

# 铁素体薄壁对接焊缝的相控阵超声检测

周礼峰,蔡家藩,邱进杰,成照宇,赵伟

(中核武汉核电运行技术股份有限公司,武汉 430223)

**摘要:**当前主要规范均不包括对于铁素体薄壁对接焊缝(壁厚为3~6 mm)的超声检测方法及质量等级要求,为此基于相控阵超声检测原理,利用声场仿真技术,研究相控阵超声检测技术在铁素体薄壁管对接焊缝上的应用,并总结其关键参数。采用所设计的相控阵超声探头及检测工艺对含有大量缺陷的铁素体薄壁模拟试件进行检测,并与铁素体薄壁对接焊缝的射线检测结果进行对比,总结出了铁素体薄壁焊缝相控阵超声检测的验收准则。

**关键词:**薄壁焊缝;相控阵超声;铁素体

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2022)12-0021-05

## Phased array ultrasonic detection of ferrite thin-walled butt welds

ZHOU Lifeng, CAI Jiafan, QIU Jinjie, CHENG Zhaoyu, ZHAO Wei

(China Nuclear Wuhan Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

**Abstract:** The current main specifications do not include requirements for the detection method and quality level of ferritic thin-wall butt welds (wall thickness 3~6 mm). This article starts from the phased array detection principle and uses sound beam simulation to analyze its detection process. The sound field simulation and analysis of phased array probe parameters are used to summarize the phased array detection process of ferrite thin-wall butt welds. The designed phased array probe and process are used to measure the simulated specimens containing a large number of natural defects. At the same time, the sound field simulation is used to calculate the simulated specimen defects, and the results of the two methods are compared, so as to conclude that the ferrite thin-wall welding acceptance criteria for seams.

**Key words:** thin-walled weld; phased array ultrasonic; ferrite

铁素体薄壁对接焊缝(壁厚一般为3~6 mm)在制造期间,受余高等结构信号影响,常规超声检测较为困难,缺陷信号信噪比低,检测效率低。因此,薄壁对接焊缝一般采用射线检测(RT),射线检测对该类焊缝有着较高的灵敏度,尤其对微小的体积型缺陷有着良好的分辨力。但是在工程应用过程中,会出现由于结构限制或墙体阻挡等无法实施射线检测的情况,超声检测成为唯一可替代的体积检测方法,而常规超声检测方法亦存在无法满足需求的情况。

收稿日期:2022-04-11

作者简介:周礼峰(1983—),男,本科,工程师,主要从事无损检测技术的研发及应用工作

通信作者:赵伟,275543035@qq.com

相控阵超声检测(PAUT)技术具有声束聚焦灵活可控<sup>[1]</sup>,在不改变探头布置的前提下,可对检测对象进行多角度、多方位扫查的特点,能将信号显示为直观的扇扫图像,从而降低缺陷漏检概率,提高检测可靠性<sup>[1-2]</sup>。笔者采用相控阵超声探头对含有缺陷的模拟试件进行检测,并与射线检测的结果做对比,总结出薄壁铁素体焊缝的相控阵超声检测验收准则。

### 1 薄壁对接焊缝的规范要求

薄壁对接焊缝的无损检测方法一般为射线检测<sup>[2]</sup>,依据标准 RCC-M—2007《压水堆核岛机械设备设计和建造规则》或 NB/T 20003.3—2010《核电厂核岛机械设备无损检测 第3部分:射线检测》,射

线检测适用于任意厚度的全焊透对接焊缝和角焊缝,标准中还规定了检测薄壁对接焊缝相应的射线

源、像质计、透照方式、图像质量等检测工艺要求。相关验收准则如表 1 所示。

表 1 不同标准中薄壁焊缝的射线检测适用范围及验收准则

规范名称	适用范围	验收准则
RCC-M—2007	适用于各种厚度的均匀或非均匀的全焊透对接焊缝和角焊缝	具有下述任何一种情况的焊缝均为不合格: ①任何形式的裂纹、未熔合、未焊透、咬边; ②壁厚 $\leq 6$ mm 时缺陷最大尺寸大于 1.5 mm 的单个气孔或者单个夹渣。
NB/T 20003.3—2010	适用于任意厚度 1、2、3 级同质或异质的全焊透对接和角接接头	具有下述任何一种情况的焊接接头均为不合格: ①任何裂纹、未熔合、未焊透、咬边; ②壁厚 $\leq 6$ mm 时最大尺寸大于 1.5 mm 的任何单个圆形缺陷; ③壁厚 $\leq 6$ mm 时最大尺寸大于 1.5 mm 的任何单个条形缺陷。

同时,当前核电领域主要规范均规定了超声检测的适用范围(均要求全焊透对接焊缝壁厚 $\geq 6$  mm),如 RCC-M—2007 规范适用范围为厚度 $\geq 10$  mm 的对接焊缝;NB/T 47013—2015《承压设备无损检测》适用于厚度 $\geq 6$  mm 筒体的对接焊缝;

NB/T 20003.2—2010 适用于厚度不小于 8 mm 焊件的全焊透对接焊缝,不同规范的对接焊缝超声检测适用范围如表 2 所示。对于壁厚小于 6 mm 的薄壁对接焊缝,超声检测方法及质量等级要求没有规范可以依据。

表 2 不同规范的对接焊缝超声检测适用范围

规范名称	章节	适用范围
RCC-M—2007	MC2600	全焊透焊缝:适用于厚度 $\geq 10$ mm 焊件的全焊透对接焊缝和角焊缝
NB/T 47013—2015	第 6 章	筒体对接焊缝:适用于厚度 $\geq 6$ mm 锅炉、压力容器对接、角接及 T 型接头
NB/T 20003.2—2010	第 18 章	厚度不小于 8 mm 焊件的全焊透对接焊接接头和角接焊接接头

## 2 薄壁对接焊缝的相控阵超声检测技术

### 2.1 相控阵超声检测工艺

超声检测薄壁对接焊缝时,受焊缝余高的影响,超声一次波声束只能覆盖焊缝根部区域。笔者采用相控阵超声分区域覆盖检测,其中采用较大的声束角度覆盖一次波和二次波区域,采用较小声束角度覆盖三次波和四次波区域,相控阵探头声束覆盖示意如图 1 所示。相控阵超声多角度扫查的特性,为薄壁结构的超声检测提供了较好的解决方案,并且在显示判别方面更为直观,扇形扫查区域覆盖如图 2 所示<sup>[3]</sup>。

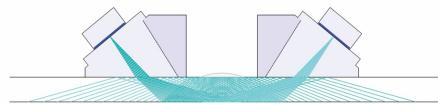


图 1 薄壁对接焊缝的相控阵探头声束覆盖示意

通过相控阵超声声束仿真,可以看出当使用 $45^\circ \sim 75^\circ$ 范围的扇扫,探头前端距离焊缝中心线 5~9 mm 时,相控阵扇形声束的二次波和三次波可完全覆盖整个焊缝区域,同时一次波和四次波扇形声束可以部分覆盖焊缝区域(见图 3)。

为了提高检测效率,试验中采用单轴的直线扫查,替代传统的两轴栅格扫查。由于现场焊接的对

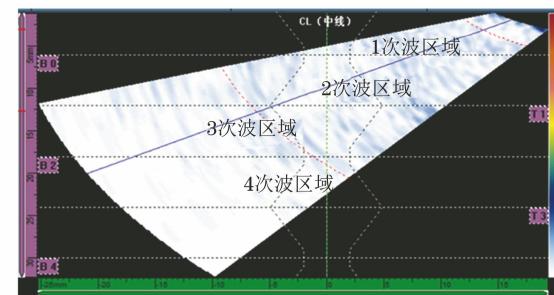


图 2 扇形扫查区域覆盖示意

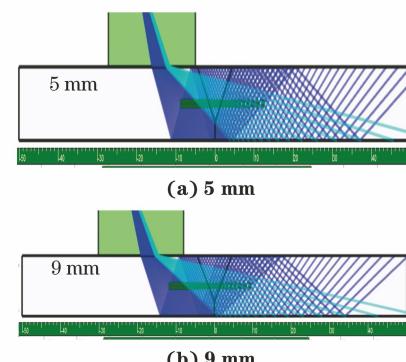


图 3 探头前端距离焊缝中心线 5 mm 和 9 mm 时的声束覆盖示意

接焊缝余高宽度不一致,故灵活选取探头前端距离焊缝中心线的距离(5~9 mm),可以适应不同的焊缝余高宽度,保证一次沿焊缝方向的扫查能够完整

覆盖整个被检区域。

## 2.2 相控阵探头设计

一般来说,探头频率越高,晶片越大,探头的声束指向性越好,缺陷分辨率越高<sup>[4]</sup>。同时,单个晶片的尺寸越小,可获得更强的声束偏转能力与更大的声束有效角度范围,还可以减少栅瓣,避免伪信号的产生。因此,对于薄壁对接焊缝,通常采用小晶片尺寸阵列和高频率探头,利用扇形多次反射波实施检测。以 6 mm 厚钢板对接焊缝为例,为保证在二次波至三次波深度范围内有更好的检测效果,可设置相控阵探头声场-6 dB 焦柱范围为 4~16 mm,不同角度的相控阵探头声场强度分布如图 4 所示。

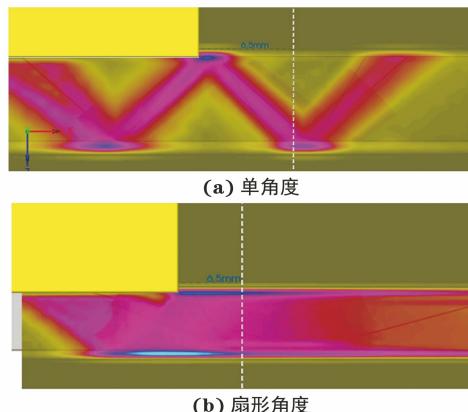


图 4 不同角度的相控阵探头声场强度分布

通过对薄壁管各参数进行声场仿真,确定采用频率为 5 MHz,晶片间距为 0.31 mm 的相控阵探头,楔块公称角度为 60°。

## 3 声场仿真

### 3.1 模拟试件缺陷设计

为了研究相控阵超声的缺陷检出能力,设计制作了 17 块含不同缺陷的铁素体薄壁对接试件,所有试件厚度均为 6 mm,且均保留焊缝余高。其中气孔和夹渣缺陷设计尺寸(直径)为 1.2~1.5 mm,未熔合缺陷的设计长度为 5 mm 和 10 mm。

试块中含 27 个气孔缺陷、18 个夹渣缺陷和 6 个未熔合缺陷,共计 45 个体积性缺陷和 6 个非体积性缺陷。

### 3.2 缺陷仿真计算

仿真计算采用与实际检测一致的相控阵检测工艺,灵敏度设置参照 CIVA 仿真计算结果,采用  $\phi 2$  mm 长横孔设置 TCG(时间校正增益)曲线。17 个模拟试件中不同类型缺陷(如气孔、夹渣以及未熔合)信息与仿真灵敏度计算结果如表 3 所示。

通过声场仿真,可知当前相控阵检测工艺可以检测出模拟试件所设计的缺陷。其中,气孔的仿真与实测信号如图 5 所示,未熔合的仿真与实测信号如图 6 所示。

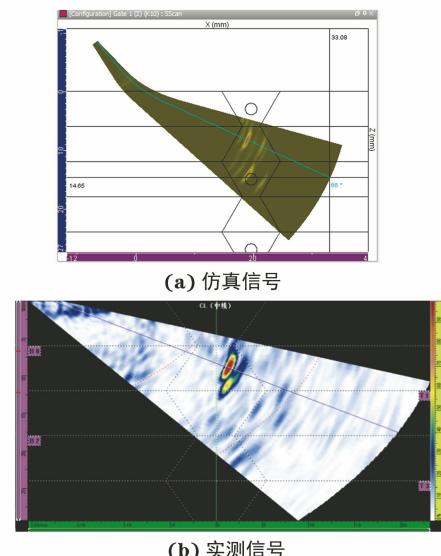


图 5 气孔的缺陷仿真与实测信号

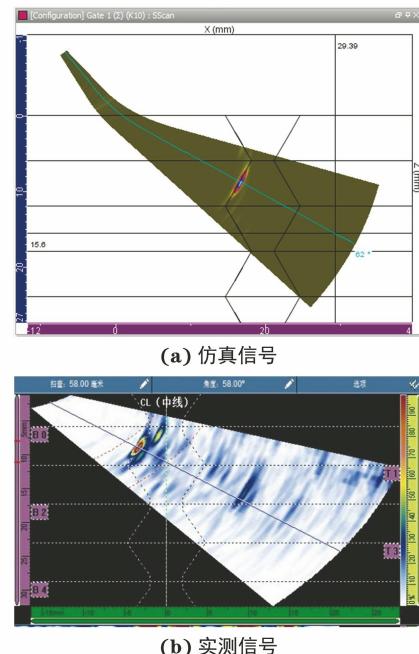


图 6 未熔合的缺陷仿真与实测信号

## 4 相控阵超声检测试验及应用

### 4.1 模拟件检测试验

#### 4.1.1 试验结果

试验过程中使用参考试块上  $\phi 2$  mm 长横孔作为反射体,对一次波到三次波范围内的孔,采用 TCG 模式设置灵敏度曲线。通过试验确定采用

45°~75°的扇扫角度范围,来实现所有角度的 TCG 曲线标定。

然后采用标定后的 TCG 曲线对模拟试件中 45 个体积型缺陷和 6 个非体积型缺陷实施超声相控阵检测,模拟试件缺陷检测结果如表 3 所示。由表 3 可见,当前模拟试件中所有缺陷均可被检出,体积型缺陷的实测灵敏度与声场仿真灵敏度符合度为 80%,非体积型缺陷的实测灵敏度与声场仿真灵敏度符合度为 100%。气孔和夹渣缺陷的相控阵超声典型信号如图 7 所示,未熔合缺陷的相控阵超声典型信号如图 8 所示。

表 3 模拟试件缺陷及其仿真与检测结果

缺陷信息			仿真及实测结果	
缺陷类型	缺陷数量	缺陷尺寸/mm	声场仿真结果	相控阵探头实测结果/dB
气孔	22	Φ1.5	Φ2 mm-15 dB	18 个缺陷幅值 > Φ2 mm-15 dB
			15.1 dB	22 个缺陷幅值 > Φ2 mm-24 dB
气孔	5	Φ1.2	Φ2 mm-17.2 dB	5 个缺陷幅值 > Φ2 mm-17.2 dB
			17.2 dB	5 个缺陷幅值 > Φ2 mm-13.2 dB
夹渣	7	Φ1.5	Φ2 mm-13.2 dB	7 个缺陷幅值 > Φ2 mm-24 dB
			13.2 dB	8 个缺陷幅值 > Φ2 mm-14.8 dB
夹渣	11	Φ1.2	Φ2 mm-14.8 dB	11 个缺陷幅值 > Φ2 mm-24 dB
			14.8 dB	4 个缺陷幅值 > Φ2 mm-4.3 dB
未熔合	4	10	Φ2 mm+0 dB	2 个缺陷幅值 > Φ2 mm+0 dB
			Φ2 mm-4.3 dB	
未熔合	2	5	Φ2 mm-4.3 dB	

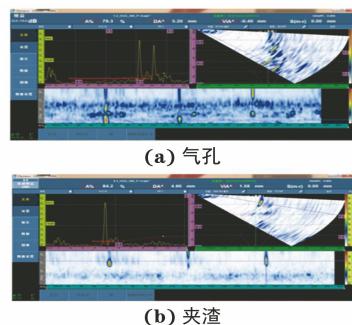


图 7 气孔和夹渣缺陷的相控阵超声典型信号

型信号如图 8 所示。

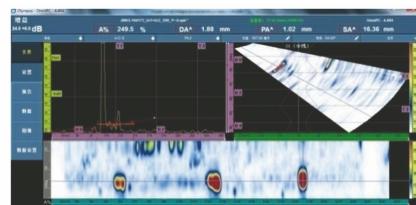


图 8 未熔合缺陷的相控阵超声典型信号

#### 4.1.2 小结

依据表 1 中 RCC-M—2007 或 NB/T 20003—2010 规范射线检测验收准则,对于壁厚不大于 6 mm 的薄壁对接焊缝不允许存在尺寸大于 1.5 mm 的单个气孔或者单个夹渣。同时,基于表 3 中对于尺寸大于 1.5 mm 的单个气孔或者单个夹渣的仿真和相控阵实测结果分析,22 个 Φ1.5 mm 气孔缺陷中有 18 个幅值 > Φ2 mm-15 dB,7 个 Φ1.5 mm 夹渣缺陷中有 5 个幅值 > Φ2 mm-13.2 dB,且所有气孔和夹渣类缺陷实测结果均大于 Φ2 mm-24 dB。因此,对于壁厚不大于 6 mm 薄壁对接焊缝的超声相控阵检测初步验收准则如下:

- ① 应记录灵敏度大于等于 Φ2 mm-24 dB 的缺陷;
- ② 凡判定为裂纹、未熔合和未焊透的缺陷显示,评为不合格;
- ③ 灵敏度大于等于 Φ2 mm-15 dB 或者长度 ≥ 5 mm 的缺陷显示,评为不合格。

#### 4.2 现场焊缝相控阵超声检测

在国内某核电厂进行 PAUT 技术验证,其大部分薄壁对接焊缝处于结构限制或墙体阻挡状态,另外约 1 000 m 焊缝未受限制,对未受限制焊缝实施了 RT(射线)检测。其中,相控阵超声检出且 RT 评判为超标缺陷的缺陷数量为 309 个,按照 4.1.2 节中的初步验收准则判定,其结果如表 4,5 所示,对于所有 309 个 RT 超标缺陷,PAUT 的综合判废率为 77%(72.5%+4.5%)。

表 4 RT 超标缺陷 PAUT 反射波幅判定结果( $\geq \Phi 2 \text{ mm-15 dB}$ )

RT 超标缺陷类型	PAUT 判废线	PAUT 检出的 RT 超标缺陷数量	PAUT 判废缺陷数量	PAUT 判废率	PAUT 判废率(合计)
非体积型缺陷	$\geq \Phi 2 \text{ mm-15 dB}$	40	36	90	72.5%
体积型缺陷		269	188	69.9	

表 5 RT 超标缺陷 PAUT 最大允许指示长度判定结果(5 mm)

PAUT 超标缺陷反射波幅	PAUT 最大允许指示长度	PAUT 检出的 RT 超标缺陷数量/个	PAUT 判废缺陷数量/个	PAUT 判废率/%
$< \Phi 2 \text{ mm-15 dB}$	5 mm	309	14	4.5

#### 4.3 薄壁对接焊缝验收准则

射线检测与相控阵超声检测属于两种不同的体

积检测方法,其中射线检测对于体积性缺陷检出率较高,超声检测对于非体积性缺陷检出率较高。同

时,壁厚不大于 6 mm 的薄壁对接焊缝受余高及焊缝内外表面状态等影响,结构信号及变形波信号较多,缺陷较难判定。因此,结合模拟试件试验及现场焊缝的试验结果分析,认为当前的相控阵超声初步验收准则可作为最终验收准则用于薄壁对接焊缝的现场检测。

#### 4.4 工程应用

采用该相控阵超声检测技术对国内某核电厂几千米的薄壁对接焊缝实施自动检测,并检出了大量缺陷,这些缺陷均经过了打磨去除、修补、计算等处理。其中,某典型缺陷 PAUT 信号及形貌如图 9 所

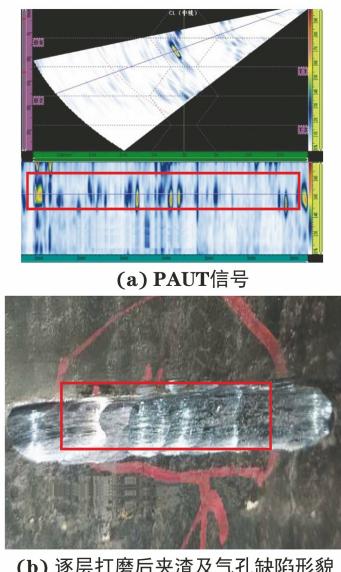


图 9 某典型缺陷的 PAUT 信号及形貌

示,经数据分析得到一段长 46 mm 的断续显示,采用砂轮机逐层(每层 0.5 mm)去除焊缝,打磨约 2 mm 后发现多个夹渣和气孔缺陷,可以看出其打磨结果与相控阵检测结果完全一致。

## 5 结语

通过声场仿真、大量模拟试件缺陷检测以及现场焊缝 RT 检测,结合现场焊缝中相控阵缺陷显示信号与逐层挖凿后气孔、夹渣的一致性试验结果,给出了薄壁对接焊缝相控阵超声验收准则,对特定情况下的超声检测结果验收具有很好的指导作用,对类似结构焊缝的超声检测结果验收具有借鉴意义。

本文获“2022 Evident 杯超声检测技术优秀论文评选”活动优胜奖。

## 参考文献:

- [1] 李衍. 焊缝超声相控阵检测——最新国际标准介绍[J]. 无损探伤, 2012, 36(4): 21-29.
- [2] 金磊. 薄壁钢部件的相控阵检测国际标准解读[J]. 无损检测, 2019, 41(9): 75-80.
- [3] 钟志民, 梅德松. 超声相控阵技术的发展及应用[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 69-71.
- [4] 李衍. 薄壁金属焊缝超声检测-常规法与相控阵法比较[J]. 无损探伤, 2015, 39(5): 1-6.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告