

引文格式:王松,王铮,席欢.复合材料R区超声相控阵检测声场仿真试验研究[J].航空制造技术,2023,66(22):60-68.

WANG Song, WANG Zheng, XI Huan. Simulation and experimental study on ultrasonic phased array inspection for R-zone of composite material[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(22): 60-68.

# 复合材料 R 区超声相控阵检测声场 仿真试验研究

王松<sup>1</sup>,王铮<sup>2</sup>,席欢<sup>2</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111;

2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

**[摘要]** 采用常规超声检测方法进行树脂基复合材料 R 区结构内部缺陷检测,存在由于入射声束不能与被检测 R 区圆弧表面垂直而导致的检测灵敏度降低,难以实现 R 区整体弧度的全覆盖检测,以及不能对缺陷沿 R 区圆弧方向的尺寸进行评定等一系列问题。为解决上述问题,采用超声相控阵方法对 R 区结构进行检测,研究了相控阵检测时 R 区不同方向截面的声场分布规律,分析了虚拟阵元晶片数目对检测声场的影响。通过研究发现,虚拟阵元晶片数目会影响声场分布,晶片数目越多,声场分布强弱差异越大,最大声场强度越强且位置越靠近表面,6 dB 声束宽度越大;聚焦检测方式下的最大声场强度普遍高于非聚焦检测方式,6 dB 声束宽度小于非聚焦声场;弧形阵列不同角度虚拟探头产生声场分布基本一致,中心组晶片的最大声场强度最大。经试验验证,采用超声相控阵方法,利用圆弧阵列探头,合理设置检测参数,可以有效检出 R 区不同角度、不同埋深、孔径约 3 mm 的平底孔人工缺陷。

**关键词:** 复合材料; R 区; 仿真; 声场; 超声相控阵; 无损检测

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.22.060



王松

高级工程师,博士,研究方向为复合材料无损检测。

先进复合材料具有轻质、高强、可设计、抗疲劳、易于实现结构-功能一体化等优点,已成为航空航天、轨道交通等领域重要结构材料之一<sup>[1-3]</sup>。复合材料的应用日益广泛,材料的质量可靠性要求不容忽视<sup>[4-5]</sup>。无损检测是材料研制和生产过程中重要的质量监控手段,是开展高性能材料研制不可或缺的重要环节<sup>[6-8]</sup>。但是随着复合材料在各种应用领域的不断拓展,各种复杂结构件不断涌现,给无损检测带来了新的难题和挑战。因此,随着先进复合材料的发展和应用,无损检测技术的进步成为一个永恒课题<sup>[9-12]</sup>。

R 区结构是复合材料件中常见结构之一,容易产生架桥、褶皱、孔洞等缺陷。而且由于应力集中现象

明显,其缺陷危害性更强。但是,R 区结构曲率大,声入射耦合面小,声波折射和散射现象复杂,导致常规超声检测灵敏度低、检测盲区大、缺陷检出率小,给复合材料制件的使用带来较大隐患<sup>[13-14]</sup>。因此,国内外学者纷纷针对这一问题开展无损检测技术研究<sup>[15-18]</sup>。张冬梅等<sup>[17]</sup>对比了相控阵弧阵换能器和线阵换能器两种检测方式下的检测能力,认为这两种形式阵列探头检测效果均优于常规超声单探头,具有检测效率高、覆盖性好等优势。谢玲丽等<sup>[16]</sup>针对带筋构件 R 区多类型缺陷的快速检测和精确识别等难题,提出基于分布式激光超声的带筋构件 R 区缺陷检测和分类识别方法,为带筋构件制造缺陷的快速检测和分类识别提供了新思

路。罗忠兵等<sup>[18]</sup>针对R区开展了弹性特性表征、有限元建模、声场计算及试验验证工作,为缺陷精准辨识提供支持。现有研究显示,超声相控阵技术是目前解决复合材料R区检测难题的最佳手段<sup>[19-21]</sup>。

本文针对L型复合材料R区的超声相控阵检测,开展了不同声束截面声场分布规律研究,并对影响声场分布的关键参数进行仿真分析和试验验证。

## 1 检测原理

基于超声相控阵的声束聚焦和阵列扫查原理,采用曲面阵列探头,晶片排列形式如图1(a)所示。检测时,使曲面阵列探头的圆弧圆心与被检测R区圆心重合,阵列探头与R区相对位置如图1(b)所示。1组晶片作为1个虚拟阵元发射声波,利用阵列扫查依次激发所有晶片,实现R区全范围声束垂直入射检测。

R区超声相控阵检测可以采用聚焦和非聚焦两种方式,非聚焦检测时,晶片组发射的声束自然汇聚到曲面探头与R区重合的圆心位置,然后再继续向R区内部传播;聚焦检测通常采用单点聚焦方式,即晶片组发射声束依次聚焦在主声束所在角度的某一深度位置,图1(c)中的红色曲线即为整个探头的聚焦位置。

该方法在检测时能够同时进行A扫描、B扫描和C扫描成像,并可直观准确地对缺陷尺寸进行定量评价,消除了传统超声方法对R区检测的弊端,如入射声束不能完全与R区表面垂直(图2(a))、难以实现R区全覆盖检测(图2(b)),以及不能对缺陷准确评定等。

## 2 仿真试验与结果讨论

### 2.1 试验方法

本文仿真试验检测对象为碳纤维复合材料L型R区结构,材料声速设为2600 m/s,声衰减设为0.8 dB/mm。

内圆曲率半径为5 mm,开口角度为90°,层板厚度为6 mm。相控阵探头为32晶片线阵,晶片沿曲率半径14 mm的圆弧排列,圆心角为119°。晶片宽度0.5 mm、长度6 mm、间距0.1 mm。

采用CIVA声场仿真软件,声波激励信号中心频率5 MHz,带宽2.5 MHz,忽略材料各向异性影响,对沿R区圆弧和长度两个方向截面的声场分布进行仿真。耦合方式采用有机玻璃楔块耦合。R区取向示意图如图3所示。

此外,针对受检测参数影响较大的沿R区圆弧方向截面,开展虚拟阵元晶片数目和晶片聚焦方式对声场分布的影响研究,以及不同角度的虚拟阵元产生声场的对比研究。

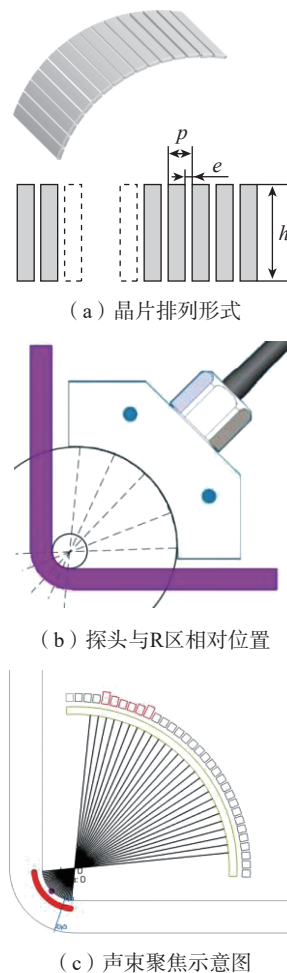
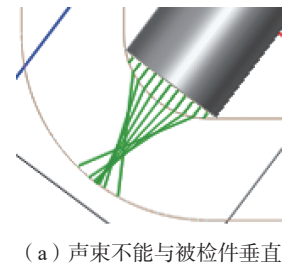


图1 R区曲面阵列探头检测示例  
Fig.1 Example of R-zone detection by curved ring array probe

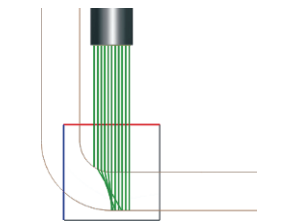
### 2.2 声场分布仿真结果

以6个晶片为1个虚拟阵元,1个晶片为激发间隔,依次激发相控阵探头中所有晶片,仿真检测采用非聚焦方式。在沿R区圆弧方向截面,1个虚拟阵元产生的声场分布如图4所示,6 dB声束范围(宽×深)约2.7 mm×6.0 mm,在不移动相控阵探头的前提下,进行阵列扫查,合成声场分布如图5所示。

由上述仿真结果可以看到,在沿



(a) 声束不能与被检件垂直



(b) 声束不完全覆盖被检R区

图2 常规超声单探头检测R区声束传播情况举例

Fig.2 Example of sound beam propagation in R-zone using conventional ultrasonic single probe

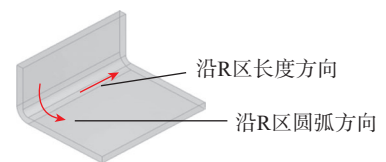


图3 R区取向示意图

Fig.3 Schematic diagram of R-zone orientation

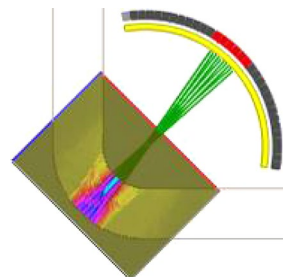


图4 1个虚拟阵元沿R区圆弧方向仿真声场  
Fig.4 A virtual probe simulation sound field along the arc direction of R-zone

R 区圆弧方向截面,1 个虚拟阵元发射的声波首先汇聚于探头与 R 角圆心的交点,再以该点为虚拟发射源向被检测 R 区传播,并近似垂直入射至对应角度 R 区表面。晶片组依次激发,最终可实现 R 区全范围声束覆盖。

在沿 R 区长度方向截面,1 个虚拟阵元产生的声场分布如图 6 所示。6 dB 有效声束范围(宽 × 深)约为 14.1 mm × 5.9 mm。

由仿真结果分析,图 1 形式的相控阵探头在 R 角圆弧和长度两个相互垂直方向截面的声场分布特点不同。两个截面中的 6 dB 声束范围在深度方向上基本能够覆盖被检 R 区 6 mm 要求,而在各自截面的宽度方向上相差较大。其中,沿 R 角圆弧方向有效声束宽度较小,而沿 R 角长度方向有效声束宽度较大,这种声场分布特点与线聚焦探头有相似之处。

### 2.3 虚拟阵元晶片数目对声场的影响

虚拟阵元晶片数目  $N$  是超声相

控阵检测的一项重要参数,分别设置  $N$  为 5、6、7、8,对不同晶片数目虚拟阵元在沿 R 角圆弧方向截面产生的声场进行仿真,聚焦方式为非聚焦。

不同数目晶片的虚拟阵元声场分布仿真结果如图 7 所示,依次激发所有阵元产生的合成声场分布仿真结果如图 8 所示。表 1 对比分析了不同

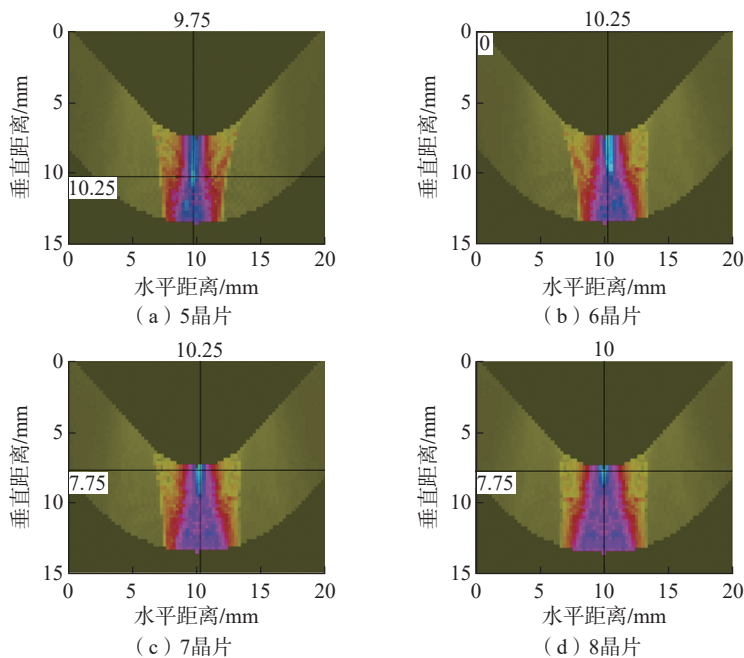


图 7 不同数目晶片的单个虚拟阵元声场分布仿真结果

Fig.7 Simulation results of sound field distribution of single virtual probe with different number of elements

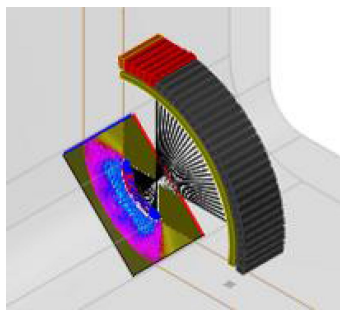


图 5 沿 R 区长度方向合成仿真声场

Fig.5 Synthetic simulation sound field along the extended direction of R-zone

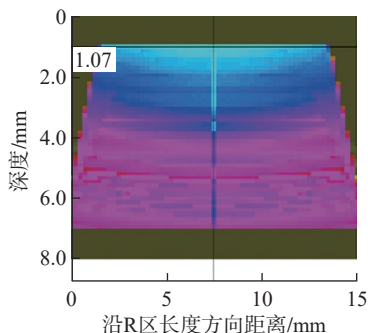


图 6 1 个虚拟阵元沿 R 区长度方向声场分布  
Fig.6 Sound field distribution of a virtual probe along the extended direction of R-zone

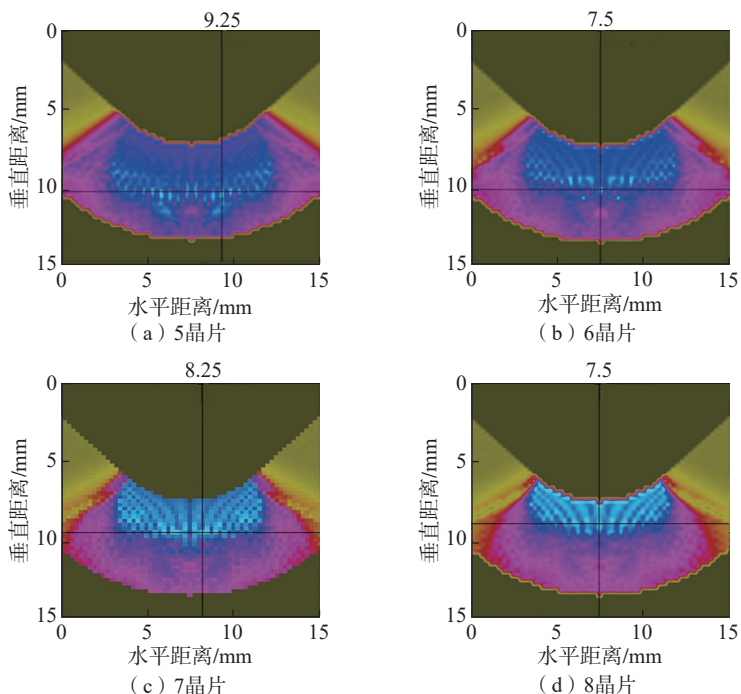


图 8 不同数目晶片的虚拟阵元合成声场分布仿真结果

Fig.8 Simulation results of virtual probe synthetic sound field distribution with different number of elements

数目晶片虚拟阵元声场的最大强度和 6 dB 有效声束范围。

由仿真结果可以看到,1 个虚拟阵元包含的晶片数目越多,声场分布强弱差异越大,最大声场强度越强,且位置越靠近表面;同时,6 dB 声束宽度增大,沿 R 区弧度方向分辨力变差,但 6 dB 声束长度基本均可覆盖 6 mm 厚度层板。

通过上述仿真试验发现,针对声场强度和分布角度,同时激发 6 或 7 个晶片检测时,声场强度总体较高,且声场分布相对均匀;针对检测分辨力和小缺陷评定,激发晶片数目越少(本仿真试验为 5 晶片),沿 R 区圆弧方向声束宽度越小,越有利于该方向的缺陷识别和评定。实际检测时,可依据上述仿真得到的虚拟阵元晶片数量与声场、分辨力的关系,针

对具体被检测对象材料衰减、厚度、最小检测缺陷等情况合理选择虚拟阵元数目。

### 2.4 聚焦方式对检测声场影响

以 6 个晶片为 1 个虚拟阵元,开展声束聚焦与非聚焦检测方式下检测效果对比研究。设置虚拟阵元聚焦方式分别为单点聚焦于 R 区内圆弧表面下 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm 深度位置,对其声场分布进行仿真。同时与不设置聚焦方式的检测声场分布情况进行对比。

图 9 和 10 分别给出 1 个虚拟阵元声场及探头合成声场的仿真结果,表 2 对比分析了图 9 虚拟阵元产生声场的最大声场强度和 6 dB 有效声束范围,图 11 和 12 分别对比了图 9 虚拟阵元声场在水平和垂直两个方向的声场强度曲线。

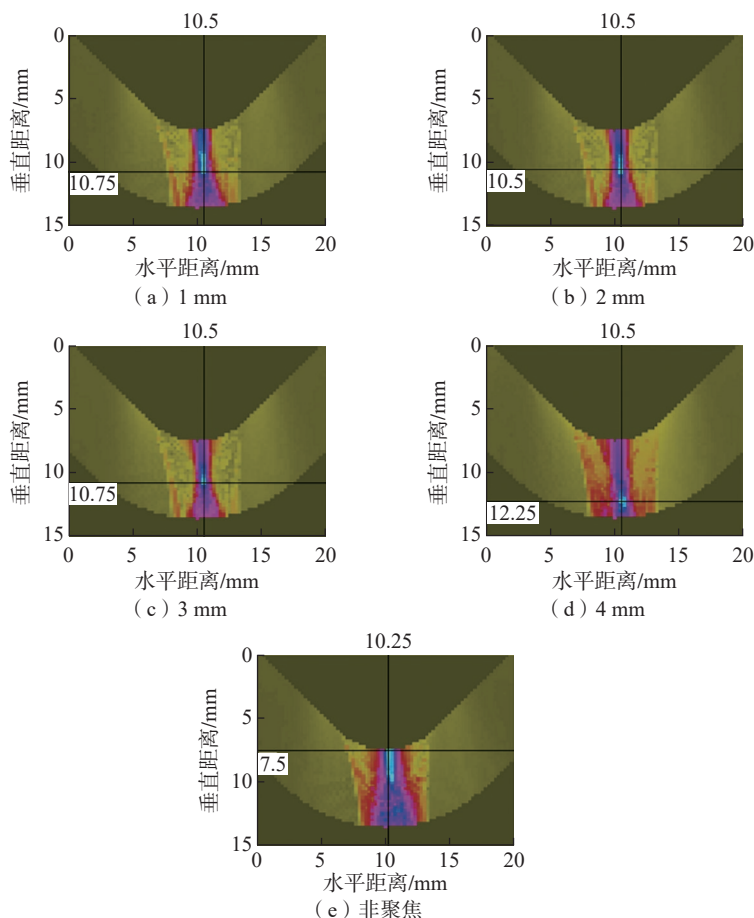


图 9 1 个虚拟阵元不同聚焦深度及非聚焦方式下声场分布

Fig.9 Sound field distribution of a virtual probe under different focusing depths and non focusing modes

由以上仿真结果可知,聚焦声场的最大声场强度普遍高于非聚焦声场,6 dB 声束宽度小于非聚焦声场。但所有聚焦与非聚焦检测方式下最大声强差异不大于 3 dB;焦点位于 3 mm 和 4 mm 时的声束宽度最小,其他情况声束宽度略大。聚焦检测方式下,最大声场强度增强,声束宽度减小,有利于提高检测信噪比。

### 2.5 不同角度虚拟阵元检测声场分布比较

以 6 个晶片为 1 个虚拟阵元,采用非聚焦检测模式,分别模拟 1~6、8~13、14~19、20~25、27~32 5 组虚拟阵元的声场分布,分析不同角度虚拟阵元声场分布差异。图 13 为上述 5 组晶片组成虚拟阵元的声场分布,表 3 为不同角度虚拟阵元产生的最大

表 1 不同数目晶片的虚拟阵元产生声场对比  
Table 1 Comparison of sound field produced by virtual probe with different number of elements

晶片数目/个	最大声场强度/pts	1 个虚拟阵元 6 dB 有效声束范围(宽 × 深)/mm
5	8.7	2.3 × 6.0
6	9.6	2.7 × 6.0
7	10.4	3.1 × 6.0
8	11.3	3.5 × 6.0

注: pts 为 CIVA 仿真声场强度单位。

表 2 1 个虚拟阵元产生的最大声场强度和 6 dB 有效声束范围对比

Table 2 Comparison of the maximum sound field intensity and 6 dB effective sound beam range generated by a virtual probe

聚焦方式	最大声场强度/pts	1 组晶片 6 dB 声场(宽 × 深)/mm
单点聚焦于表面下 1 mm	9.9	2.7 × 6.1
单点聚焦于表面下 2 mm	10.3	2.4 × 6.1
单点聚焦于表面下 3 mm	11.1	1.5 × 6.1
单点聚焦于表面下 4 mm	9.8	1.5 × 6.1
非聚焦	9.6	2.7 × 6.0

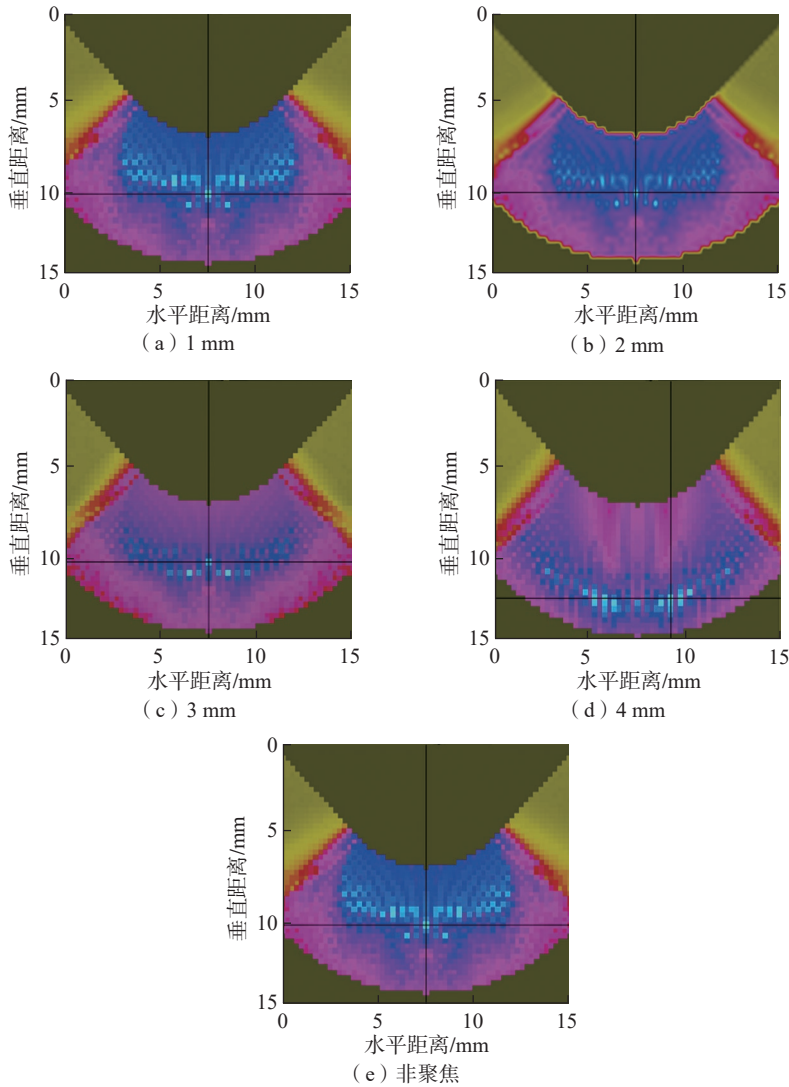


图 10 不同聚焦深度及非聚焦方式下合成声场分布

Fig.10 Synthetic sound field distribution under different focusing depths and non focusing modes

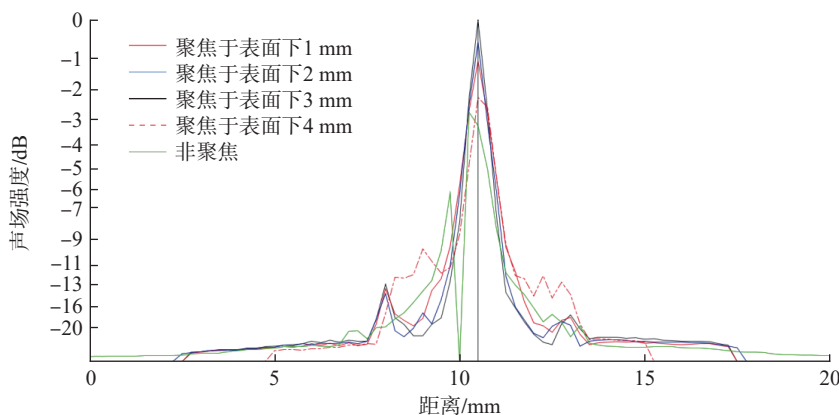


图 11 1 个虚拟阵元声场在水平方向的声场强度曲线对比

Fig.11 Comparison of sound field intensity curves of a virtual probe in the horizontal direction

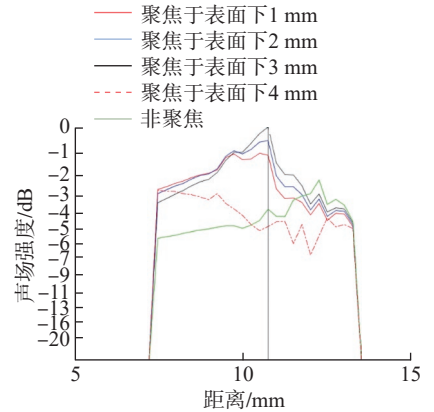


图 12 1 个虚拟阵元声场在垂直方向的声场强度曲线对比

Fig.12 Comparison of sound field intensity curves of a virtual probe in the vertical direction

表 3 5 个不同角度虚拟阵元产生的最大声场强度对比

Table 3 Comparison of the maximum sound field intensity generated by five virtual array elements from different angles

虚拟阵元	最大声场强度/pts
1~6 晶片	9.0
8~13 晶片	9.4
14~19 晶片	9.6
20~25 晶片	9.4
27~32 晶片	9.0

声场强度的对比。

以上仿真结果分析表明,5 种角度虚拟阵元产生的声场分布相似,最大声场强度略有差异,近似中心(14~19 晶片)的虚拟阵元最大声强最强,两侧虚拟阵元随偏转角度增加最大声强依次降低,5 种虚拟阵元声场的最大强度差不大于 1 dB。

### 3 检测试验

#### 3.1 虚拟阵元不同晶片数目检测效果比较

本检测试验采用广州多浦乐公司的 Novascan 32/128 超声相控阵检测仪和 5 MHz 曲面线阵探头(5C32-0.5×10-X51),检测采用水耦合方式。被检测试样为厚度 6 mm、内圆弧曲

率半径 5 mm、开口角度 90° 的 L 型 R 区有机玻璃,其声速和声衰减与碳纤维材料相近。试样采用平底孔模拟分层缺陷,平底孔孔径为 3 mm,平底孔轴线与 R 区侧边的角度呈 45°,埋深(即平底孔孔底距离内圆弧表面的距离)分别为 1.0 mm、2.5 mm

和 4.5 mm,平底孔位置如图 14 所示。

检测采用非聚焦模式,激励信号为 100 V 负方波,虚拟阵元晶片数目分别选择为 4、6、8。图 15 为不同埋深平底孔 B 扫描图。3 种晶片数目虚拟阵元检测的平底孔埋深与增益值曲线如图 16 所示,其增益值为将

平底孔反射信号幅度调至检测仪满刻度 80% 时的检测仪增益值。

上述检测试验中,晶片数量分别为 4、6 和 8 的虚拟阵元,均可实现 R 角中 3 种埋深  $\phi 3$  mm 平底孔检测,检测信噪比及分辨力均较佳。其中,晶片数目为 4 的虚拟阵元检测,所用增益值相对较大,说明声场能量偏弱;晶片数目为 6 的虚拟阵元检测,3 个平底孔所用增益值相对均较小,说明声场能量整体较强;晶片数目为 8 的虚拟阵元,埋深较小的平底孔增益值居中,埋深较大的平底孔增益值较大,说明声场能量较 6 晶片虚拟阵元弱,且能量分布沿厚度方向变化较大。

本试验验证的不同晶片虚拟阵元检测声场强度和均匀性分布规律,与 2.3 节仿真结果一致。

### 3.2 不同角度检测效果比较

本试验采用法国 M2M 公司的 Multi2000 超声相控阵检测仪,配备广州多浦乐公司的 5 MHz 曲线阵探头(5C32-0.5×10-X51),检测采用水耦合方式。

对厚度 6 mm、曲率半径 5 mm、开口角度 90° 的 L 型碳纤维复合材料 R 区试样进行检测,试样中采用平底孔模拟分层缺陷,平底孔孔径为 3 mm,埋深约 4 mm,平底孔轴线与 R 区一侧直角边的夹角分别为 45°、60°、75° 和 90°。R 区试样中平底孔分布如图 17 所示。

选择 6 个晶片为一个虚拟阵元,以非聚焦检测方式对 R 区试样进行阵列扫查检测。R 区试样中不同角度平底孔超声相控阵检测的 A 扫描波形、B 扫描图像和扇形扫查图像,如图 18 所示。

由检测波形和图像可知,4 种角度平底孔均能有效检出。45°、60°、75°、90° 这 4 个角度平底孔反射波幅度达到显示屏满刻度 80% 时的增益值分别为 47.5 dB、46.8 dB、58.1 dB 和 48.3 dB,除 75° 平底孔检测增

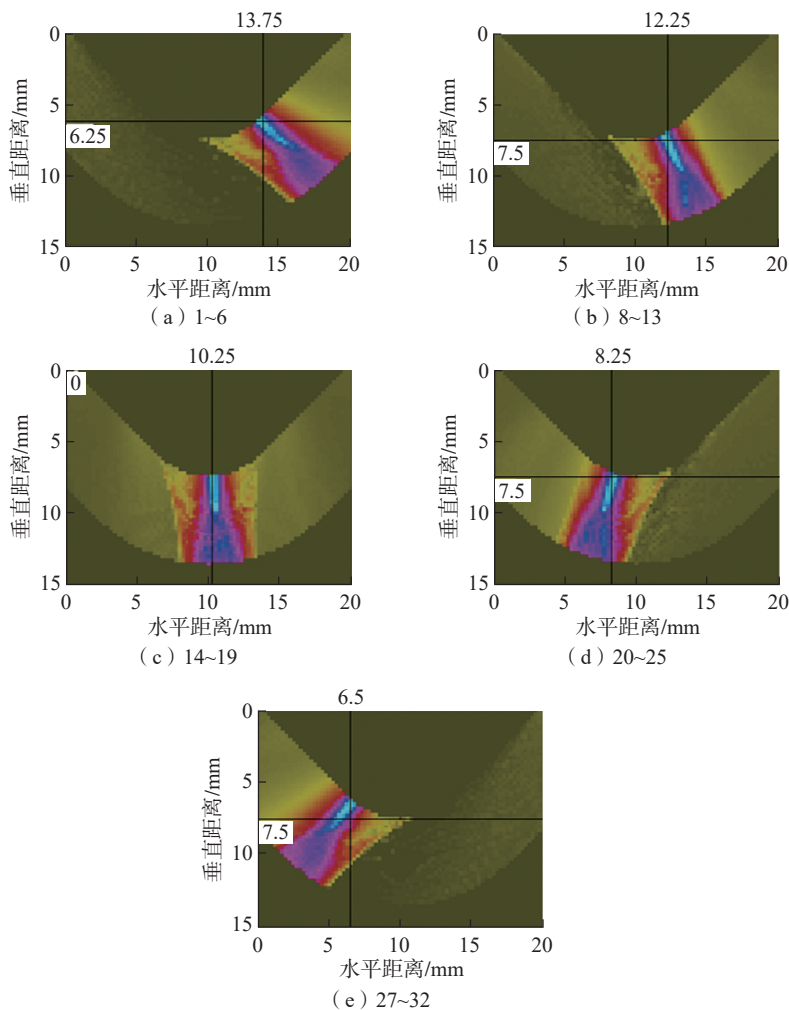


图 13 5 个不同角度虚拟阵元检测声场分布

Fig.13 Sound field distribution of five virtual array elements with different angles

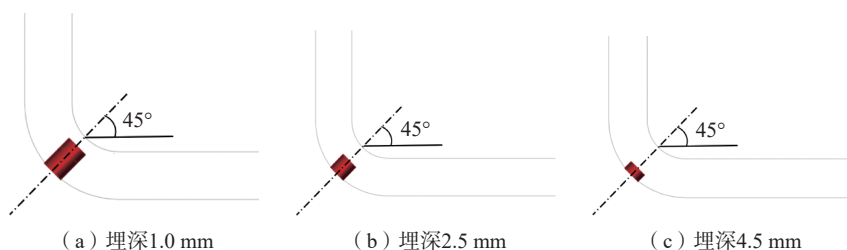


图 14 平底孔位置示意图

Fig.14 Schematic diagram of flat bottom hole position

益值偏大外(反射幅度偏低),其他3个平底孔增益值相差不大,最大差值为1.5 dB。观察75°平底孔扇形扫描图像,在平底孔显示上方的材料内部有杂乱信号显示,表明该处材料内部可能存在弥散性缺陷,导致声波发生衰减,从而造成该平底孔增益值偏高。

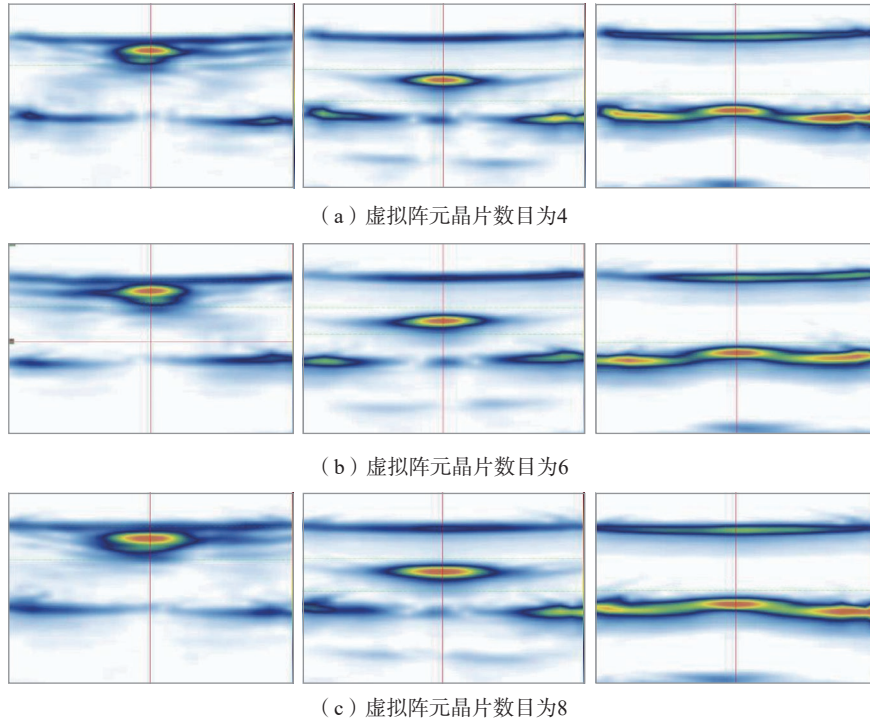


图 15 3种晶片数目虚拟阵元检测B扫描图

Fig.15 B-scan image of virtual array element detection for three types of chip numbers

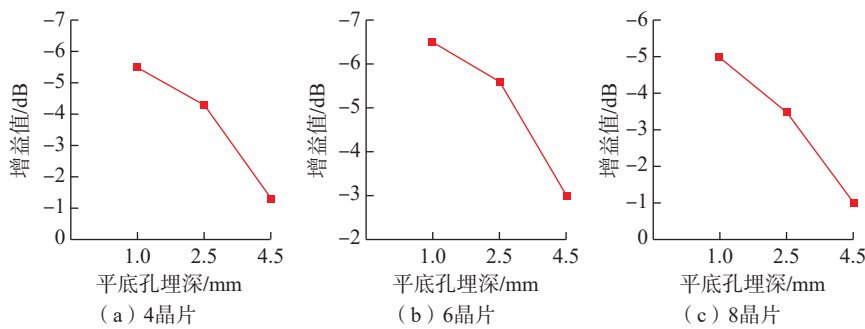


图 16 3种晶片数目虚拟阵元检测灵敏度曲线

Fig.16 Sensitivity curves of virtual array element detection for three types of chip numbers

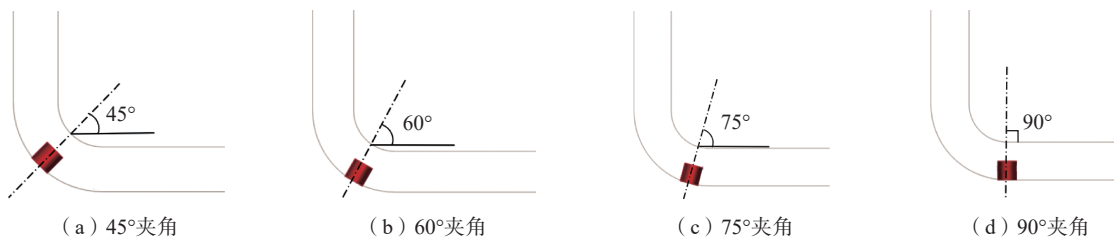


图 17 R区试样中平底孔与直角边对应关系示意图

Fig.17 Schematic diagram of relationship between the flat bottom hole and the right angle edge in R-zone specimens

该试验结果验证了2.4节“不同角度虚拟阵元声场分布相似”结论的合理性。

## 4 结论

本研究根据仿真和试验结果,可以得到以下结论。

(1) 圆弧阵列探头检测R区时,在沿R区圆弧方向和长度方向声场分布规律不同,必要时建议分别测量两个方向的声束宽度。

(2) 虚拟阵元晶片数目会影响声场分布,晶片数目越多,声场分布强弱差异越大,最大声场强度越强,且位置越靠近表面,6 dB声束宽度越大。

(3) 聚焦检测方式下,最大声场强度普遍高于非聚焦检测方式,6 dB声束宽度小于非聚焦声场。

(4) 弧形阵列探头不同角度虚拟探头产生声场分布基本一致,中心组晶片的最大声场强度最大。

(5) 经试验验证,采用超声相控阵方法,利用圆弧阵列探头,合理设置检测参数,可以有效检出R区不同角度、不同埋深、孔径约3 mm的平底孔人工缺陷。

## 参考文献

[1] 肇研,刘寒松.连续纤维增强高性能热塑性树脂基复合材料的制备与应用[J].材料工程,2020,48(8):49-61.

ZHAO Yan, LIU Hansong. Preparation and application of continuous fiber reinforced high-performance thermoplastic composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(8): 49-61.

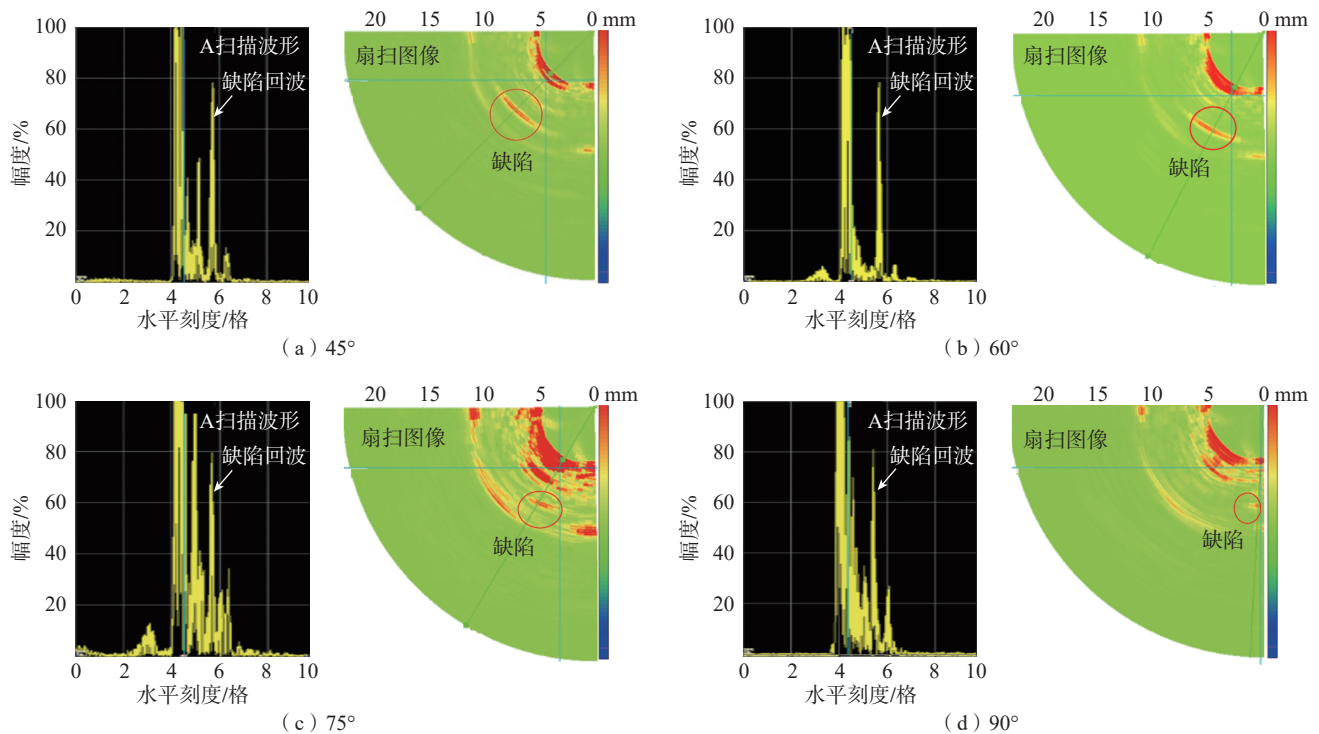


图 18 R 区试样中不同角度平底孔检测结果显示

Fig.18 Display of testing results for flat bottom holes at different angles in R-zone specimens

[2] 李军, 刘燕峰, 倪洪江, 等. 航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势[J]. 材料工程, 2022, 50(6): 49-60.

LI Jun, LIU Yanfeng, NI Hongjiang, et al. Application progress and development trend of resin matrix composites for aero engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(6): 49-60.

[3] NJUGUNA J. Lightweight composite structures in transport: Design, manufacturing, analysis and performance[M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2016.

[4] 陈巍. 先进航空发动机树脂基复合材料技术现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(5): 68-72, 92.

CHEN Wei. Status and development trends of polymer matrix composites on advanced aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 68-72, 92.

[5] 马绪强, 苏正涛. 民用航空发动机树脂基复合材料应用进展[J]. 材料工程, 2020, 48(10): 48-59.

MA Xuqiang, SU Zhengtao. Application progress of polymer matrix composites in civil turbofan aeroengine[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(10): 48-59.

[6] ROACH D. Use of focused pulse-echo ultrasonics for non-destructive inspection of thick carbon-carbon structures[J]. Insight-Non-

Destructive Testing and Condition Monitoring, 2006, 48(12): 743-750.

[7] KRAMB V A. Use of phased array ultrasonics for automated aerospace testing applications[J]. Materials Evaluation, 2007, 65(1): 67-73.

[8] HUANG J, QUE P W, JIN J H. A parametric study of beam steering for ultrasonic linear phased array transducer[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2004, 40(4): 254-259.

[9] DATTOMA V, WILLEM PANELLA F, PIRINU A, et al. Ultrasonic and thermographic studies for CFRP inspections with real and simulated defects[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 34: 224-234.

[10] LARIONOV V V, LIDER A M, DOLMATOV D O, et al. Ultrasonic testing for defects in complex shaped metal products[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2021, 57(5): 369-374.

[11] LECKEY C A C, ROGGE M D, RAYMOND PARKER F. Guided waves in anisotropic and quasi-isotropic aerospace composites: Three-dimensional simulation and experiment[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 385-394.

[12] FUENTES R, GARDNER P, MINEO C, et al. Autonomous ultrasonic inspection using Bayesian optimisation and robust outlier

analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145: 106897.

[13] 何方成, 王铮, 史丽军. 复合材料制件拐角部位超声检测技术[J]. 材料工程, 2011, 39(7): 80-84.

HE Fangcheng, WANG Zheng, SHI Lijun. Ultrasonic testing technique for the inspection of defects in the corner of composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, 39(7): 80-84.

[14] CASAVOLA C, PALANO F, DE CILLIS F, et al. Analysis of CFRP joints by means of T-pull mechanical test and ultrasonic defects detection[J]. Materials, 2018, 11(4): 620.

[15] ITO J, BIWA S, HAYASHI T, et al. Ultrasonic wave propagation in the corner section of composite laminate structure: Numerical simulations and experiments[J]. Composite Structures, 2015, 123: 78-87.

[16] 谢玲丽, 汪小凯, 韩星会, 等. 基于分布式激光超声的带筋构件R区缺陷检测方法[J]. 光子学报, 2023, 52(2): 19-28.

XIE Lingli, WANG Xiaokai, HAN Xinghui, et al. Defect detection method for R-zone of ribbed components using distributed laser ultrasonics[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2): 19-28.

[17] 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 inspection for the corner of composite components[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 688–692.

[18] 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 Zhongbing, ZHANG Song, QIAN Hengkui, 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.

[19] 史洪源, 张熠玮, 邵红亮. 碳纤维复合材料方杆R区的超声相控阵检测方法[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2019(8): 23–28.

SHI Hongyuan, ZHANG Yiwei, SHAO Hongliang. Ultrasonic phased array inspection method for the corner of carbon fiber composite square rod[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(8): 23–28.

[20] 周正干, 李文涛. 航空航天领域中先进超声检测技术的发展和应[用]. 航空制造技术, 2018, 61(19): 34–44.

ZHOU Zhenggan, LI Wentao. Development and application of advanced ultrasonic testing technology in aerospace[J]. Aeronautical

Manufacturing Technology, 2018, 61(19): 34–44.

[21] 宁宁, 王丹, 曲亚林, 等. 碳纤维加筋板的超声相控阵 C 扫描检测可靠性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(1): 11–15.

NING Ning, WANG Dan, QU Yalin, et al. Reliability of ultrasonic phased array C-scan testing for carbon fiber composite stiffened panels[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(1): 11–15.

通讯作者: 王铮, 高级工程师, 研究方向为复合材料和金属材料的无损检测。

## Simulation and Experimental Study on Ultrasonic Phased Array Inspection for R-Zone of Composite Material

WANG Song<sup>1</sup>, WANG Zheng<sup>2</sup>, XI Huan<sup>2</sup>

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**[ABSTRACT]** The conventional ultrasonic method for the R-zone of composite has a series of problems, such as reducing detection sensitivity caused by the incident sound beam not be perpendicular to the surface of the R-zone, difficulty in full coverage detection of the R-zone, and inability to evaluate the size of defects along the curvature direction of the R-zone. To solve the above issues, the ultrasonic phased array method was used to detect the R-zone of composite material, and the sound field distribution law in the R-zone was studied. The influence of the number of virtual probe on the detection sound field was analyzed. Through research, it has been found that the number of array element chips affects the sound field distribution. The more chips there are, the greater the difference in sound field distribution strength, the stronger the maximum sound field intensity, and the closer the position is to the surface, the larger the 6 dB sound beam width; Under the focusing detection method, the maximum sound field intensity is generally higher than that of the non focusing detection method, and the 6 dB sound beam width is generally smaller than that of the non focusing sound field; The distribution of sound field generated by virtual probes with different angles of arc array probes is basically consistent, and the maximum sound field intensity of the central group chip is the highest. Through experimental verification, the use of ultrasonic phased array method and the use of arc array probes with reasonable detection parameters can effectively detect artificial defects in flat bottomed holes with different angles, burial depths, and aperture of about 3 mm in the R-zone.

**Keywords:** Composite materials; R-zone; Simulation; Sound field; Ultrasonic phased array; Nondestructive testing

(责编 逸飞)