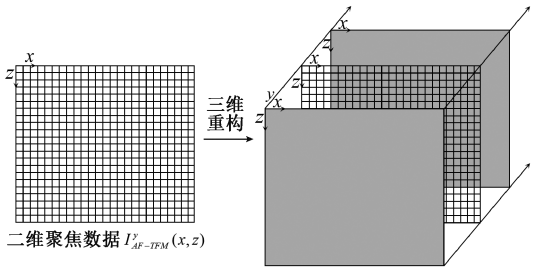


图 3 三维重建过程
Fig. 3 The 3D reconstruction process

2 实验研究及数据采集

2.1 实验装置

为了验证成像算法的可行性,搭建了利用相控阵检测系统来采集 AF-TFM 三维成像数据的实验平台,如图 4 所示,该实验平台由多台设备组成,激励和接收端由 64 阵元线阵探头 (10L64-C4) 提供,其有效孔径为 32 mm,阵元长度为 10 mm,阵元中心间距 $\rho = 0.5$ mm,其

工作原理是通过在压电晶片两端施加交变电流产生固定频率的振动从而激励出超声波,也可以通过将超声波转换为电信号进行存储。如图 2 的扫查过程,需要线性探头对不同扫查位置进行检测,扫查步进距离设置为 $d = 0.05$ mm,通过计算机 (Intel Core i7-12700F) 内的信号控制软件和多通道选择器 (MUX-128d-E) 来控制高频率发射接收仪 (JPR-600C) 产生特定频率的余弦信号,激励信号的各项参数如表 1,特定频率的余弦信号经功率放大器 (N4L LPA05 Power Amplifier) 放大并作用于线阵探头从而产生特定频率的超声波,传播过程中声波遇缺陷而反射的缺陷回波被线阵探头接收,由示波器 (DS1202Z-E) 显示,最后保存至计算机中的存储硬盘中,通过提取实验数据并使用 AF-TFM 成像算法进行处理,最终实现缺陷的三维重构。

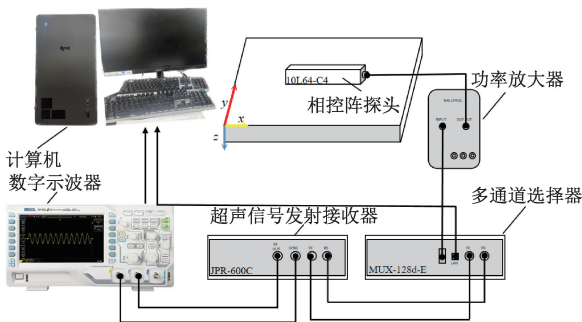


图 4 数据采集系统
Fig. 4 Data acquisition system

表 1 激励信号参数

Table 1 The excitation signal parameters	
参数名称	参数值
信号中心频率/MHz	10
脉冲电压/V	150
信号增益/dB	20
信号采集频率/MHz	200
Hanning 窗调制周期	5

2.2 材料

本次实验的实验对象为 CFRP 层压板,选择的材料为含环氧树脂的碳纤维预浸料,将单层厚度为 0.25 mm 的预浸料以 $[(0/45/90/-45)_2]$ 顺序进行交替铺层,共计 40 层,材料参数如表 2 所示。分层缺陷是通过预埋厚度为 0.03 mm 的长方体 (3 mm×1 mm×0.03 mm) 聚酰亚胺薄膜 (表面涂抹脱模剂),再通过一系列的加工工艺制作而成,预埋缺陷位置如图 5 所示,将一个 100 mm×100 mm×10 mm 的 CFRP 层压板分为 5 个检测区域,每个区域均预设缺陷。

表 2 待测 CFRP 参数

Table 2 The CFRP parameters to be tested

参数名称	参数值
平均纵波声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3 099.57
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 560
泊松比	(V_{12}, V_{13}, V_{23}) = (0.3, 0.3, 0.34)
杨氏模量/GPa	(E_1, E_2, E_3) = (134, 8.7, 8.7)
剪切模量/GPa	(G_{12}, G_{13}, G_{23}) = (4.48, 4.48, 3.46)
长 $\times$ 宽 $\times$ 高/mm	100 $\times$ 100 $\times$ 10
层数	40 层

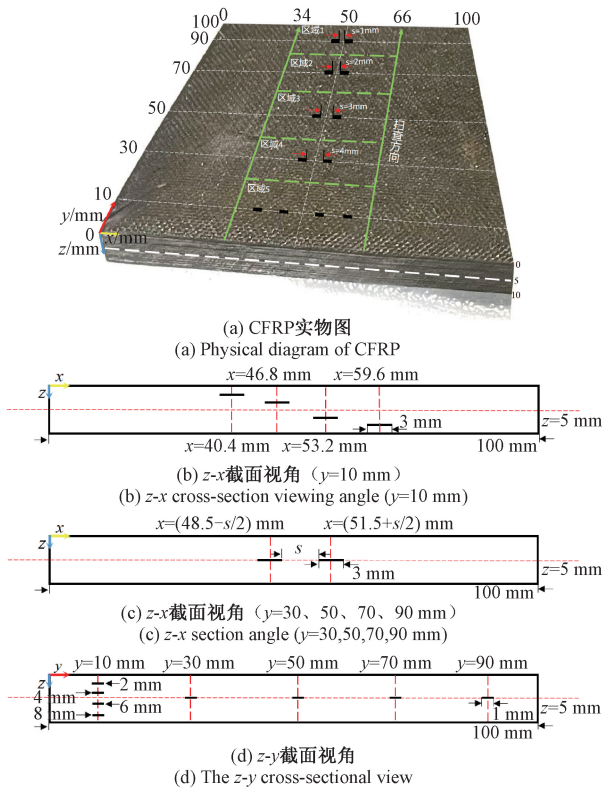


图 5 预埋缺陷位置

Fig. 5 Embedded defect position

2.3 实验数据采集

如图 6 为原始波形的归一化幅值图,激励源处于缺陷的正上方,实线部分为收发合置的原始波形,当接收阵元与激励源间隔 1 mm 所接收的收发分离原始波形为实线。从图中可以分析得出,由于收发分离阵元采集到的信号是激励源的旁瓣声束,导致收发分离信号的初始波幅值强度要明显弱于收发合置信号,且收发分离信号的初始波形宽度相较于后者更宽,在实际检测过程中会影响对近场缺陷的判断;从缺陷回波这段波形可以分析得出,由于收发分离信号的实际声程要大于收发合置信号,

导致两者存在相位差(θ)和幅值差,进一步影响三维重构图对缺陷定位定量的准确性。

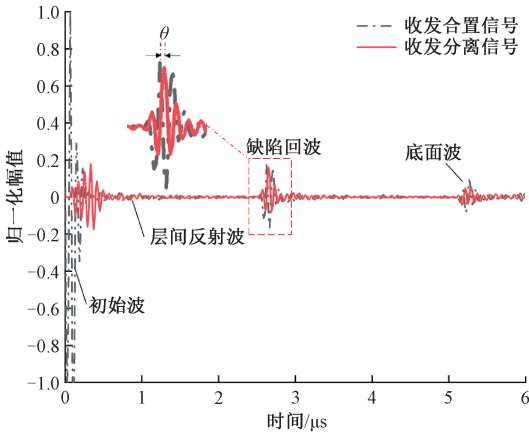
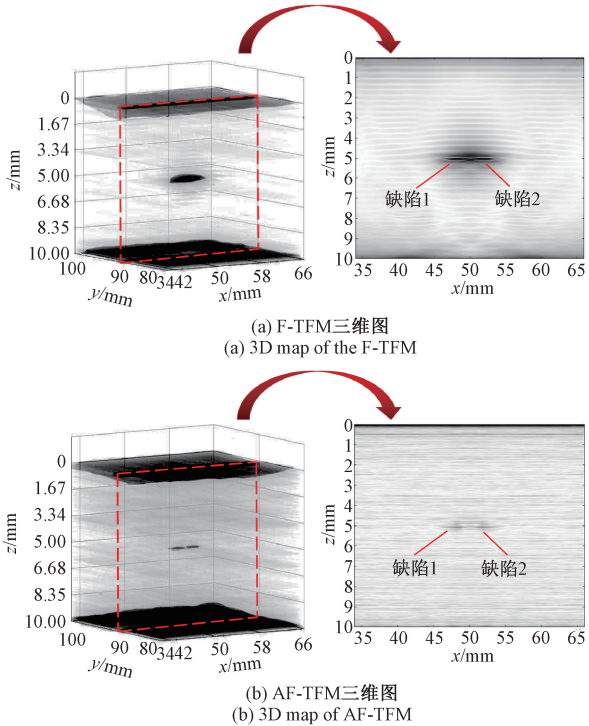


图 6 原始波形

Fig. 6 Original waveform

3 AF-TFM 成像算法研究

根据以上实验数据,本节采用 AF-TFM、F-SAFT 和 F-TFM 算法分别进行三维成像并提取目标缺陷的 x - z 截面图像(如图 7)。为了减少体素数量,重构的区域是以板中检测区域 1 的三维网格坐标 (50,90,5) 为中心的 32 mm $\times$ 20 mm $\times$ 10 mm 的长方体部分。



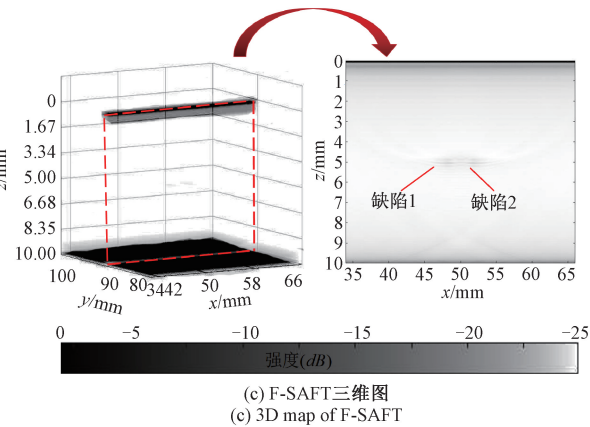


图 7 含双缺陷(间距 1 mm)的三维图像
Fig. 7 3D image with double defects (1 mm apart)

由图 7 分析可得,3 种方法均可以对缺陷进行三维重构,能够观察到缺陷在三维空间中所处的位置坐标,但成像质量存在一些差异。图 7(a)为 F-TFM 三维成像图,由于单阵元激励的超声波的能量主要集中在主声束方向,旁瓣声束还存在部分能量被其他阵元接收,形成收发分离信号,从而产生伪像和噪音,导致成像质量下降,从图中可以观察到,缺陷轮廓模糊不清,无法准确地对两个缺陷进行定位定量。图 7(b)为经过 AF-TFM 算法处理后的三维成像图,空间中两个缺陷的轮廓清晰可见,通过对比图 7(a)可得,经过算法处理后的三维成像结果,分层缺陷的纵向厚度和水平宽度均变得更窄,缺陷中心的能量更集中,表明使用 AF-TFM 算法可以提高成像质量,归因于该算法充分考虑了超声传播方向的影响,使超声波传播过程中的等效声程的和实际声程的时间轴保持一致。图 7(c)为 F-SAFT 三维成像图,可以大致得判断出缺陷的轮廓和位置,由于该成像技术只使用了收发合置数据,旁瓣声束对成像结果影响较小,但也会导致部分有用信息有所丢失,使得缺陷中心的能量强度较低,鲁棒性较差。

为了比较 3 种方法的成像质量,引入了 API 这一评判指标,其目的是为了量化三维成像的空间分辨率。其表达式为:

$$API = \frac{N_{-6\text{ dB}} D_x D_y D_z}{\lambda^3} \quad (11)$$

式中: λ 表示波长, D_x 、 D_y 和 D_z 分别为沿 x 、 y 和 z 方向的体素尺寸, $N_{-6\text{ dB}}$ 是目标缺陷从 0 dB(缺陷中心处最大幅值强度)至 -6 dB 区间的体素数量,当波长相同时,API 的值越小,表明三维图像中目标缺陷的能量强度衰减的速度越快,且能量更集中,图像分辨率越高。

3 种成像算法的 API 值如表 3 所示,结果表明,未经矫正的收发分离信号对成像质量有着极大的影响,由于

无法区分两个缺陷的轮廓边界,传统的 F-TFM 图像中目标缺陷的 API 值无法得出。而等效声速矫正后的 AF-TFM 图像中目标缺陷的 API 值相较于 F-SAFT 图像要更低,能够获得更高的成像分辨率。

表 3 空间中的成像分辨率(API)对比
Table 3 Imaging resolution (API) comparison in space

成像算法	缺陷 1	缺陷 2
F-TFM	—	—
AF-TFM	9.75	10.70
F-SAFT	11.29	12.39

从图 7(a)、(b)和(c)的三维图像中分别提取含缺陷的 x - z 截面切片,并提取目标缺陷中心最大幅值沿着 x 轴方向的幅值变化进行归一化处理,图 8 是 AF-TFM 分别与 F-SAFT 和 F-TFM 的归一化幅值对比图,其中纵坐标为幅值归一化后的幅值高度,为了研究不同成像算法的定量精度,参考了超声质量评判标准对横向分辨率的定义,采用 -6 dB 定量法对缺陷进行定量,在纵坐标为 0.5 处取一条横向水平线,截取与两个主瓣相交的 4 个点,从中提取两点(相交于同一主瓣)并计算其横坐标差值的绝对值,该值即为缺陷的预测宽度。将该方法拓展至缺陷多个维度的尺寸预测,3 种成像算法对缺陷多个维度的尺寸预测结果如表 4 所示。

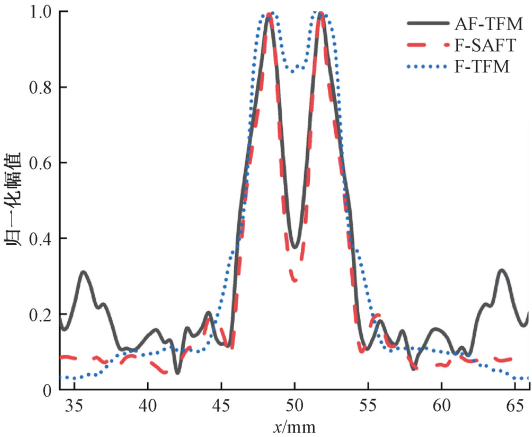


图 8 三种成像算法目标缺陷的归一化幅值对比图
Fig. 8 The normalized amplitude comparison plots of the target defects of the three imaging algorithms

本次实验中预设两个分层缺陷,在空间中的实际尺寸均为 $x \times y \times z = 3\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.03\text{ mm}$,双缺陷 x 轴方向的实际间距为 1 mm。由表 4 可知,在 y 轴方向,3 种成像算法对分层缺陷的定量均有较好的表现;在 z 轴方向,应用 -6 dB 定量法测量出成像算法重构后目标缺陷的预测高度,并求出与缺陷实际高度(0.03 mm)的差值,将该

表 4 3 种成像算法的缺陷尺寸预测

Table 4 Defect size prediction of the three imaging algorithms

mm

尺寸预测	成像算法					
	F-TFM		AF-TFM		F-SAFT	
	缺陷 1	缺陷 2	缺陷 1	缺陷 2	缺陷 1	缺陷 2
x 轴方向尺寸预测	—	—	3. 071	3. 045	2. 766	2. 766
y 轴方向尺寸预测	1. 081	1. 052	1. 028	1. 031	1. 025	1. 034
z 轴方向尺寸预测	0. 825	0. 838	0. 095	0. 105	0. 122	0. 133
x 轴方向双缺陷间距预测	—		1. 142		1. 345	

差值除于缺陷实际高度计算出缺陷高度的定量误差,经过 F-SAFT 成像算法处理后的缺陷 1 和 2 的预测高度与缺陷实际高度的定量误差分别为 306. 67% 和 343. 33%,而经过 F-TFM 成像算法处理后的定量误差分别为 2 650% 和 2 693%,由此可得,F-SAFT 成像算法在 z 轴方向的定量精度要比 F-TFM 成像算法明显要高,这是由于 F-TFM 成像算法融合了大量未经矫正的收发分离信号从而产生大量噪音,最终导致定量精度严重降低。经过 AF-TFM 成像算法处理后的定量误差分别降至 216. 67% 和 250%,采用精准二维等效声速映射的方式将大量收发分离信号矫正,处理后的 AF-TFM 图像的半波高 z 轴方向水平宽度分别缩小至 F-TFM 图像的 11. 52% 和 12. 53%,缺陷定量误差分别下降了 2 433. 33% 和 2 443%。

由表 4、图 7 和 8 可知,在 x - z 截面,图像融合大量未经矫正的收发分离信号,产生了大量的噪音和伪像,当两个缺陷的间距过近(间距 1 mm)时,由于噪音和伪像填满了双缺陷间隙,缺陷轮廓变得模糊不清,导致 F-TFM 图像中无法有效区分出两个缺陷。经过 AF-TFM 算法处理后的半波高 x 轴方向水平宽度分别为 3. 071 mm 和 3. 045 mm(实际宽度均为 3 mm),其定量误差分别为 2. 37% 和 1. 51%,缺陷定量误差相较于 F-SAFT 分别下降了 5. 43% 和 6. 3%(F-SAFT 定量误差均为 7. 8%)。双缺陷间距定量误差相较于 F-SAFT 下降了 20. 31%(F-SAFT

间距定量误差为 34. 5%),经过 AF-TFM 算法处理后,图像中两个缺陷的轮廓清晰度明显提升,且缺陷中心能量更集中。从图中可以清楚地判断出间距极小的两个缺陷的轮廓边缘,横向分辨率有了极大的提升,相较于 F-TFM 图像,处理后的图像更加清晰易读。

本节对比了 F-SAFT、F-TFM 和 AF-TFM 三种成像技术在定量精度和 API 值两方面的成像性能,发现 AF-TFM 成像技术能有效减少图像的噪音和伪像,提高了缺陷轮廓边缘的清晰度,显著提升了成像分辨率(特别是横向分辨率),并且缺陷定量精度相较于 F-TFM 和 F-SAFT 更具优势。

4 精准频域全聚焦成像算法适用性分析

4. 1 双缺陷间距对成像检测影响

为了研究 AF-TFM 三维成像技术在 x 轴水平方向上能够区分两个相邻缺陷最小距离的能力(横向分辨率),本次研究选择检测区域 1~4 作为研究对象(如图 5),每个区域的中心均预制了两个长度 3 mm,宽度 1 mm,高度 0. 03 mm 的缺陷,每组双缺陷的间距分别为 1、2、3 和 4 mm,利用图 4 所示的数据采集系统对区域 1~4 进行扫描并提取检测数据进行 AF-TFM 三维成像,三维重构图像情况如图 9 所示。对所得 4 组实验数据进行幅值归一化处理,得到的成像检测数据分析,如表 5 所示。

表 5 双缺陷间距变化时 CFRP 分层缺陷成像检测数据分析

Table 5 Analysis of CFRP stratified defect imaging detection data during dual defect spacing changes

双缺陷实际 间距/mm	双缺陷预测 间距/mm	相对误差 /%	深度定位误差/%		宽度定量误差/%		水平定位误差/%	
			缺陷 1	缺陷 2	缺陷 1	缺陷 2	缺陷 1	缺陷 2
1	1. 142	14. 19	1. 40	1. 40	2. 37	1. 51	0. 55	-0. 36
2	1. 649	-17. 53	1. 40	1. 40	4. 04	4. 04	0. 37	-0. 24
3	3. 172	5. 74	1. 44	1. 44	-8. 64	-7. 79	0. 31	-0. 13
4	4. 238	5. 95	1. 47	1. 47	-6. 11	-5. 62	0. 13	-0. 07

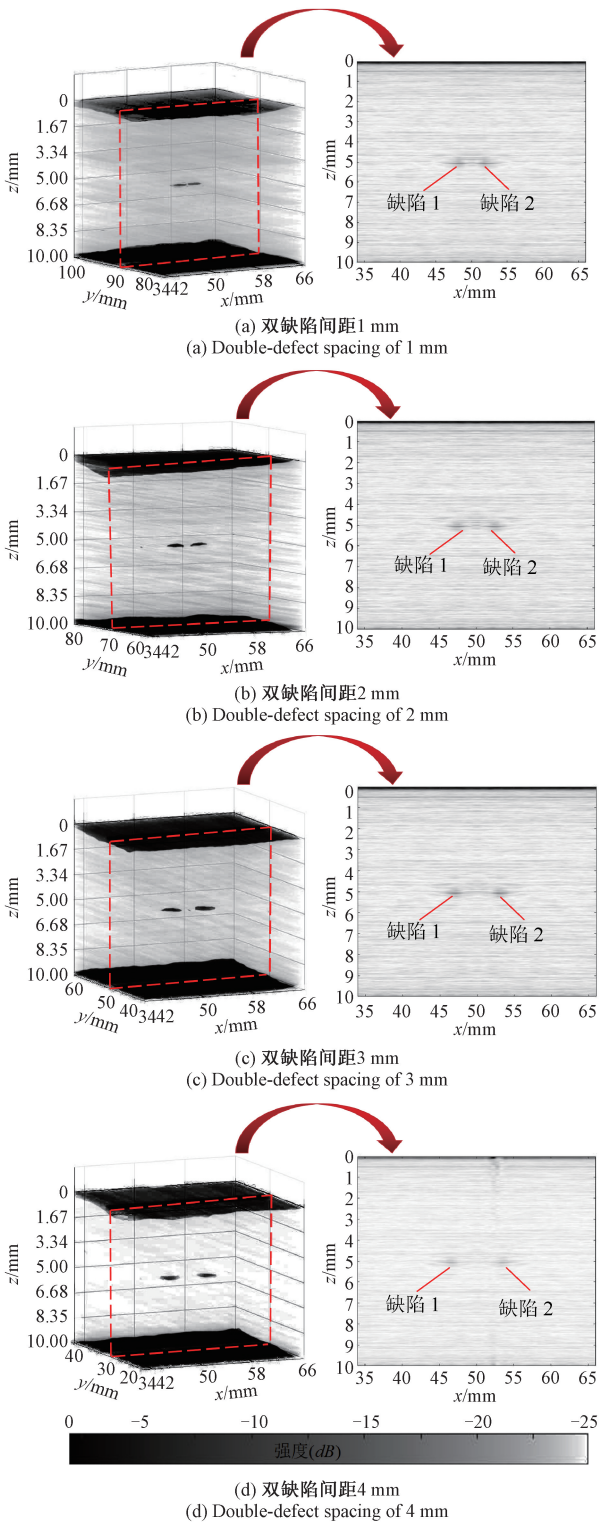


图 9 不同间距的双缺陷三维成像图

Fig. 9 3D imaging map of double defects with different spacing

由图 9 分析可得,当双缺陷间距为 1 mm 时,缺陷的轮廓清晰、能量收敛集中且周围的噪音几乎没有,这得益于 AF-TFM 算法对等效声速进行了矫正,使得收发分离

信号可以对缺陷重构图像进行正向增益,而不是成为图像的噪音;当双缺陷间距为 2 mm 时,也可获得不错的成像效果,但随着双缺陷的间距不断增大,从图中可以观察到,缺陷的宽度和中心能量强度在不断降低,直至间距变为 4 mm 时,虽然还可以分辨出缺陷的位置,但轮廓已经变得模糊不清,缺陷中心能量衰减严重,这是因为当目标缺陷与检测中心轴($x = 50$ mm)水平距离增加时,部分缺陷回波信号会逃逸出接收范围,而激励-接收间距的增加也会导致采集到的缺陷信号越来越少(直至接收不到缺陷信号),使得目标缺陷获得的幅值增益效果明显降低。由表 5 可得,当双缺陷的间距发生变化时,所提 AF-TFM 三维成像技术对缺陷的定位精度均可以维持一个较高的水平;当双缺陷的间距变大时,间距定量精度也会提高,归因于间距的变大使噪音混叠效应降低,从而减少了伪像的产生;而缺陷宽度的定量误差会随着双缺陷的间距变大而变大,这是由于目标缺陷与检测中心轴($x = 50$ mm)水平距离的增加会导致目标缺陷的幅值增益降低。在本次实验过程中可得出一些结论,AF-TFM 三维成像技术可以区分的最小距离为 1 mm,同时能够获得较高的定位定量精度,当目标缺陷离检测中心轴($x = 50$ mm)水平距离越近时,对横向双缺陷的识别效果越好,横向分辨率也越高。

4.2 缺陷深度位置对成像检测影响

为研究 AF-TFM 三维成像技术对不同深度缺陷的检测灵敏度,本次实验选择的检测区域 5 作为研究对象(如图 5 所示),该区域的预制了 4 个长度 3 mm,宽度 1 mm,高度 0.03 mm 的缺陷,预埋深度分别为 2、4、6 和 8 mm,将采集到的检测数据进行三维重构(如图 10 所示),提取实验数据并幅值归一化处理,得到的成像检测数据分析(如表 6 所示)。

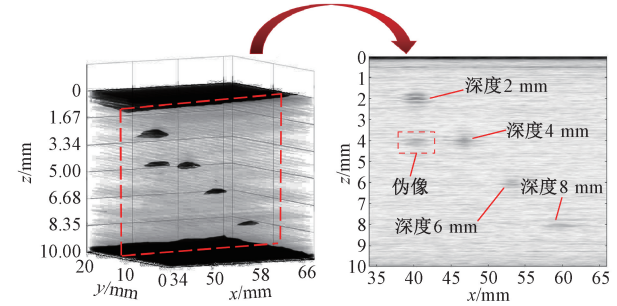


图 10 不同深度的缺陷三维成像图

Fig. 10 3D imaging plots of defects at different depths

由图 10 分析可得,当缺陷深度为 2 mm 时,由于超声波的传播距离过短,导致超声在缺陷和工件上表面反复传播,从而产生伪像,在实际应用过程中普遍通过比较一次缺陷回波与工件上表面和二次缺陷回波两者的间距是

表 6 不同深度缺陷的成像检测数据分析

Table 6 Analysis of imaging detection data for different depth defects

缺陷实际 深度/mm	缺陷预测 深度/mm	相对误差 /%	宽度定量 误差/%	水平定位 误差/%
2	1.97	-1.5	-11.18	-0.26
4	3.99	-0.003	22.65	-0.94
6	6.09	1.5	21.81	0.11
8	7.97	-0.004	53.10	0.35

否一致来判断伪缺陷,当两者间距一致且一次缺陷回波距离上表面的间距较小时可以判定二次回波为伪缺陷,基于此原理对二次缺陷回波精准识别并对 AF-TFM 成像技术进行优化,利用降噪算法^[29]对二次回波缺陷进行抑制,消除伪缺陷对成像结果的干扰,成像结果如图 11,从图中可以分析得出,伪缺陷基本被抑制。

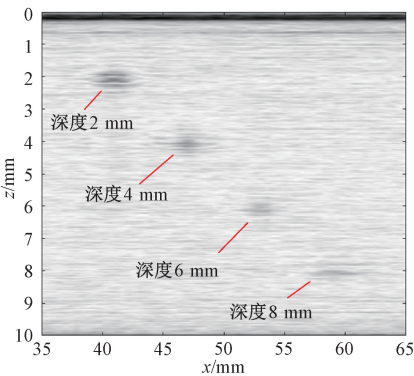


图 11 伪像消除后不同深度的缺陷成像图

Fig. 11 Defect imaging images at different depths after artifact elimination

当缺陷深度增加时,缺陷高度也逐渐变得更窄,这是因为混叠的超声波逐渐散开,干涉现象的减弱使得缺陷信号变得更纯净,直至缺陷深度为 8 mm 时,受到复合材料的高衰减性和缺陷远离检测中心轴($x=50$ mm)这两个因素的影响下,虽然缺陷轮廓依旧清晰但缺陷中心能量强度明显变弱。从表 5 中也可以分析得出,缺陷的宽度定量误差会随着缺陷深度的增加而增大,但对缺陷的定位精度还维持着较高水准。因此一个合适的检测深度也是至关重要的,缺陷位置过浅时,容易受到混叠噪音的影响,缺陷位置过深时,会受到材料高衰减性的影响,但总体来说影响并不大,还可以维持着较高的定位定量精度,检测灵敏度也并没有明显降低。

5 结 论

本文将精准的二维等效声速应用于超声相控阵的 F-TFM 成像,提出了 AF-TFM 三维成像技术。全矩阵-全聚焦数据中包含激励-接收阵元分离时采集的收发分离信号,其等效声速会随着深度和传播方向发生变化,尤其是在 CFRP 中,这种偏差会被放大。为了解决这个问题,我们把超声传播方向转化为空间频率,从而得出精准的二维等效声速映射,该映射会随着深度和空间频率的变化而自适应变化,从而得出每个聚焦点的精准等效声速。为了避免重复计算,将子矩阵的划分标准从激励点位置变为激励-接收间距。随后通过与 F-TFM 算法和 F-SAFT 算法进行对比实验,验证了精准的二维等效声速映射对 F-TFM 三维成像在成像质量和定量精度的有效性。同时分析了双缺陷间距和缺陷深度对成像效果的影响,研究发现该成像技术可以获得较高的横向分辨率,能够区分两个横向相邻地缺陷最小距离为 1 mm,当缺陷埋深在板厚的 80% 范围内,位于检测中轴线($x=50$ mm)附近时,能够获得较高的定位定量精度。实验结果表明优化后的 AF-TFM 三维成像技术在不同影响参数下均能保持较高的定位定量精度和成像质量。研究表明,AF-TFM 成像算法的精准度主要取决于横向双缺陷的间距,受缺陷深度影响较小,更适用于横向双缺陷的检测与区分;同时,该成像技术对 CFRP 的分层缺陷具有较高的检测灵敏度。

此外,在相同条件下,该成像技术确实可以明显提高横向分辨率,但目前该成像技术理论上能够区分的最小距离并没有得出结论,这需要综合考虑缺陷与探头的间距、探头的有效孔径和超声波波长的影响,需要进一步研究。随着硬件设备的不断迭代,可以使用 GPU 并行计算来提高计算效率,同时我们也期望可以将 CFRP 中各个方向的声速修正参数融入 AF-TFM 算法中来进一步提高成像质量。

参考文献

[1] HYNES N, VIGNESH N J, JAPPES J, et al. Effect of stacking sequence of fibre metal laminates with carbon fibre reinforced composites on mechanical attributes: Numerical simulations and experimental validation [J]. Composites Science and Technology, 2022, 12: 221.

[2] PATHAK A K, DHAKATE S R. Carbon nanomaterial-carbon fiber hybrid composite for lightweight structural composites in the aerospace industry: Synthesis, processing, and properties [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2022: 445-470.

- [3] MALI H S, SHARMA P. Machinability of high-strength fiber-reinforced polymer textile composites: A review [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2023: 1-28.
- [4] ANSARI F A, SHARMA H K. Advanced fiber materials in corrosion protection [J]. *Fiber Materials: Design, Fabrication and Applications*, 2023: 339.
- [5] BANEJA M D, QUEIROZ H F M. Application of structural adhesives in composite connections [J]. *Structural Adhesives: Properties, Characterization and Applications*, 2023: 375.
- [6] GAO Y, ZHU S, DING H, et al. Thickness variation effect on compressive properties of ultra-thick CFRP laminates [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023: 108390.
- [7] GAO Y, WANG J, SONG X, et al. Investigation on the compressive mechanical properties of ultra-thick CFRP laminates [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 241: 107966.
- [8] LI Y, MENG J, LUO J, et al. Cryogenic mechanics and damage behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 169: 107484.
- [9] WANG Q, CHEN Q, CHEN Y, et al. The effect of internal delamination damage on the tensile strength of aeronautical composites [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2022: 1-8.
- [10] 孙昌立,迟大钊,刚铁,等. 超声相控阵矩阵阵列三维合成聚焦成像方法 [J]. *焊接学报*, 2018, 39 (6): 7-12, 129.
- SUN CH L, CHI D ZH, GANG T, et al. 3D synthetic focused imaging method for ultrasound phased matrix arrays [J]. *Journal of Welding*, 2018, 39 (6): 7-12, 129.
- [11] 梁蒙蒙. 超声相控阵检测与成像技术研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
- LIANG M M. Ultrasonic phased array detection and imaging technology research [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.
- [12] WRONKOWICZ A, DRAGAN K, LIS K. Assessment of uncertainty in damage evaluation by ultrasonic testing of composite structures [J]. *Composite Structures*, 2018, 203: 71-84.
- [13] ZHANG H, SUN J, RUI X, et al. Delamination damage imaging method of CFRP composite laminate plates based on the sensitive guided wave mode [J]. *Composite Structures*, 2023, 306: 116571.
- [14] 陈尧,冒秋琴,陈果,等. 基于 Omega-K 算法的快速全聚焦超声成像研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39 (9): 128-134.
- CHEN Y, MAO Q M, CHEN G, et al. Rapid full-focused ultrasound imaging study based on the Omega-K algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39 (9): 128-134.
- [15] 曾邱毓晨,吴文焘,李平,等. 渐进式频率-波数域全聚焦超声成像 [J]. *声学学报*, 2022, 47 (5): 663-674.
- ZENG Q Y CH, WU W T, LI P, et al. Progressive frequency-wave number domain fully focused ultrasound imaging [J]. *Acta Acustica*, 2022, 47 (5): 663-674.
- [16] 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.
- [17] 周正干,朱甜甜,马腾飞,等. 先进树脂基复合材料纤维褶皱缺陷阵列超声全聚焦成像 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39 (9): 4384-4392.
- ZHOU ZH G, ZHU T T, MA T F, et al. Ultrasonic all-focus imaging of advanced resin-based composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2022, 39 (9): 4384-4392.
- [18] YLITALO J T, ERMERT H. Ultrasound synthetic aperture imaging: Monostatic approach [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1994, 41 (3): 333-339.
- [19] CHANG Y F, CHERN C C. Frequency-wavenumber migration of ultrasonic data [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2000, 19: 1-10.
- [20] BERTORA F, PELLEGRETTI P, QUESTA A, et al. An alternative frequency domain beamforming [C]. *IEEE Ultrasonics Symposium*, IEEE, 2004.
- [21] OLOFSSON T. Phase shift migration for imaging layered objects and objects immersed in water [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2010, 57 (11): 2522-2530.
- [22] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array [J]. *IEEE Transactions on*

- Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(11): 2450-2462.
- [23] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The wavenumber algorithm: Fast fourier-domain imaging using full matrix capture [C]. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2009, 1096(1): 856-863.
- [24] CARCREFF E, BRACONNIER D. Comparison of conventional technique and migration approach for total focusing[J]. Physics Procedia, 2015, 70: 566-569.
- [25] DOLMATOV D O, DEMYANYUK D G, OZDIEV A H, et al. Fourier-domain post-processing technique for Digital Focus Array imaging with Matrix phased array for ultrasonic testing of ITER components [J]. Fusion Engineering and Design, 2018, 126:124-129.
- [26] MARMONIER M, ROBERT S, LAURENT J, et al. Real-time 3D imaging with Fourier-domain algorithms and matrix arrays applied to non-destructive testing [J]. Ultrasonics, 2022, 124:106708.
- [27] NI C Y, CHEN C, YING K N, et al. Non-destructive laser-ultrasonic synthetic aperture focusing technique (SAFT) for 3D visualization of defects [J]. Photoacoustics, 2021, 22: 100248.
- [28] DAI L N, NI C Y, YING K N, et al. Defect imaging based on laser ultrasonic frequency domain synthetic aperture focusing technology with separated generation-

detection and 2-D equivalent velocity mapping [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 156: 108485.

- [29] KIM J, UDPA L, UDPA S. Multi-stage adaptive noise cancellation for ultrasonic NDE [J]. NDT & E International, 2001, 34(5): 319-328.

作者简介



陈学宽, 2021 年于温州大学获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为超声成像检测及超声后处理成像。
E-mail: 1404823337@qq.com

Chen Xuekuan received his B. Sc. degree from Wenzhou University in 2021. He is currently a master student at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasound imaging detection and ultrasound post-processing imaging.



龙盛蓉 (通信作者), 2001 年于湖北工业大学获得学士学位, 2005 年于湖北工业大学获得硕士学位, 2014 年于南昌大学获得博士学位, 现为南昌航空大学副教授, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: lornalong@126.com

Long Shengrong (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Hubei University of Technology in 2001, M. Sc. degree from Hubei University of Technology in 2005, and Ph. D. degree from Nanchang University in 2014. She is currently an associate professor at Nanchang Aviation University. Her main research direction is ultrasonic nondestructive testing.