Ultrasonic Phased Array Phase Shift Migration Imaging Method for Titanium Alloy Diffusion Welding*

YANG Chenxu[1], *LI Qiufeng*[1], *SHEN Jiahui*[2], *WANG Haitao*[3], *HU Qiang*[1], *CHEN Yao*[1*]

(1.*Key laboratory of Nondestructive Testing Technology(MOE), Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi* 330063, *China*;
2.*Power China Jiangxi Electric Power Engineering Limited Company, Nanchang Jiangxi* 330096, *China*;
3.*China construction first group corporation limited, Beijing* 100161, *China*)

Abstract: Titanium alloy is widely used in aerospace and other industrial manufacturing fields. Diffusion welding is a main way of component connection, and the quality of connection is very important for the safe use of components. Aiming at the detection of typical internal defects in diffusion welding of titanium alloy, the research of water immersion ultrasonic phased array detection was carried out. Firstly, the influence of different water depth on phased array acoustic field is studied according to Gauss superposition theorem to determine the suitable water layer thickness; Secondly, the finite element model of diffusion welding of titanium alloy with typical defects was established to simulate the process of immersion ultrasonic phased array testing and collect the testing data; Finally, the frequency-domain synthetic aperture imaging is performed based on the phase shift principle. The research results show that the use of ultrasonic phased-array focused scan data for dual-media frequency-domain synthetic aperture imaging, compared with phased-array conventional B-scan imaging, in addition to detecting micro-aperture defects of 0.2 mm in diameter that cannot be imaged by conventional imaging methods, the contrast ratio is improved by an average of 6.39 dB, and the defect localization accuracy is within 1.3%, and the method can provide water immersion ultrasonic phased-array detection of diffusion welding defects in titanium alloys theoretical guidance.

Key words: immersion ultrasonic phased array; diffusion welding; phase shift migration algorithm; damage imaging
EEACC: 7210 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2021.11.011

钛合金扩散焊水浸超声相控阵相位迁移成像方法*

杨宸旭[1], 李秋锋[1], 沈佳卉[2], 王海涛[3], 胡 强[1], 陈 尧[1*]

(1.无损检测技术教育部重点实验室(南昌航空大学), 江西 南昌 330063;
2.中国电建集团江西省电力设计院有限公司, 江西南昌 330096; 3.中建一局集团第二建筑有限公司, 北京 100161)

摘 要: 钛合金广泛应用于航空航天等工业制造领域, 扩散焊是钛合金构件连接的一种主要方式, 连接质量对构件的安全使用非常重要。针对钛合金扩散焊典型内部缺陷的检测开展水浸超声相控阵检测研究。首先根据高斯叠加定理研究不同水深对相控阵声场的影响, 以确定适合的水层厚度; 其次建立含典型缺陷钛合金扩散焊有限元模型, 模拟水浸超声相控阵检测过程并采集检测数据; 最后将超声相控阵平行聚焦扫描数据根据相位迁移原理进行频域合成孔径成像。研究结果表明: 利用超声相控阵聚焦扫描数据进行双介质频域合成孔径成像, 相比相控阵传统 B 扫成像, 除检测出传统成像方法无法成像的直径 0.2 mm微孔缺陷外, 对比率平均提升了 6.39 dB, 缺陷定位精度在 1.3%以内, 该方法可为钛合金扩散焊缺陷的水浸超声相控阵检测提供理论指导。

关键词: 水浸超声相控阵; 扩散焊; 相位迁移算法; 损伤成像
中图分类号: TB552 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2021)11-1489-06

项目来源: 国家自然科学基金(11764030, 51705232); 江西省主要学科和技术带头人资助计划(20204BCJL22039); 江西省自然科学基金项目(20192BAB216026)
收稿日期: 2021-06-23 **修改日期**: 2021-07-26

近年来,对于扩散焊的研究相关检测技术引起了许多国内外学者的关注。扩散焊优点众多,不需要钎料以及保护气体;焊后,不需要机械加工;扩散焊由于其原理为高温高压下的原子扩散,不会改变母材特性[1-3]。扩散连接技术是钛合金构件连接的一种主要形式,该类焊接件在航空航天、工业制造等领域得到广泛应用[4-6]。

由于钛合金扩散焊常见缺陷比较微小,需要高精度和高灵敏度的检测方法,一般检测方法无法满足需求[7]。超声水浸检测是无损检测领域中广泛使用的一种检测方法,此检测方法操作简单方便,检测精度较高、易实现自动化检测。传统单探头超声水浸检测成像需要根据步进值移动探头位置,增加了检测时间和实验误差;且相同频率下单探头对于微小缺陷的检出率较低。

随着检测需求的日益增加,对超声水浸检测系统的检测效率及成像分辨率提出了更高的要求[8-10]。超声相控阵可以独立控制探头内的每个阵元使其声束可以进行偏转和聚焦,可以在不移动探头的情况下进行较大范围的成像。水浸超声相控阵检测结合了水浸检测和阵列检测的优点,相比传统单探头水浸超声检测可成倍的提升检测效率[11-12]。

水浸超声相控阵检测方法采用高频探头可获得较高的分辨率,同时相控阵探头可以灵活调整聚焦深度,利用这一点,检测过程中可以实现平行聚焦扫描同一深度缺陷,适用于钛合金板扩散焊检测。本文首次提出采用水浸超声相控阵检测钛合金扩散焊常见缺陷,相比传统超声相控阵楔块检测,该方法以水作为耦合剂实现超声检测;利用有限元仿真软件模拟相控阵平行聚焦扫描检测过程并提取各个阵元数据,将一个阵元组的各个阵元数据进行去延时叠加处理后进行双介质频域合成孔径成像。

1 基本理论

1.1 超声相控阵平行聚焦扫查原理

超声相控阵检测时,为提高实际检测缺陷时的检出率和准确性,通常采用声束聚焦检测微小缺陷[13]。图 1 中,第 n 个阵元距离中心距离为 x_n,聚焦深度为 F,声波在介质中的传播速度为 C,则根据阵元在声场区域的几何特性,第 n 个阵元的延时为:

$$t_n=\Delta s/C \tag{1}$$

即:

$$t_n=\frac{F-\sqrt{x_n^2+F^2}}{C}+t_0 \tag{2}$$

式中:Δs 为两个相邻阵元之间的声程差;d 为阵元间距;t_0 为避免 t_n 为负值的时间常数。

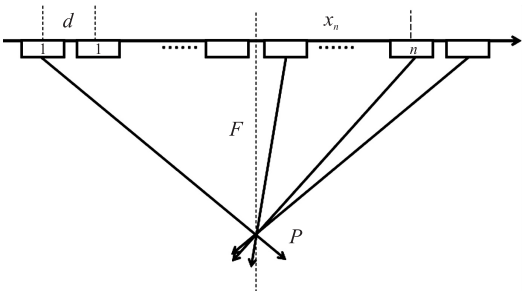


图 1 声束聚焦在 P 点

声束聚焦平行扫描为探头阵元组的各阵元按照设定好的聚焦法则,形成聚焦声束对缺陷进行实时扫查。在进行聚焦平行扫描前可选择一定数量的阵元作为阵元组中的子阵元,形成的多个阵元组分别激励并接收信号实现相控阵聚焦平行扫描。以 4 阵元为一阵元组为例,相控阵声束聚焦平行扫描示意图如图 2 所示。阵元组中的各个阵元延迟时间根据式(2)进行计算,利用 MATLAB 编程可以实现对各阵元延时的快速计算。

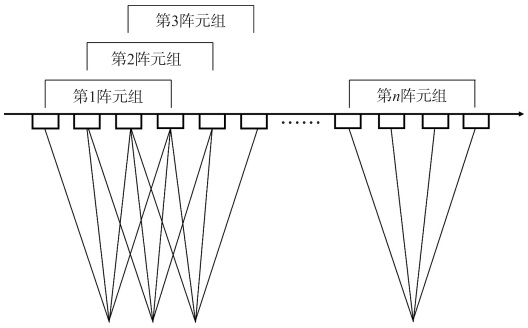


图 2 相控阵声束平行聚焦扫描

1.2 双介质频域合成孔径聚焦成像

由于超声相控阵多采用高频探头检测缺陷,其声场声束波长短,声束扩散角较小,普通时域算法成像无法对偏离扩散角位置较远的点进行叠加成像。频域相控阵根据其爆炸反射原理,对时域信号的傅里叶变换并通过相位迁移(Phase Shift Migration, PSM)算法对检测区域进行成像,可以用于超声相控阵聚焦缺陷信号的成像。

频域合成孔径成像算法利用傅里叶变换所得的精确解进行成像,最早应用于地震波成像[14-15]。爆炸模型不仅适用于单介质声场,同样也适用于多介质声场中,频域合成孔径算法主要有两种成像方法,ω-k 算法和 PSM 算法[16-17],其中 PSM 算法是直接根据波动方程推导,以得到声场精确解,是本文采用的成像算法。

根据波动方程,平面上任意一点声压可以表示为[18-19]:

$$P(x,y,t)\left(\nabla^2-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)=0 \tag{3}$$

式中:c 为声波在介质中的传播速度;∇^2 为拉普拉斯算子。从获取数据 $P(x,z=0,t)$ 傅里叶频谱中可以得到 $P(x,z,t=0)$ 的成像数据:

$$P(x,z,t)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}P(k_x,z,\omega)\mathrm{e}^{2\pi i(k_x-\omega t)}\mathrm{d}k_x\mathrm{d}\omega \tag{4}$$

式中:k_x 为 x 轴方向波矢。

根据式(3)和式(4)结合傅里叶变换唯一性和边界条件 $P(k_x,z=0,\omega)$,将缺陷处当做声源可得到:

$$\begin{cases}B(k_x,\omega)=0\\A(k_x,\omega)=P(k_x,\omega)\equiv P(k_x,z=0,\omega)\end{cases} \tag{5}$$

假定在 $z>Z$ 范围内,根据角谱法[20],若将所得到的频域波场 Z 外推至 z,则有:

$$P(k_x,z,\omega)=P(k_x,z=Z,\omega)\mathrm{e}^{2\pi ik_z(z-Z)} \tag{6}$$

式中:k_z 为 z 轴方向波矢。

结合上式和逆傅里叶变换得到任意点 (x,z) 的二维图像:

$$I(x,z)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}P(k_x,z=Z,\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_z(z-Z)}\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_x}\mathrm{d}k_x\mathrm{d}\omega \tag{7}$$

本次实验中水层界面为规则平面,界面两侧均为均匀介质,即声速在某一深度为定值,根据 Snell 定理,将 C 表示为 Z 轴方向的函数,利用声压相位行进方向的连续性和双层介质界面的声透射系数,通过改变每一层 z 轴方向的波矢即可完成双介质 PSM 成像。本文将各阵元组聚焦声束的回波数据进行去延时叠加形成(探头阵元数-子阵元组所含阵元数+1)条 A 扫数据,将这些数据进行双介质 PSM 成像并与传统相控阵 B 扫成像对比。

2　水层厚度分析和模型建立

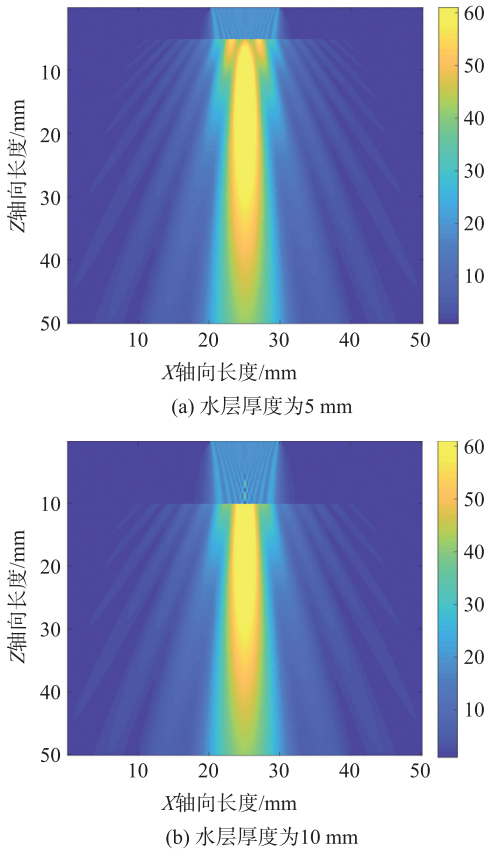
2.1　水层厚度分析

水浸检测的水层厚度是检测过程中重要参数的之一,根据多元高斯叠加定理可以获得声束在双层介质中的声场分布,高斯叠加系数[21]如表 1 所示。

利用瑞利积分形式表示声场中任意一点的声压;通过叠加高斯声束即可获得点声压幅值;计算两层介质中的质点振动速度并根据声束透射系数即可得到多元高斯叠加声场模型,模拟水-钛合金声场分布情况。本次实验设定探头频率为 5 MHz,一阵元组孔径大小 8.5 mm,水和钛合金传播速度分别为 1 482 m/s、6 332 m/s,水层厚度 5 mm、10 mm 时水-钛合金声场分布如图 3 所示。

表 1　高斯叠加系数

n	A_r	B_r
1	-2.971 6+8.618 7i	4.186 9-5.516 0i
2	-3.481 1+0.968 7i	3.839 8-10.800 0i
3	-1.398 2-0.812 8i	3.435 5-16.358 2i
4	0.077 3-0.330 3i	2.461 8-27.713 0i
5	2.879 8+1.610 9i	5.469 9+28.631 0i
6	0.125 9-0.095 7i	1.983 3-33.288 0i
7	-0.264 1-0.672 3i	2.933 5-22.015 0i
8	18.019 0+7.829 1i	6.303 6+36.777 2i
9	0.051 8+0.018 2i	1.304 6-38.465 0i
10	-16.942 8-9.938 0i	6.588 9+37.068 0i
11	0.370 8+5.452 2i	5.551 8+22.425 5i
12	-6.692 9+4.072 2i	5.401 3+16.732 6i
13	-9.363 8-4.999 8i	5.149 8+11.124 9i
14	1.587 2-15.421 2i	4.966 5+5.685 5i
15	19.002 4+3.685 0i	4.629 6+0.305 5i



(a) 水层厚度为5 mm

(b) 水层厚度为10 mm

图 3　水-钛合金声场分布

根据图 3(a),水层厚度为 5 mm 时,钛合金声场部分声束带有旁瓣,旁瓣会分散主瓣能量甚至产生伪像,从而降低成像分辨率。将水层厚度增至 10 mm 时,如图 3(b)所示,旁瓣问题得到明显改善,若继续增加水层厚度,高频率声波会随着声程的增加而使其能量受损严重,这将导致缺陷回波幅值过低从而无法成像的问题。

2.2 模型建立

根据实际待检测对象在 COMSOL 中建立有限元模型,模型如图 4 所示。水层厚度为 10 mm,宽为 50 mm,钛合金厚 10 mm,宽度 50 mm。扩散连接为原子间的扩散,所以除缺陷区域外,两块钛合金薄板可看做一个整体[22]。

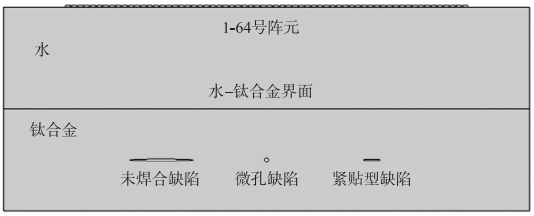


图 4 测试模型结构图

在扩散连接过程中,受焊接工艺与其他因素影响,常产生中部高两端方向逐渐变窄的大面积未复合缺陷;类圆球状微小气孔缺陷以及方向、长短不同的弥散分布型条状缺陷[23]。根据钛合金扩散焊常见缺陷及其基本形貌特点,设置宽 6 mm、厚 0.2 mm 椭圆形缺陷为未焊合缺陷;直径 0.2 mm 点状缺陷为微孔缺陷;宽 1.5 mm、厚 0.1 mm 矩形缺陷为紧贴型缺陷,三种缺陷中心距上表面 15 mm。

设置阵元中心距为 0.6 mm,阵元宽度为 0.5 mm,阵元数目为 64,入射角度设定为 0°,又以水层作为耦合剂,故忽略横波干扰。在 64 个阵元中,以 16 阵元为一阵元组,超声相控阵平行聚焦扫描的每组阵元延时法则均相同,组中 16 个阵元延时时间如图 5 所示,通过这种激励方式可以将每组阵元发射的声束聚焦在水层上表面 15 mm 深的位置。

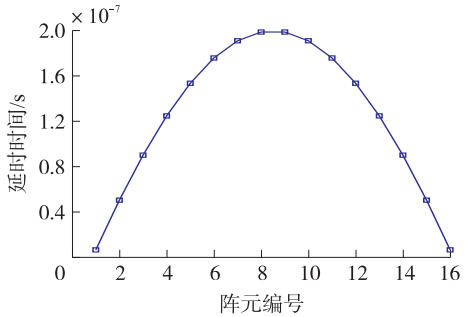


图 5 阵元组中 1-16 阵元延时激励方式

通过计算缺陷位置在远场区内,不会受到声压急剧起伏的影响,可以良好的进行检测。在本模型中激励信号选择高斯脉冲,其具有能量集中、余波能量小、旁瓣对主波的干扰小、指向性好等优点,数学表达式为:

$$P=\mathrm{e}^{-[\pi f_0(t-t_0)]^2} \tag{8}$$

在有限元中,网格划分得越小,计算的准确性越高,但需要较高计算机配置和较长计算时间。为保证计算精度,有限元的最大网格尺寸应介于波长的 0.05 倍到 0.1 倍之间。考虑到本模型大小和实际条件,选择每个波长包含 10 个单元间隔即可满足仿真需求。由于波束在水和钛合金中的波长不同,所以在两种介质的网格划分需要分开计算,其各自最大网格单元大小为:

$$\Delta x=\lambda/10 \tag{9}$$

相似的,时间步长的选取对计算结果的准确性同样影响较大,为保证声压模拟的稳定性,采样时间应不大于声波在单元网格中的传播时间,即:

$$\Delta t=\Delta x/C_{\max} \tag{10}$$

式中:$C_{\max}$为超声波在两种介质中的最大声速。另外,模型中的材料根据检测方案选择 COMSOL 仿真软件内置材料:H_2O(water)[liquid]和 Ti-6Al-4V[solid,polished]。图 6 为第一阵元组声束聚焦在缺陷附近,时间为 7.735 μs。

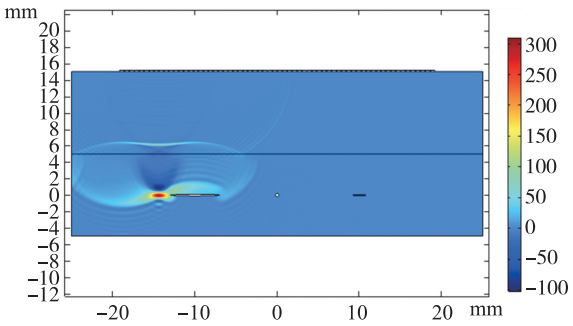


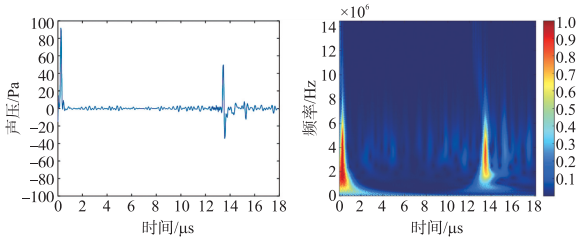
图 6 相控阵声束聚焦

3 钛合金扩散焊缺陷成像研究

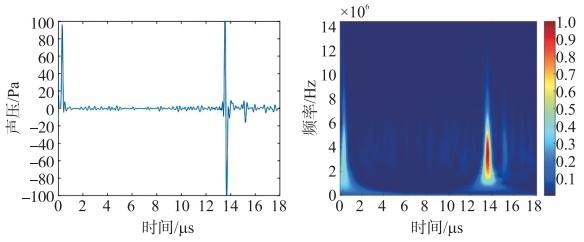
3.1 回波信号分析

通过有限元仿真软件获得所有阵元组中的各个阵元所接收的信号,将组中全部阵元进行去延时叠加得到一条合成信号,最终可得到 49 条 A 扫数据。以第一阵元组为例,图 7 为组中一部分阵元信号与组中全部阵元的合成信号。

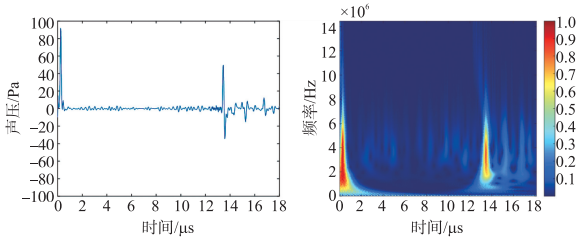
根据图 7(a)与图 7(c)可以看出,一组阵元中的单阵元能量有限或基于位置限制,回波信号较差,若直接使用单阵元数据成像必定会造成图像缺陷不清晰。图 7(b)所表示的 5 号阵元回波信号相比 1 号阵元和 12 号阵元的回波信号更“干净”,但缺陷的回波信号不明显,且无缺陷区域信号不平稳,幅值逼近缺陷信号幅值,若直接成像会出现伪像。将阵元组中 1-16 号阵元分别去掉对应的延时并叠加得到图 7(d),从时域信号可以看出,非缺陷区域信号平稳且幅值明显低于缺陷信号幅值;从频域信号可以看出,从左至右的高亮云图分别对应了声场中的



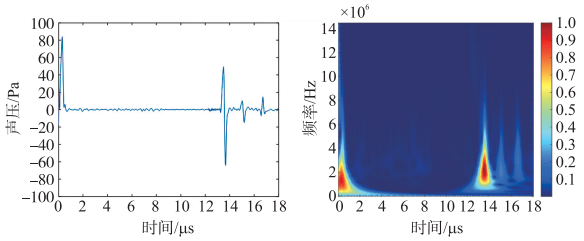
(a) 1号阵元回波数据



(b) 5号阵元回波数据



(c) 12号阵元回波数据



(d) 合成信号回波数据

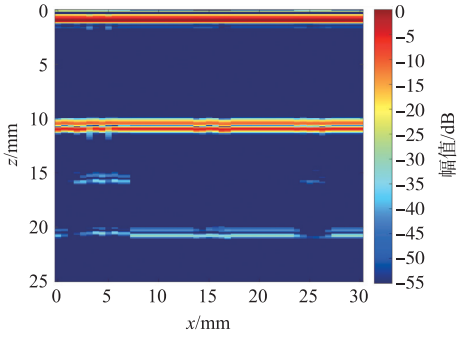
图 7　A 扫信号时频图

始波、水-钛合金界面波、缺陷波、底波，信号效果得到显著提升。

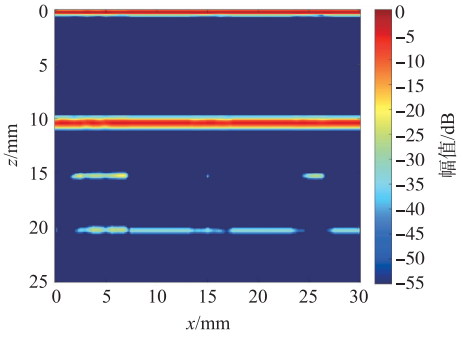
3.2　成像对比及分析

将 49 条合成信号分别进行超声相控阵 B 扫成像以及相位迁移算法成像，由于本次实验以 16 阵元为一阵元组，聚焦声束主声轴为组中中心位置阵元间的轴线，所以成像区域的横向范围为 30 mm，纵向成像区域为 25 mm，如图 8 所示。对图像进行-55 dB 处理，由 8(a)可以看出，超声相控阵传统 B 扫成像可以较清晰的呈现未焊合缺陷和紧贴型缺陷，但未焊合缺陷成像出现伪像情况，会影响缺陷位置判断。对于微孔缺陷，其缺陷特征无法呈现，在钛合金扩散焊实际应用中，微孔缺陷会影响工件在役服务寿命或造成更加严重的后果。

由图 8(b)，相比超声相控阵传统 B 扫成像，PSM 算法成像的最大特点在于可以检出直径为 0.2 mm 的微孔缺陷；其次由于 PSM 算法根据波动方程求解的精确解并逐层递推成像，使得图像分辨率显著提高，水-钛合金界面与三种缺陷成像更加平滑，可以轻易分辨三种缺陷的类型。



(a) 超声相控阵B扫成像



(b) 超声相控阵频域合成孔径成像

图 8　成像结果对比

3.3　缺陷图像量化对比

为直观对比两种情况下的相控阵聚焦声束成像效果，三种缺陷的对比率(Contrast Ratio，CR)和定位误差如表 2、表 3 所示。

表 2　三种缺陷 CR 对比　　单位：dB

缺陷种类	传统 B 扫成像	PSM 算法成像	提升 CR
未焊合缺陷	-32.54	-25.61	6.93
微孔	/	-35.11	/
紧贴型缺陷	-36.73	-30.89	5.84

表 3　三种缺陷位置误差　　单位：%

缺陷种类	传统 B 扫成像	PSM 算法成像	降低误差率
未焊合缺陷	6.67	1.3	5.37
微孔	/	0.87	/
紧贴型缺陷	5.33	0.67	4.66

根据表 2、表 3，PSM 算法下的相控阵聚焦声束成像所对应的未焊合、紧贴型缺陷 CR 分别提高了 6.93 dB、5.84 dB，未焊合缺陷与紧贴型缺陷位置误差率降低了 5.37%、4.66%。

4　结论

钛合金扩散焊过程中产生的未焊合、微孔、紧贴

型缺陷,采用水浸超声相控阵平行聚焦扫查检测缺陷,制定 49 个以 16 阵元为一组的阵元组。根据 49 条合成 A 扫信号进行超声相控阵传统 B 扫成像,在 -55 dB 处理下未检测到 0.2 mm 直径微孔缺陷,且缺陷位置误差较大。

基于相控阵合成信号进行 PSM 算法成像,不仅检测出微孔缺陷,且图像分辨率缺陷位置精度都有显著提升,CR 平均提升 6.39 dB,未焊合、紧贴型两种缺陷位置误差率偏平均降低 5.02%,本次实验为扩散焊水浸超声相控阵检测提供理论依据。

参考文献:

[1] 史耀武.中国材料工程大典 第 22 卷[M]. 北京:化学工业出版社,2006.

[2] 刘晨曦,刘永长,周晓胜,等. 扩散连接技术在核聚变反应堆包层模块制造中的应用[J]. 精密成形工程,2015,6(1):1-8.

[3] 郑辉,黄丽霞,王志刚,等. 波形钢腹板 T 型焊缝超声检测参数优化研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2018,32(3):70-75.

[4] 白培康,王建宏.材料成型新技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[5] Mbalasubramanian. Development of Prosessing Windows for Diffusion Bonding of Ti-6Al-4V Titaniumalloy and 304 Stainless Steel with Silver as Intermediate Layer[J]. Transactions of Nonferrous Metals Socerty of China,2015,25(9):2932-2938.

[6] 周正干,李文涛,李洋,等. 相控阵超声水浸 C 扫描自动检测系统的研制[J]. 机械工程学报,2017,53(12):28-34.

[7] Feng Pengni, Yang Cuiping, Wang Baoyu, et al. Formability and Microstructure of TC4 Titanium Alloy Hollow Shafts Formed by Cross-Wedge Rolling with a Mandrel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2021(114):1-3.

[8] 张英明,韩明臣,田园,等. 钛合金超声探伤技术[J]. 稀有金属快报,2008(10):1-6.

[9] 郑辉,陈尧,黄丽霞,等. 波形钢腹板软膜超声相控阵检测探头的设计[J]. 传感技术学报,2019,32(8):1215-1221.

[10] 沙正骁,梁菁,李彦. 基于超声环阵相控阵的变孔径聚焦检测技术[J]. 失效分析与预防,2019,14(2):84-89,95.

[11] Zhou Yunlai, Qian Xudong, Alistair Birnie. A Reference Free Ultrasonic Phased Array to Identify Surface Cracks in Welded Steel Pipes Based on Transmissibility[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2018,168(12):66-78.

[12] 燕翔,李杨,孔焕平. 铝铜真空固相扩散焊焊缝微观组织研究[J]. 失效分析与预防,2015,10(4):207-211.

[13] 孙浩然,陆铭慧,伏翔,等. 双金属结合面缺陷的凸面相控阵超声检测[J]. 无损检测,2021,43(2):37-42.

[14] Skjelvareid M H, Tomas O, Yngve B, et al. Synthetic Aperture Focusing of Ultrasonic Data from Multilayered Media Using an Omega-k Algorithm[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control,2011,58(5):1037.

[15] 李秋锋,石立华,梁大开. 基于合成孔径聚焦技术的混凝土断面二维成像方法研究[J]. 声学学报(中文版),2008(4):370-377.

[16] 陈尧,冒秋琴,石文泽,等. 一种傅里叶域超声平面波复合成像处理构架[J]. 仪器仪表学报,2020,41(7):155-163.

[17] 王冠,黄丽霞,王志刚,等. 提高频域合成孔径超声阵列成像质量的方法[J]. 传感技术学报,2020,33(9):1285-1291.

[18] 冒秋琴,陈尧,石文泽,等. 频域相位相干合成孔径聚焦超声成像研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(2):135-145.

[19] 王冠,陈尧,王志刚,等. 混凝土桩基 SAGA 层析成像算法实验研究[J]. 传感技术学报,2020,33(4):517-523.

[20] Ebers Lena, Hammer Manfred, Förstner Jens. Light Diffraction in Slab Waveguide Lenses Simulated with the Stepwise Angular Spectrum Method[J]. Optics express,2020,28(24):36361-36379.

[21] Wen J J. Breazeale M A. A Diffraction Beam Field Expressed as the Supperpsotion of Gaussian Beams[J]. Journal of the Acoustical Society of America,1988,83(5):1752-1756.

[22] Saadati Ahmad, Malekan Mehdi, Khodabakhshi Farzad. Under Glass Transition Temperature Diffusion Bonding of Bulk Metallic Glass and Aluminum[J]. Materials Chemistry and Physics,2021,269(9):1-10.

[23] 王海登,鄂楠,张智柏. 扩散焊缺陷超声波检测信号特征[J]. 焊接技术,2021,50(2):92-95,106.



杨宸旭(1996—),男,汉族,黑龙江佳木斯,硕士研究生,主要从事超声检测技术及仪器方面的研究工作;



陈 尧(1984—),男,辽宁,博士,副教授,硕士生导师,本文通讯作者,主要从事复杂结构和材料检测技术、图像检测与信号处理等方面的研究,chenyao1984@foxmail.com。



李秋锋(1976—),男,汉族,江西南昌,博士,南昌航空大学教授,硕士研究生导师,主要从事声学检测与评价技术、检测信号处理及检测成像算法等方面的研究;