

引用格式: 庄泽宇, 廉国选, 王小民. 基于水平分置线性双阵列的超声全聚焦成像方法在粗晶材料检测中的应用[J]. 声学技术, 2022, 41(3): 355-362.
[ZHUANG Zeyu, LIAN Guoxuan, WANG Xiaomin. Application of ultrasonic total focusing method in the detection of grained materials based on a horizontal dual linear array setup[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(3): 355-362.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.03.007

基于水平分置线性双阵列的超声全聚焦成像方法 在粗晶材料检测中的应用

庄泽宇^{1,2}, 廉国选¹, 王小民^{1,2}

(1. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对粗晶材料超声检测信噪比低的问题, 提出了一种水平分置线性双阵列超声成像方法。将两个线阵超声换能器沿直线水平分置在待检区域表面两侧, 用收发分离的信号采集模式, 一侧激发, 另一侧记录各通道数据, 进行聚焦成像。相比单阵列和同位置双线阵检测, 文中的方法有效地减少了背向散射信号对缺陷信号的干扰, 提高了成像信噪比。在粗晶铜质试块上的成像实验结果表明, 当缺陷距离阵列较近时, 文中的方法优于单阵列和同位置双线阵方法, 成像信噪比提高约 5~10 dB; 当缺陷距离阵列较远时, 单阵列模式和同位置双线阵检测方法失效, 但文中的方法依然可以识别缺陷。文中的研究为粗晶材料的超声检测提供了一种可行的方案。

关键词: 超声检测; 阵列成像; 粗晶材料; 双阵列

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-03-0355-08

Application of ultrasonic total focusing method in the detection of grained materials based on a horizontal dual linear array setup

ZHUANG Zeyu^{1,2}, LIAN Guoxuan¹, WANG Xiaomin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ultrasonic testing is difficult to detect flaws in grained materials because of the low flaw signal-to-grain noise ratio. In this paper, an ultrasonic imaging method based on a horizontal dual linear array (HDLA) setup is proposed. The two linear arrays are arranged on both sides of the surface of the area to be detected. One of the transducer arrays excites the ultrasonic wave, while the other records the data of each channel, and finally focused imaging is performed. Compared with the single array and the one-side dual linear arrays (DLA) setup modes, this method effectively reduces the interference of strong backscattered signals in grained materials and improves the signal to noise ratio (SNR) of images. The imaging experimental results on grained copper samples show that the imaging SNR of the proposed method is improved by about 5~10 dB compared with the other two modes of single array and DLA, when the flaw is close to the array. When the flaw is far away from the array the single array mode and DLA mode fail, however, the HDLA method can still identify the flaw. This method provides a possible scheme for ultrasonic testing of grained materials.

Key words: ultrasonic nondestructive testing; array imaging; grained materials; dual linear array

0 引言

奥氏体钢、钛合金和各种复合材料由于其优秀的物理化学特性, 已被广泛地应用于工业中, 如制造一些承压部件或容器。对这类部件定期进行无损检测, 对保障其安全运行十分重要, 超声检测是不

可缺少的检测方法之一^[1-2]。超声波在这类材料中传播时, 材料的微观结构会对超声产生较强的散射, 使得检测的信噪比严重下降, 影响缺陷检出的可靠性^[3]。

提高超声检测信噪比的方法分两大类。一类是对时域信号进行滤波处理, 由于晶粒噪声对声波频率较敏感, 选用较低频段的超声信号进行检测能有效减少结构噪声, 但会使检测分辨率降低。结构噪声与缺陷回波在相同的频带内, 常规的多次平均、带通滤波等方法难以奏效。为此, 学者们提出了一些信号处理方法, 如分裂谱法、小波变换、匹配追踪^[4-6]等。这类方法对参数设置较为敏感, 实践中一

收稿日期: 2021-12-17; 修回日期: 2022-01-14

基金项目: 船舶建造焊缝质量数字化检测技术资助项目。

作者简介: 庄泽宇(1992-), 男, 福建福州人, 博士研究生, 研究方向为超声阵列成像检测。

通信作者: 廉国选, E-mail: lian@mail.ioa.ac.cn

般需要多次试验选取最佳值。另一类是利用空间相干叠加,当换能器位置改变时,结构噪声信号相对于缺陷信号的振幅和相位变化较大。利用这一特性,采集不同方向的缺陷回波并进行波束形成或聚焦成像,一定程度上能提高缺陷的信噪比和检出率,例如超声合成孔径成像^[7]、阵列全聚焦成像算法(Total Focusing Method, TFM)^[8]等。

常规的阵列聚焦算法是线性算法,通过相干叠加提高缺陷信号的信噪比,但一部分结构噪声也会被增强,形成伪像。声波的多重散射效应也会在成像时产生较强的斑点噪声,干扰缺陷的识别^[9]。一些学者在常规成像算法的基础上,利用信号中的相位信息对成像结果进行非线性加权,可以提高成像信噪比,如相位相干成像算法^[10]。但这类非线性的加权处理方式仍需要谨慎地选择加权因子,否则易导致图像失真^[11]。

晶粒的背向散射和多重散射是结构噪声的主要来源,这类声波能量会随着发射换能器和接收换能器距离的增加而降低^[12]。因此,将阵列进行收发分离成为一种解决方案。目前,研究人员开发了双线阵换能器(Dual Linear Arrays, DLA)和双矩阵换能器(Dual Matrix Arrays, DMA)^[13]。DLA 可看作是传统双晶片超声换能器的阵列化方案,能削弱界面波对成像的影响,但只能在某一深度才能达到最好的聚焦效果。DMA 采用面阵设计,可以小范围调整聚焦深度。但在阵元数一定的情况下,难以同时兼顾面阵两个方向的偏转、聚焦性能。例如常见的 32 通道 DLA 换能器一侧为 16 阵元线阵,而 64 通道 DMA 换能器一侧的面阵单元分布为 8×4 方式,即沿成像平面方向只有 8 个阵元。

本文提出一种水平分置线性双阵列(Horizontal Dual Linear Arrays, HDLA)成像检测方法,利用在水平方向上具有一定间隔的两个阵列,一发一收采集超声信号。相比 DLA 和 DMA,阵列间距更大,在成像平面具有更好的聚焦性能。同时,使用鲁棒性较强的 TFM 算法,避免加权参数的选择问题。此方法在原始信号层面上减少了晶粒背向散射和多重散射噪声,削弱了其对缺陷信号的影响,有效地提高了粗晶材料超声阵列成像的信噪比。

1 原 理

1.1 粗晶材料的超声散射

如图 1(a)所示,换能器阵元 T 向粗晶材料中发射超声波时,发射阵元附近区域的声波能量很高,晶粒之间有强烈的多重散射效应。接收阵元与发射

阵元距离越近,接收到的多重散射波越强,这类干扰信号最终会表现为成像结果中的斑点噪声。同时,如图 1(b)所示,晶粒粗大导致超声背散射效应明显。散射波强度与入射角和散射角的夹角 φ 相关,散射波的能量主要分布在小角度范围。因此,将阵列进行收发分离可以降低多重散射和背向散射噪声对缺陷信号的影响。

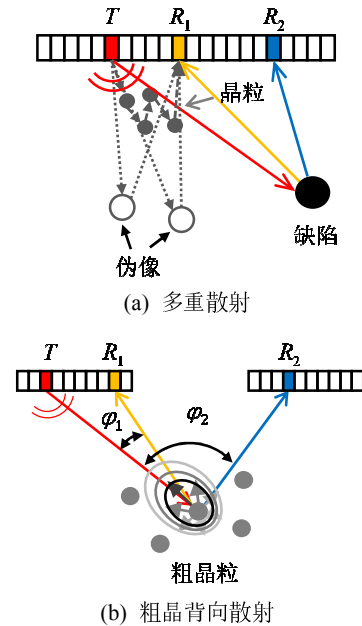


图 1 粗晶材料超声散射示意图
Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic scattering of grained materials

1.2 超声检测模型

图 2 为 HDLA 超声检测模型,阵列换能器放置在工件上方左右两侧,分别记为阵列 1、阵列 2。两个阵列参数一致,阵元数均为 N_e ,相邻阵元中心间距为 d 。定义阵列 1 最右侧阵元中心到阵列 2 最左侧阵元的中心的距离为阵列间距 D_{12} 。如图 2 所示,以两阵列的对称中心为原点 O ,定义二维坐标系 xOz ,阵列探头的阵元沿 x 轴排布, z 轴与探头辐射面和工件表面的法线方向一致。工件的纵波声速为 c ,本文仅考虑工件中单一的纵波模式。使用全矩阵采集(Full Matrix Capture, FMC)的信号获取方式,即每个阵元依次激发并同时采集所有通道数据。接收到回波信号表示为 $r(t, x_r, x_t)$,其中 x_r 、 x_t 分别表示接收阵元和发射阵元的横坐标。

根据发射、接收阵元所属阵列的不同,可将 FMC 数据 $r(t, x_r, x_t)$ 分为 4 个部分。分别是阵列 1 激发阵列 1 接收($x_r < 0, x_t < 0$)、阵列 1 激发阵列 2 接收($x_r < 0, x_t > 0$)、阵列 2 激发阵列 1 接收($x_r > 0, x_t < 0$)和阵列 2 激发阵列 2 接收($x_r > 0, x_t > 0$); 分别记为 $r_{11}(t, x_r, x_t)$ 、 $r_{12}(t, x_r, x_t)$ 、 $r_{21}(t, x_r, x_t)$ 和 $r_{22}(t, x_r, x_t)$ 。

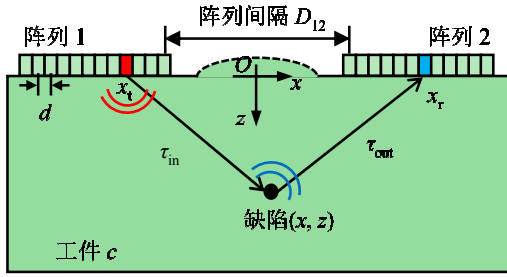


图2 HDLA 超声检测方式示意图

Fig.2 Schematic diagram of HDLA ultrasonic testing model

根据声场互易原理，回波信号 r_{12} 与 r_{21} 是对称的，即所得声场信息相同。而 r_{11} 和 r_{22} 是对成像区域分别从左侧(阵列 1)和右侧(阵列 2)获得缺陷信息，二者并无本质差别。因此，我们研究基于数据 r_{11} 的收发合置的单阵列成像和基于数据 r_{12} 的水平分置双阵列(HDLA)成像。

为对比 DLA 检测方法，本文设计了如图 3 所示的 DLA 超声检测模型。阵列 1 与阵列 2 分别对称地置于楔块两个斜面上。楔块两个斜面的法线均与 x 轴垂直，通过设计楔块的角度以及高度，使双阵列声波路径在工件内缺陷处重合。使阵列 1 依次激发，同时阵列 2 记录各通道数据，数据可表示为 $r_{DLA}(t, x_r, x_t)$ 。

1.3 TFM 成像算法

记 τ_{in} 为声波从发射阵元 $(x_t, 0)$ 到达缺陷 (x, z) 的时间， τ_{out} 为缺陷散射波到接收阵元 $(x_r, 0)$ 的时间。根据图 2 几何关系可得：

$$\tau_{in} = \sqrt{(x - x_t)^2 + z^2} / c, \tau_{out} = \sqrt{(x - x_r)^2 + z^2} / c \quad (1)$$

将 FMC 中与成像点相对应的延时的数据进行叠加，得到单阵列 TFM 成像结果 I_s 和 HDLA 成像结果 I_d ，即：

$$I_s(x, z) = \sum_{x_t} \sum_{x_r} r_{11}(\tau_{in} + \tau_{out}, x_r, x_t) \quad (2)$$

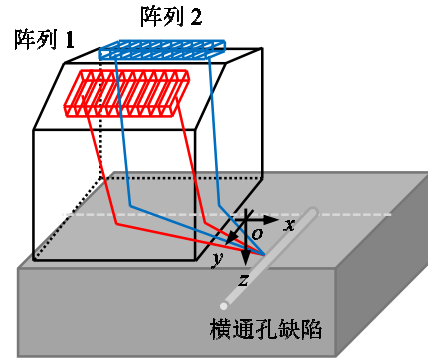
$$I_d(x, z) = \sum_{x_t} \sum_{x_r} r_{12}(\tau_{in} + \tau_{out}, x_r, x_t) \quad (3)$$

DLA 模式下，单阵元发射声波为柱面波。根据图 3(b)侧视图，可按二维平面双层介质模型(如图 4 所示)计算声传播路径。其中，阵元距界面高度为 L_1 ，楔块声速为 c_1 ，工件内深度坐标为 $\tilde{z}$ 。声传播时间 τ_{in} 、 τ_{out} 可由 Snell 定律或费马原理计算得到。

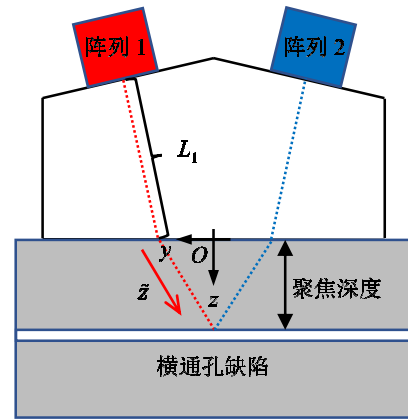
参照对比单线阵模式(图 2)，根据本文中缺陷位置，定义缺陷回波到达 DLA 最右侧阵元在工件表面的折射点到缺陷的水平距离为 $D_{12}/2$ 。

将 $r_{DLA}(t, x_r, x_t)$ 中与成像点相对应的延时的数据叠加，得到 DLA 的 TFM 成像结果 I_{DLA} ：

$$I_{DLA}(x, \tilde{z}) = \sum_{x_t} \sum_{x_r} r_{DLA}(\tau_{in} + \tau_{out}, x_r, x_t) \quad (4)$$



(a) 立体图



(b) 侧视图

图3 DLA 超声检测方式示意图

Fig.3 Schematic diagram of DLA ultrasonic testing model

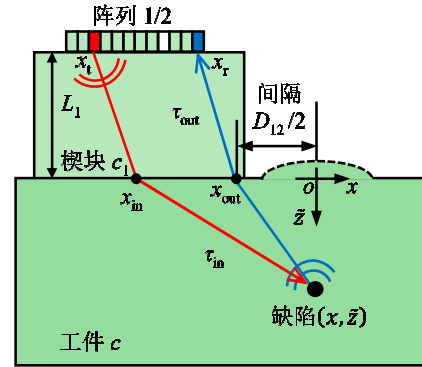


图4 DLA 声程计算

Fig.4 Acoustic path calculation for DLA ultrasonic testing mode

1.4 成像结果的评价方法

对成像结果的评价分为分辨率和信噪比两个方面。首先，对图像中缺陷峰值进行归一化处理(单位为 dB)：

$$I_{dB}(x, z) = 20 \lg \frac{I(x, z)}{\max \{I_{defect}\}} \quad (5)$$

横向分辨率 R_h 、纵向分辨率 R_v 及阵列性能指标 (Array Performance Indicator, API)^[8] I_{AP} ，计算方法为

$$\begin{cases} R_h = N_h \Delta x / \lambda_c \\ R_v = N_v \Delta z / \lambda_c \\ I_{AP} = N_{API} \Delta x \Delta z / \lambda_c^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中： N_h 、 N_v 分别表示缺陷峰值所在位置的横向、纵向上像素幅值大于-6 dB 的像素个数， Δx 、 Δz 分别表示横向、纵向的像素大小， N_{API} 表示缺陷峰值附近幅值大于-6 dB 的像素个数， λ_c 表示信号中心频率对应声波波长。

信噪比的计算方法为缺陷峰值(单位为 dB)减去缺陷附近区域的噪点峰值(单位为 dB)。

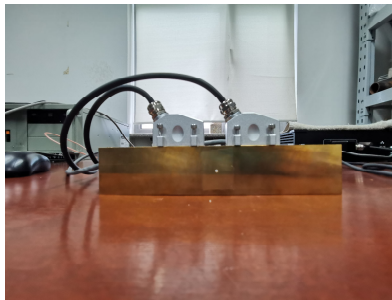
2 试验及分析

2.1 试验设置

试验装置包括相控阵主机、两个参数一致的超声阵列换能器(参数见表 1)和计算机(Inter Core i7-9750H 2.6GHz)。实验试块(如图 5 所示)包括：铜质试块 A(细晶)、铜质试块 B(粗晶)。两个铜质试块的纵波声速均为 $4\,500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，高度为 40 mm，长度为 200 mm，正中心均有一半径为 1 mm 的横通孔缺陷。

表 1 阵列换能器参数
Table 1 Parameters of phased array

阵元数	阵元宽度/ mm	阵元间距/ mm	中心频率/ MHz	-6 dB 信号 带宽/MHz
64	0.5	0.6	5	3~7



(a) 试块 A(细晶)



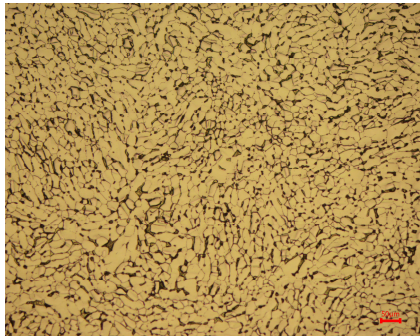
(b) 试块 B(粗晶)

图 5 试块照片

Fig.5 Photos of specimens

2.2 试样金相

为获得两个铜质试块的晶粒大小，对两块试样进行金相实验，并统计晶粒度。首先，从铜试块 A、B 中截取试样，使用 P180-P2500 碳化硅砂纸逐级进行研磨；而后，先使用 YS 抛光布配合 $3\mu\text{m}$ - $1\mu\text{m}$ 多晶金刚石抛光液对试样进行粗抛，再使用 ET 抛光布配合 50 nm 二氧化硅抛光液进行精抛；最后使用腐蚀液(配比为三氯化铁 3 g、盐酸 2 ml、无水乙醇 96 ml 的混合液)进行腐蚀，并用显微镜观察，得到如图 6 所示金相照片。



(a) 试块 A(细晶)



(b) 试块 B(粗晶)

图 6 试块金相照片

Fig.6 Metallographic photos of specimens

由图 6 可以观察到，试块 A 晶粒较为细密，按照枝晶形态排列；试块 B 的金相结构为铸态， α 相呈针状在 β 基体上析出。使用 GB/T6394-2017 中的直线截点法评定试样的平均晶粒度，得到试块 A 平均晶粒度为 $25.87\mu\text{m}$ ，试块 B 中 α 相的平均直径约为 $82.81\mu\text{m}$ 。

2.3 成像结果与分析

2.3.1 细晶试块 A

对试块 A 使用单阵列、DLA 和 HDLA 三种方法采集 FMC 数据， G 取 20mm，使用式(2)、(3)、(4)进行 TFM 成像。成像范围横向 x 取 $(-10,10)$ 、深度方向 z 取 $(10,30)$ ，单位 mm，图像像素大小为 $\Delta x = \Delta z = 0.1\text{mm}$ 。并根据式(5)，以位于图像正中

(0, 20) 的缺陷峰值，分别进行归一化处理，单位为 dB，成像显示范围为-20~0 dB，结果如图 7 所示。

可以看出，三种成像方法对细晶试块 A 中央的横通孔缺陷均能正确成像。其中，单阵列成像分辨率更高、像点更小，DLA 次之。HDLA 模式能同时接收到圆孔上下两端的衍射信号，并在成像结果中显示出来。

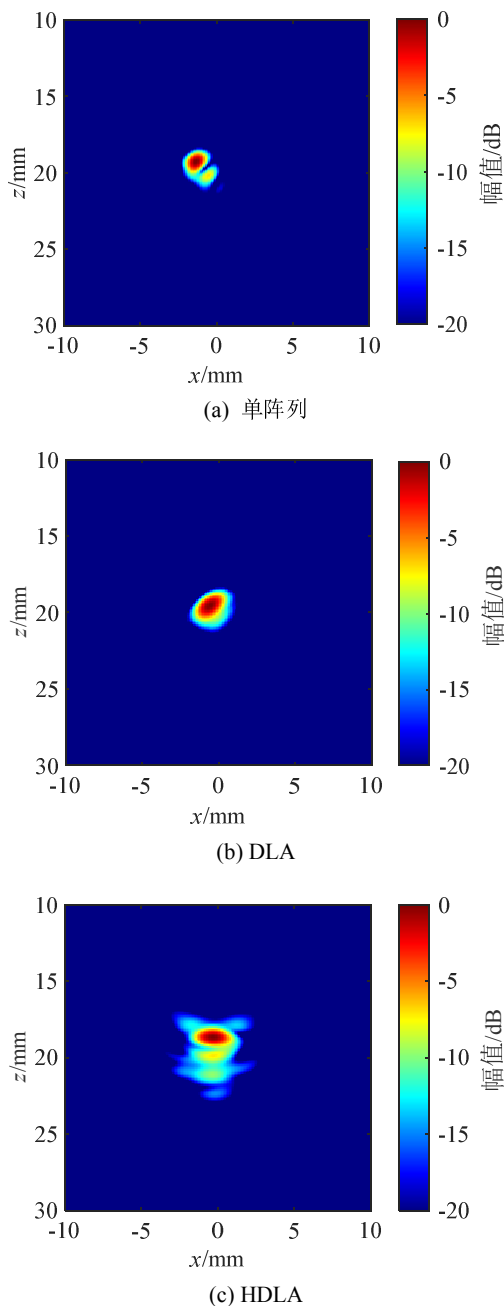


图 7 不同超声检测方式的试块 A 成像结果， $D_{12}=20$ mm
Fig.7 Imaging results of Specimen A for different ultrasonic testing modes, $D_{12}=20$ mm

为对比不同阵列间距 D_{12} 对三种检测方法效果的影响，进行 4 组实验， D_{12} 分别取 6、20、30 和 40 mm。根据式(6)，对不同 D_{12} 取值下三种检测方

法对试块 A 的成像结果分别统计 R_h 、 R_v 和 API，统计结果如表 2 所示。

表 2 不同超声检测方式的试块 A 成像分辨率
Table 2 Imaging resolutions of specimen A for different ultrasonic testing modes

检测方式	D_{12}/mm	R_h	R_v	API
单阵列	6	1.01	0.90	0.84
	20	1.12	1.01	1.11
	30	1.12	1.23	1.41
	40	1.12	1.46	1.86
DLA	6	1.46	1.23	1.68
	20	1.57	1.34	2.11
	30	1.46	1.57	2.47
	40	1.23	1.68	2.82
HDLA	6	1.23	0.67	0.91
	20	2.24	1.01	2.04
	30	3.25	1.46	4.15
	40	4.82	1.79	7.41

通过对比可以看出，HDLA 成像结果的横向分辨率明显低于单阵列和 DLA，且随阵列间距增大，差距更明显。这是由于，对于 HDLA 而言，中央成像区域位置的总声程随横坐标变化率低，且角度越大，声程变化越小。而对于收发合置的单阵列成像模式和 DLA 而言，总声程随横坐标变化大。对于纵向分辨率，单阵列和 HDLA 两种成像模式在对称轴上像点的声程随纵坐标变化是一致的，故两种模式纵向分辨率较为接近。而 API 可以近似看作横纵分辨率的综合结果，故 HDLA 成像的 API 比单阵列和 DLA 成像的 API 大。

2.3.2 粗晶试块 B

采用相同的检测图像计算方法，在不同 D_{12} 取值下，对粗晶试块 B 分别应用单阵列、DLA 和 HDLA 三种成像检测方法，成像结果分别如图 8、9、10 所示。可以看出，相比细晶的成像结果，粗晶材料的成像结果中存在明显的材料噪声。随着 D_{12} 的增大，三种方法的图像信噪比均有下降。

图 8 为试块 B 单阵列成像结果，当 D_{12} 小时，图像信噪比较好，可以分辨缺陷。但随着 D_{12} 的增加，单阵列成像信噪比迅速下降。图 9 为 DLA 检测结果，相较单阵列检测，信噪比有一定的提升。图 10 为 HDLA 成像检测结果，可以看出其信噪比优于单阵列和 DLA。分别统计单阵列、DLA 和 HDLA 成像结果的信噪比，如表 3 所示。

从表 3 中可以看出，当 $D_{12}=6$ mm 和 $D_{12}=20$ mm 时，单阵列和 DLA 检测方法对中心处缺陷可以较为清晰地成像，图像信噪比分别为 12.9、7.7 和 13.5、

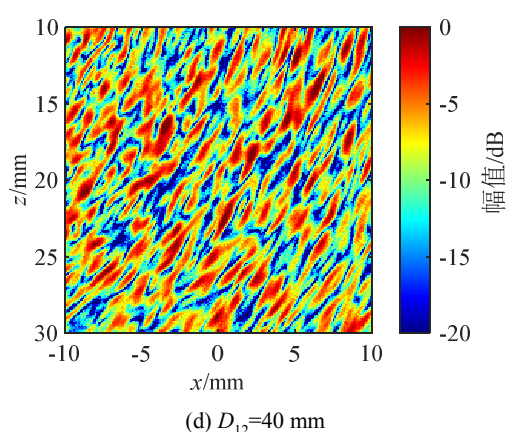
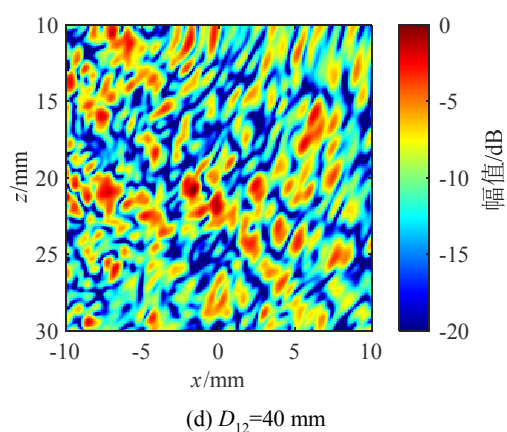
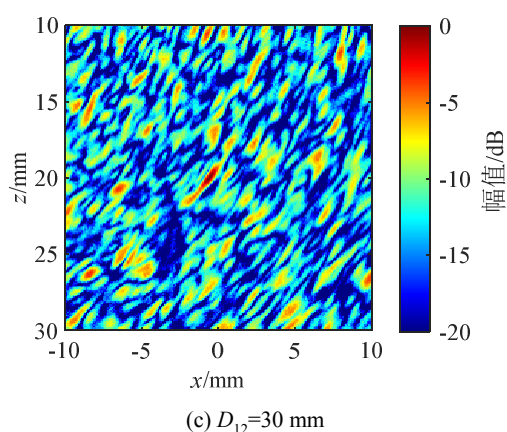
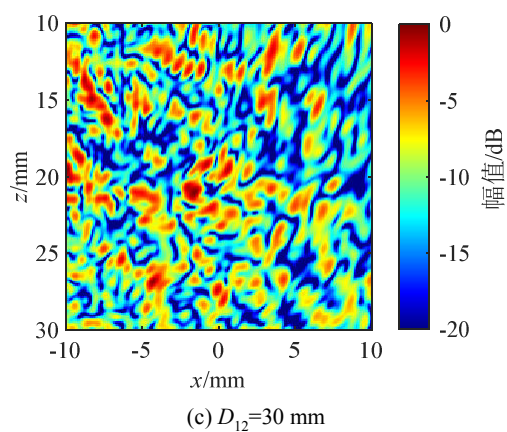
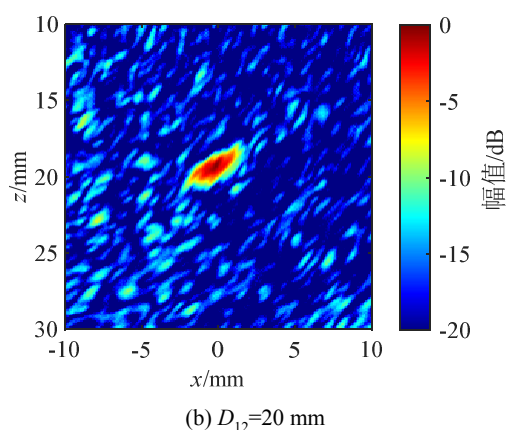
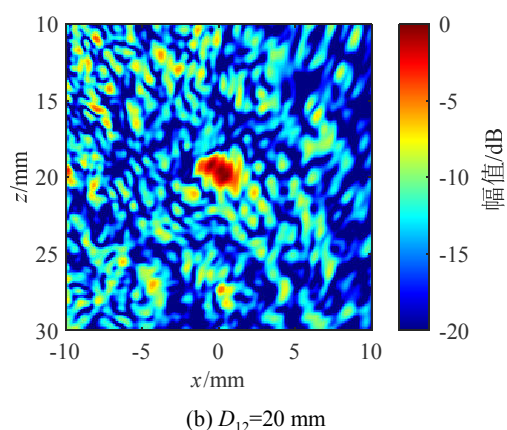
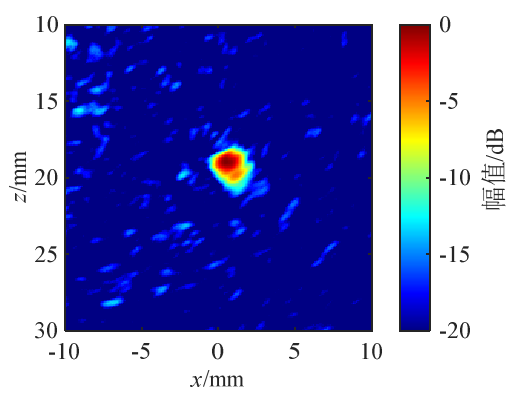
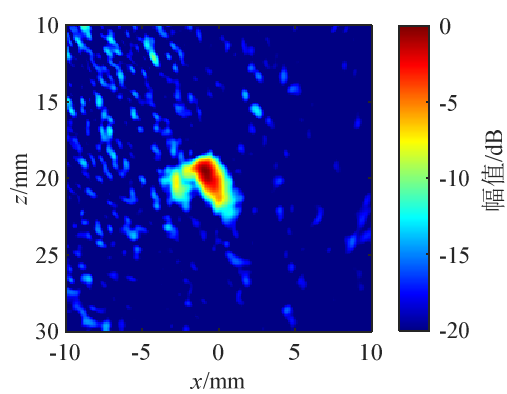


图 8 试块 B 单阵列成像结果

Fig.8 Single array imaging results of Specimen B

图 9 试块 B, DLA 成像结果

Fig.9 DLA imaging results of Specimen B

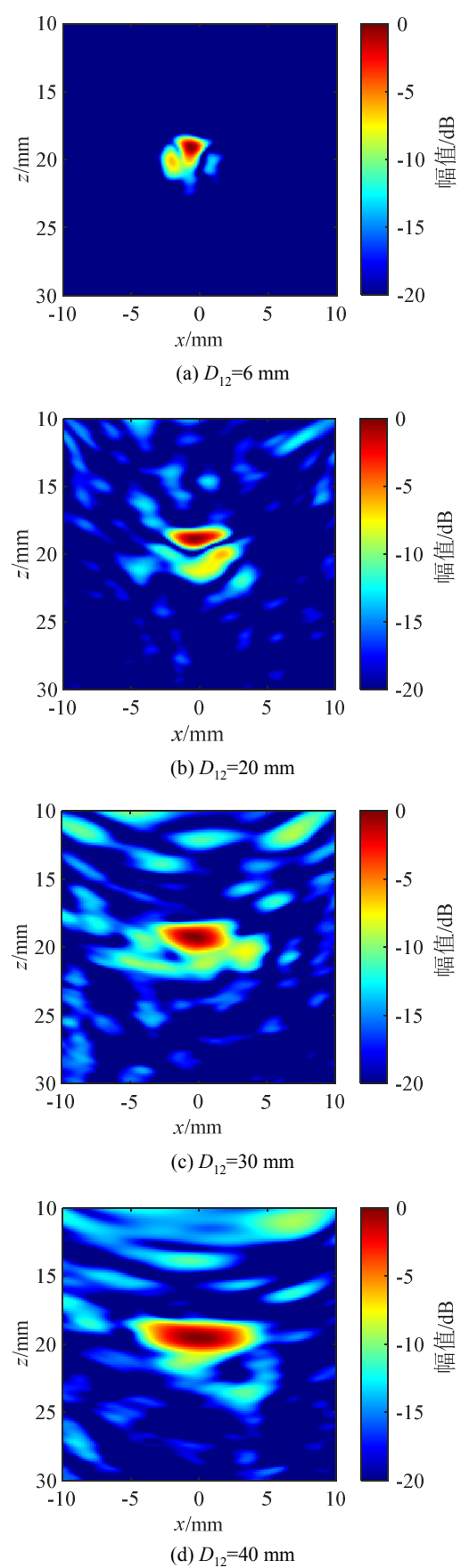


图 10 试块 B, HDLA 成像结果
Fig.10 HDLA imaging results of Specimen B

表 3 不同超声检测方式的试块 B 成像信噪比
Table 3 Imaging signal to noise ratios of specimen B for different ultrasonic testing modes

检测方式	信噪比/dB			
	$D_{12}=6\text{ mm}$	$D_{12}=20\text{ mm}$	$D_{12}=30\text{ mm}$	$D_{12}=40\text{ mm}$
单阵列	12.9	7.7	<3	<3
DLA	13.5	9.5	4.2	<3
HDLA	21.2	12.4	11.0	10.6

9.5 dB, DLA 相比单阵列模式在一定程度上提高了信噪比。HDLA 的图像信噪比分别为 21.2dB、12.4 dB, 较单阵列和 DLA 的图像噪声水平更低。当 $D_{12}=30\text{ mm}$ 和 $D_{12}=40\text{ mm}$ 时, 单阵列成像的信噪比已降低到 3 dB 以下, DLA 也无法识别缺陷, 双阵列成像依然可以识别缺陷, 信噪比分别为 11.0、10.6 dB。

3 结 论

本文首先给出水平分置线性双阵列(HDLA)成像检测模型和算法, 而后在细晶和粗晶试样上分别进行了单阵列、线性双阵列(DLA)和 HDLA 成像试验, 计算了不同位置缺陷的分辨率、信噪比。试验结果表明:

- (1) 三种方法均能有效地对细晶铜质试样中的横通孔缺陷进行准确的成像。在缺陷位于阵列边缘下方时, 三种方法的横向、纵向分辨率以及 API 几乎相同。随着缺陷相对阵列水平距离增加(即角度增大), 单阵列成像和 DLA 成像的横向、纵向分辨率和 API 均只有微弱的降低, HDLA 的纵向分辨率略有降低, 但横向分辨率和 API 降低严重。
- (2) 对粗晶材料, 当缺陷距换能器距离较近时, 单阵列成像和 DLA 成像可以识别缺陷, 但信噪比随着距离的增加快速降低, 无法识别横向距离较远(角度大)的缺陷。HDLA 成像的信噪比在不同的缺陷位置均优于单阵列成像和 DLA 成像, 在缺陷位置较远时依然可以识别缺陷。

综上所述, 当晶粒较细, 或检测区域距离阵列较近时, 单阵列成像可以满足一定的工业检测需求。当晶粒较粗且检测区域距离阵列较远时, 水平分置双阵列成像检测可以作为一种有效的方法。

HDLA 超声检测方法对粗晶材料的成像信噪比较单阵列和 DLA 方法有所改善, 其主要原因是阵列在水平方向上的收发分离降低了晶粒噪声, 提高了缺陷信号本身的信噪比。相比其他滤波降噪算法, 该方法无需对原始检测信号做复杂的滤波降噪

处理,避免了有用的缺陷信号被滤除的风险,更容易被应用到工程检测中。文中使用的全聚焦方法是一种鲁棒性较强的成像算法,除此外可根据实际检测需求,使用平面波成像、合成孔径成像或者传统的相控扫查成像方式。

参 考 文 献

- [1] 沈功田. 承压设备无损检测与评价技术发展现状[J]. 机械工程学报, 2017, **53**(12): 1-12.
SHEN Gongtian. Development status of nondestructive testing and evaluation technique for pressure equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, **53**(12): 1-12.
- [2] 钱鑫源. 钛合金的超声波检验[J]. 材料工程, 1992, **20**(6): 29-32.
QIAN Xinyuan. The ultrasonic inspection of titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 1992, **20**(6): 29-32.
- [3] 罗斌, 罗宏建, 刘一舟, 等. 粗晶材料超声检测中的非线性信号处理[J]. 中国机械工程, 2005, **16**(3): 212-214.
LUO Bin, LUO Hongjian, LIU Yizhou, et al. Non-linear signal processing in ultrasonic testing of coarse grain material[J]. China Mechanical Engineering, 2005, **16**(3): 212-214.
- [4] 毛秉毅. 基于分离谱技术的自适应带通滤波法在超声检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2007, **28**(11): 2108-2112.
MAO Bingyi. Application of adaptive band-pass filter in ultrasonic inspection based on split-spectrum processing technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, **28**(11): 2108-2112.
- [5] 卢超, 张维, 鄂冠华, 等. 小波变换软阈值去噪在粗晶材料超声检测中的应用[J]. 应用声学, 2003, **22**(3): 1-6.
LU Chao, ZHANG Wei, WU Guanhua, et al. De-noising in ultrasonic detection of coarse-grained materials by wavelet transform soft-thresholding[J]. Applied Acoustics, 2003, **22**(3): 1-6.
- [6] 龚思璠, 王强, 谢正文, 等. 奥氏体不锈钢焊缝超声回波信号的匹配追踪处理[J]. 声学技术, 2017, **36**(3): 252-256.
GONG Sifan, WANG Qiang, XIE Zhengwen, et al. Matching track process of ultrasonic echo signal in austenitic stainless steel welds[J]. Technical Acoustics, 2017, **36**(3): 252-256.
- [7] 林莉, 杨平华, 张东辉, 等. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2012, **48**(4): 12-20.
LIN Li, YANG Pinghua, ZHANG Donghui, et al. Review of phased array ultrasonic testing for thick wall cast austenitic stainless steel pipeline welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, **48**(4): 12-20.
- [8] 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.
- [9] CAMACHO J, BRIZUELA J, FRITSCH C, et al. Grain noise reduction by phase coherence imaging[C]//AIP Conference Proceedings. Kingston (Rhode Island). AIP, 2010: 855-862.
- [10] CAMACHO J, FRITSCH C. Phase coherence imaging of grained materials[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, **58**(5): 1006-1015.
- [11] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Comparison of ultrasonic array imaging algorithms for nondestructive evaluation[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, **60**(8): 1732-1745.
- [12] VELICHKO A. Quantification of the effect of multiple scattering on array imaging performance[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, **67**(1): 92-105.
- [13] ANDRÉ L. Improved Inspection of CRA-Clad Pipe Welds with Accessible Advanced Ultrasonic Phased-Array Technology[C]//19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016.