

基于全聚焦成像技术的焊缝近表面平面类缺陷检测

于 朋, 刚 铁

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 全聚焦成像技术 (TFM, total focusing method) 利用虚拟聚焦算法, 将采集到的每一组收发信号聚焦于成像区域的每一单元格上 (虚拟聚焦点) 并最终成像. Half-Skip TFM(HSTFM) 是在全聚焦成像技术 (TFM) 的基础上发展起来的一种超声相控阵后处理成像技术. 文中分别采用 TFM, HSTFM 这两种算法对位于焊缝试件近下表面的典型平面类缺陷 (垂直于试件表面扩展) 进行了成像检测. 结果表明, TFM 的成像仅观察到平面类缺陷上尖端的存在; 而在 HSTFM 的成像中, 平面类缺陷成像完整且清晰可见. 同时, 试验中根据 HSTFM 的成像结果, 测量出了缺陷的尺寸与定位信息, 并具有较小的测量误差.

关键词: 无损检测; 超声相控阵检测; 全聚焦成像技术; 焊接接头; 缺陷

中图分类号: TG 441.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400309

0 序 言

焊接接头在焊接过程中易形成诸如气孔、夹渣、未焊透、未熔合、裂纹等缺陷^[1]. 这些缺陷会减小焊缝的有效工作面积, 使得焊件使用性能降低, 焊件的使用寿命缩短, 甚至还会引起严重的应力集中, 成为脆性断裂的根源^[2].

超声相控阵检测技术是采用多阵元的换能器, 依靠计算机技术控制阵列中各阵元发射或接收超声波的时间来控制各阵元的声束在声场中偏转、聚焦^[3]. 相对于普通超声探头, 其具有更高的检测效率, 检测分辨力, 信噪比和灵敏度等. 该技术已成功应用于各种焊缝探伤^[4-7]. 全聚焦成像技术 (TFM, total focusing method) 一直是超声相控阵检测技术的研究热点之一. 该技术利用虚拟聚焦算法, 将采集到的每一组收发信号聚焦于成像区域的每一单元格上 (虚拟聚焦点) 并最终成像^[8]. TFM 成像技术的基础为超声相控阵全矩阵采样技术 (FMC), 即依次把相控阵探头的每一个晶片单独激发发射超声波, 声波在检测物体内部经过反射、衍射等传播后, 被所有的晶片接收并储存. 通过 FMC 技术采集到的信号数据量庞大且全面, 在经过 TFM 成像技术处理后, 成像结果具有更高的检测分辨力、信噪比等,

尤其对于微小缺陷的检测更具优势. 但 TFM 成像检测对焊接接头中的近表面缺陷的检测具有很大的难度. 其原因在于近表面缺陷属于埋藏缺陷, 并无表面开口; 同时缺陷靠近试件表面, 采用 TFM 技术检测时, 极易受到底面回波的干扰. 目前, 工业上对近表面缺陷的无损检测手段主要为磁力、涡流等^[1,9]. 但针对于内部埋藏缺陷, 这些检测手段相较于超声检测方法却并不适用. 因此研究如何提高超声相控阵对近表面缺陷的检测能力, 能够丰富该手段的适用范围, 也为提高试件的检测效率提供了可能.

文中采用 TFM 和 HSTFM^[10] 两种成像算法, 以近表面的平面类缺陷作为研究对象, 其论述分为三部分. 第一部分重点说明试验方法. 第二部分论述 TFM 和 HSTFM 两个成像技术的算法与实现过程. 第三部分则通过成像结果的对比和分析, 验证以上两种成像算法对近表面缺陷成像检测的有效性与测量的精确性.

1 试验方法

试验基于 Matrix 超声相控阵系统 (M2M, france) 进行超声检测与时域信号的全数据采集 (FMC). 其线性阵列相控阵探头 (Olympus) 含有 48 个晶片, 总长度为 28.2 mm; 探头中心频率为 5 MHz, 具体参数如表 1 所示.

表 1 超声相控阵探头参数
Table 1 Experimental array parameters

中心频率 f/MHz	晶片数目 $N(\text{个})$	晶片宽度 W/mm	晶片间距 p/mm
5	48	0.49	0.1

为模拟焊接接头中的近表面缺陷, 试验利用电火花与线切割方法加工两个铝合金试块. 该两个试块的三维尺寸一致, 长度均为 300 mm, 宽度为 100 mm, 厚度 $h = 15.0$ mm, 编号分别为 1 号, 2 号. 1 号试块不含缺陷, 为对比试块. 2 号试块中, 在位于焊缝中心处加工有宽度为 0.2 mm 的近表面人工缺陷来模拟焊接裂纹, 如图 1 所示. 定义缺陷上尖端为 A 点, 下尖端为 B 点. 加工时, 缺陷下尖端 B 点距试块下表面 $L_B = 0.5$ mm, 缺陷上尖端 A 点距试块下表面 $L_A = 3.7$ mm, 因此缺陷高度 $L = 3.2$ mm. 在对两组试块进行超声相控阵检测过程中, 探头位于试块上表面, 并以探头中心晶片为原点 $O(0, 0)$ 建立 x - z 坐标系, x 方向为探头晶片的线性排列方向, z 方向与 x 方向垂直, 其共同构成的 x - z 平面为超声扫查区域. 因此, 在该坐标系下, A, B 两点的位置坐标分别为 $(d, h-L_A)$, $(d, h-L_B)$, d 为探头中心至缺陷的水平距离. 试验中, 探头沿 x 正方向进行移动扫查, 扫查步长设置为 0.5 mm. 需要注明的是, 文中定义 d_m, h_m, l_m, l_A, l_B 为 d, h, L, L_A, L_B 的成像测量值; 同时, d_m 与 l_A, l_B 还分别起到了缺陷横向定位与纵向定位的作用.

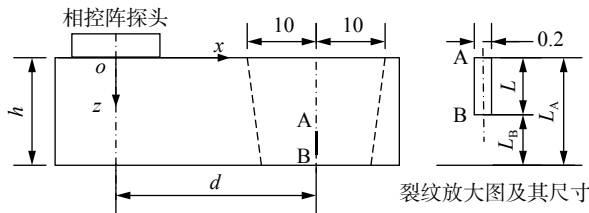


图 1 模拟试块示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic of test specimens

2 TFM 与 HSTFM 技术的成像算法

TFM 成像技术是一种虚拟聚焦算法, 其将采集到的每一组收发信号聚焦于成像区域的每一单元格上 (虚拟聚焦点) 并最终成像. TFM 成像技术的算法可以表示为^[9]

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

式中: (i, j) 为 FMC 数据中某一组时域信号 $f_{ij}(x, z)$ 的发射-接收晶片的序号; $h_{ij}(x, z)$ 为该时域信号 $f_{ij}(x, z)$ 的希尔伯特变换形式; $t_{ij}(x, z)$ 为由第 i 晶片发射, 经虚拟聚焦点 $P(x, z)$ 反射或散射并被第 j 晶片接收的声束传播时间; N 为所用相控阵线性阵列探头的晶片总数; $I(x, z)$ 为经虚拟聚焦后, 某一聚焦点 $P(x, z)$ 的成像强度.

图 2 为声波传播路径示意图. 如图 2a 所示, TFM 成像技术考虑的声束传播路径为: 声束由第 i 晶片激发后直接传播至聚焦点 $P(x, z)$, 被该点反射或散射返回至探头中第 j 晶片. 在图 1 所建立的笛卡尔坐标系中, 发射声束的第 i 晶片坐标为 $(x_i, 0)$, 接收声束的第 j 晶片的坐标为 $(x_j, 0)$. TFM 算法中传播时间 $t_{ij}(x, z)$ 可以表示为

$$t_{ij}^{\text{TFM}}(x, z) = (\sqrt{(x_i - x)^2 + z^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + z^2})/c \quad (2)$$

式中: c 为声速.

HSTFM 算法是基于 TFM 发展而来, 与 TFM 的区别在于其计算的声束传播路径不同. 如图 2b 所示, HSTFM 算法中的声束被第 i 晶片发射后, 首先经检测试件下表面反射, 其后该反射声束抵达聚焦点 $P(x, z)$, 再被该点反射或散射回到第 j 晶片. HSTFM 算法中的声束传播时间可表示为^[10]

$$t_{ij}^{\text{HSTFM}}(x, z) = (\sqrt{(x_i - x)^2 + (2h - z)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + z^2})/c \quad (3)$$

式中: h 为检测试件的厚度. 因此, HSTFM 成像技术的算法可以表示为

$$I^{\text{HSTFM}}(x, z) = \left| \sum_{i,j=1}^N h_{ij} \left[\frac{(\sqrt{(x_i - x)^2 + (2h - z)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + z^2})}{\sqrt{(x_j - x)^2 + z^2}} \right] \right| \quad (4)$$

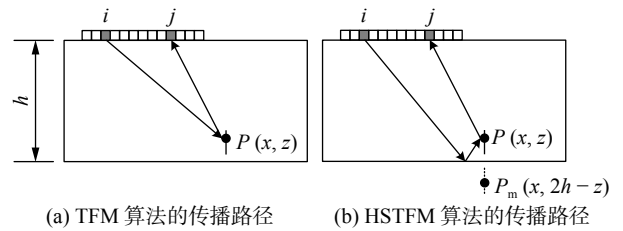


图 2 声波传播路径示意图
Fig. 2 Examples of the ray paths

HSTFM 成像还具有对称性. 若某虚拟聚焦点 P_m 与 $P(x, z)$ 关于试件下表面对称, 则该聚焦点的坐标可以表示为 $P_m(x, 2h - z)$. 经式 (3) 计算, 经过该

两点的声束传播时间是相同的,因此该两点的 HSTFM 的成像强度亦为相同.这就造成 HSTFM 的成像关于试件下表面对称的现象.

3 试验结果

3.1 TFM 成像算法的成像结果

图 3 为两组试块的 TFM 成像结果. FMC 数据采集时,超声相控阵探头的中心与缺陷重合,即 $d = 0$. 从图中可以观察到试块上表面成像 (α 区域) 与下表面成像 (β 区域), 并可从成像中得出试块的测量厚度 $h_m = 15.0$ mm, 其厚度测量结果是精确的. 对比图 3a 与 3b, 2 号试块中缺陷上尖端的成像 A_m 清晰可见, 并可得其位置坐标为 (0, 11.3), 即上尖端至探头中心的水平距离为 0, 其至试块下表面的距离 $l_A = 3.7$ mm, 该两项测量结果亦为精确. 但从图 3b 中无法观察到缺陷下尖端的成像, 因此无法得到缺陷的高度信息. 试验考察了探头中心与缺陷不同水平距离 ($0 \leq d \leq 14$ mm) 时的 TFM 成像, 其分析结果与上述相同, 即缺陷上尖端的成像清晰, 但下尖端不可见. 因此, 在工业现场检测采用 TFM 技术对近表面缺陷检测时, 仅依据缺陷上尖端的成像无法判断该缺陷类型, 且无法得出完整的缺陷定

位与定量分析.

3.2 HSTFM 成像算法的成像结果

图 4 为成像结果. 图 4a 与图 4b 分别为两组试块的 HSTFM 成像结果, 进行 FMC 数据采集时超声相控阵探头中心与缺陷的距离 $d = 24.5$ mm. 从图中可以观察到 HSTFM 成像均关于试件下表面 ($z = 15.0$ mm) 对称. 同时, 探头正下方的成像区域中有大面积的黑区 (smearing^[8]) 存在, 其产生的原因与底面反射波有关, 详见文献 [10]. 黑区亦关于试件下表面对称, 即其纵向 (z 方向) 高度为试件厚度的两倍, 横向 (x 方向) 长度与相控阵探头晶片沿 x 方向的总长度一致. 从图 4a, 4b 中可测得黑区纵向高度均为 30.0 mm, 即可得试件厚度 $h_m = 15.0$ mm, 其与试件的实际厚度一致. 图 4b 中的人工缺陷成像清晰可见, 且其亦关于试件下表面对称. 由于 HSTFM 算法考虑的是经试件底面反射后的声波传播路径, 因此该缺陷成像为人工缺陷纵向 (z 方向) 表面的成像. 图 4c 为该缺陷成像的放大图, 从成像中可以测得该缺陷最大成像强度处的 x 方向坐标为 24.6 mm, 该值即为缺陷距探头中心水平距离的测量值 d_m , 其相对误差为 0.4%. 图 4d 为缺陷成像 ($x = d_m = 24.6$ mm 处) 沿 z 方向的成像强度 I 变化曲线, 采用 -6 dB 法测量该缺陷上尖端 A_m 距离试件下表面 $l_A = 3.7$ mm, 下尖端 B_m 距离下表面 $l_B = 0.5$ mm, 故缺陷高度测量值 $L_m = 3.2$ mm, 其测量结果与缺陷实际高度相一致. 因此, 根据 HSTFM 成像可获得该缺陷准确的定量与定位信息.

针对部分焊接接头存在不同尺寸余高的情况, 文中进一步探究了 FMC 数据采集时探头中心至缺陷距离 d 的变化 ($16.0 \leq d \leq 102.5$ mm) 对近表面缺陷 HSTFM 成像测量精确性的影响. 试验结果表明, 对于缺陷的水平定位, 即缺陷距探头中心水平距离 d_m 的测量相对误差一直保持在 0.5% 以下. 而缺陷高度 L_m 与缺陷下尖端 B_m 至下表面纵向距离 l_B 的测量误差如图 5 所示. 当 $d = 16.0$ mm 时, 缺陷高度 L_m 的测量绝对误差为 0.1 mm; 此时, 缺陷下尖端 B_m 至下表面纵向距离 $l_B = 0.2$ mm, 故其绝对误差为 0.3 mm. 随着 d 的增加, 该两项测量值的绝对误差均呈现减小的趋势, 即测量精确性提高. 在 $16.0 \leq d \leq 26.0$ mm 范围内, 缺陷测量高度 L_m 的测量绝对误差保持在 0.4 mm 以内; 而测量值 l_B 则在 $18.5 \leq d \leq$

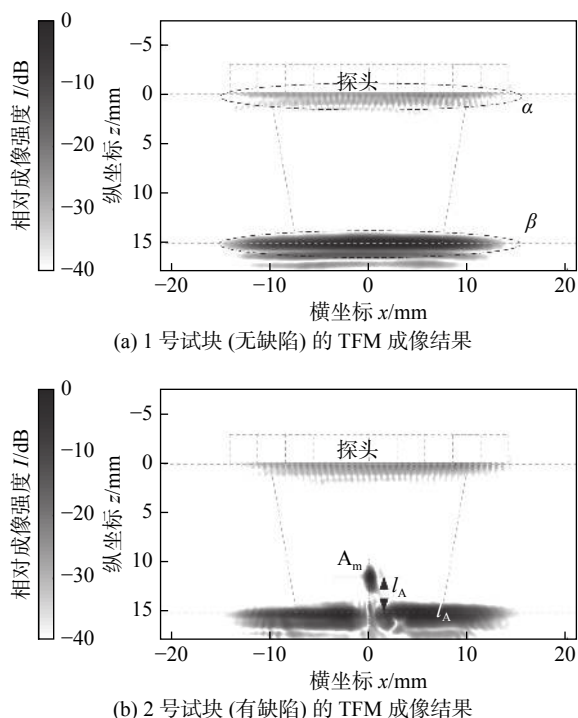
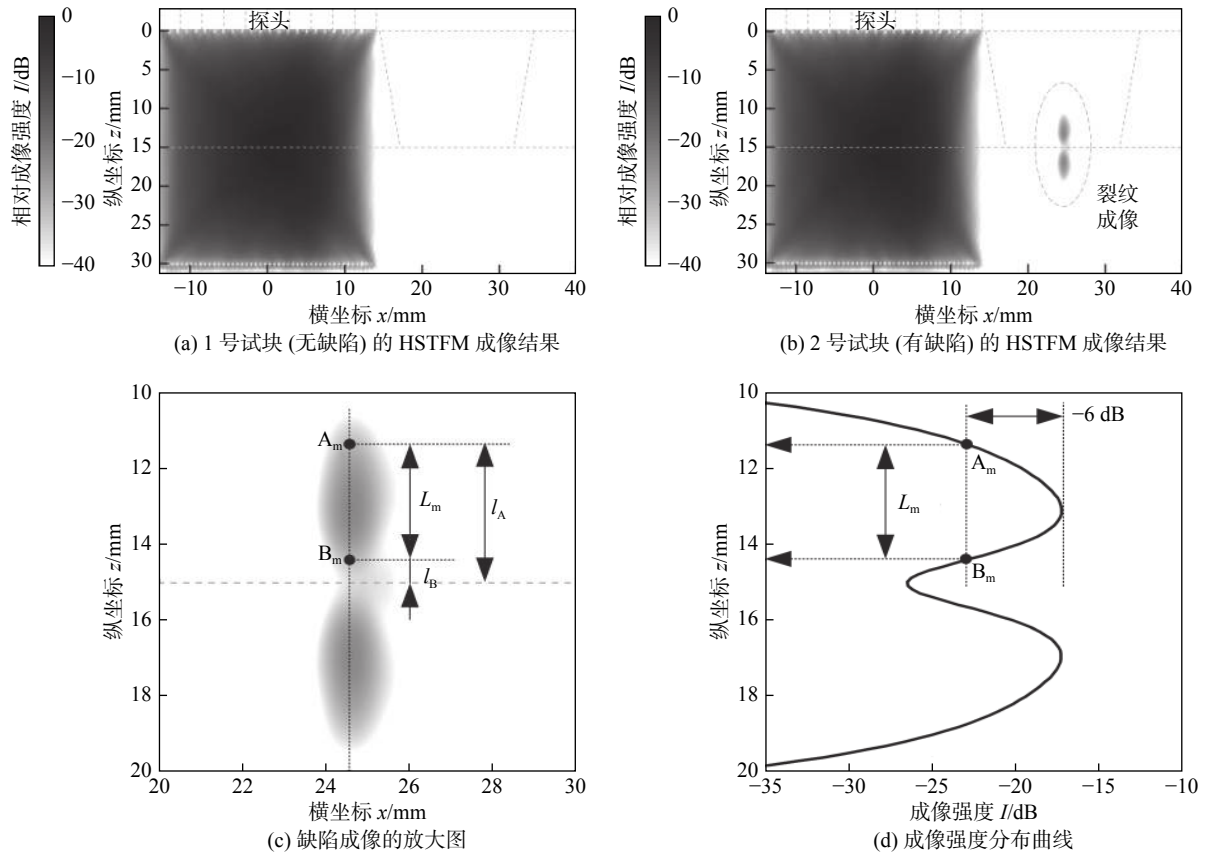
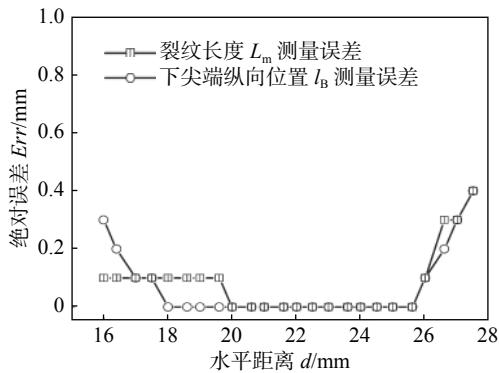


图 3 两组试块的 TFM 算法的成像结果

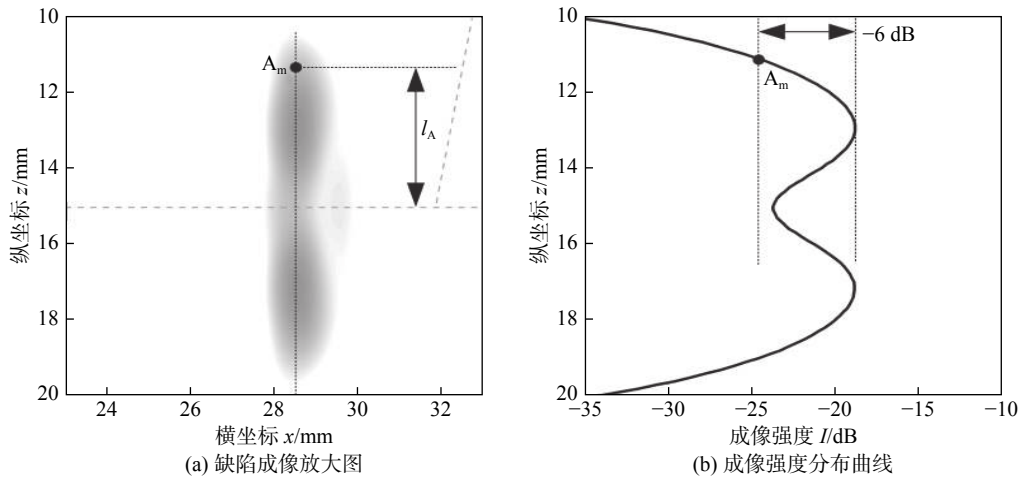
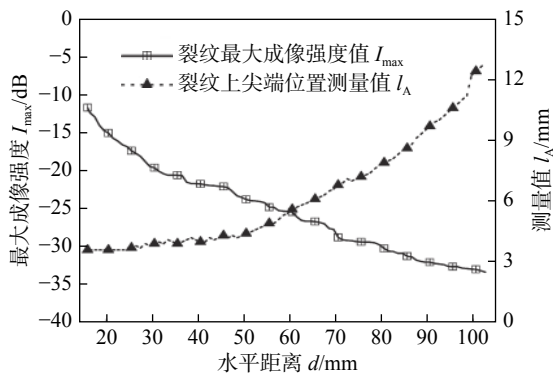
Fig. 3 Images of blocks 1 and 2 from TFM

图 4 两组试块的 HSTFM 算法的成像结果 ($d=24.6$ mm)Fig. 4 Images of blocks 1 and 2 from HSTFM ($d=24.6$ mm)图 5 缺陷高度 L_m 与缺陷下尖端纵向位置 l_B 的测量绝对误差值随缺陷水平位置 d 变化的曲线Fig. 5 Plots of absolute error of both measured crack depth, L_m and measured vertical position of crack root, l_B versus horizontal distance, d

26.0 mm 范围内的绝对误差保持在 0.05 mm 以内. 当探头中心至缺陷水平距离 d 由 26.0 mm 增长至 27.5 mm 时, 下尖端 B_m 至下表面纵向距离的测量值 l_B 则由 0.5 mm 逐步减小为 0.1 mm, 即成像中 B_m 点逐渐靠近试件下表面, 其绝对误差逐步增大. 同时, 缺陷高度 L_m 的绝对误差也逐步

增加.

当 d 超过 27.5 mm 时, 缺陷高度无法再通过 -6 dB 法测量得到. 例如图 6 为 $d = 28.5$ mm 时, 2 号试件缺陷的 HSTFM 成像放大图与该缺陷成像沿 z 方向的成像强度变化曲线. 在图 6b 中, 通过 -6 dB 法只能得到缺陷上尖端 A_m 至下表面纵向距离 l_A , 而无法得到 B_m 的纵向距离 l_B , 从而没有充足的信息计算出缺陷高度. 其原因在于随着探头与缺陷距离的增加, 到达缺陷的声束能量逐渐减小, 从而使得声束没有足够的分辨力得到精确的缺陷成像, 即缺陷的成像强度逐渐减小. 如图 7 所示, 缺陷成像中最大成像强度 I 随 d 的增加而逐渐减小; 同时, 缺陷上尖端 A_m 至下表面纵向距离 l_A 逐步增大, 说明缺陷的整体成像有随着 d 的增加而被纵向拉长的趋势, 且在 d 增加的过程中 l_A 一直大于缺陷高度的实际值 3.2 mm. 因此, 虽然当探头中心与缺陷距离较远时无法测量得到精确的缺陷高度, 但可根据缺陷成像的上尖端纵向位置预估出缺陷高度的最大可能数值, 这有利于试件的可靠性评价.

图 6 2 号试件缺陷的 HSTFM 算法的成像结果 ($d=28.5$ mm)Fig. 6 Images of crack in block 2th from HSTFM ($d=28.5$ mm)图 7 缺陷成像最大成像强度值 $I_{\max}$ 与缺陷上尖端纵向位置测量值 l_A 随 d 变化的趋势曲线Fig. 7 Plots of both Indication $I_{\max}$ and crack tip depth l_A versus horizontal distance d

4 结 论

(1) TFM 成像算法并不能对垂直于试件表面扩展的近表面平面类缺陷进行有效的成像检测与尺寸测量; 而 HSTFM 成像方法则可以胜任。

(2) 当探头中心至缺陷水平距离处于 $16.0 \leq d \leq 102.5$ mm 范围时, HSTFM 算法均可得到缺陷的清晰成像, 适用于具有余高的焊缝探伤。

(3) 基于 HSTFM 成像的缺陷尺寸测量的精度与 FMC 数据采集时探头至缺陷的水平距离 d 有关。在 $16.0 \leq d \leq 26.0$ mm 范围内, 缺陷测量高度的绝对误差保持在 0.4 mm 以内。

(4) 当探头与缺陷距离较远时, 无法通过 -6 dB 法测量得到精确的缺陷尺寸, 但仍可预估出缺陷高度的最大可能数值, 这有利于试件的可靠性评价。

参考文献:

- [1] 赵嘉华. 焊接检验 [M]. 北京:机械工业出版社, 1993.
- [2] 方洪渊. 焊接结构学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [3] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测 [M]. 北京:高等教育出版社, 2010.
- [4] Fortunato J, Anand C, Braga D F, *et al.* Friction stir weld-bonding defect inspection using phased array ultrasonic testing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(12): 3125 – 3134.
- [5] Wahbeh M, Foerder M, Boundouki R, *et al.* Phased array ultrasonic testing (PAUT) performed on electrosag weld specimen subject to cyclical tension load testing[J]. Bridge Structures, 2018, 13(4): 135 – 146.
- [6] 单宝华, 欧进萍. 海洋平台结构管节点焊缝超声相控阵检测技术 [J]. 焊接学报, 2004, 25(6): 35 – 37.
- [7] Shan Baohua, Ou Jinping. Ultrasonic phased array inspection technology of offshore platform structure tubular joint welds[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(6): 35 – 37.
- [8] Pilyugin S O, Lunin V P. Determining the probability of detecting flaws in weld joints by phased-array ultrasonic testing[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, 52(6): 332 – 338.
- [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] Rao B P C, Raj B, Jayakumar T, *et al.* An artificial neural network for eddy current testing of austenitic stainless steel welds[J]. NDT & E International, 2002, 35(6): 393 – 398.
- [11] Zhang J, Drinkwater B W, Wilcox P D, *et al.* Defect detection using ultrasonic arrays: the multi-mode total focusing method[J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 123 – 133.

第一作者简介: 于朋, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要从事无损检测方面科研工作。Email: pengyu.hit@hotmail.com.

通信作者简介: 刚铁, 男, 教授, 博士研究生导师。Email: gangt@hit.edu.cn