

文章编号: 1001-4888(2018)04-0517-08

铝制容器焊缝超声阵列成像方法研究^{*}

王炯耿¹, 姚晖², 罗宏建¹, 焦敬品³, 刘帅开³, 何存富³, 吴斌³

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 杭州 310014; 2. 国网浙江省电力公司, 杭州 310013; 3. 北京工业大学, 北京 100124)

摘要: 针对铝制容器焊缝内部缺陷检测问题, 本文提出一种基于斜入射的超声阵列全聚焦成像方法。基于斯涅尔定律, 研究了超声波在界面中的传播特性, 确定了引入楔块下声束的传播路径, 并将提出的斜入射超声阵列全聚焦成像技术用于铝制容器焊缝缺陷检测。仿真和实验结果表明, 利用该方法可很好地实现焊缝中缺陷的检测。本文研究工作为焊接构件安全评价提供了可行的技术方案。

关键词: 焊缝; 斜入射; 超声阵列; 全聚焦成像; 无损检测

中图分类号: TB52 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-045

0 引言

由于铝合金具有一系列优良的物理化学性能, 因此铝制焊接容器被广泛应用于石油、化工、机械、电力等行业。也正是铝合金独特的物理化学性能, 决定了铝制压力容器在焊接过程中容易出现气孔、未焊透、未熔合、裂纹等缺陷。同时铝制容器服役环境一般存在较大温差, 容易造成裂纹以及未熔合区域的扩展。因此, 对铝制焊接容器焊缝的检测至关重要。目前, 对铝制焊接容器检测方法主要有射线检测法和超声检测法^[1-3]。而常规的射线检测法, 缺陷检出率受制于缺陷的方向, 检测效率低, 且对人体有辐射损伤。常规的超声波探伤, 对焊缝中的未焊透缺陷、未熔合缺陷及裂纹等面积型缺陷具有较高的检测灵敏度, 但由于焊缝的材料特性复杂、结构特殊, 使用普通超声检测焊缝内部缺陷时, 检测信号中的噪声和衰减较大, 容易造成缺陷漏检。近年来, 超声相控阵技术以其灵活的声束聚焦和方向控制能力, 使其在复杂构件缺陷检测领域的应用日渐广泛。

国内外学者对焊缝的超声相控阵检测方法已经开展了深入研究。Long 等^[4]利用超声相控阵技术的全聚焦采集模式对奥氏体钢焊缝结构进行了缺陷检测。Liapis 等^[5]利用 CIVA 软件对超声波斜入射下核电设备管脚焊缝相控阵检测进行了数值仿真。胡栋等^[6]利用相控阵的扇扫成像技术对不同深度的焊缝内部缺陷进行了检测。詹湘琳等^[7]对管道环焊缝超声相控阵检测方法进行了研究, 并针对管道环焊缝缺陷特点, 通过数值仿真, 优化设计出适合管道焊缝检测的相控阵探头参数。利用商用相控阵检测系统可方便地对构件进行实时成像, 但在保证成像实时性的同时, 其缺陷检测精度和识别能力却受到了限制。对于工业构件的无损检测, 由于其物理化学状态在检测过程中相对稳定或变化很小, 使得检测过程的实时性对其检测结果的影响很小, 因此, 可以通过对超声阵列检测数据进行后处理的方法, 来提高超声相控阵检测的精度和缺陷识别能力。正因如此, 基于数据后处理的超声相控阵检测成像方法研究成为超声无损检测领域的研究热点。

^{*} 收稿日期: 2017-03-05; 修回日期: 2017-05-29

基金项目: 国网浙江省电力公司科技项目, 项目编号: 5211DS140059

通讯作者: 焦敬品(1973—), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代测控技术与方法、无损检测新技术、现代信号分析与处理技术、新型传感器技术。Email: jiaojp@bjut.edu.cn

国内外学者对相控阵全矩阵数据后处理方法进行了大量卓有成效的研究,常用的后处理方法有全聚焦成像^[8-10]、矢量全聚焦成像^[11]和相位一致成像^[12]等方法。以上的阵列后处理成像算法,大多仅应用于声束垂直入射到待测试件情形下相控阵探头采集的全矩阵数据处理。针对现有阵列成像技术仅适用于单一介质中声波垂直入射的不足,国外学者已开展了多介质下全聚焦成像方法的研究。例如,针对凸型试件相控阵探头与凹形楔块的多介质耦合问题,Sutcliffe 等^[13]提出了基于费马原理的双介质虚拟聚焦路径计算方法,实现了多介质下的全聚焦成像。对凹形试件进行相控阵检测时,基于费马原理的多介质虚拟聚焦路径计算方法中存在“多解”及“错解”等问题。为此,Weston 等^[14]提出了基于斯涅尔定律的虚拟聚焦声束路径求解算法。Zhang 等^[15,16]详细分析了多介质下虚拟聚焦误差对全聚焦成像结果的影响。基于声学原理,周正干等^[17]研究了楔块耦合检测时,声传播过程中的扩散衰减、透射衰减以及指向性衰减规律,提出了多介质 TFM 的校准新方法,与原始全聚焦成像和常规平方根校准全聚焦成像相比,相同大小、位置不同的缺陷成像幅值间的差异得到了降低,缺陷漏检率也得到了降低。

针对焊缝结构及尺寸特点,为了保证焊缝区缺陷的检出效果,需要使待测焊缝处于相控阵探头的主声束方向的范围内,并远离探头的近场区,因此,超声阵列检测实验过程中,通过在相控阵探头上加斜楔,使声波倾斜入射到待测焊缝试件中。斜楔的引入会改变试块内的声束传播路径及方向,进而影响全聚焦成像算法。本文利用斜楔块耦合的相控阵探头激发的斜入射纵波对铝制容器焊缝的内部缺陷进行了检测,基于采集的全矩阵数据,对焊缝进行斜入射纵波的全聚焦成像,实验室和现场检测实验证明了该方法对铝制容器焊缝内部缺陷检测的有效性。

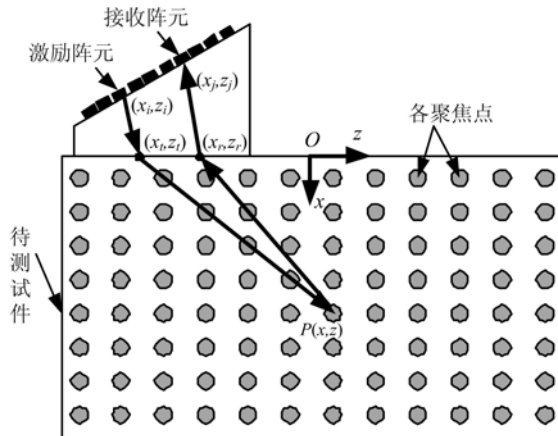


图 1 基于斜入射的全聚焦成像原理

Fig. 1 Principle of total focusing imaging with oblique incidence

1 斜入射纵波的全聚焦成像技术

1.1 纵波斜入射下的全聚焦成像原理

斜入射纵波的全聚焦成像技术^[6,7]是在普通的全聚焦成像^[5]的基础上发展而来的,其原理如图 1 所示。假设一维线性相控阵的阵元个数为 N ,其中阵元 i 为激励阵元,阵元 j 为接收阵元。由激励阵元 i 激励的声束经过楔块到达待测试件成像区域聚焦点 $P(x, z)$ 处,由此聚焦点反射后经楔块被接收阵元 j 所接收。若每个阵元激励的声波,均被所有阵元所接收,就会得到 $N \times N$ 组全矩阵数据 $h_{ij}(t)$ 。利用采集到的全矩阵数据,得到特定聚焦点 (x, z) 的幅值 $I(x, z)$ 为:

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

其中, $h_{ij}(t_{ij}(x, z))$ 为阵元 i 激励、阵元 j 接收的超声回波信号中表征目标聚焦点 (x, z) 的幅值信息; $t_{ij}(x, z)$ 为提取该幅值所用的传播时间。设楔块中的波速为 c_1 ,待测试件内波速为 c_2 ,则传播时间 $t_{ij}(x, z)$ 为:

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

其中, x_i 和 z_i 分别为阵元 i 的横、纵坐标; x_j 、 z_j 分别为阵元 j 的横、纵坐标; x_t 、 z_t 分别为激励声束在界面折射交点的横、纵坐标; x_r 、 z_r 分别为接收声束在界面折射交点的横、纵坐标; x 、 z 分别为成像区域各聚焦点的横、纵坐标。

1.2 声束在界面折射交点的确定

在楔块与待测试件界面处, 声波会发生折射, 并遵从斯涅尔定律。实际上, 根据声波传播的互易性, 可以将接收与激励声波的路径等同处理。根据图 1 所示检测模型, 确定入射声波及反射声波在楔块及试件界面间的折射点。

下面分别就界面为平面和曲面两种情况, 说明界面折射点的确定过程。

(1) 界面为平面时交点的确定过程

图 2 为界面为平面时声波的传播路径。图中, 介质 I 表示楔块, 介质 II 表示待测试件; $A(x_i, z_i)$ 为激励阵元 i 的坐标, $B(x_t, z_t)$ 为声束在界面折射交点的坐标, $C(x, z)$ 表示成像点的坐标; θ_1 为入射角, θ_2 为折射角。由 Snell 定理可得

$$\frac{\sin(\theta_1)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{c_2} \quad (3)$$

其中

$$\sin(\theta_1) = \frac{x_r - x_i}{\sqrt{(x_r - x_i)^2 + (z_r - z_i)^2}}, \quad \sin(\theta_2) = \frac{x - x_t}{\sqrt{(x - x_t)^2 + (z - z_t)^2}}$$

代入(3)式可得

$$\frac{\beta(x_t - x_i)^2}{(x_t - x_i)^2 + (z_t - z_i)^2} = \frac{(x - x_t)^2}{(x - x_t)^2 + (z - z_t)^2} \quad (4)$$

其中

$$\beta = \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2$$

将(4)式整理可得

$$p_4 x_t^4 + p_3 x_t^3 + p_2 x_t^2 + p_1 x_t + p_0 = 0 \quad (5)$$

对于方程(5), 其中 p_4 、 p_3 、 p_2 、 p_1 、 p_0 是与 x_t 无关的常数。对式(5)进行求解, 并剔除复数解, 从而得到界面折射点的坐标 x_t 。

(2) 界面为曲面时交点的确定过程

当楔块与试件间界面为曲面时, 如图 3 所示, 声束从 A 点经接触面交点 B 到达 C 点。D 点是 A 点在过 B 点的曲面切线上的投影, E 点是 C 点在过 B 点的曲面切线上的投影。若曲面表达式是已知的, 且可表示为

$$z = f(x) \quad (6)$$

由于 B 点位于交界面上, 则

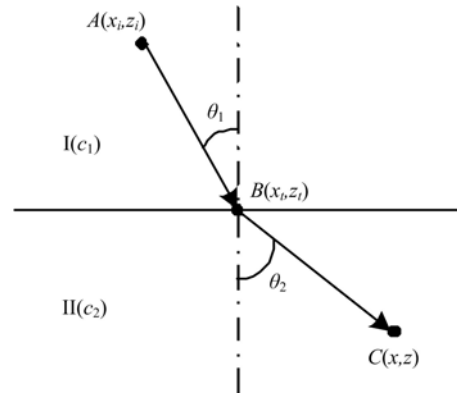


图2 界面为平面时的折射原理图

Fig. 2 A diagram of refraction at a planar interface

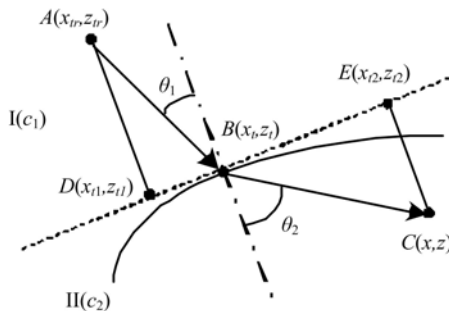


图3 界面为曲面时的折射原理图

Fig. 3 A diagram of refraction at a curved interface

$$z_t = f(x_t) \quad (7)$$

于是,分别可以得到 D、E 两点的横纵坐标

$$x_{il} = \frac{z_i - z_t + (dz_t/dx_t)x_t}{(dz_t/dx_t) + (1/(dz_t/dx_t))} + \frac{x_i}{(dz_t/dx_t)^2 + 1} \quad (8)$$

$$z_{il} = -\frac{x_{il}}{dz_t/dx_t} + z_t + \frac{x_i}{dz_t/dx_t} \quad (9)$$

$$x_{el} = \frac{z - z_t + (dz_t/dx_t)x_t}{(dz_t/dx_t) + (1/(dz_t/dx_t))} + \frac{x}{(dz_t/dx_t)^2 + 1} \quad (10)$$

$$z_{el} = -\frac{x_{el}}{dz_t/dx_t} + z + \frac{x}{dz_t/dx_t} \quad (11)$$

声束在界面交点 B 点处声束发生折射,有

$$\sin(\theta_1) = \frac{\sqrt{(x_{il} - x_t)^2 + (z_{il} - z_t)^2}}{\sqrt{(x_t - x_i)^2 + (z_t - z_i)^2}},$$

$$\sin(\theta_2) = \frac{\sqrt{(x_{el} - x_t)^2 + (z_{el} - z_t)^2}}{\sqrt{(x - x_t)^2 + (z - z_t)^2}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(3),

$$\beta \frac{(x_{il} - x_t)^2 + (z_{il} - z_t)^2}{(x_t - x_i)^2 + (z_t - z_i)^2} = \frac{(x_{el} - x_t)^2 + (z_{el} - z_t)^2}{(x - x_t)^2 + (z - z_t)^2} \quad (13)$$

整理式(13)可得

$$p_4 x_t^4 + p_3 x_t^3 + p_2 x_t^2 + p_1 x_t + p_0 = 0 \quad (14)$$

求解方程(14)即可得到 x_t 的值。在式(14)中,系数 p_4 与 x_t 无关,而 p_3 、 p_2 、 p_1 、 p_0 与 x_t 有关。这是因为在 p_3 、 p_2 、 p_1 、 p_0 的表达式中含有 x_{il} 、 z_{il} 、 x_{el} 、 z_{el} ,都和 x_t 有关,因而 p_3 、 p_2 、 p_1 、 p_0 也与 x_t 有关。对式(14)进行求解,并剔除伪解,即可得到界面折射点的横坐标 x_t 的值,进而根据曲面方程 $z_t = f(x_t)$ 可得到折射点的纵坐标。

2 铝制容器焊缝的 CIVA 仿真研究

CIVA 是一款无损检测专用的仿真软件,可用于超声、X 射线、涡流三种无损检测方法的仿真。本文利用 CIVA 软件中的超声仿真模块,对焊缝内部缺陷超声相控阵检测进行数值仿真。按照铝质容器焊缝试件建立 CIVA 仿真模型,如图 4 所示。楔块的材料为有机玻璃,厚度为 20mm。待检测试块的基体材料为铝,试块厚度为 25mm,呈圆弧状,半径为 2.41m。

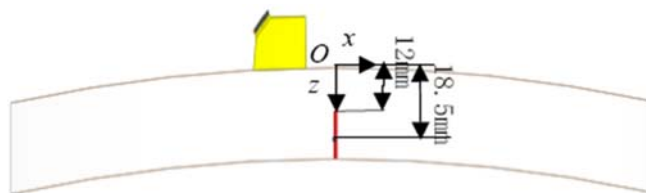


图 4 铝制容器焊缝试件的仿真模型

Fig. 4 Simulation model of weld in aluminum vessel

在焊缝中心线左侧 20mm 处,以楔块界面中心 O 为坐标原点,建立如图 4 所示的 xOz 坐标系, x 方向为缺陷宽度方向, y 方向为缺陷长度方向, z 方向为深度方向。在试块焊缝内部有三个缺陷,缺陷信息如表 1 所示。数值仿真中,相控阵检测参数设置如下:激励信号采用中心频率为 2.25MHz 的 5 周期汉宁窗调制的正弦信号,采样频率为 100MHz,检测模式为全矩阵数据采集模式。探头中心频率为 2.25 MHz,晶片数量为 32,晶片宽度为 0.65mm,晶片间距为 0.75mm。

表 1 缺陷的基本信息
Tab. 1 Basic information of defects

标号	类型	尺寸信息/mm				中心坐标 (x, z)/mm
		x 方向	y 方向	z 方向 上端	z 方向 下端	
A	圆柱孔	2	2	12	25	(0, 18.5)
B	圆柱孔	4	4	12	25	(0, 18.5)
C	槽	/	30	12	25	(0, 18.5)

利用数值仿真得到的全矩阵数据进行斜入射纵波全聚焦成像,结果如图 5 所示。从图中可以发现,全聚焦成像中有两个明显的高强度声反射区域。将成像结果中高强度声反射区域内最大值对应的位置提取出来,如表 2 所示。从表 2 中可以发现,各全聚焦成像结果中两处高强度声发射区域分别对应于仿真模型中缺陷的上下端位置。因此,全聚焦成像中,能清楚地反映出缺陷的上下端面位置,利用两个端面位置的差值,可以计算出缺陷的深度信息。仿真模型中三个缺陷的深度均为 13mm,因此全聚焦得到的缺陷深度信息与仿真模型中缺陷深度吻合较好。

表 2 缺陷的中心位置
Tab. 2 The central position of the defects

缺陷 名称	缺陷中心位置坐标			顶底纵坐标之差 (缺陷高度)
	顶端缺陷(x, z)	底端缺陷(x, z)	顶底中心(x, z)	
A	(1.25, 12.75)	(1.00, 25.50)	(1.13, 19.12)	12.75
B	(-1.00, 11.50)	(-1.00, 24.25)	(-1.00, 17.88)	12.75
C	(-0.25, 12.75)	(1.25, 25.75)	(0.50, 19.25)	13.00

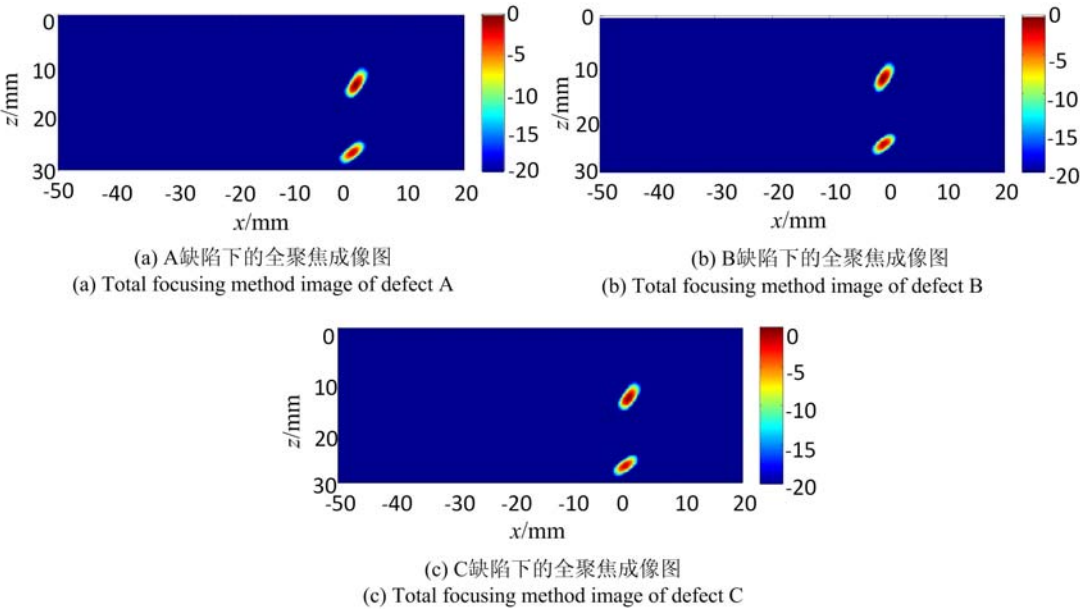


图 5 仿真缺陷的全聚焦成像结果图
Fig. 5 Total focusing method image of simulated defects

3 铝制容器焊缝缺陷超声相控阵检测实验研究

在实验室对铝制容器焊缝壳体试件进行相控阵检测实验。实验所用超声相控阵检测系统主要由计算机、Multi X LF 超声相控阵系统、相控阵探头以及待检测试件等组成,如图 6 所示。实验采用的探头



图 6 相控阵检测试验系统

Fig. 6 The testing system of phased array

的中心频率为 2.25MHz, 型号为 2L-32A5, 其基本参数与上节数值仿真中探头参数完全相同。待测试件为铝制容器焊缝试件。实验中所使用的楔块和试件的结构参数及缺陷的尺寸、位置与仿真模型均相同。鉴于铝质容器的曲面外形的特点, 实际检测中不便于在探头与试件间引入浸水层。为改善实际检测中楔块与试件的耦合情况, 对相控阵探头的检测位置进行了适当调整。因此, 检测实验中相控阵探头位置与仿真中略有不同。

对斜入射纵波检测条件下铝质容器焊缝试块进行全矩阵数据采集, 并进行全聚焦成像, 结果如图 7 所示。分析图 7 可以发现, 与仿真结果类似, 成像中均能反映出三缺陷的上下端面位置, 并由此可以确定缺陷的深度信息。

表 3 给出了实验检测得到的不同缺陷端面及深度结果。从表 3 中可以发现, 缺陷 A、C 的全聚焦成像中得到的缺陷位置及深度信息与实际的人工缺陷吻合较好, 而缺陷 B 的全聚焦成像中的缺陷位置信息与人工缺陷实际位置信息有较大的差距。分析原因认为, 由于试件结构尺寸及焊接工艺的差异, 使得三个试件中缺陷的实际尺寸与设计尺寸有一定差异。

表 3 实验成像结果中缺陷位置信息

Tab. 3 Position information of defects in experimental imaging results

缺陷名称	缺陷中心位置坐标			顶底纵坐标之差 (缺陷高度)
	顶端缺陷 (x, z)	底端缺陷 (x, z)	顶底中心 (x, z)	
A	(0.50, 13.50)	(2.50, 25.00)	(1.50, 19.25)	11.5
B	(1.50, 8.50)	(-0.75, 24.50)	(0.38, 16.50)	16
C	(-1.75, 12.25)	(0.00, 23.75)	(-0.87, 18.00)	11.5

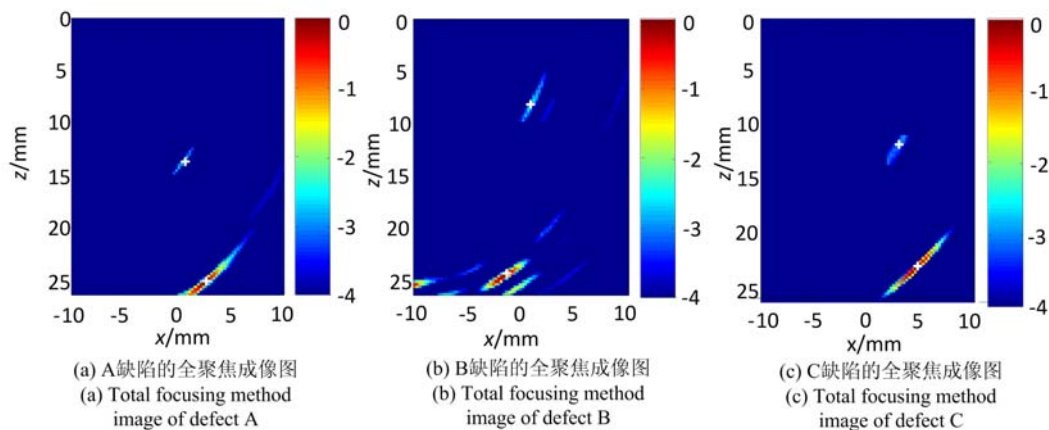


图 7 实验缺陷的全聚焦成像结果图

Fig. 7 Total focusing method image of experimental defects

4 结论

将 Snell 定律和全聚焦成像方法相结合, 本文发展了一种基于斜入射纵波楔块耦合的超声阵列全聚焦成像方法, 并将其应用于铝制容器焊缝缺陷检测。仿真和实验结果表明, 利用该方法可很好地实现焊缝中的缺陷检测, 同时, 利用全聚焦成像中高强度声发射区域分布, 可实现缺陷深度测量。与不加楔块的直入射纵波检测相比, 待检测焊缝位于相控阵探头的主声束方向范围内且远离探头的近场, 既提高了缺陷的检出能力, 同时又消除了近场区的影响。该方法更适合于工程检测。

参考文献:

- [1] 戴翔, 罗更生, 张勇芳, 等. 厚壁管道周向超声导波缺陷检测研究[J]. 实验力学, 2016, 31(5):636—645 (DAI Xiang, LUO Gengsheng, ZHANG Yongfang, et al. On the defect detection of thick-walled pipe by using circumferential ultrasonic guided wave[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5):636—645 (in Chinese))
- [2] 张东波, 潘永东, 李立兵, 等. 板背部缺陷的单侧非接触式超声无损检测方法[J]. 实验力学, 2016, 31(4):525—533 (ZHANG Dongbo, PAN Yongdong, LI Libing, et al. On the one-side non-contact ultrasonic non-destructive testing method for detection the defects on backside of plate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(4):525—533 (in Chinese))
- [3] 何存富, 周文桢, 刘增华, 等. 基于多通道时间反转 Lamb 波的铝板小缺陷检测[J]. 实验力学, 2015, 30(6):683—689 (HE Cunfu, ZHOU Wenzhen, LIU Zenghua, et al. Small-sized defect detection in aluminum plate based on time reversal Lamb waves[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6):683—689 (in Chinese))
- [4] Long R, Russell J, Cawley P, et al. Ultrasonic phased array inspection of flaws on weld fusion faces using full matrix capture[C]. Proceedings of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Publishing, 2009, 1096(1):848—855.
- [5] Liaptsis D, Cooper I, Mazeika L. A Phased array ultrasonic testing technique for the inspection of nozzle welds in the nuclear industry[C]. Proceedings of the 49th Annual British Conference on Non-Destructive Testing, 2015:1—11.
- [6] 胡栋, 王强, 肖琨, 等. 奥氏体不锈钢焊缝的相控阵超声检测[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2013, 34(1):8—11 (HU Dong, WANG Qiang, XIAO Kun, et al. A phased array ultrasonic testing of austen welds[J]. Journal of Henan University of Science & Technology:Natural Science, 2013, 34(1):8—11 (in Chinese))
- [7] 詹湘琳. 超声相控阵油气管道环焊缝缺陷检测技术的研究[D]. 天津大学, 2007 (ZHAN Xianglin. A phased array ultrasonic testing method for nondestructive testing of girth welds in gas pipeline[D]. Tianjin University, 2017 (in Chinese))
- [8] Holmes C, Drinkwater B, Wilcox P. The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2004, 46(11):677—680.
- [9] 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.
- [10] Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D. Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays; Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation[J]. Ultrasonics, 2008, 48(6):636—642.
- [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] Camacho J, Parrilla M, Fritsch C. Phase coherence imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2009, 56(5):958—974.
- [13] Stutcliffe M, Weston M, Dutton B, et al. Real-time full matrix capture with auto-focussing of known geometry through dual layered media[C]. 51st Annual Conference of The British Institute of Non-Destructive Testing, 2012.
- [14] Weston M, Mudge P, Davis C, et al. Time efficient auto-focusing algorithms for ultrasonic inspection of dual-layered media using full matrix capture[J]. NDT & E International, 2012, 47(4):43—50.
- [15] Zhang J, Drinkwater B W, Wilcox P D. Efficient computation of delay law for imaging structure with a complex surface[C]. Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013:139—142.
- [16] Zhang J, Drinkwater B W, Wilcox P D. Efficient immersion imaging of components with nonplanar surfaces[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, and Frequency Control, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2014, 61(8):1284—1295.
- [17] 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]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10):1—7 (in Chinese))

Study of ultrasonic array imaging method for weld seam of aluminum vessel

WANG Jiong-geng¹, YAO Hui², LUO Hong-jian¹, JIAO Jing-pin³,
LIU Shuai-kai³, HE Cun-fu³, WU Bin³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310013, China; 3. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the internal defects detection of aluminum vessel welds, an ultrasonic array total focusing method (TFM) is proposed in this paper based on oblique incidence. Based on Snell's law, the propagation characteristics of ultrasonic wave in the interface were investigated, and the propagation path of ultrasonic wave in media was determined with the introduced wedge. The proposed oblique incidence ultrasonic array total focus imaging technique was applied to non-destructive examination of aluminum vessel weld defects. Numerical and experimental results show that TFM with oblique incidence longitudinal wave algorithm can be used for non-destructive examination of weld defects. It provides a feasible technology for security evaluation of the welding assembly.

Keywords: weld seam; oblique incidence; ultrasonic array; total focusing method (TFM); non-destructive examination (NDE)