

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.23060101 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.23060101

引用格式: 张海燕, 黄强, 张辉, 等. 基于超声扩散场信号的近场缺陷非线性全聚焦成像[J]. 声学技术, 2025, 44(0): 1-7. [ZHANG Haiyan, HUANG Qiang, ZHANG Hui, et al. Nonlinear total focusing imaging of near-field defects based on ultrasonic diffuse field signals[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(0): 1-7.]

# 基于超声扩散场信号的近场缺陷非线性全聚焦成像

张海燕<sup>1,2</sup>, 黄强<sup>1</sup>, 张辉<sup>3</sup>, 朱文发<sup>3</sup>, 朱琦<sup>4</sup>

(1. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444; 2. 上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444;  
3. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620; 4. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444)

**摘要:** 文章提出一种基于扩散场信息的非线性全聚焦方法 (nonlinear total focusing method, NTFM), 解决了超声相控阵近场处缺陷检测时, 受盲区影响造成横向分辨率低的问题。在对铝合金板缺陷进行检测时, 靠近超声相控阵探头的缺陷信号淹没在盲区中。所提方法利用信号间的空间相干性, 实现对噪声的抑制, 达到削弱盲区的目的。利用中心频率为 0.5、1 MHz 的线形相控阵探头激发兰姆波, 对两块带有通孔缺陷的铝合金板进行实验, 获得直接采集信号与扩散场信号。对扩散场信号互相关处理后得到重建信号, 将重建信号与直接采集信号结合得到混合信号。对混合信号进行 NTFM 成像, 实现缺陷的可视化图像。实验结果表明: 与传统全聚焦成像法相比, NTFM 成像抑制了伪像, 提高了成像质量, 降低了漏检率。文中提出的方法为提高薄板材料近场处缺陷成像的横向分辨率提供了新思路。

**关键词:** 超声相控阵; 扩散场; 非线性全聚焦; 兰姆波

中图分类号: TB559

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-00-0001-07

## Nonlinear total focusing imaging of near-field defects based on ultrasonic diffuse field signals

ZHANG Haiyan<sup>1,2</sup>, HUANG Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>3</sup>, ZHU Wenfa<sup>3</sup>, ZHU Qi<sup>4</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai 200444, China; 3. School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 4. School of Mechatronic and Automation Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** A nonlinear total focusing method (NTFM) based on diffuse field information is proposed to solve the problem of low lateral resolution caused by the blind zone in near-field defect detection with ultrasonic phased array. While testing the defect of zirconium alloy plate, the defect signal close to the ultrasonic phased array probe is drowned in the blind zone. The proposed method uses the spatial coherence between signals to suppress noise and weaken the blind zone. In the experiment of two zirconium alloy plates with through-hole defects, the linear phased array with the center frequencies of 0.5 MHz and 1 MHz probes are used to excite the Lamb wave for obtaining the direct acquisition signals and diffuse field signals. After cross-correlation processing of the diffuse field signals, the reconstruction signal is obtained, and then combined with the direct acquisition signal to obtain a mixed signals. The NTFM of mixed signals is performed to obtain visualization of defects in zirconium alloy sheets. The experimental results show that compared with the traditional total focusing imaging method, the NTFM imaging suppresses artifacts, improves the imaging quality, and reduces the missed detection rate. The proposed method provides a new idea for improving the lateral resolution of near-field defect imaging of thin sheet materials.

**Key words:** ultrasonic phased array; diffuse field; nonlinear total focusing method; Lamb wave

## 0 引言

铝合金材料具有强度高、中子吸收率低、耐高温及耐腐蚀等特性, 在核工业领域有着广泛的应用

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-06-26

基金项目: 国家自然科学基金 (12174255、12104290、12374443) 资助项目

作者简介: 张海燕 (1970—), 女, 山东菏泽人, 博士, 教授, 研究方向为超声检测。

通信作者: 张海燕, E-mail: hyzh@shu.edu.cn

前景<sup>[1]</sup>。铝合金板状材料在复杂环境服役过程中, 难免会出现裂纹、孔洞等缺陷, 缺陷的存在将会对材料的力学性能产生极为不利的影 响, 进而影响系统的整体安全性。因此需要对铝合金板状材料进行检测, 及时发现缺陷, 避免重大安全事故的发生。超声无损检测具有检测能力强、安全性高、可用频率范围广等优点, 被广泛应用于材料内部缺陷的检测。

相控阵超声检测技术在超声无损检测领域得到了广泛应用, 相较于传统超声检测技术, 该技术具有操作简便、检测精度高、耗时短等特点<sup>[2-4]</sup>。

Holmes 等<sup>[5]</sup>针对超声相控阵全矩阵数据采集 (full matrix capture, FMC) 特点, 首次提出了全聚焦方法 (total focusing method, TFM) 进行成像, 研究表明与传统成像方法相比, TFM 成像具有高信噪比及优良检测精度。Saini 等<sup>[6]</sup>研究了结合合成孔径聚焦技术改进的 TFM 算法在不同条件下对表面裂纹的检测能力, 确定了可控参数与不可控参数会在一定程度上影响裂纹的检测效果。周正干等<sup>[7]</sup>考虑了声波在传播时的能量衰减, 提出了衰减校准系数对 TFM 成像进行修正, 校准后 TFM 图像能量分布更加均匀, 缺陷的检出率及缺陷定量精度明显提高。

超声波在薄板材料中的传播十分复杂, 经过模式转换、散射、反射等物理现象后, 会产生超声兰姆波, 利用兰姆波可对薄板材料中的缺陷进行检测和评估。近年来, 不少学者将 TFM 方法应用到兰姆波对板状结构的损伤检测中。Prado 等<sup>[8]</sup>提出了一种复合技术, 该技术在对不同兰姆波模式信号进行频散补偿后, 利用 TFM 生成用于损伤定位的图像。Liu 等<sup>[9]</sup>为了减小频散的影响, 在低频厚积条件下使用  $S_0$  模式兰姆波实现了 TFM 成像。在使用超声相控阵对近场处缺陷进行检测时, 表面直达波、初始激励、相邻阵元间的机械串扰等会对缺陷处的散射信号产生严重干扰, 此时直接对 FMC 采集到的信号进行 TFM 成像, 发现该区域受噪声干扰严重, 形成检测盲区<sup>[10-12]</sup>。针对此现象, Potter 等<sup>[13]</sup>利用扩散场信号之间的相关性, 对扩散场信号进行格林函数重建, 抑制了早期回波信号中的噪声, 增强了有用信号。然而, 由于超声相控阵阵元数是有限的, 格林函数重建的信号也会引入新的噪声, 严重时将影响缺陷检测<sup>[14]</sup>。

本文针对铝合金板的近场处缺陷检测, 利用超声波在各向同性介质中经过多次反射和散射形成的近似均匀分布的扩散场信号。在此基础上, 构建了扩散场信号重建矩阵, 并将其与直接采集的信号矩阵相结合, 形成了信号混合矩阵。为了实现更精确的成像, 在 TFM 成像的基础上提出了非线性全聚焦方法 (nonlinear total focusing method, NTFM)。

## 1 基于扩散场的非线性全聚焦成像

### 1.1 混合矩阵的建立

FMC 是一种数据采集方法, 该方法能获得更丰富的信号信息, 提高分辨率, 提高成像质量。对一个具有  $N$  个阵元的超声相控阵探头, 依次激励每个阵元, 所有阵元同时接收信号, 最终可得到

$N \times N$  组 A 扫信号。从零时刻开始采集的信号组成直接采集信号矩阵  $\mathbf{h}_{ij}(t)$ , 其中  $i, j$  分别表示对应编号的发射阵元和接收阵元。超声波在各向同性材料中经过一段时间的散射、反射后, 声场会近似均匀分布在材料中, 产生扩散场信号<sup>[15-16]</sup>。在阵元发射信号一段时间后, 按照 FMC 方式采集信号可得到扩散场信号矩阵  $\mathbf{d}_{ij}(t)$ 。有研究表明, 对采集到的扩散场信号进行互相关、求导操作, 然后求其统计平均值, 便可求得两阵元间声场的格林函数<sup>[17-18]</sup>。重建的格林函数全矩阵  $\mathbf{r}_{ij}(t)$  可通过式 (1) 求得:

$$\mathbf{r}_{ij}(t) = \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \int_{t_r}^{t_r+t_c} d_{si}(t) d_{sj}(t+\tau) dt \right] \quad (1)$$

式中:  $N$  表示相控阵阵元个数;  $t_r$  表示阵元产生激励后的间隔时间;  $t_c$  表示扩散场信号采集的时间长度。 $t_r$  需要根据实际扩散速率和信噪比来确定,  $t_r$  取小了无法满足扩散场的特性, 取大了不利于近场处信息恢复。 $t_c$  越大, 重建信号越能真实反映材料内部真实情况, 但处理数据时会大大增加处理时间。因此在选取  $t_c$  时, 需权衡处理时间与重建信号质量。

由于相控阵阵元个数的限制, 使得统计平均的次数有限, 进而造成重建信号存在瑕疵。重建信号能更好地反映近场信息, 但后部分时间的信号不如直接采集的信号好。因此, 可将重建信号的早期信息与直接采集信号的后期信息相结合, 充分利用两种信号的优势, 形成混合矩阵。这样就能得到更准确、更完整的成像信息, 从而提高成像的质量和可靠性<sup>[13]</sup>。混合矩阵  $\mathbf{m}_{ij}(t)$  为

$$\mathbf{m}_{ij}(t) = \alpha \mathbf{h}_{ij}(t) + \beta (1 - \alpha) \mathbf{r}_{ij}(t) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + e^{-\gamma(t-t_u)}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\sum_{k=1}^N |h_{kk}(t_b)|}{\sum_{k=1}^N |r_{kk}(t_b)|} \quad (4)$$

其中:  $t_u$  表示转换时间, 决定了重建信号  $\mathbf{r}_{ij}(t)$  与直接采集信号  $\mathbf{h}_{ij}(t)$  占混合矩阵信号的比例;  $t_b$  表示底部回波第一次出现时间;  $\gamma$  表示转换过程的平滑度参数。

### 1.2 非线性全聚焦成像

对混合矩阵信号进行处理, 得到对应的解析信号矩阵  $\mathbf{a}_{ij}(t)$ :

$$\mathbf{a}_{ij}(t) = \mathbf{m}_{ij}(t) + j\widehat{\mathbf{m}}_{ij}(t) = \mathbf{E}(t) e^{j\varphi(t)} \quad (5)$$

$$\widehat{\mathbf{m}}_{ij}(t) = \mathbf{m}_{ij}(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\mathbf{m}_{ij}(\tau)}{(t-\tau)} d\tau \quad (6)$$

$$\mathbf{E}(t) = \sqrt{\mathbf{m}_{ij}^2(t) + \widehat{\mathbf{m}}_{ij}^2(t)} \quad (7)$$

$$\varphi(t) = \arctan \frac{\widehat{m}_{ij}(t)}{m_{ij}(t)} \quad (8)$$

式中： $E(t)$  为解析信号包络，由同相分量  $m_{ij}(t)$  和正交分量  $\widehat{m}_{ij}(t)$  确定； $\varphi(t)$  为解析信号的瞬时相位； $j$  表示虚数单位。

对解析信号包络进行  $p$  次方根缩放，同时保持瞬时相位不变，得到：

$$\widehat{a}_{ij}(t) = \sqrt[p]{E(t)} e^{j\varphi(t)} \quad (9)$$

与传统 TFM 相似，NTFM 也需要将成像区域离散化为一系列网格点集。对经过  $p$  次方根缩放的解析信号进行求和，然后对求和结果取  $p$  次幂，最后取模，可得到成像区域任意点  $(x, z)$  的强度  $I(x, z)$ ：

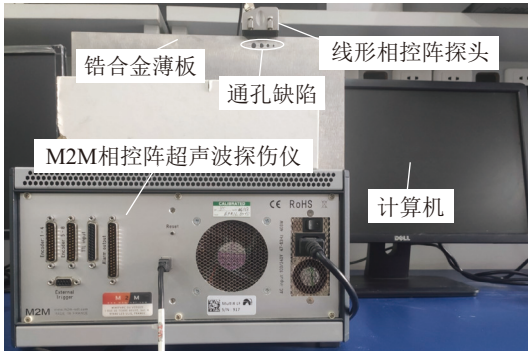
$$I(x, z) = \left| \left\{ \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \sum_{t=1}^N \widehat{a}_{tr}[t_r(x, z)] \right\}^p \right|, \quad p \geq 1 \quad (10)$$

$$t_r(x, z) = \frac{1}{c_p} \left[ \sqrt{(x-x_r)^2 + (z-z_r)^2} + \sqrt{(x-x_r)^2 + (z-z_r)^2} \right] \quad (11)$$

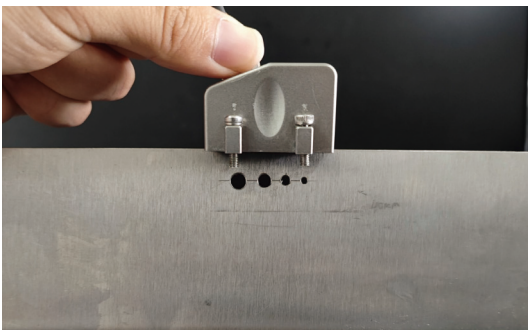
式中： $c_p$  为超声波在试样中的传播速度； $(x_r, z_r)$ 、 $(x_t, z_t)$  分别为发射阵元与接收阵元在笛卡尔坐标系中的坐标。

## 2 非线性全聚焦方法验证实验

实验装置如图 1(a) 所示。实验系统包括：商



(a) 实验系统



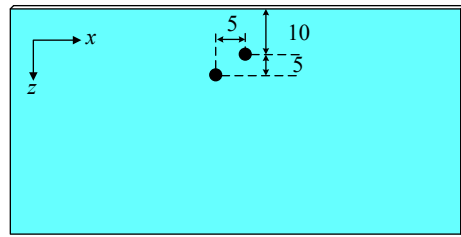
(b) 侧面垂直对称激发

图 1 实验装置图

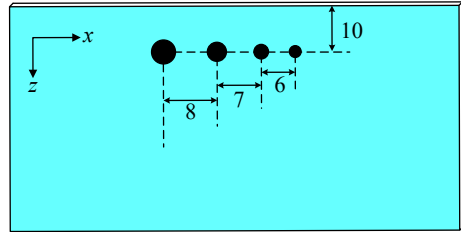
Fig.1 Photos of experimental device

用相控阵超声探伤仪 M2M(Multi2000, M2M Inc, Les Ulis, France) 及配套的软件 Multi2000、计算机、线形超声相控阵探头、钽合金薄板。实验使用了中心频率为 0.5 MHz 及 1 MHz 的线形相控阵探头，其阵元数为 16、阵元宽度为 1.8 mm、阵元中心间距为 2 mm。采样频率为 50 MHz 保持不变，激励电压为 70 V。图 1(b) 为侧面垂直对称激发装置图。

两块钽合金薄板试样 A、B 的缺陷尺寸如图 2 所示，其长、宽、高均为 300 mm×1 mm×150 mm。试样 A 分布着 2 个直径为 2 mm 的圆形通孔缺陷，通孔的圆心距上边缘的距离分别为 15 mm、10 mm，且两通孔横向中心距离、纵向中心距离均为 5 mm。试样 B 有 4 个圆心在同一水平线上的圆形通孔缺陷，直径分别为 5、4、3、2 mm，从左至右两相邻通孔圆心间距分别为 8、7、6 mm，通孔的圆心与上边缘的距离均为 10 mm。



(a) 试样 A



(b) 试样 B

图 2 实验所用钽合金板试样的缺陷尺寸 (单位: mm)

Fig.2 Size of defects in zirconium alloy plate specimens used in the experiment (unit: mm)

分别将中心频率为 0.5、1 MHz 的线形相控阵探头置于通孔上方同一位置，如图 1(b) 所示，利用 Rodriguez 在文献[19]采用的直接接触法，将超声相控阵置于被检试样缺陷的正上方，相控阵与试样通过耦合剂贴合，侧面垂直对称激发 S0 模式兰姆波。使用中心频率为 0.5 MHz 的探头时，频厚积为 0.5 MHz·mm，波速约为 3 400 m·s<sup>-1</sup>。使用中心频率为 1 MHz 的探头时，频厚积为 1 MHz·mm，波速约为 4 000 m·s<sup>-1</sup>。根据文献[20]对近场的研究，近场的最远距离可以通过式 (12) 计算：

$$d_N = \frac{a_T^2 f}{4c} \quad (12)$$



式中： $a_T$ 为超声探头的孔径； $f$ 为探头的中心频率； $c$ 为超声波在介质中的传播速度。实验所用中心频率为 0.5、1 MHz 的相控阵探头的孔径均为 31.8 mm。将相应数值代入式 (12)，得近场距离分别约为 37、63 mm，故试样 A、B 中的缺陷均在近场范围内。

采集数据时，将 M2M 相控阵探伤仪设置为 FMC 采集模式、采样频率为 50 MHz、信号窗口长度为 100  $\mu\text{s}$ ，得到由  $16 \times 16$  组数据组成的全矩阵数据。使用 1 MHz 相控阵探头对试样 A 进行检测，对采集到的信号进行处理。当发射阵元、接收阵元均为编号 8 时，结果如图 3 所示。由图 3(a) 可知直接采集的信号前期受噪声的干扰较严重。图 3(b) 为扩散场信号，信号采集时间窗口起始时间为 250  $\mu\text{s}$ 。图 3(c) 是扩散场信号互相关后的重建信号，与图 3(a) 对比可知，互相关后恢复的信号前期的噪声明显得到抑制，但是后期引入了新噪声。图 3(d) 为结合了重建信号与直接采集信号的混合信号，近场处缺陷信号质量得到提升，重建信号引入的噪声也得到削弱。

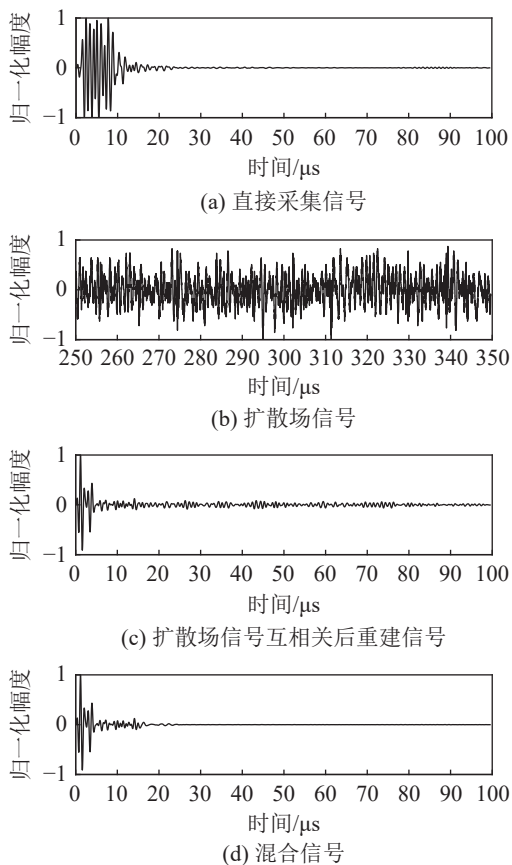
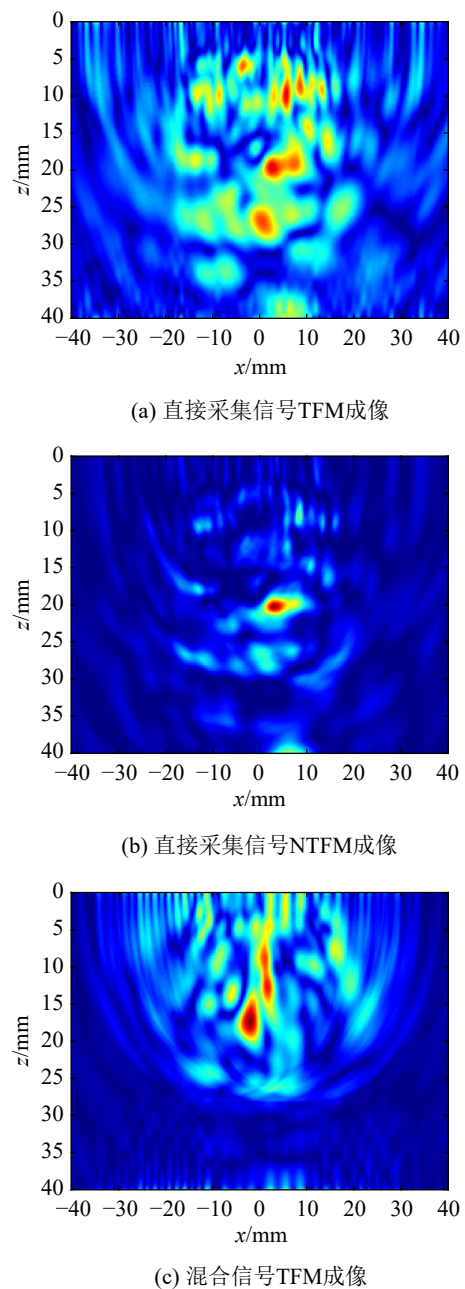


图 3 中心频率为 1 MHz 探头的 8 号阵元发射、接收时，试样 A 的探测信号波形

Fig.3 Waveforms of detection signals of the specimen A when the 8th element of the probe array with the center frequency of 1 MHz transmits and receives

### 3 成像结果与分析

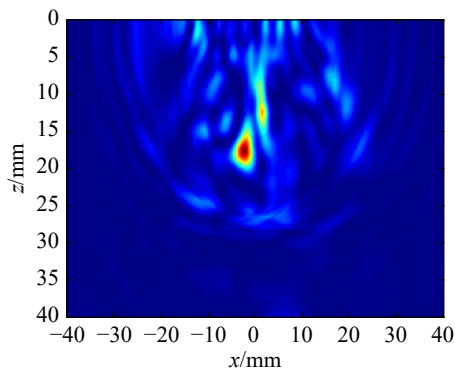
采用中心频率为 0.5 MHz 的探头对试样 A 进行超声检测，得到的 TFM 和 NTFM 的成像对比如图 4 所示。直接采集信号  $h_{ij}(t)$  的 TFM 成像如图 4(a) 所示，近场处缺陷散射信号受噪声影响严重，成像结果不能正确显示缺陷位置。直接采集信号  $h_{ij}(t)$  的 NTFM 成像结果如图 4(b) 所示，图中噪声明显得到抑制，伪像减少，但依然无法反映真实缺陷的位置。图 4(c)、4(d) 分别为混合信号的 TFM 与 NTFM 成像结果，与图 4(a) 相比，图 4(c) 中的伪像明显减少，对缺陷的分辨率有所提高，但依然无法有效



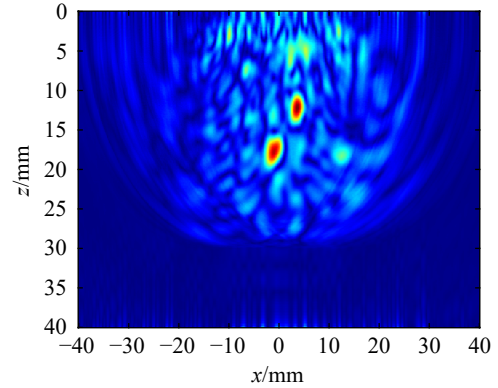
(a) 直接采集信号TFM成像

(b) 直接采集信号NTFM成像

(c) 混合信号TFM成像



(d) 混合信号NTFM成像



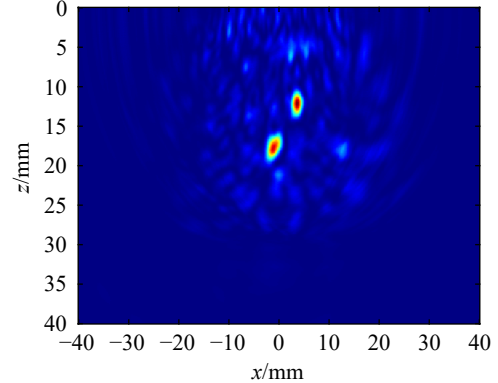
(c) 混合信号TFM成像

图4 中心频率为 0.5 MHz 探头对试样 A 进行检测时 TFM 和 NTFM 的成像对比

Fig.4 Comparison of imaging results with TFM and NTFM for the detection of specimen A by the probe with the center frequency of 0.5 MHz

反映实际缺陷情况。图 4(d) 相比图 4(c) 成像质量明显提高，成像结果较好，还原了近场处缺陷。

保持其他实验条件不变，采用中心频率为 1 MHz 的探头对试样 A 进行检测，成像结果如图 5 所示。直接采集信号的 TFM、NTFM 成像分别如图 5(a)、5(b)，混合信号 TFM、NTFM 成像分别如图 5(c)、5(d)。从图 5(c) 能明显看出试样 A 中存在两处缺陷，但伪像的存在对通孔缺陷数量的判断造成了干扰。与图 5(c) 相比，图 5(d) 中缺陷成像中



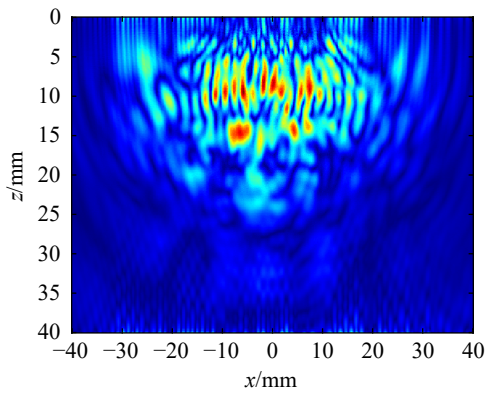
(d) 混合信号NTFM成像

图5 中心频率为 1 MHz 的探头对试样 A 进行检测时 TFM 和 NTFM 的成像结果对比

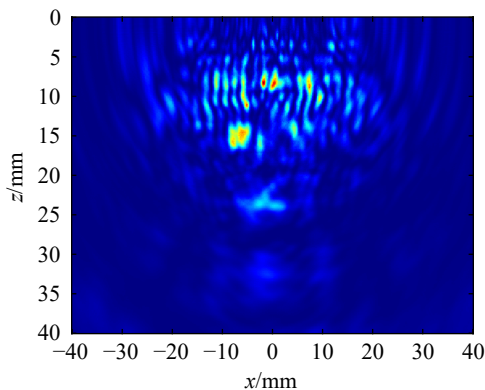
Fig.5 Comparison of imaging results with TFM and NTFM for the detection of specimen A by the probe with the frequency of 1 MHz

的伪像得到了抑制，减少了对试样 A 中缺陷判断的影响，更加符合实际情况。

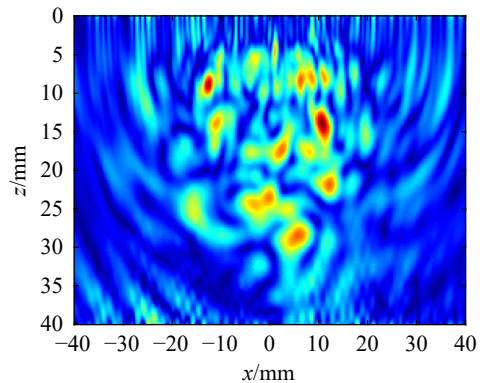
按照对试样 A 的检测手段，对试样 B 也进行类似的操作。采用中心频率为 0.5 MHz 的探头对试样 B 进行检测，得到直接采集信号与混合信号的 TFM、NTFM 成像结果如图 6 所示。采用中心频率为 1 MHz 的探头对试样 B 进行检测，得到的 TFM、NTFM 成像如图 7 所示。由图 6(d) 可知，在使用中心频率为 0.5 MHz 的探头检测时，混合



(a) 直接采集信号TFM成像



(b) 直接采集信号NTFM成像



(a) 直接采集信号TFM成像

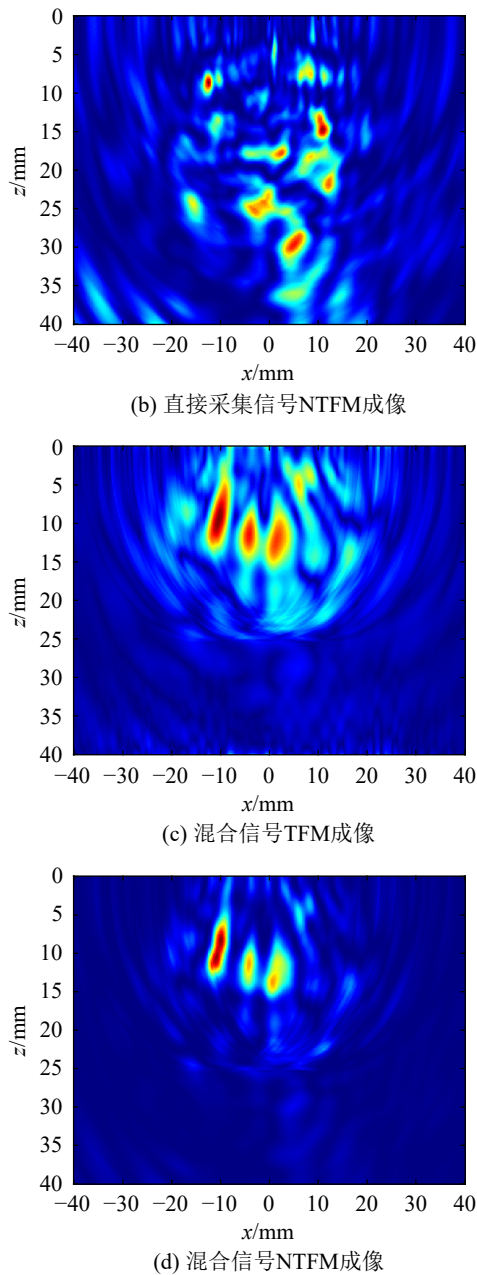


图6 中心频率为0.5 MHz的探头对试样B进行检测时TFM和NTFM的成像结果对比

Fig.6 Comparison of imaging results with TFM and NTFM for the detection of specimen B by the probe with the center of frequency of 0.5 MHz

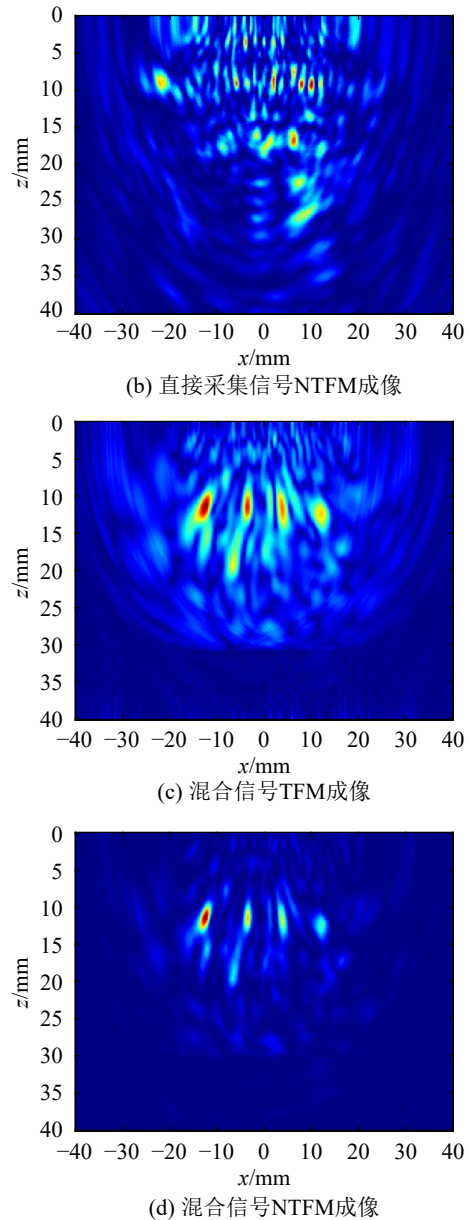
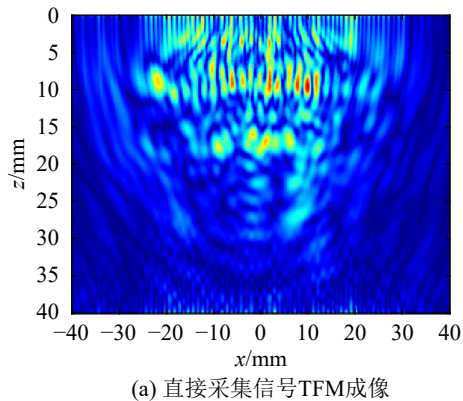


图7 中心频率为1 MHz的探头对试样B进行检测时TFM和NTFM的成像结果对比

Fig.7 Comparison of imaging results with TFM and NTFM for the detection of specimen B by the probe with the center frequency of 1 MHz

信号 NTFM 成像只显示了3个通孔缺陷,不能完全显示试样B中缺陷的真实情况。如图7(d)所示,当使用中心频率为1 MHz的探头检测时,试样B中的4个通孔缺陷均能完全显示,缺陷成像形状也更接近圆形。观察图4(d)、5(d)、6(d)、7(d)成像结果可知,使用中心频率为1 MHz的探头时混合信号 NTFM 成像结果的质量更高、可靠性更好。

## 4 结论

本文利用中心频率为0.5 MHz与1 MHz的超



声相控阵探头激励出  $S_0$  模式的兰姆波, 对两块带有通孔缺陷的铝合金薄板近场处通孔缺陷进行超声检测, 受实验系统非线性效应信号影响, 直接采集信号中通孔缺陷散射信号受噪声干扰严重。本文将采集到的扩散场信号进行互相关处理得到重建信号, 并将其与直接采集信号结合, 得到混合信号。然后采用本文提出的 NTFM 成像方法对直接采集信号和混合信号进行成像, 并与 TFM 成像方法进行对比, 得出以下结论:

(1) 两种探头直接采集信号的 TFM 成像均不能对近场处通孔缺陷有效成像, 对混合信号使用 TFM 成像方法进行后处理, 能在一定程度对缺陷进行成像, 但效果不佳。

(2) 相比 TFM 成像, 对混合信号使用 NTFM 成像算法进行后处理, 伪像受到明显抑制, 近场处缺陷成像质量、横向分辨率得到显著提高, 更好地反映了缺陷真实情况。

(3) 中心频率为 1 MHz 的探头对缺陷的检测效果优于 0.5 MHz 探头的检测效果, 得到的缺陷成像形状与实际更加匹配, 成像质量和准确度更好。

#### 参 考 文 献

- [1] 贾豫婕, 林希衡, 邹小伟, 等. 铝合金的研发历史、现状及发展趋势[J]. *中国材料进展*, 2022, **41**(5): 354-370.  
JIA Yujie, LIN Xiheng, ZOU Xiaowei, et al. Research & development history, status and prospect of zirconium alloys[J]. *Materials China*, 2022, **41**(5): 354-370.
- [2] BAI Z L, CHEN S L, XIAO Q Y, et al. Compressive sensing of phased array ultrasonic signal in defect detection: Simulation study and experimental verification[J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, **17**(3): 434-449.
- [3] TAHERI H, DU J, DELFANIAN F. Experimental observation of phased array guided wave application in composite materials[J]. *Materials Evaluation*, 2017, **75**(10): 1308-1316.
- [4] ZHANG H Y, ZHANG J Y, FAN G P, et al. The auto-correlation of ultrasonic lamb wave phased array data for damage detection[J]. *Metals*, 2019, **9**(6): 666.
- [5] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. *NDT & E International*, 2005, **38**(8): 701-711.
- [6] SAINI A, FELICE M V, FAN Z, et al. Optimisation of the half-skip total focusing method (HSTFM) parameters for sizing surface-breaking cracks[J]. *NDT & E International*, 2020, **116**: 102365.
- [7] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. *机械工程学报*, 2015, **51**(10): 1-7.  
ZHOU Zhenggan, PENG Di, LI Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, **51**(10): 1-7.
- [8] PRADO V T, HIGUTI R T, KITANO C, et al. Lamb mode diversity imaging for non-destructive testing of plate-like structures[J]. *NDT & E International*, 2013, **59**: 86-95.
- [9] LIU Z H, SUN K M, SONG G R, et al. Damage localization in aluminum plate with compact rectangular phased piezoelectric transducer array[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, **70**: 625-636.
- [10] HERNÁNDEZ Á, UREÑA J, MAZO M, et al. Reduction of blind zone in ultrasonic transmitter/receiver transducers[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, **133**(1): 96-103.
- [11] LIU X X, CHEN X Y, LE X H, et al. Reducing ring-down time of pMUTs with phase shift of driving waveform[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, **281**: 100-107.
- [12] HAN Y, YANG K J, CHEN J, et al. Ultrasonic imaging through reverberation media[J]. *Ultrasonics*, 2023, **131**: 106959.
- [13] POTTER J N, WILCOX P D, CROXFORD A J. Diffuse field full matrix capture for near surface ultrasonic imaging[J]. *Ultrasonics*, 2018, **82**: 44-48.
- [14] ZHANG H Y, LIU Y Q, FAN G P, et al. Sparse-TFM imaging of lamb waves for the near-distance defects in plate-like structures[J]. *Metals*, 2019, **9**(5): 503.
- [15] WEAVER R, LOBKIS O. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field: pulse-echo using thermal phonons[J]. *Ultrasonics*, 2002, **40**(1-8): 435-439.
- [16] SNIEDER R, SLOB E, WAPENAAR K. Lagrangian Green's function extraction, with applications to potential fields, diffusion and acoustic waves[J]. *New Journal of Physics*, 2010, **12**(6): 063013.
- [17] WEAVER R L, LOBKIS O I. Ultrasonics without a source: thermal fluctuation correlations at MHz frequencies[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **87**(13): 134301.
- [18] 张海燕, 徐梦云, 张辉, 等. 利用扩散场信息的超声兰姆波全聚焦成像[J]. *物理学报*, 2018, **67**(22): 286-292.  
ZHANG Haiyan, XU Mengyun, ZHANG Hui, et al. Full focal imaging of ultrasonic Lamb waves using diffuse field information[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(22): 286-292.
- [19] RODRIGUEZ S, DESCHAMPS M, CASTAINGS M, et al. Guided wave topological imaging of isotropic plates[J]. *Ultrasonics*, 2014, **54**(7): 1880-1890.
- [20] 孙芳, 曾周末, 靳世久, 等. 超声相控阵近场偏转与聚焦离散点源声场仿真[J]. *系统仿真学报*, 2013, **25**(5): 1108-1112.  
SUN Fang, ZENG Zhoumo, JIN Shijiu, et al. Sound-field of discrete point sources simulation on deflecting and focusing of near-field of ultrasonic phased array[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, **25**(5): 1108-1112.