

DOI: 10.11973/wsje202002001

全聚焦相控阵技术的场测量

强天鹏¹, 杨贵德², 杜南开², 陈建华², 张国强¹, 龚成刚¹

(1.江苏中特创业设备检测有限公司, 南京 225003; 2.广东汕头超声电子股份有限公司, 汕头 515041)

摘要:全聚焦相控阵系统不能显示 A 扫, 从而给检测带来问题。通过研究全聚焦相控阵的声场特性和信号特性, 提出“场测量”技术路线, 阐述了有关原理和实施的基本过程, 论证了在焊缝检测应用中的可行性, 给出了一些试验结果。结果表明: 场测量技术路线有利于全聚焦相控阵技术优势的发挥, 在检测中的应用效果良好。

关键词:全聚焦相控阵; 焊缝检测; 声场特性; 场测量; 信噪比

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)02-0001-06

Field measurement of full focus phased array technology

QIANG Tianpeng¹, YANG Guide², DU Nankai², CHEN Jianhua², ZHANG Guoqiang¹, GONG Chengang¹

(1.Jiangsu Zhongtechuangye NDT Co., Ltd., Nanjing 225003, China;

2.Guangdong Shantou ultrasonic Electronics Co., Ltd., Shantou 515041, China)

Abstract: Due to the fact that there is no A-scan display in a fully-focus phased array system, so this might cause some difficulties for the defect detection. By studying the sound field characteristics and signal characteristics of the fully-focus phased array, a new technical route of "field measurement" is proposed. The principle and the basic process of implementation were explained and the feasibility in the application of weld inspection was demonstrated. Some experiments were also given. It is pointed out that the presented field measurement technology route is beneficial to the unique characteristics of the fully-focus phased array technology and it can achieve good results.

Key words: fully focused phased array; weld inspection; sound field characteristics; field measurement; signal to noise ratio

以往各种超声方法应用的技术路线都是基于 A 扫信号的, 人们习惯通过 A 扫认知检测过程中的各种情况 and 处理相关问题, 包括: ① 描述检测过程状态, 例如确定工件中超声传输路径和相应的到达时间, 辨识各个信号; ② 进行系统的各种设置, 包括增益设置、扫查范围设置、声程增益校准、角度增益校准等; ③ 获取缺陷的信息, 即测量缺陷的位置、波幅、尺寸, 并判断其性质; ④ 制订工艺和标准, 即提出检测的各项参数, 并规定其数值。

但在全聚焦相控阵技术应用时遇到了问题: 仪

器系统(使用的仪器是国产全聚焦相控阵 3D 实时成像系统, 配用的探头是 8×8 面阵探头, 单个阵元边长为 3 mm, 文中引用的数据和图像如果没有特别说明, 均是来自该仪器系统)没有 A 扫显示。没有 A 扫显示的原因是: 全聚焦仪器系统探头接收到的 A 扫信号是海量的, 一个 64 阵元探头在一个固定位置接收的 A 扫数量达 4 096 条, 其中任何一条 A 扫都无法表征检测的整体情况, 所以单个 A 扫显示是没有意义的。

针对此情况, 在研究全聚焦相控阵的声场特性和信号特性后, 认为可以用新的概念和技术路线——建立在“场”概念基础上的“场测量”和“场校准”技术路线, 解决没有 A 扫信号显示带来的一系列问题, 建立起新的焊缝检测工艺规则。

文章主要讨论“场测量”问题, 在简单回顾常规

收稿日期: 2019-10-06

作者简介: 强天鹏(1951—), 男, 研究员, 主要从事压力容器无损检测工作

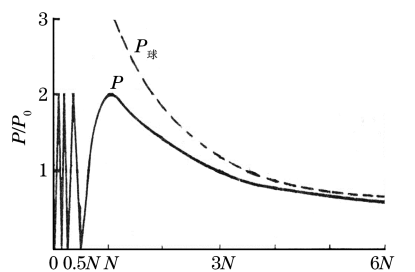
通信作者: 强天鹏, 13776663939@vip.163.com

超声场声压分布、简要介绍全聚焦相控阵原理的基础上,讨论全聚焦相控阵声场与常规超声场的不同点,进而以全聚焦相控阵声场特性和信号特性为依据论证“场测量”的可行性,描述实施过程,给出若干试验结果,最后得出按照场测量技术路线实施的检测具有较高的效率和可靠性的结论。

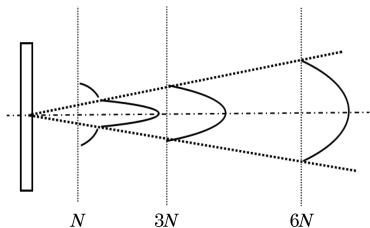
1 理论知识

(1) 常规超声场声压分布

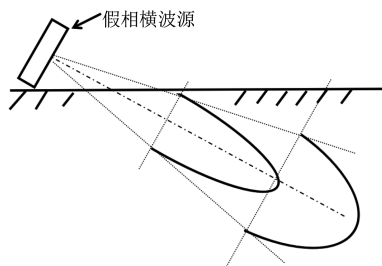
图1是描述常规超声场的几幅图(图中 P 为声压, P_0 为波源的起始声压; P_N 为理想球面波声压; N 为近场长度)。



(a) 连续波声场的声束轴线上的声压变化



(b) 直探头纵波声束横截面上的声压变化



(c) 斜探头横波声束边界和横截面上的声压变化

图1 常规超声场的描述图

(2) 全聚焦相控阵基本原理(详见专题第一篇文章)

全聚焦相控阵包括两个过程:全矩阵信号采集(FMC)过程和全聚焦成像(TFM)过程。

(3) 关于声场的几个定义(详见专题第一篇文章^[1])

声场的定义:有限空间内声能量的分布。

全聚焦声场的定义:全聚焦超声系统通过FMC-TFM过程施加于和探测到某一体积(目标

区)的超声能量分布。

目标区的定义:为研究FMC-TFM声场和进行全聚焦相控阵检测而人为设置的体积。

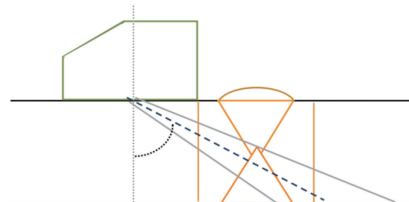
暂稳态声场和稳态声场:探头不动时目标区声场称为稳态声场;探头缓慢移动时称暂稳态声场,暂稳态声场的数据采集过程中声场能量有微小变化,这个变化可以忽略。

(4) 关于超声波束的正确理解

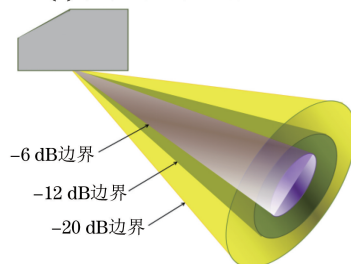
常规超声检测中,关于超声波束,在很多论文和教科书中都采用如图2(a)所示的画法,图中波束构成元素为声束轴线、边界角(扩散角)、边界线。这样的画法很简明,但是容易引起误解,比如存在以下误解:①波束有边界;②边界线以外没有超声能量;③在波束边界内的缺陷才能被发现。

实际上所谓波束边界是不存在的,如果一定要用线条来描述波束形状,需引入等声压概念,用等声压线或等声压面表示,如图2(b)所示,图中给出了-6, -12, -20 dB等3条等声压面。

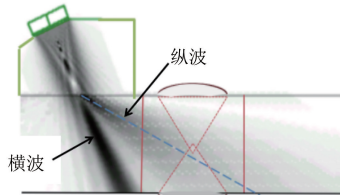
应该按照图2(c)所示来正确理解超声波束:图中灰度大小代表能量(声压)高低;灰度在图中的工件内处处存在,表明能量遍布于工件内;能量集中可能形成束,但不存在可见的波束边界。理论上的等声压线或等声压面概念可以成立,但是实际上它们



(a) 波束边界线的一般画法



(b) 用等声压面表示波束边界的画法



(c) 用灰度描述波束的画法

图2 超声波束边界线示意

是看不见摸不着的。

文章下面的讨论凡涉及波束边界的地方都采用等声压线/面来描述;关于场测量概念则需通过灰度/色度图去理解。

2 全聚焦相控阵声场特性研究

从4个方面研究全聚焦相控阵声场特性:小晶片多次发射的影响,大窗口长时接收的影响,目标区细分和聚焦的影响,信号叠加平均处理的影响。

2.1 全聚焦相控阵独特发射方式的影响

探头阵元的单个晶片尺寸很小(边长3 mm),一个信号周期内,所有晶片激发一次,要激发很多次(64次),这是全聚焦相控阵超声发射的特点,这会给超声场带来影响,有关讨论如下。

2.1.1 小晶片发射的超声波束边界角

比较边长为24 mm的方晶片(常规脉冲反射法超声)与边长为3 mm的方晶片(全聚焦相控阵探头阵元)的波束边界角,进而讨论其对声场的影响。

不同形状尺寸:不同波型的声束边界角可用式(1),(2)计算^[2]。

$$\sin \gamma_1 / c_1 = \sin \gamma_2 / c_2 \quad (1)$$

$$\sin \gamma = F\lambda / D \quad (2)$$

式中: γ 为折射角(此处为 55°); c 为声速(工件中纵波声速 $c_L = 5.95 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$,横波声速 $c_S = 3.23 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$;聚苯乙烯楔块中纵波声速 $c_P = 2.4 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$); λ 为介质中的波长; D 为圆晶片直径; F 为扩散因子。

表1 不同声压下降值时的扩散因子 F

参数	声压下降值/dB		
	6	12	20
扩散因子 F	0.51	0.70	1.08

因为扩散因子数据是关于圆晶片的,而阵列探头阵元是方晶片,需要用式(3)^[3]进行换算。

$$D = 2a/\pi^{1/2} \quad (3)$$

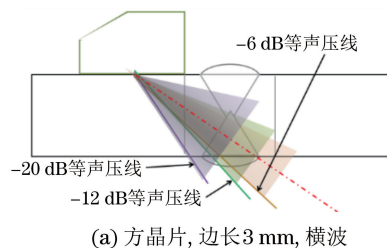
式中: a 为方晶片的边长。

边长为3 mm方晶片,频率为5 MHz,折射角为 55° 的横波和纵波斜探头,以及晶片边长为24 mm,频率为5 M,折射角为 55° 的纵波斜探头,在钢中等声压线为-6,-12,-20 dB时的边界角计算结果如表2所示,绘制的探头超声波束扩展情况如图3所示。

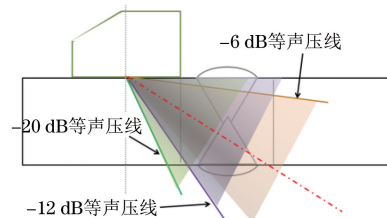
根据计算结果讨论晶片尺寸和波型对波束边界角的影响,得到以下结论。

表2 不同晶片尺寸,不同波型时的波束声压边界角

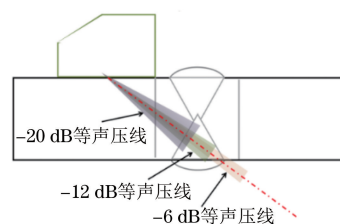
方晶片尺寸/mm	波型	上边界角/下边界角		
		-6 dB	-12 dB	-20 dB
3	横波	63.4/47.7	67.0/45.2	76.6/40.2
3	纵波	79.0/40.3	90/35.6	90/26.7
24	纵波	57.0/52.8	57.9/52.1	59.6/50.6



(a) 方晶片,边长3 mm,横波



(b) 方晶片,边长3 mm,纵波



(c) 方晶片,边长24 mm,纵波

图3 不同晶片尺寸探头,不同波型时的波束声压边界角

(1) 晶片尺寸越小,波束边界角越大,波束覆盖范围也越大。全聚焦相控阵单个阵元晶片尺寸很小,所以波束边界角和波束覆盖范围比常规脉冲反射法的大很多。

(2) 由于纵波声速比横波声速大,波长长,所以纵波的波束边界角比横波的要大很多,波束覆盖范围也大很多。这也意味着纵波声场的声压分布比横波声场的更均匀。

(3) 纵波比横波更有利于上表面附近区域的检测。3 mm晶片纵波、-12 dB声压的波束上边界角超过 90° ,相比之下,3 mm晶片、横波-20 dB波束上边界角也没有达到 90° ,说明采用纵波比横波更有利于扩大声束覆盖范围,减小上表面盲区,检出上表面缺陷。

2.1.2 小信号多次发射的影响

在一个信号周期内,全聚焦相控阵系统对阵列

探头的每一个阵元逐个激发,共发出 64 个脉冲。这种小晶片多次发射与孔径相等的大晶片一次发射的差异,以及对声场的影响可以从两个方面考虑:一是向声场注入的能量大小;二是与声场持续作用时间的长短。

(1) 探头向声场注入能量的定量计算涉及多个环节,其中不确定因素较多,例如施加于晶片的电脉冲能量、激发晶片消耗的能量、小晶片和大晶片的电声转换效率差异等。定性判断则比较简单:输入多个电脉冲的能量之和肯定大于一个脉冲的;多次激发晶片施加的能量之和应该不小于一次激发的;受激小晶片的电声转换效率应该高于大晶片的,因此前者向声场注入的能量比后者注入的应该更多一些。

(2) 对于多次发射小信号所建立的声场与一次发射一个大信号所建立的声场,笔者认为应该有所不同,前者是瞬时过程,后者是持续过程。另外,全聚焦相控阵采用有序小位移的发射方式,以小时间/位移差依次发射小声脉冲持续作用于声场,应该有利于反映目标区的细节,为检测提供更多信息。

2.2 大窗口长时接收信号的影响

探头从声场接收的能量与探头晶片面积(窗口面积)和接收信号的持续时间有关。一个信号周期内全聚焦相控阵探头整个晶片阵列(64 个阵元)同时打开接收回波信号,每个晶片依次接收 64 次,共接收 4 096 个 A 扫信号,对比常规探头的整个晶片只接收一个 A 扫信号,前者接收的能量或信息远远超过后者接收的。

2.3 目标区细分和聚焦的影响

全聚焦相控阵将目标区划分成 65 536 个微小空间,每一个微小空间对应于一个 3D 图像中的一个像素点。通过计算机的聚焦计算截取所有 4 096 个 A 扫信号中与某一个像素点相关的部分,进行叠加平均处理,得到该点的信号幅值(色度)。直至 65 536 个像素点全部处理完毕,才完成一个信号全聚焦过程。该过程具有两个优点,一是目标区细分保证了所有微小空间中的能量细微变化都能探测得到;二是聚焦有利于减小噪声,尤其全聚焦相控阵所采用的独特的有序小位移发射方式和回波信号聚焦处理方式,有利于降低结构噪声。

2.4 信号叠加平均处理的影响

叠加平均处理是数字信号处理中最常用的手段,通过叠加平均能有效降低噪声,提高信噪比。该过程实际上是一个能量/质量转换过程。全聚焦系

统接收的能量比以往各种超声方法接收的能量大得多,这就为转换提供了条件。

叠加平均信号处理的原理如图 4 所示,将探头在固定位置采集的 N 个 A 扫信号叠加再除以 N ,由于有效信号的到达时间是固定不变的,而噪声信号(主要是电噪声)是随机的,所以处理后有效信号幅度不变,噪声信号幅度降低。信号叠加平均处理后,信噪比计算式如式(4)所示

$$S_{NRa} = N^{1/2} S_{NRs} \quad (4)$$

式中: S_{NRa} 为平均处理后的信噪比; S_{NRs} 为平均处理前的信噪比; N 为叠加次数。

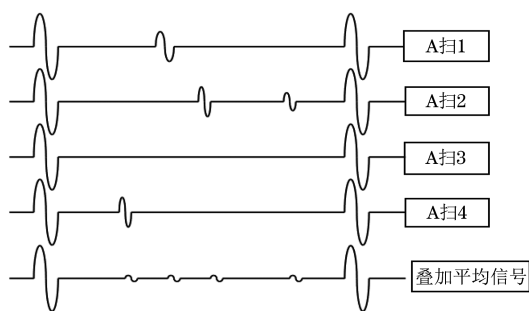


图 4 信号叠加平均处理的原理示意

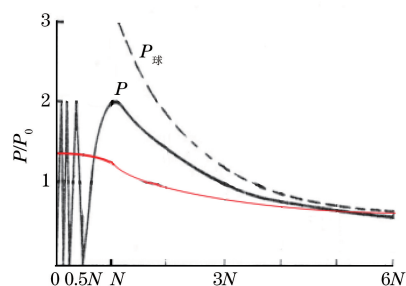
全聚焦相控阵系统的信号叠加平均次数是海量的,所以输出信号的信噪比非常高。以 64 阵元探头为例,探头在一个位置上接收的 A 扫信号有 4 096 条,也就是说要进行 4 096 次叠加平均处理。按照公式计算,全聚焦相控阵信号的信噪比是常规脉冲反射法超声信号的 64 倍,换算成分贝数为 36 dB。

2.5 小结

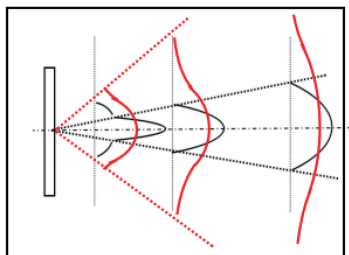
(1) 接收能量大。由于小晶片多次发射和大窗口长时间接收,全聚焦相控阵探头接收的能量远大于常规超声探头接收的。接收能量大意味着灵敏度高,能探测到更大区域的更多微小信号,并且为后续的信号叠加平均处理创造了条件。

(2) 声场声压变化平缓。小晶片发射的宽波束和海量信号的叠加平均改变了全聚焦相控阵声场的声压分布,其不同位置上的声压变化比常规脉冲反射法的超声声场平缓,且近场区影响小。专题第一篇文章中提供的实测结果也证明了这一点。两种声场的声压分布差异如图 5 所示:图中黑色曲线为脉冲反射法活塞波声场的声压曲线,红色曲线为全聚焦相控阵声场的声压曲线。声压变化平缓意味着全聚焦相控阵系统信号记录和显示范围更大,检测有效范围也更大。

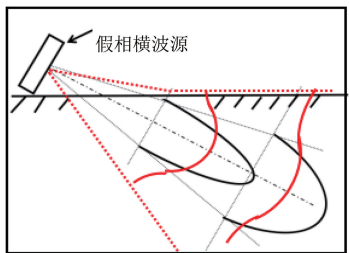
(3) 目标区中所有点的能量状态都能被探测到。小晶片多次发射使超声能量充斥于整个目标区



(a) 声束轴线上声压分布和声束横截面上声压分布差异



(b) 直探头纵波声束横截面上的声压分布



(c) 斜探头横波声束横截面上的声压分布

图5 声束轴线上声压分布和声束横截面上声压分布差异

体积中;目标区细分和聚焦使探测指向到达目标区内中的所有空间;探头的大窗口长时间接收海量A扫使系统获得较多的能量和信息,信号的高信噪比特性使得非常细微的声压变化也能被探测出。

(4) 输出信号的信噪比极高。全聚焦相控阵独特的有序小位移发射和海量信号聚焦降低了结构噪声;海量叠加平均处理降低了电噪声。理论计算和专题第一篇文章中的实测结果均证明:全聚焦相控阵信号比常规脉冲反射法信号高 36 dB,比普通相控阵信号高 18 dB。

3 场测量的原理和应用

3.1 场测量的原理

综上所述,全聚焦相控阵声场中,超声能量充斥于整个目标区体积内,且按一定规律分布。声场中任何扰动,或者说目标区内形态的任何改变(例如出现缺陷)会使超声能量的分布发生相应改变,探头接收的信号也会改变(捕捉到缺陷信息),故提出场测量。

场测量不需要像以往常规脉冲反射法那样知晓波束指向,波束中心线路径和边界角位置,这是因为

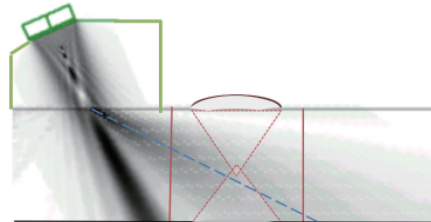
常规脉冲反射法超声像一支手电筒,用光束去扫描检测区域,必须知道何时光束指向何处;而全聚焦相控阵像太阳光一样笼罩检测目标区,无处不在。至于阳光的强弱(能量分布不均匀),可以通过场校准解决。

既然场测量不按以往基于A扫的规则进行,所以也不需要A扫以及一切与A扫有关的术语,包括超声路径、信号时间、折射角,波束边界角、波形、波高、底波、反射波、折射波、波形转换波以及相关计算公式等。

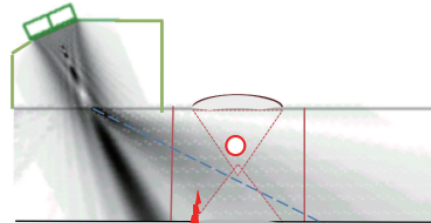
场测量的可行性和优势建立在全聚焦相控阵系统的独特的信号发射和接收方式,独特的声场,独特的目标区细分聚焦方法以及信号处理方法等一系列技术基础上。即,通过大窗口长时间接收保证获取足够能量和信息,通过海量信号的叠加平均处理获得高信噪比信号,通过对细分的目标区逐点聚焦实现检测区域覆盖和提高信号分辨率,使场测量具有很高的检测灵敏度和可靠性。

3.2 场测量过程

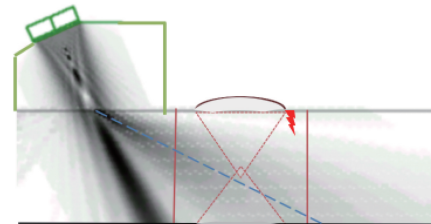
场测量过程实质上就是全聚焦相控阵检测过程。全聚焦相控阵对焊缝的检测步骤为:① 校准:在试块上按照场校准规则完成校准,不需要利用A扫。② 检测:使用经过校准的系统,按照场测量规



(a) 纵波斜射检测焊缝时的超声能量



(b) 气孔和裂纹处的超声能量



(c) 上表面热影响区裂纹处的超声能量

图6 场测量过程图示

则在工件上实施检测,同样不需要利用 A 扫。

可结合图 6 来理解用场测量进行焊缝检测的过程:

图 6(a)所示是纵波斜射检测焊缝的一般情况,探头放在焊缝一侧的适当位置,声束以某一角度穿过焊缝,用场的概念思考,认为此时超声能量充斥目标区,即目标区处处有超声能量,通过从场中获取的信号,能够探知目标区的状况。

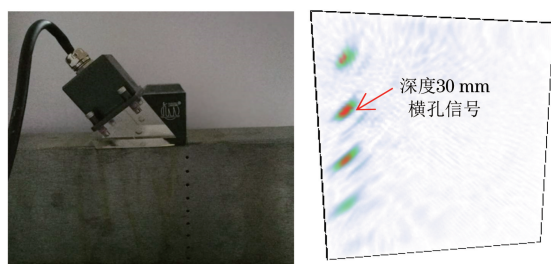
图 6(b)的不同之处是焊缝中存在两个缺陷,即气孔和裂纹。缺陷的出现将改变目标区声场能量的分布状态,探头能检测到这一改变,记录和显示这些缺陷。需要强调的是:目标区内出现任何缺陷,都会引起声场能量分布变化,只要信噪比和灵敏度足够,就能被检测出来。

图 6(c)中,有一条裂纹处于焊缝上表面的热影响区,按照传统方法检测,此裂纹无法被检测到,因为按照此位置布置的检测声束的纵波、横波、一次波、二次波都打不到它;但按照场测量理论,此裂纹能够检出!因为目标区处处有超声能量,该裂纹即使位置不佳,仍然会引起场能量分布变化从而被检测到。

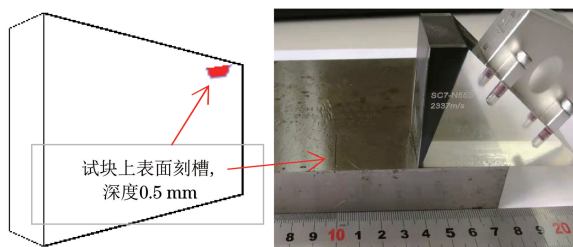
3.3 场测量的试验

通过多项试验证明场测量技术路线是可行的。

如图 7(a)所示的试验间接证明全聚焦相控阵声场比常规脉冲反射法声场的声压分布均匀,且全聚焦相控阵探头波束更宽。将全聚焦相控阵探头放



(a) 大深度覆盖试验



(b) 上表面缺陷检测试验

图 7 全聚焦相控阵检测试验

在试块上的固定位置进行测量,可同时获得 4 个不同深度横孔的回波信号,且相邻孔信号幅度差不超过 6 dB;而同样位置的脉冲反射法常规探头只有 1 个孔回波信号出现,深度差 10 mm 的相邻孔信号波幅差达 21 dB。

图 7(b)所示的试验证明全聚焦相控阵可检出上表面缺陷。使用折射角 55° 探头,探头前沿距离刻槽 40 mm 远,按照传统认识是无法检测到上表面深度 0.5 mm 刻槽的,但此试验证明该刻槽可以检测到,经增益补偿和信号处理后显示的缺陷图像非常清晰。从工程应用角度来说,全聚焦相控阵技术没有上表面盲区。

4 场测量应用优势

用“场”的概念理解检测过程,以及用“场测量”和“场校准”技术路线实施检测的全聚焦相控阵系统,其应用具有以下优势。

(1) 解决了全聚焦相控阵系统无法提供 A 扫信号显示带来的问题。在技术应用过程中,不需要利用 A 扫信号。

(2) 简化了技术应用过程,包括系统校准过程、工件扫查过程、数据评定过程、工艺编制过程,也简化了理论和实际操作培训过程。过程简化除了能大幅度提高效率外,也将减少人为失误。

(3) 检测速度大幅度提高。主要体现在以下 3 个方面:一是用沿线扫查代替锯齿扫查,发现缺陷不需要寻找最高波;二是能够覆盖更大的深度范围,初步试验证明对 100 mm 厚度焊缝可不分区,一次扫查完成检测;三是上表面缺陷的检出效果较好,无须增加对上表面盲区的补充检测。

(4) 检测灵敏度和可靠性大幅度提高。扫查灵敏度可提高 12 dB 甚至更多;目标区内局部补偿量可达 24 dB 甚至更多,能保证检测目标区内各种小缺陷的检出。

参考文献:

- [1] 强天鹏,杨贵德,杜南开,等.全聚焦相控阵技术声场特性初探[J].无损检测,2020,42(1):1-6.
- [2] 北京市技术交流站.超声波探伤原理及其应用[M].北京:机械工业出版社,1982.
- [3] 杨贵德,方俊钊,詹红庆,等.基于相控阵全矩阵采集的全聚焦技术应用研究[J].无损探伤,2016,39(2):26-27.