

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311973

基于分割环阵的 CFRP 分层缺陷超声全聚焦成像*

杨宁¹, 陆铭慧¹, 张萍¹, 朱颖¹, 张毅萍²

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 上海飞机制造有限公司 上海 201324)

摘要:碳纤维复合材料在钻孔加工时易产生分层缺陷, 分层缺陷严重影响了构件的力学性能, 存在严重的安全隐患。针对碳纤维复合材料孔边分层缺陷的检测, 提出一种基于分割环形阵列的 1/4 矩阵全聚焦成像方法。设计了 R4×S8、R3×S12、R3×S16 和 R4×S12 四种分割环形阵列结构, 通过数值仿真对比分析了各阵列的聚焦声场特点, 最终确定分割环阵探头为 5 MHz 的 R4×S12 探头。使用该探头对碳纤维复合材料孔边分层试块的上层、中层、下层缺陷进行全矩阵采集, 利用 VTK 工具包分别进行全矩阵三维成像和 1/4 矩阵三维成像。结果表明, 1/4 矩阵方法比全矩阵方法三维成像的缺陷对比度更高, 1/4 矩阵方法的缺陷尺寸表征误差更小, 误差不超过 6%。与全矩阵成像相比, 1/4 矩阵成像信噪比提升范围为 3.43~7.61 dB, 有效提升了图像质量。

关键词: 分层缺陷; 全聚焦; 分割环形阵列; 1/4 矩阵; 三维成像

中图分类号: TH878 TB553 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Ultrasonic total focusing method of carbon fiber reinforced plastics delamination defects based on segmented annular arrays

Yang Ning¹, Lu Minghui¹, Zhang Ping¹, Zhu Ying¹, Zhang Yiping²

(1. Key Laboratory Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China)

Abstract: Carbon fiber-reinforced plastics are prone to delamination defects during drilling and processing, and the delamination defects seriously affect the mechanical properties of the components, and there are serious safety hazards. For the detection of delamination defects at the hole edge of carbon fiber-reinforced plastics, a 1/4 matrix total focusing method based on the segmented annular arrays is proposed. Four structures of segmented annular arrays, R4×S8, R3×S12, R3×S16, and R4×S12, are designed. The characteristics of the focused sound field of each array are analyzed by numerical simulation comparisons, and the segmented annular array probe is finally determined to be the 5 MHz R4×S12 probe. By using this probe, the full-matrix capture of the upper, middle, and lower layer defects of the hole-edge delamination specimens of carbon fiber composites is performed, and the full-matrix 3D imaging and 1/4-matrix 3D imaging are implemented by using the VTK toolkit, respectively. The results show that the 1/4-matrix method has higher defect contrast than the full-matrix method for 3D imaging. The defects size characterization error of the 1/4-matrix method is smaller, with an error of no more than 6%. Compared with that of full-matrix imaging, the signal-to-noise ratio enhancement of the 1/4-matrix imaging is in the range of 3.43~7.61 dB, which effectively improves the image quality.

Keywords: delamination defects; total focusing method; segmented annular arrays; 1/4 matrix; three-dimensional imaging

0 引言

与传统金属材料相比, 碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)具有比强度高、比模量大、

刚性好、耐疲劳等优异性能, 广泛应用于航空、航天等领域^[1-2]。大型飞机复合材料主承力构件之间的主要的连接形式为铆接与栓接, 复合材料的钻孔是加工处理中十分重要的一道工序^[3]。由于制造工艺的特点, 在钻孔加工时 CFRP 层压板极容易出现毛刺、撕裂及分层缺陷^[4]。

收稿日期: 2023-09-26 Received Date: 2023-09-26

* 基金项目: 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(COMAC-SFGS-2022-1812)项目资助

其中,分层缺陷会严重影响 CFRP 构件的力学性能,容易造成重大的安全事故^[5]。因此,对 CFRP 构件中的制孔分层缺陷进行有效检测十分有意义。随着检测技术的发展,CFRP 分层缺陷已有多种无损检测方法,如红外热成像检测^[6]、工业 CT 检测^[7]、DR 射线检测^[8]、太赫兹检测^[9]、涡流检测^[10]、超声水浸 C 扫^[11]和超声相控阵检测^[12]等。其中,超声相控阵方法超声波穿透力强,成像分辨率高,现已广泛应用于 CFRP 构件的现场快速检测。

全聚焦成像检测方法(total focusing method, TFM)作为超声相控阵检测的“黄金准则”,其通过采集完备的全矩阵信号,因而具有比常规相控阵方法更高的检测性能^[13]。与传统的超声二维成像相比,超声三维成像具有图像显示直观、信息丰富及准确率较高等显著的优势,该技术已在医学领域得到了十分广泛的应用^[14]。在工业无损检测领域,随着检测标准和要求提高,工件内部缺陷的三维可视化成为了检测人员越来越迫切的需求。近年来,国内外学者针对相控阵三维成像技术进行了大量研究。Kitazawa 等^[15]开发了一种基于超声阵列探头的三维成像系统,利用矩阵阵列探头采集超声信号,实现了平底孔的三维成像。Wronkowicz 等^[16]利用一维阵列探头对碳纤维复合材料进行检测,利用采集的 B 扫图像对缺陷进行了三维重建,并将其与 CT 成像结果进行对比,验证了超声三维重建的准确性。周正干等^[17]提出了超声矩阵探头体扫查时的三维体数据采集方法和数据融合算法,采用等值面和体绘制两种算法对铝试样中的缺陷进行三维成像,研究表明,该方法在无需移动探头的情况下便可实现缺陷三维成像,且定量精度较高。陆铭慧等^[18]借助 VTK 工具包,采用编码器触发的一维线阵对工件进行了全覆盖式扫查,获取工件各截面的 B 扫图像,通过堆叠各截面的 B 扫图像重构出了工件的三维图像。肖海^[19]利用二维面阵超声探头,给出了三维空间内基于动态均质化方法的超声全聚焦缺陷成像算法,结合波速修正实现了 CFRP 内部分层缺陷的三维成像。赵志鹏等^[20]采用激光扫描仪捕获曲面的点云模型,使用一维阵列轮式探头采集超声数据,利用体素化降采样方法对超声检测结果进行重建,实现了曲面复合材料内部缺陷的三维成像,但成像精度有待提高。综上所述,利用一维阵列探头能够实现缺陷的三维可视化,但精度有限,且无法进行实时三维成像,而二维阵列探头是提高三维成像精度和解决实时三维成像的有效手段。

二维阵列的设计准则主要为最小化主瓣宽度、消除栅瓣、抑制旁瓣和偏转方向的声压最大化。二维矩形阵列可以采用如下方法^[21]:最小化主瓣宽度可以通过提高阵元数或阵元间距来实现;对于二维矩形阵列,因其具有十分规则的阵元排布而表现出高度的周期性,为了避免栅瓣,阵元间距须严格地控制在 $\lambda/2$ (即半波长)附近,这

虽然可以消除栅瓣,解决了空间模糊的问题,但它却增加了阵元的密度,恶化了阵元间的互辐射效应;抑制旁瓣只有通过提高阵元数,但阵元数增多会导致较大的近场盲区;偏转方向的声压最大化可以通过增加阵元、阵元间距或阵元大小来实现。按照该原则确定的二维矩形阵列需要有足够多的阵元数和非常严格的阵元间距,抑制旁瓣和栅瓣的同时会带来其他的问题。出于该原因,探索一种阵元间距不限于 $\lambda/2$ 甚至更高且能减少阵元数的其他二维阵列分布十分必要。

Martinez 团队^[22-24]已经提出了分割环形阵列(segmented annular arrays, SAA)。在工业无损检测领域,目前 SAA 的应用较少。该阵列分布将多个组成的同心环划分为多个扇区,具有如下优势:其轴向对称性保证了辐射声场的规律性;具有高质量的主瓣特性;与二维矩形阵列相比,SAA 有着更低的周期性水平,从而降低了栅瓣的能量,因此它允许阵元间距大于 λ 甚至更高,同时能够保持优异的声场特性;阵列尺寸相同的情况下,阵元间距增大,阵元的数量就可以减少。章成广等^[25]对比分析了基本相同孔径与阵元数的 SAA 和二维矩形阵列聚焦声场,结果充分说明在得到相同分辨率条件下,SAA 所需的阵元数要比二维矩形阵列少很多。SAA 除了以上优点,其几何形状也决定了它十分适合 CFRP 的孔边检测,可将 SAA 的内环阵元边缘紧贴 CFRP 的孔进行检测。

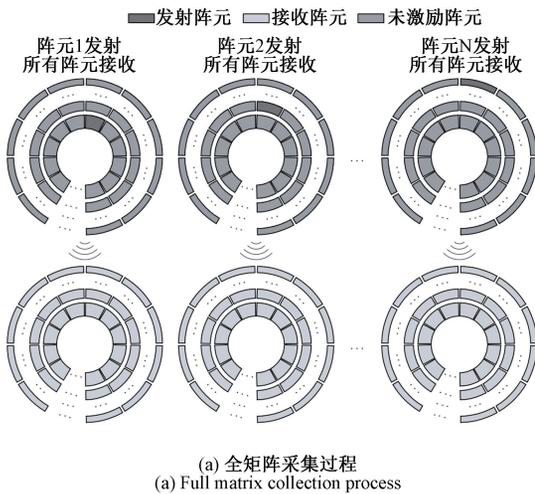
本文研究了基于分割环形阵列的 CFRP 孔边分层缺陷的 TFM 三维成像。设计了几种用于孔边分层检测的分割环形阵列探头,对不同阵列的聚焦声场进行仿真,采用最优阵列进行不同频率的声场仿真,取最优频率下的最优阵列进行全矩阵信号采集,根据声波在孔边区域的传播特性与分割环阵的几何特点,提出了基于 1/4 矩阵的全聚焦成像。

1 基于 SAA 的全聚焦成像模型

TFM 三维成像算法是基于全矩阵采集的后处理算法,SAA 的全矩阵采集原理如图 1 所示。如图 1(a)所示,SAA 依次激励 N 个阵元产生超声信号,每次激励后所有阵元同时接收。因此,全部采集后得到 $N \times N$ 组回波信号,如图 1(b)所示。这里定义 s_{ij} 是第 i 个阵元发射时,第 j 个阵元接收的回波信号。

将 SAA 各阵元从内到外、顺时针方向依次编号,如图 2 所示。在 SAA 与工件界面位置建立直角坐标系, x 和 y 所处平面为被检物体的表面, z 垂直于被检物体表面,方向为被检物体深度方向。建立坐标系后,对成像区域进行三维网格划分。

假设 $A(x, y, z)$ 处为目标聚焦点,则由阵元 i 发射超声波到达缺陷点 A ,由阵元 j 接收缺陷点 A 的反射信号,



$i \backslash j$	1	2	...	$N-1$	N
1	S_{11}	S_{12}	...	$S_{1(N-1)}$	S_{1N}
2	S_{21}	S_{22}	...	$S_{2(N-1)}$	S_{2N}
...
$N-1$	$S_{(N-1)1}$	$S_{(N-1)2}$...	$S_{(N-1)(N-1)}$	$S_{(N-1)N}$
N	S_{N1}	S_{N2}	...	$S_{N(N-1)}$	S_{NN}

(b) 全矩阵数据
(b) Full matrix ultrasonic data

图1 SAA全矩阵采集原理

Fig. 1 Total matrix capture principle for SAA

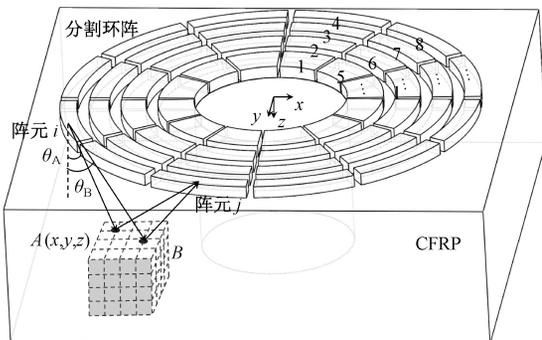


图2 全聚焦三维成像原理

Fig. 2 3D imaging principle based on TFM

此时超声波的传播时间为:

$$t_{ij}(x,y,z) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + z^2}}{c} \quad (1)$$

式中: x_i, y_i, x_j, y_j 分别为发射阵元 i 与接收阵元 j 的位置信息; c 为超声波在材料中的声速。

式(1)将得到 N 个阵元所组成 SAA 的 $N \times N$ 收发组所对应的传播时间, 将每个时间所对应的信号幅值进行叠加, 便可得到三维空间内任意网格点处的像素值, 从而实现缺陷的三维表征:

$$I_a(x,y,z) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{ij}(t_{ij}(x,y,z)) \quad (2)$$

式中: $s_{ij}(t)$ 表示阵元 i 发射超声波阵元 j 接收得到的回波数据。

如图3所示, 若发射阵元 i 与接收阵元 j 位于 CFRP 试块孔的两侧, 阵元 i 发射的超声波传播到孔洞侧壁时会遭到反射, 此时阵元 j 无法接收到阵元 i 的超声信号, 导致全矩阵数据的部分信号丢失, 且其他阵元可能会受到侧壁反射波的干扰。若继续采用全矩阵进行成像, 不仅增加计算量降低效率, 而且可能会降低成像质量。本文提出了 1/4 矩阵的 TFM 成像方法, 将 SAA 等分为 4 个扇区, 在 $N \times N$ 组全矩阵数据中分别取 4 个扇区的 $N/4 \times N/4$ 组子数据。利用 1/4 矩阵子数据对 4 个扇区对应检测区域的网格点分别进行计算, 然后将 4 个区域的数据合并, 形成完整检测区域的三维体数据。

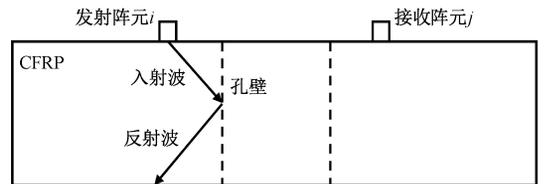


图3 孔洞侧壁反射示意图

Fig. 3 Diagram of ultrasonic reflection from the side wall of the hole

2 SAA 的设计与仿真优化

2.1 SAA 设计

为了降低优化变量维度, 本文设计 SAA 每个环的面积相等, 将环等分为若干个阵元, 每个环所含阵元数相等, 环间距相等, 阵元之间周向开口角度相等, 最小环内径与最大环外径相等。

根据上述思路, 本文设计的 4 种阵列结构如图 4 所示。图 4(a) 中的 $R4 \times S8$ 探头由 4 个圆环组成, 每个圆环被均匀分为 8 段; 图 4(b) 中的 $R3 \times S12$ 探头由 3 个圆环组成, 每个圆环被均匀分为 12 段; 图 4(c) 中的 $R3 \times S16$ 探头由 3 个圆环组成, 每个圆环被均匀分为 16 段; 图 4(d) 中的 $R4 \times S12$ 探头由 4 个圆环组成, 每个圆环被均匀分为 12 段。由于本文 CFRP 试块的孔直径为 6.35 mm, 因此四种阵列的最小环内径均为 6.35 mm。实

际检测应用中,阵列的排布区域有限,在满足本文 CFRP 孔边缺陷检测需求的前提下,本文统一 4 种阵列的声场

覆盖范围,所设计阵列的最大环外径为 17.476 mm。4 种 SAA 阵列的参数如表 1 所示。

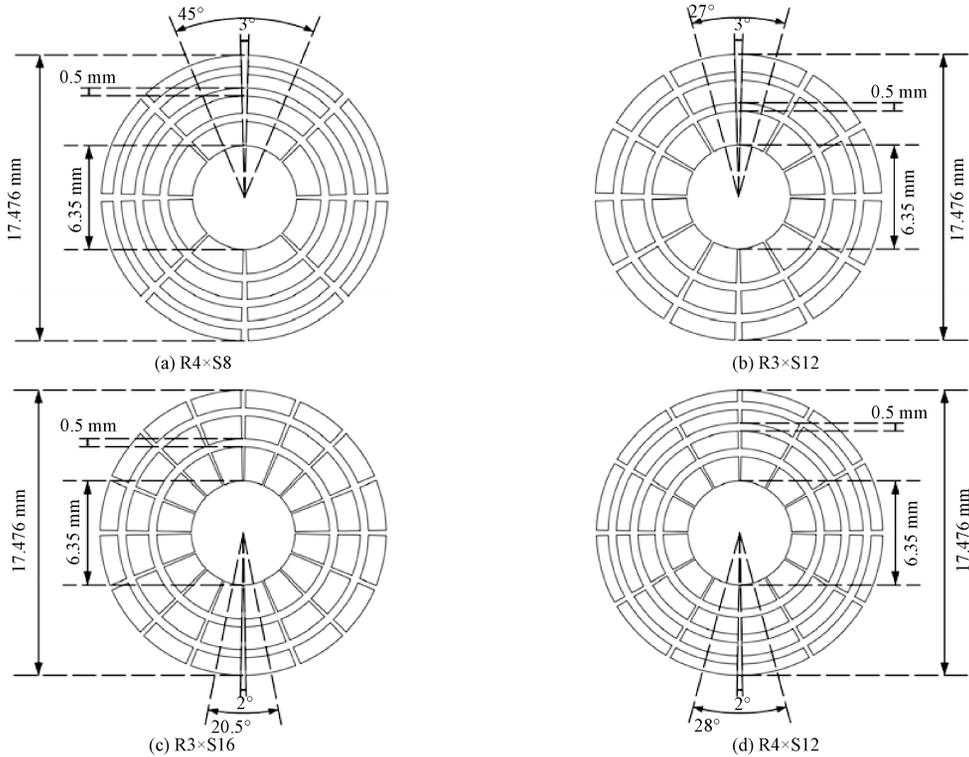


图 4 SAA 结构设计

Fig. 4 Structural design of SAA

表 1 SAA 结构参数

Table 1 Structural parameters of SAA

阵列分布	1 环内半径	1 环外半径	2 环内半径	2 环外半径	3 环内半径	3 环外半径	4 环内半径	4 环外半径
R4xS8								
R4xS12	3.175	4.675	5.175	6.209	6.709	7.536	8.036	8.738
R3xS12								
R3xS16	3.175	5.278	5.778	7.153	7.653	8.738	—	—

2.2 SAA 声场仿真

为了对比分析不同阵元的聚焦声场,选择性能最优的阵元进行全聚焦成像,本文使用 CIVA 软件对不同阵元在 CFRP 中的聚焦声场进行了仿真。CIVA 软件中的声场计算是基于 Pencil 法修正的瑞利积分,核心是将阵元看作由多个离散点源组成,而空间中任意点的声压看作是所有点源在该点所产生声压的累加。

首先建立 CFRP 模型,CFRP 的尺寸为 20 mm × 20 mm × 10 mm,中心有一个 φ6.35 mm 通孔,材料密度 $\rho = 1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,CFRP 的铺层角度为 $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$,共 54 层。CFRP 为正交各向异性材料,具有 9 个独立的弹性常数,其中, $c_{11} = 229\,820 \text{ MPa}$,

$c_{12} = 52\,606 \text{ MPa}$, $c_{13} = 56\,036 \text{ MPa}$, $c_{22} = 11\,945 \text{ MPa}$, $c_{23} = 4\,935 \text{ MPa}$, $c_{33} = 12\,105 \text{ MPa}$, $c_{44} = 3\,000 \text{ MPa}$, $c_{55} = 4\,500 \text{ MPa}$, $c_{66} = 4\,500 \text{ MPa}$ 。

设置好材料属性后,将阵元的几何模型导入软件,选择阵元中心为入射点,如图 5 所示激励波形为 7.5 MHz、80% 带宽的高斯脉冲信号,纵波模式。

如图 6 所示,采用 R4xS8 阵列结构,将 1/4 阵元放置在孔边,对 SAA 中 1/4 的阵元进行激励,聚焦点位于激励阵元的中轴线上,距孔边 0.5 mm,深度为 9.62 mm。计算各阵元的延迟时间,通过控制各个阵元的发射延时使超声波在聚焦点处聚焦。扫查步进设为 0.1 mm,最后设置求解范围便可对声场进行求解。

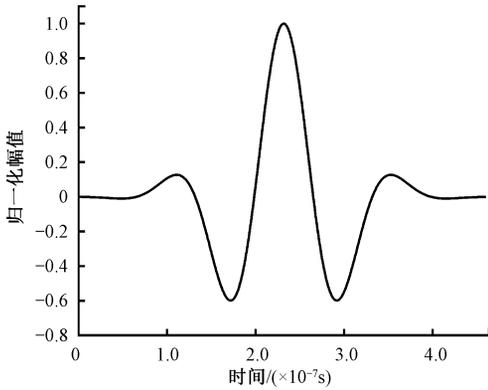


图5 激励信号

Fig. 5 Stimulated signal

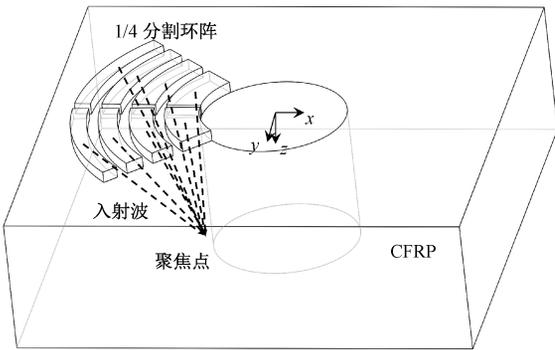


图6 声场聚焦示意图

Fig. 6 Diagram of sound field focusing

本文主要从两个方面分析4种SAA的声束聚焦性能,分别为焦点处的纵向声场分布(XZ截面聚焦声场)和横向声场分布(XY截面聚焦声场)。前者用于分析焦点附近的能量波动情况,表征了聚焦声束的纵向分辨能力;后者用于分析聚焦声场指向性、旁瓣等问题,表征了聚焦声束的横向分辨率。纵向声场中焦点处能量越集中,纵向分辨率越高,探头的聚焦性能就越优;横向声场中主瓣宽度越窄、旁瓣越小,横向分辨率越高,探头的聚焦性能就越优。4种SAA的聚焦声场结果须结合纵向声场和横向声场来整体对比分析,以确定聚焦性能最优的SAA探头。

4种阵列XZ截面的声场聚焦仿真结果如图7所示,仿真计算得到的声压幅值均进行了归一化处理。图7中整体显示出靠近聚焦区域声场能量呈明显升高趋势,远离聚焦区域的声场能量呈降低趋势。但观察R3×S12和R3×S16的声场发现,大致在X轴-4~-2的非聚焦区域,也有明显的能量集中,说明R3×S12和R3×S16的聚焦声场焦点周围有能量波动,降低了纵向分辨率;而R4×S8和R4×S12声场的聚焦区域的能量更为集中,且非聚焦区域的能量波动较小。因此,纵向声场中R4×S8和R4×S12有着更加优异的聚焦性能。

图8所示为各阵列XY截面声场分布,图9所示为各阵列在焦点处X、Y轴方向上的声场曲线。结合图8和9可以看出,R3×S12和R3×S16的主瓣宽度较宽,且R3×S12在X轴和Y轴方向的旁瓣能量都较高,R3×S16

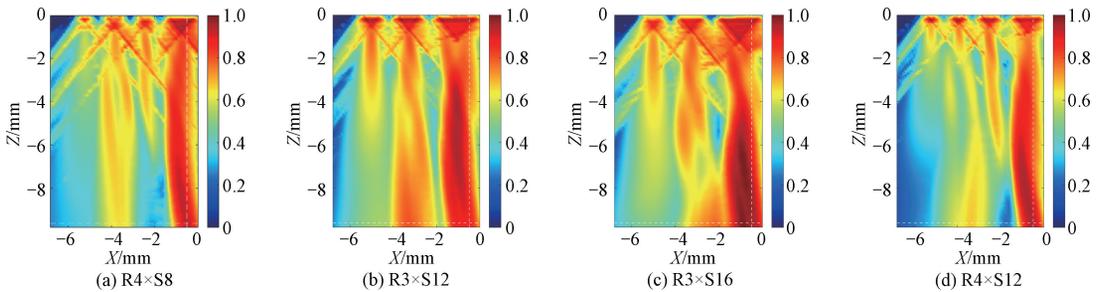


图7 XZ截面聚焦声场

Fig. 7 XZ cross-section focused sound field

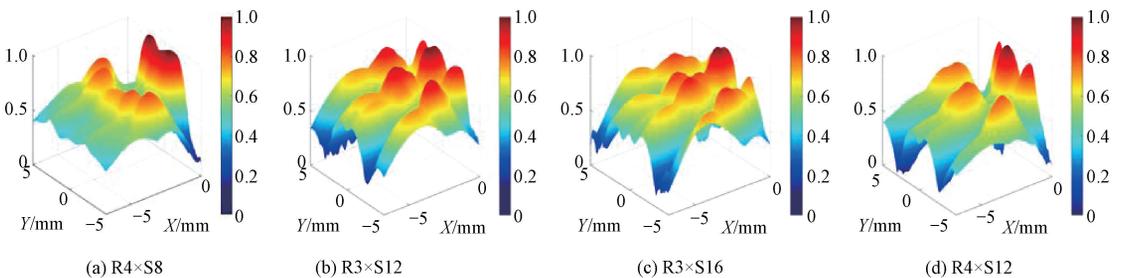
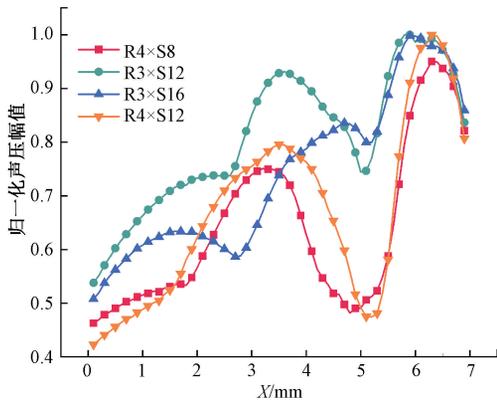
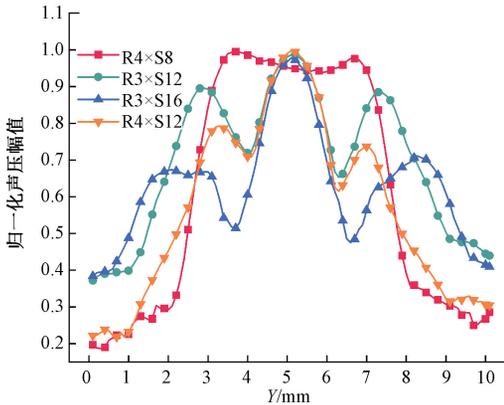


图8 XY截面声场分布

Fig. 8 XY cross-section sound field distribution



(a) X轴方向的声场曲线
(a) Sound field curve in the X direction



(b) Y轴方向的声场曲线
(b) Sound field curve in the Y direction

图 9 不同阵列在聚焦点处 X、Y 方向的声场曲线
Fig. 9 Sound field curves of different arrays in X and Y directions at the focusing point

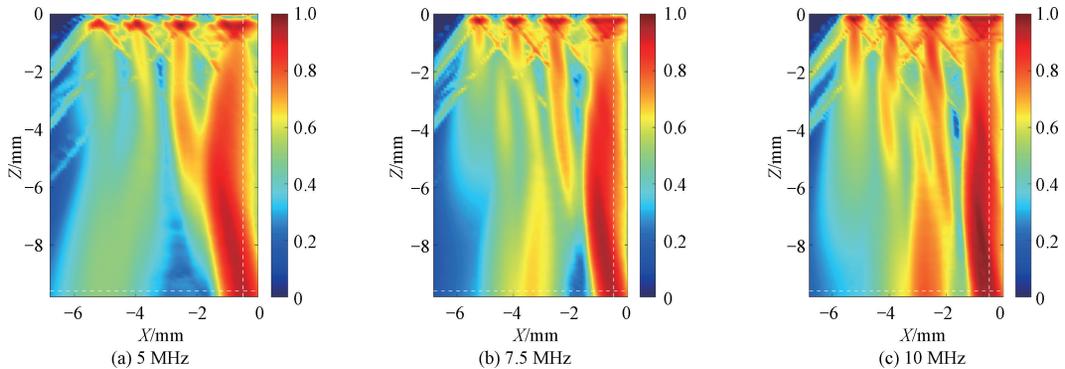


图 10 XZ 截面聚焦声场
Fig. 10 XZ cross-section focused sound field

主瓣宽度相近,在 Y 轴方向的旁瓣能量也基本一致,在 X 轴方向 7.5 和 10 MHz 的旁瓣能量较高,而 5 MHz 的旁瓣能量较低,故 5 MHz 声场的横向分辨率最高。因此,横向声场中 5 MHz 有着最优异的聚焦性能。

在 X 轴方向的旁瓣能量较高,降低了 R3×S12 和 R3×S16 的横向分辨率;R4×S8 和 R4×S12 的主瓣宽度都较窄,其中,R4×S8 在 X 轴方向的旁瓣能量较小,但在 Y 轴方向的旁瓣能量很高,甚至超过了主瓣能量,严重影响了声束聚焦性能,而 R4×S12 在 X 轴和 Y 轴方向旁瓣能量均处于低水平,且主瓣能量足够高,横向分辨率最高。因此,横向声场中 R4×S12 具有最优的聚焦性能。

综上所述,通过对比本文设计的 4 种分割环阵的聚焦声场,R4×S12 探头的聚焦性能最优,因此,本文实验所用的 SAA 探头最终选择图 4(d) 中的 R4×S12 阵列结构。

确定 SAA 探头为 R4×S12 的阵列结构后,需要选择合适的阵元中心频率。同样的方法对比分析 5、7.5 和 10 MHz 时 R4×S12 探头的聚焦声场,选择聚焦性能最优的频率作为探头频率。聚焦位置不变,激励 R4×S12 探头的 1/4 阵元,激励信号分别为 5、7.5 和 10 MHz 3 种频率的 80% 脉宽的高斯脉冲。

XZ 截面聚焦声场如图 10 所示,可以看到 10 MHz 声场在 X 轴-3~-2 的非聚焦区域有较为明显的能量集中,说明 10 MHz 的聚焦声场焦点周围有能量波动,降低了纵向分辨率;5 和 7.5 MHz 的声场在聚焦区域能量更为集中,且非聚焦区域能量波动较小。因此,纵向声场中 5 和 7.5 MHz 有着更加优异的聚焦性能。

图 11 所示为 3 种频率下 R4×S12 探头 XY 截面的声场分布,图 12 所示为不同频率下探头在聚焦点处 X、Y 轴方向上的声场曲线。结合图 11 和 12 可以看出,三者的

综上所述,通过 CIVA 数值仿真对比分析 SAA 的聚焦声场,本文最终选择 SAA 为 5 MHz 的 R4×S12 探头,后续实验将使用该探头对 CFRP 的孔边分层缺陷进行全聚焦成像。

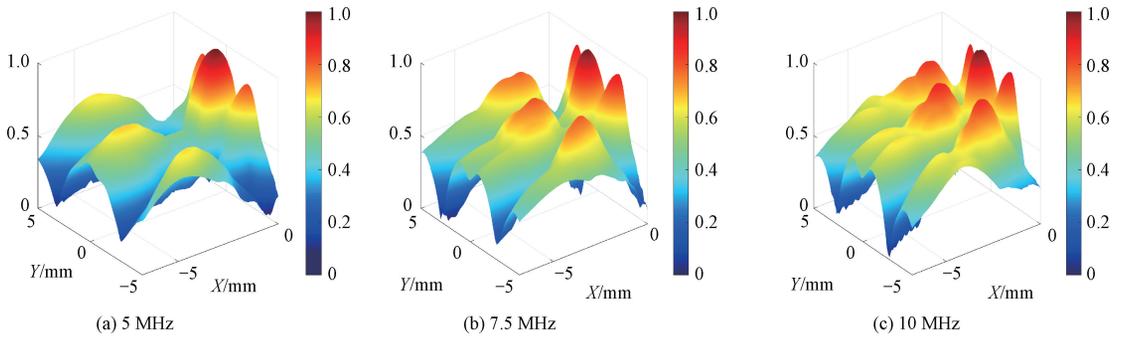
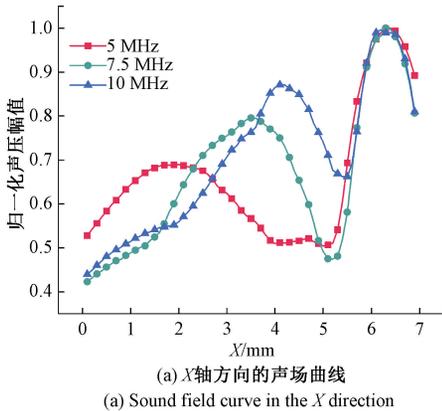
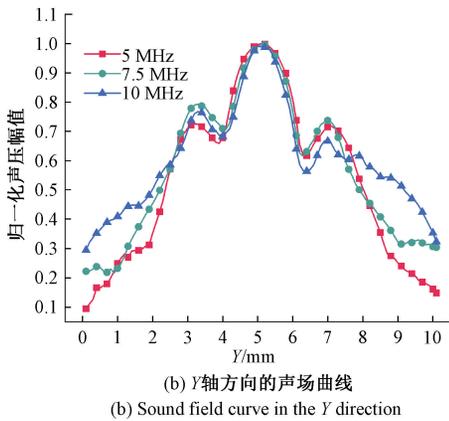


图 11 XY 截面声场分布

Fig. 11 XY cross-section sound field distribution



(a) X轴方向的声场曲线



(b) Y轴方向的声场曲线

图 12 R4×S12 阵列不同频率时在聚焦点处 X、Y 方向的声场曲线

Fig. 12 Sound field curves in the X and Y directions at the focusing point for different frequencies of the R4×S12 array

计 54 层,单层厚度为 0.185 mm。如图 13 所示,其中黄色部分为孔边分层缺陷,试块包含上、中、下不同深度的 2 mm×2 mm 孔边分层缺陷,分别位于第 2~3 层之间、第 27~28 层之间和第 52~53 层之间,分层缺陷的编号分别为 #1、#2、#3,孔径为 6.35 mm,分层缺陷厚度均为 0.2 mm。

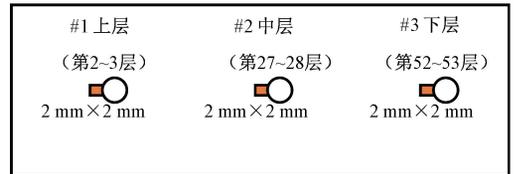


图 13 CFRP 试块

Fig. 13 CFRP specimen

3.2 全矩阵采集

搭建实验系统如图 14 所示,包括计算机、多通道数据采集设备 CTS-22T、5 MHz 的 R4×S12 探头(委托汕头超声电子股份有限公司制作)和 CFRP 孔边分层试块。将计算机与多通道数据采集设备 CTS-22T 通过网线连接,SAA 探头与 CTS-22T 相连。



图 14 实验系统

Fig. 14 Experimental system

3 实验测量

3.1 实验试块

本文 CFRP 试块的碳纤维材料为日本东丽的 T800,试块厚度为 10 mm,铺层方向为 $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$,共

首先,保证探头表面与 CFRP 表面光洁,并在探头表面涂上耦合剂;使阵元内环与孔边重合以保证阵元对孔边的覆盖;最后,设置发射参数,便可进行采集数据。

设备的采样频率为 62.5 MHz,发射电压设为 60 V,采取纵波一发多收的模式,分别对 CFRP 孔边分层试块的#1、#2 和#3 进行全矩阵信号采集。图 15 所示为#2 缺陷全矩阵信号采集时 1 号阵元发射超声波,编号为 $6n$ (n 为正整数) 的阵元接收到的回波信号,可以看出 6 号、12 号、42 号、48 号阵元能接收到较强的信号,而 18~36 号阵元由于孔的存在接收到的信号十分微弱,能接收到波形的恰好是可以与 1 号阵元组成 1/4 矩阵的阵元。

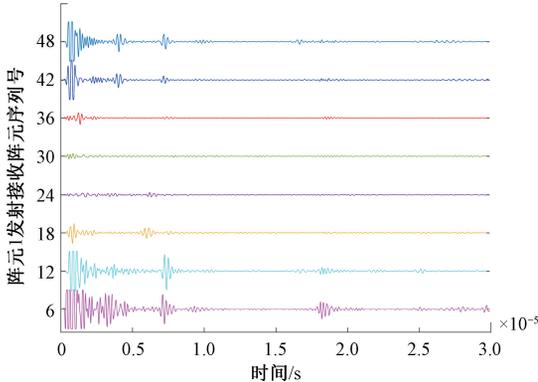


图 15 #2 缺陷典型阵元回波信号

Fig. 15 Typical array element echo signal of #2 defects

3.3 TFM 成像结果

本文对 R4×S12 探头的全矩阵成像和 1/4 矩阵成像进行对比,R4×S12 探头的 1/4 矩阵信号分别为 1~12 阵元的全矩阵信号、13~24 阵元的全矩阵信号、25~36 阵元的全矩阵信号和 37~48 阵元的全矩阵信号。

若对 CFRP 试块采用全矩阵成像,则将成像区域划分为 16 mm×16 mm×10 mm。若采用 1/4 矩阵成像,则将该成像区域划分为各组阵元对应的 4 个成像区域,每个成像区域大小 4 mm×4 mm×10 mm,对 4 个区域分别进行全聚焦计算后,再合并为完整的成像区域。两种方法划分的网格大小均为 0.36 mm×0.36 mm×0.36 mm,利用式(1)、(2)计算每个网格点处的幅值,采用 VTK 工具包对所得三维体数据进行三维成像。

图 16~18 所示分别为#1、#2、#3 的全矩阵成像图与 1/4 矩阵成像图。可以看出,全矩阵成像图的噪点较多,缺陷的对比度不高,尤其是位于上下界面附近的#1、#3 缺陷,1/4 矩阵成像图的噪点明显降低,缺陷的对比度高于全矩阵成像,缺陷更容易识别。

为了对比两种成像方法缺陷定量的精确度,图 19~21 所示为缺陷深度位置 XY 截面的二维成像图,XY 截面图中可以看出 1/4 矩阵成像的效果明显优于全矩阵成像。分别计算两种成像的缺陷面积(图 22),全矩阵成像的#1、#2、#3 缺陷面积比实际面积分别为 0.5、0.37、

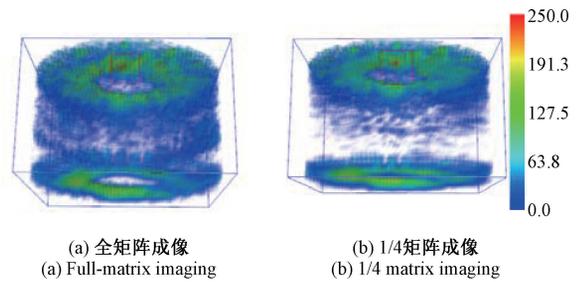


图 16 #1 缺陷 TFM 成像

Fig. 16 TFM imaging of #1 defects

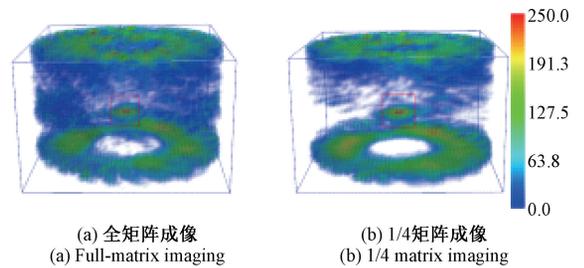


图 17 #2 缺陷 TFM 成像

Fig. 17 TFM imaging of #2 defects

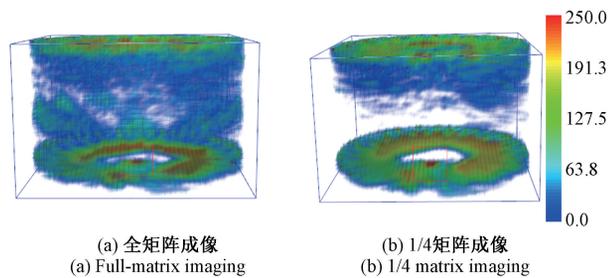


图 18 #3 缺陷 TFM 成像

Fig. 18 TFM imaging of #3 defects

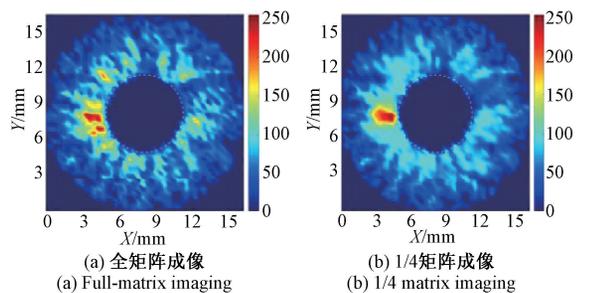


图 19 #1 缺陷截面

Fig. 19 Cross-section of #1 defects

0.5 mm²,最大误差为 12.5%,而 1/4 矩阵成像的#1、#3 缺陷面积比实际面积分别为 0.24、0.11 mm²,#2 缺陷面积与实际面积相同,误差不超过 6%。因此,1/4 矩阵成像方法的缺陷定量精确度比全矩阵成像方法更高。

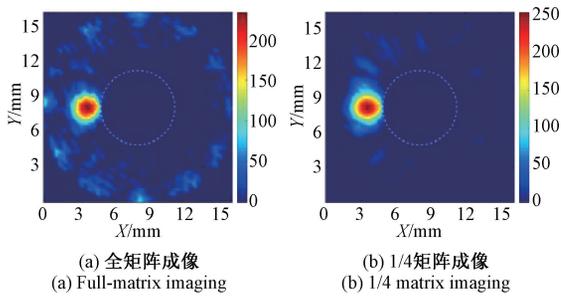


图 20 #2 缺陷截面

Fig. 20 Cross-section of #2 defects

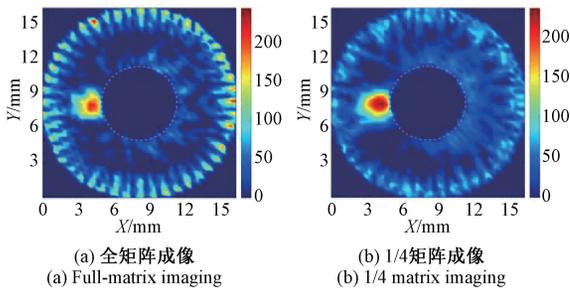


图 21 #3 缺陷截面

Fig. 21 Cross-section of #3 defects

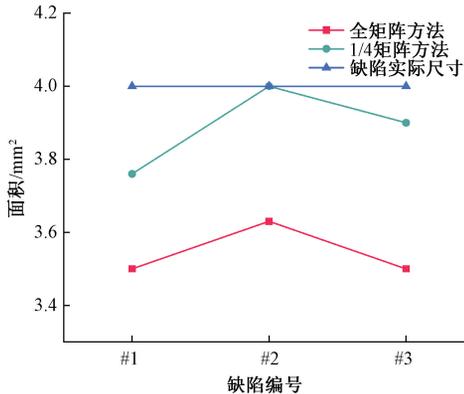


图 22 #1、#2、#3 缺陷面积

Fig. 22 Area of #1, #2, #3 defects

为了进一步评价全矩阵和 1/4 矩阵的成像质量,本文引入信噪比(signal noise ratio, SNR)这一指标,信噪比计算公式如下:

$$SNR = 20 \lg \frac{V_s}{V_n} \quad (3)$$

式中: V_s 表示缺陷信号幅值; V_n 表示噪声信号幅值; V_n 取噪声幅值最高处。信噪比越高,表示缺陷信号相对于噪声的比值越大,成像质量越好。

表 2 为两种成像方法的信噪比,可以看出, #1、#2、#3 的 1/4 矩阵成像方法较全矩阵成像方法信噪比分别提升 4.94、3.43、7.61 dB。

表 2 信噪比

Table 2 Signal noise ratio			
成像方法	#1 信噪比	#2 信噪比	#3 信噪比
全矩阵成像	2.07	7.43	0
1/4 矩阵成像	7.01	10.86	7.61

4 结 论

本文针对 CFRP 孔边分层缺陷,提出了基于分割环形阵列的 1/4 矩阵全聚焦成像方法。设计了 R4×S8、R3×S12、R3×S16 和 R4×S12 四种 SAA 探头,通过仿真聚焦声场来确定使用的探头参数,最终采用 5 MHz 的 R4×S12 探头对含有上、中、下 3 种深度分层缺陷的 CFRP 试块分别进行全矩阵成像和 1/4 全矩阵成像,得到如下结论。

1) 1/4 矩阵方法比全矩阵方法三维成像的缺陷对比度更高,尤其上、下界面附近的缺陷对比度提升更为明显。

2) 对比两种方法的缺陷面积测量结果,全矩阵成像的缺陷面积与实际面积误差最高达到 12.5%,而 1/4 矩阵成像的缺陷面积误差不超过 6%,1/4 矩阵成像更有助于缺陷大小的精确表征。

3) 与全矩阵成像相比, #1、#2、#3 缺陷的 1/4 矩阵成像信噪比分别提升了 4.94、3.43、7.61 dB,有效提升了图像质量,但提升有限。

4) 基于分割环阵的 1/4 矩阵全聚焦成像方法为孔边缺陷检测提供了新思路,除了 CRRP,该方法也适用于其他金属和非金属孔结构的孔边缺陷检测。

参考文献

- [1] 周建民, 陈超, 涂文兵, 等. 红外热波技术、有限元与 SVM 相结合的复合材料分层缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 29-38.
ZHOU J M, CHEN CH, TU W B, et al. Composite layer defect detection method based on infrared heat wavetechnology, finite element and SVM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 29-38.
- [2] 范文茹, 雷建, 董玉珊, 等. 基于四电极法的 CFRP 结构损伤检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 961-968.
FAN W R, LEI J, DONG Y SH, et al. Damage detection of CFRP laminate structure based on four-probe method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 961-968.
- [3] 温姣玲, 卢超, 何方成, 等. 航空复合材料层压板钻孔分层缺陷相控阵检测参数优化[J]. 玻璃钢/复合

- 材料, 2017(2): 21-25.
- WEN J L, LU CH, HE F CH, et al. Optimisation of phased array detection parameters for drilled delamination defects in aerospace composite laminates[J]. *Composites Science and Engineering*, 2017(2): 21-25.
- [4] 杨亮, 蔡桂喜, 刘芳, 等. 碳纤维复合材料制孔结构超声无损检测及评价[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(19): 2327-2332.
- YANG L, CAI G X, LIU F, et al. Ultrasonic nondestructive testing and evaluation of hole structure of carbon fiber composites[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(19): 2327-2332.
- [5] GENG D X, LIU Y H, SHAO Z Y, et al. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review[J]. *Composite Structures*, 2019, 216: 168-186.
- [6] MAIO L, MEMMOLO V, BOCCARDI S, et al. Ultrasonic and IR thermographic detection of a defect in a multilayered composite plate[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 167: 71-79.
- [7] 董方旭, 王从科, 凡雨梅, 等. X射线CT成像检测方法对复合材料内部分层缺陷检测结果的影响研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(3): 86-91.
- DONG F X, WANG C K, FAN L M, et al. Study on the effect of X-ray CT imaging inspection methods on the detection results of internal delamination defects in composite materials[J]. *Composites Science and Engineering*, 2019(3): 86-91.
- [8] 赵付宝, 孙良文, 汤振鹤, 等. 复合材料构件的X射线数字成像检测[J]. *中国测试*, 2021, 47(S2): 92-95.
- ZHAO F B, SUN L W, TANG ZH H, et al. Application of X-ray digital imaging detection for composite components[J]. *China Measurement & Test*, 2021, 47(S2): 92-95.
- [9] WANG J, XU T, ZHANG L, et al. Nondestructive damage evaluation of composites based on terahertz and X-ray image fusion[J]. *NDT&E International*, 2022, 127: 102616.
- [10] CHENG J, QIU J H, JI H L, et al. Application of low frequency ECT method in noncontact detection and visualization of CFRP material[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 110: 141-152.
- [11] ZHANG Z, GUO S F, LI Q, et al. Ultrasonic detection and characterization of delamination and rich resin in thick composites with waviness[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 189: 108016.
- [12] 罗忠兵, 张松, 钱恒奎, 等. CFRP复杂几何结构区相控阵超声检测建模与声传播规律[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(11): 3672-3681.
- LUO ZH B, ZHANG S, QIAN H K, et al. Modelling and wave propagation behavior of phased array ultrasonic testing on carbon fiber reinforced plastics components with complex geometry[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(11): 3672-3681.
- [13] 陈明, 陈尧, 肖树坤, 等. 基于环形统计计量阈值加权的上表面开口裂纹横波全跨全聚焦成像[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4): 52-60.
- CHEN M, CHEN Y, XIAO SH K. Shear wave full-skip total focusing method of upper surface-breaking cracks based on circular statistic vector threshold weighting[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(4): 52-60.
- [14] 辛均浩. 阵列超声探伤三维成像技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- XIN J H. The research on three-dimensional imaging technology of array ultrasonic flaw detection[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [15] KITAZAWA S, KONO N, BABA A, et al. A three-dimensional phased array ultrasonic testing technique[C]. 10th European Conference on Non-Destructive Testing, 2010.
- [16] WRONKOWIC A, DRAGAN K, DZIENDZIKOWSKI M, et al. 3D reconstruction of ultrasonic B-scans for nondestructive testing of composites[J]. *Computer Vision and Graphics*, 2016, 9972: 266-277.
- [17] 周正干, 李洋, 陈芳浩, 等. 矩阵换能器超声三维成像方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(2): 371-378.
- ZHOU ZH G, LI Y, CHEN F H, et al. Research on three dimensional imaging method using ultrasonic matrix array transducer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(2): 371-378.
- [18] 陆铭慧, 刘元钰, 何新军, 等. 相控阵线阵换能器的三维成像方法研究[J]. *压电与声光*, 2021, 43(2): 225-230.
- LU M H, LIU Y Y, HE X J, et al. Study on 3D imaging method of linear array phased array transducer[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(2): 225-230.
- [19] 肖海. 纤维增强复合材料超声三维全聚焦缺陷成像研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- XIAO H. Ultrasonic 3D total-focusing defect imaging study of fiber-reinforced composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [20] 赵志鹏, 戴宁, 周鑫, 等. 复合材料曲面构件缺陷超声三维成像方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(7):

257-266.

ZHAO ZH P, DAI N, ZHOU X, et al. A 3D ultrasonic imaging method for defects of composite curved components [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 257-266.

- [21] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 50-55.

SHI K R, GUO Y M. Phased array ultrasonic imaging and testing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 50-55.

- [22] MARTINEZ O, ULLATE L G, IBANEZ A. Comparison of CW beam patterns from segmented annular arrays and squared arrays[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 85(1-3): 33-37.

- [23] ULLATE L G, GODOY G, MARTINEZ O, et al. Analysis of the ultrasonic field radiated by segmented annular arrays [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2006, 53(10): 1944-1954.

- [24] GODOY G, MARTINEZ O, IBANEZ A, et al. Random thinning of segmented annular arrays [C]. 2006 IEEE Ultrasonics Symposium. IEEE, 2006:2148-2151.

- [25] 章成广, 张碧星, 邓方青, 等. 非整数维超声相控阵探测方法研究 [J]. 声学学报(中文版), 2008, 33(6): 555-561.

ZHANG CH G, ZHANG B X, DENG F Q, et al. Non-integer dimension ultrasonic phased array testing [J]. Acta Acustica, 2008, 33(6): 555-561.

作者简介



杨宁, 2021 年于南昌航空大学获得学士学位, 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: 1359625122@qq.com

Yang Ning received his B.Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2021. He is currently a M.Sc. candidate at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic imaging detection and ultrasonic post-processing imaging.



陆铭慧(通信作者), 1986 年于南昌航空工业学院(南昌航空大学)获得学士学位, 1996 年于清华大学获得硕士学位, 2003 年于中国科学院声学研究所获得博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为声学检测技术及检测系统研制。

E-mail: lunara@163.com

Lu Minghui (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 1986, M.Sc. degree from Tsinghua University in 1996, and Ph.D. degree from Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences in 2003. She is currently a professor at Nanchang Hangkong University. Her main research interests include acoustic detection techniques and development of detection systems.