

搅拌摩擦焊焊缝阵列超声全聚焦成像检测技术

王 飞¹ 赵彦龙² 危 荃¹ 周正干³ 李文涛³

(1 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

(2 空军装备部驻上海地区第一军事代表室, 上海 201109)

(3 北京航空航天大学机械及自动化学院, 北京 100083)

文 摘 针对航天薄壁铝合金搅拌摩擦焊焊缝的高精度、高分辨率检测应用需求,开展了阵列超声全聚焦成像检测技术研究。基于斜楔块耦合下横波多次反射全聚焦优化算法搭建了阵列超声检测系统,利用该系统对厚度为6 mm搅拌摩擦焊焊缝不同位置处的 $\Phi 0.35$ mm横孔进行了相控阵超声扇形扫描成像和阵列超声全聚焦成像检测对比试验。试验结果表明,两种方法均能够有效检测出焊缝中心或热力影响区的横孔,但阵列超声全聚焦成像检测技术在信噪比和纵向分辨力方面更具优势,该技术的发展为航天领域复杂构件高精度、高分率、高可靠性检测难题的解决提供了新的思路和途径。

关键词 搅拌摩擦焊,阵列超声,全聚焦成像

中图分类号:TP391.9

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.XXXX.XX.001

Detection of Friction Stir Weld by Array Ultrasonic Testing Using Total Focusing Method

WANG Fei¹ ZHAO Yanlong² WEI Quan¹ ZHOU ZhenGang³ LI WenTao³

(1 Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600)

(2 The First Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Shanghai, Shanghai 201109)

(3 School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract In order to meet the application requirements of high-precision and high-resolution inspection of aerospace thin-wall aluminum alloy stir welding welds, ultrasonic array testing using total focusing method was studied. The array ultrasonic testing system was built based on the multi-reflection full focus optimization algorithm of shear wave coupled with oblique wedges. The comparative test of phased array ultrasonic testing by sector scanning and array ultrasonic testing by total focusing method for the $\Phi 0.35$ mm transverse holes at different positions of the 6mm friction stir welding seam were carried out by using the developed array ultrasonic testing system. The test results show that both methods can effectively detect the transverse holes in the weld center or heat affected zone, but array ultrasonic testing by total focusing method has more advantages in signal-to-noise ratio and longitudinal resolution. The development of this technology provides a new way to solve the problems of high precision, high score rate and high reliability detection of complex components in aerospace field.

Key words Friction stir weld, Array ultrasonic testing, Total focusing method

0 引言

搅拌摩擦焊技术作为一种绿色、高可靠的焊接技术,目前已在航空、航天、轨道交通等领域得到广泛应用。与传统的熔焊技术所不同的是,搅拌摩擦焊技术是利用搅拌工具的热-力挤压锻造作用形成材料的固相连接,焊接过程中虽然不会产生传统的

气孔、热裂纹等焊接缺陷,但是当焊接工艺控制不当时,也会导致焊缝中出现一些微小孔洞类或弱结合缺陷^[1-2]。

目前针对该类缺陷的检测常采用相控阵超声检测方法,受方法本身及仪器硬件条件制约,在检测薄壁或弯曲型面等几何结构特殊的焊缝时,有限数量

收稿日期:2020-03-20

第一作者简介:王飞,1986年出生,高级工程师,主要从事航天材料及构件无损检测技术开发与应用研究。E-mail:wf0420@163.com。

的合成声束和聚焦点往往难以确保探测区域的全覆盖,进而导致待检区域范围内灵敏度差异,一定程度上也增加了缺陷的漏检和误检概率,不利于检测质量的控制^[3-4]。尤其是近年来随着航天领域大直径贮箱全搅拌摩擦焊技术的突破,对于提升焊缝检测质量的可靠性满足现场原位高精度、高分辨率的检测应用需求就显得尤为迫切。基于全矩阵数据采集(FMC)全聚焦(TFM)成像的阵列超声检测技术是近年来发展起来的一种新技术^[6-7]。该技术相比于常规相控阵超声检测技术,可针对具有复杂几何外形或者复杂材料属性的被测试件进行检测与评价算法的定制^[3],因此为解决航天领域复杂薄壁结构缺陷的高灵敏度、高可靠性检测难题提供了有效解决方案。

本文围绕航天薄壁铝合金搅拌摩擦焊焊缝的高灵敏度、高可靠性检测应用需求,结合小直径人工缺陷对比试样开展了相控阵超声扇形扫描成像和阵列超声全聚焦成像检测对比试验研究,分析了全聚焦成像检测技术的优势,进而为该技术在航天领域的工程推广应用提供一定参考。

1 阵列超声成像检测原理

1.1 相控阵超声成像检测原理

相控阵超声检测时主要控制阵列换能器各个阵元晶片的发射和接收延时(相位)来实现合成声束的偏转或聚焦,进而通过B型、C型、S型等显示成像方式实现工件内部缺陷的检测,检测原理如图1所示^[3-4]。

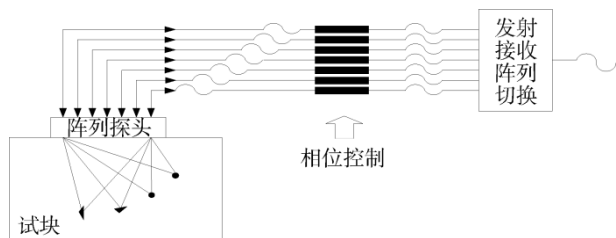


图1 相控阵超声检测原理

Fig. 1 Principle of phased array ultrasonic testing

1.2 基于全矩阵数据采集全聚焦成像的阵列超声检测原理

1.2.1 全矩阵数据采集原理

如图2图3所示,以 N 阵元的一维线性阵列探头为例,基本原理为:依次对线阵换能器中编号1到 N 的阵元进行激励,包括当前激励阵元在内的1到 N 所有阵元并行接收,由此共可获得 $N \times N$ 组波形数据。对于 i 阵元发射、 j 阵元接收所获得的数据可表示为 S_{ij} ,该 S_{ij} 包含了对应时间采样点所接收到的信号幅值^[4-5]。

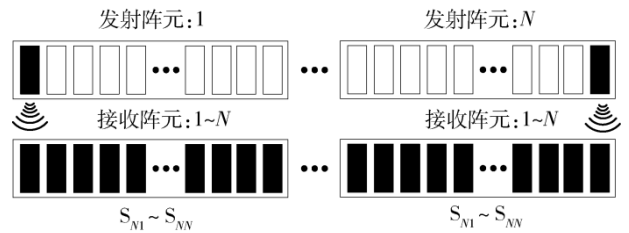


图2 全矩阵数据采集示意图

Fig. 2 Schematic diagram of full matrix data collection

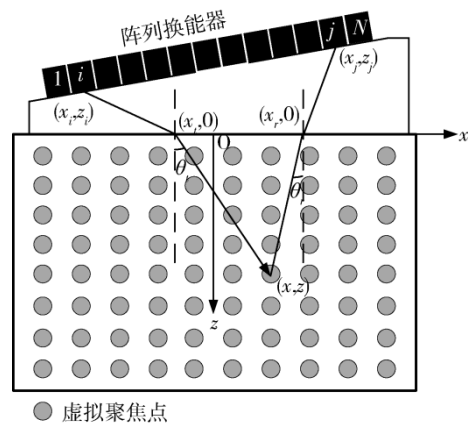
$R \backslash T$	1	2	...	j	...	N
1	S_{11}	S_{12}	...	S_{1j}	...	S_{1N}
2	S_{21}	S_{22}	...	S_{2j}	...	S_{2N}
...
i	S_{i1}	S_{i2}	...	S_{ij}	...	S_{iN}
...
N	S_{N1}	S_{N2}	...	S_{Nj}	...	S_{NN}

图3 全矩阵数据

Fig. 3 Full matrix data

1.2.2 全聚焦成像算法原理^[7-12]

基于斜楔块入射的全聚焦成像算法原理如图4所示,阵列换能器通过楔块耦合于被检区域上表面,通过1.2.1中全矩阵数据采集方法获得 S_{ij} 。针对某一目标聚焦点 (x, z) ,利用延时法则将换能器中所有发射-接收阵元组合的回波信号在该点叠加,获得表征该点信息的幅值 $I(x, z)$ 。通过对被检区域内各个聚焦点的幅值进行合成即可即实现被测区域内的高灵敏度成像。



● 虚拟聚焦点

图4 楔块斜入射条件下全聚焦成像算法

Fig. 4 Total focused ultrasound Imaging algorithm under wedge oblique incidence condition

对于特定聚焦点 (x, z) 的幅值 $I(x, z)$ 可表示为:

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N S_{ij}(t_{ij}(x, z)) \quad (1)$$

式中, $S_{ij}(t_{ij}(x, z))$ 为聚焦点 (x, z) 的幅值信息。 $t_{ij}(x, z)$ 为提取聚焦点 (x, z) 幅值的延迟时间,包括声波从阵元 i 激励传播到 (x, z) 再被阵元 j 接收所需时间,由图4可知:

$$t_{ij}(x, z) = \frac{\sqrt{(x_i - x_l)^2 + z_l^2} + \sqrt{(x_j - x_r)^2 + z_r^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x - x_l)^2 + z^2} + \sqrt{(x - x_r)^2 + z^2}}{c_2} \quad (2)$$

式中, x_i, x_j 分别为发射、接收阵元的横坐标; z_l, z_r 分别为发射、接收阵元的纵坐标; x_l, x_r 分别为发射、接收声束在界面折射点的横坐标; c_1 为楔块中纵波声速、 c_2 为试块内的横波声速。

2 搅拌摩擦焊焊缝对比试样制作

针对厚度为 6 mm 的 2219 铝合金搅拌摩擦焊对

接焊缝试样, 分别在焊缝截面中心及热影响区不同位置处加工 $\Phi 0.35 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的横孔人工反射体, 用于对比和验证不同位置处的缺陷检测效果(图 5)。其中图 5(a) 试样 1# 中焊缝中心孔 1、孔 2、孔 3 距表面深度分别为 1、3、5 mm, 图 5(b) 试样 2# 中焊缝热力影响区孔 1、孔 2、孔 3 距表面距离分别为 2、3、4 mm。

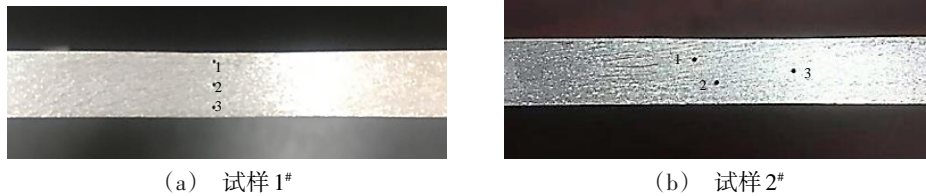


图 5 铝合金搅拌摩擦焊焊缝对比试样

Fig. 5 Comparative sample of aluminum alloy friction stir weld

3 阵列超声检测系统搭建

本文基于课题组开发的阵列超声检测系统开展试验研究, 该系统采用 AOS 阵列超声板卡、32 阵元线阵换能器、斜楔块、电脑主机等硬件及自主开发具备

相控阵和全聚焦成像功能的检测软件集成而成。其中线阵换能器频率 5 MHz, 阵元间距 0.6 mm, 阵元宽度 0.5 mm, 有机玻璃斜楔块角度 36° 。

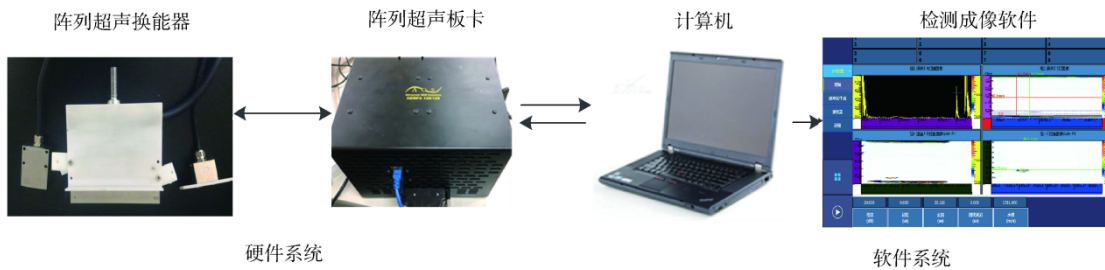


图 6 阵列超声检测系统组成

Fig. 6 Composition of array ultrasonic testing system

4 铝合金搅拌摩擦焊阵列超声成像检测试验

采用 3 中的搭建的阵列超声检测系统对图 5 人工缺陷对比试样进行了常规相控阵超声检测扇形扫描成像和阵列超声全聚焦成像检测对比试验。

4.1 相控阵超声检测试验

相控阵超声检测试验采用有机玻璃斜楔块横波

直接接触法进行检测, 选择激发的换能器阵元数量 32, 扇形扫描的声束偏转角度 $40^\circ \sim 80^\circ$, 入射声波采用直射波和一次反射波组合的方式确保焊缝区域的声束全覆盖。图 7 为检测试样 1# 和试样 2# 声线传播路径仿真, 图 8 为对应的人工孔的扇形扫描图像结果, 由图 8 可以看出在换能器位置固定确保焊缝区声

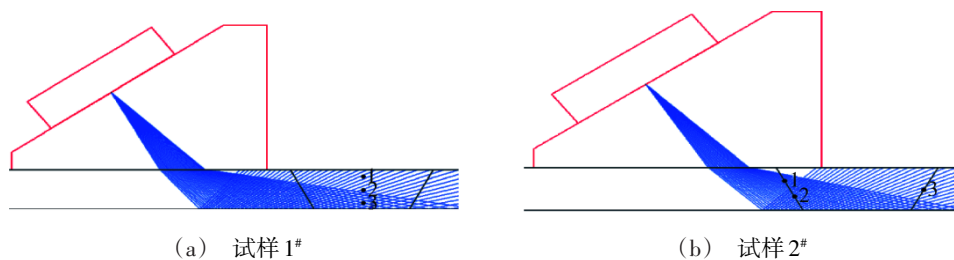


图 7 相控阵超声扇形扫描声线传播路径

Fig. 7 Acoustic ray propagation path of phased array ultrasonic testing by sector scanning

束全覆盖条件下,试样1#和试样2#中不同位置处的人工孔缺陷均能够检测出,但试样1#中位置分布相对集中的3孔缺陷成像效果一般、信噪比和纵向分辨力均较差,且位于近表面的孔1缺陷信号较弱;试样2#缺陷位置分布相对分散,成像效果优于试样1#,不同孔之间的信噪比相差(2~3)dB。

4.2 基于全矩阵数据采集的阵列超声全聚焦成像检测试验

针对试样1#和试样2#采用4.1中相同参数的换能器和楔块进行全矩阵数据采集和全聚焦成像试验,其中全聚焦成像算法是根据斜楔块耦合时多次

反射的全矩阵数据建立,检测时只需对声束类型和反射次数进行设定。图9为采用纯横波(S)模式,结合横波一次反射波发射和接收所获得的试样1#和试样2#的全聚焦成像结果,由图9(a)可以看出试样1#中不同深度位置的3个人工孔均能有效检出且纵向分辨力明显优于图8(a)中相控阵超声检测方法,实际测得3孔的信噪比均高于20 dB且相邻孔之间信噪比相差较小;图9(b)中的全聚焦成像结果更加准确、直观地反映出焊缝热力影响区不同位置人工孔缺陷的分布和形状信息且缺陷图像圆形度、对比度、信噪比均优于图8(b)的检测结果。

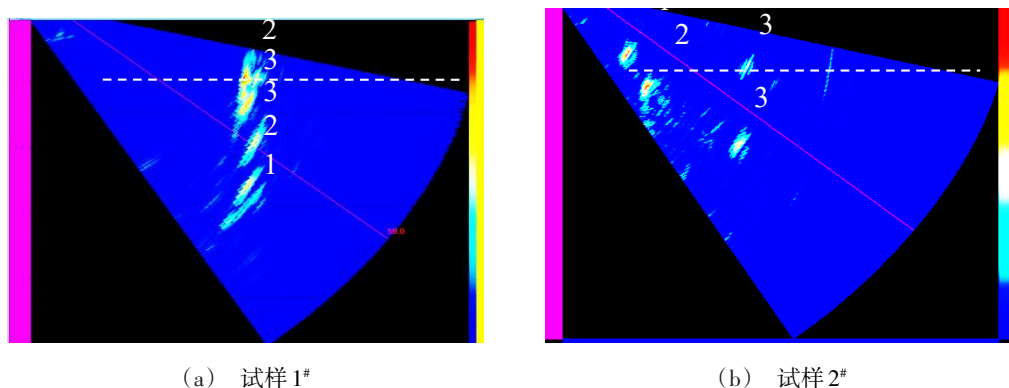


图8 相控阵超声扇形扫描成像结果

Fig. 8 Imaging results of phased array ultrasonic testing by sector scanning

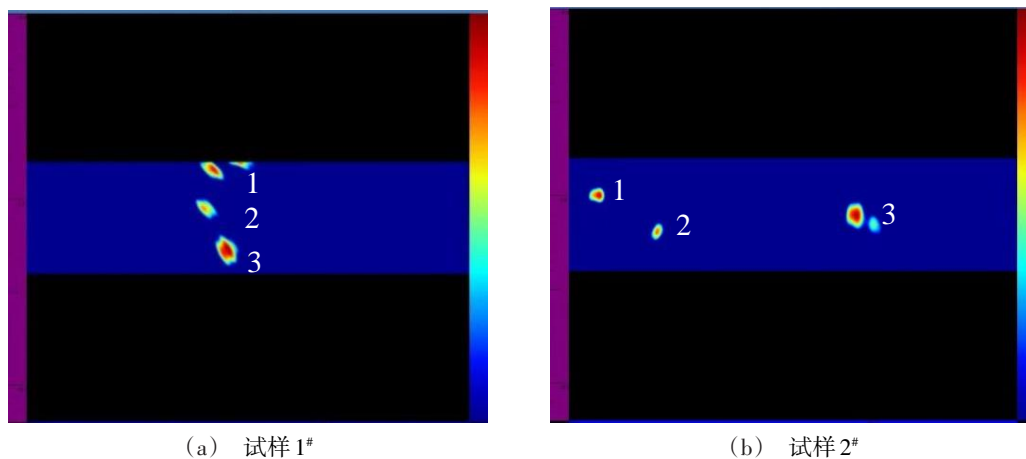


图9 阵列超声全聚焦成像检测结果

Fig. 9 Test results of array ultrasonic testing using total focus method

5 结论

(1)利用所建立的阵列超声检测系统,采用基于相位控制和全矩阵数据的阵列超声检测方法均能有效检测出6 mm厚度铝合金搅拌摩擦焊缝中 $\Phi 0.35$ mm的人工孔缺陷,采用斜楔块耦合的全聚焦成像方法能较大程度提高成像的信噪比。

(2)对于6 mm厚度焊缝而言,采用相控阵扇形扫描结合直射波和一次反射波组合的检测方法能够确保焊缝区的声束全覆盖,但大的声束偏转角会使得近表面缺陷的信噪比变差,且不同位置处缺陷信噪比差异较大,而全聚焦成像方法在不同位置缺陷检出、信噪比、纵向分辨力等方面优势明显,同时能

够更加准确、直观地反映出缺陷的分布和形状信息。

(3)全矩阵数据包含了更为丰富完整的阵列超声回波信息,后续可通过算法仿真优化、缺陷定量评价及三维成像等方面的深入研究,进一步促进该技术在航天领域的工程化应用,为解决复杂构件的高灵敏度、高可靠性检测难题提供有效的解决方案。

参考文献

[1] 栾国红,郭德伦. 搅拌摩擦焊技术在中国的发展和推广应用[J]. 航空制造技术,2014(7):70-75.

LUAN Guohong, GUO Delun. Development and application of friction stir welding technology in China [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(7):70-75.

[2] 余亮,陈玉华,黄春平,等. 搅拌摩擦焊缝缺陷的超声相控阵检测技术[J]. 焊接学报,2014,35(1):21-24.

YU Lang, CHEN Yuhua, HANG Chunping, et al. Phased array ultrasonic testing technology for weld defects of friction stir welding [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2014,35(1):21-24.

[3] 李洋,周正干. 基于全矩阵数据的阵列超声检测与评价技术研究和应用概述[J]. 航空制造技术,2019,62(14):28-37.

LI Yang, ZHOU Zhenggan. Ultrasonic array non-destructive testing and evaluation using full matrix: A review [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62 (14) : 28-37.

[4] 王飞,涂俊,危荃,等. 某薄壁构件搅拌摩擦焊锁底焊缝的超声相控阵检测[J]. 无损检测,2017,39(5):17-20.

WANG Fei, WEI Quan, et al. Ultrasonic phased array testing of friction stir welded thin-walled lock welds [J]. Non-destructive Testing Technology, 2017,39(5):17-20.

[5] 温姣玲. 航空复合材料层压板钻孔分层缺陷相控阵检测方法研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2017.

WEN Jiaoling. Research on phased array detection method of aerospace composite laminates drilling stratification defects

[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.

[6] 李衍. 超声全聚焦法成像检测缺陷表征[J]. 无损探伤,2018,42(3):1-4.

LI Yan. Flaw characterization in ultrasonic imaging inspection by total focusing methods [J]. Non-destructive testing, 2018,42(3):1-4.

[7] 周正干,李洋,周文彬. 相控阵超声后处理成像技术研究、应用和发展[J]. 机械工程学报,2016,52(6):1-11.

ZHOU Zhenggan, LI Yang, ZhOU Wenbin. Ultrasonic phased array post-processing imaging techniques: a review [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016,52(6):1-11.

[8] 刘钊,康志远,张祥林,等. 全聚焦成像技术在薄板焊缝检测中的应用[J]. 无损探伤,2018,42(4):14-17.

LIU Zhao, KANG Zhiyuan, ZHANG Xianglin, et al. Application of full focus imaging technology in thin plate weld inspection[J]. Non-destructive Testing, 2018,42(4):14-17.

[9] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance[J]. NDT & E International, 2011, 44(4):361-368.

[10] SCHMERR Jr L W. Fundamentals of ultrasonic phased arrays[M]. New York:Springer, 2015.

[11] 胡宏伟,杜剑,李洋,等. 基于稀疏矩阵的两层介质超声相控阵全聚焦成像[J]. 机械工程学报,2017,53(14):128-134.

HU Hongwei, DU Jian, LI Yang. Two-layer medium ultrasonic phased array total focusing method imaging based on sparse matrix [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (14):128-134.

[12] 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.