

# 承压设备插入式接管角焊缝超声相控阵 检测工艺

吴家喜<sup>1</sup>, 张子健<sup>1</sup>, 张小龙<sup>1</sup>, 许波<sup>1,2</sup>, 柴军辉<sup>1,2</sup>, 胡健<sup>1</sup>, 陈旭杰<sup>1</sup>

(1.宁波市劳动安全技术服务公司,宁波 315048;2.宁波市特种设备检验研究院,宁波 315048)

**摘要:** 插入式接管角焊缝的特殊结构和焊缝形式,增加了常规 A 型超声波对其检测的难度和工艺的复杂性。针对承压设备插入式接管角焊缝容易出现的几类典型缺陷,通过 CIVA 软件仿真制定检测工艺,同时采用以色列 ISONIC 2009 相控阵设备对模拟试块进行检测,并与 CIVA 仿真结果进行了比对。结果表明,插入式接管角焊缝的超声相控阵检测工艺具有良好的检测效果,验证了工艺的有效性,为相控阵检测技术在插入式接管角焊缝中的推广应用提供了相关经验。

**关键词:** 角焊缝;焊接缺陷;CIVA 仿真;超声相控阵

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2020)03-0043-07

## Ultrasonic phased array inspection technology for fillet weld of inserting nozzle of pressure equipment

WU Jiaxi<sup>1</sup>, ZHANG Zijian<sup>1</sup>, ZHANG Xiaolong<sup>1</sup>, XU Bo<sup>1,2</sup>, CHAI Junhui<sup>1,2</sup>, HU Jian<sup>1</sup>, CHEN Xujie<sup>1</sup>

(1.Ningbo Labor Safety and Technology Services Company, Ningbo 315048, China;

2.Ningbo Special Equipment Inspection and Research Institute, Ningbo 315048, China)

**Abstract:** Due to special structure and weld form of the inserted nozzle fillet weld, the difficulty of conventional A-mode ultrasonic testing and the complexity of the process are increased. In this paper, several typical defects of fillet weld of inserting nozzle for pressure equipment are discussed. The testing process is simulated by CIVA software. At the same time, the simulation test block is tested by Israel ISONIC 2009 phased array equipment, and the results are compared with those of CIVA simulation. The results show that the ultrasonic phased array inspection technology for the fillet weld of the plug-in nozzle has a good detection effect, which verifies the effectiveness of the technology and provides relevant experience for the popularization and application of the phased array inspection technology in the fillet weld of the plug-in nozzle.

**Key words:** fillet weld; defect of weld; CIVA simulation; ultrasonic phased array

角焊缝是承压设备较为常见的焊缝形式之一,其中插入式接管角焊缝是角焊缝中的一大类,主要用于接管与壳体的连接,细分为截面非全焊透和全焊透 T 型接头两大类,GB 150.3—2011《压力容器》附录 D 对各类插入式接管角焊缝的结构尺寸和适

用场合进行了详细的规定<sup>[1]</sup>。承压设备插入式接管角焊缝在焊接过程中的焊接质量受多重因素的影响,焊缝结构内部会有部分制造缺陷,如未焊透、未熔合、夹渣、气孔等;另一方面,承压设备在运行中,焊缝内部也可能产生危害性缺陷,如横向裂纹、纵向裂纹等<sup>[2]</sup>。因此,有必要对承压设备插入式接管角焊缝进行内部缺陷检测,防止危害性缺陷对设备的安全运行造成影响。

目前,在压力容器的定期检验过程中,对插入式接管角焊缝一般进行表面检测,埋藏缺陷的超声检测、射线检测未能普及,从而为设备的安全运行埋下

收稿日期:2019-05-16

基金项目:浙江省质监系统质量技术基础建设项目(20180119)

作者简介:吴家喜(1988—),男,助理工程师,本科,主要从事承压类特种设备无损检测研究工作

通信作者:张子健,zhangzj@nbanji.com

了隐患<sup>[3]</sup>。常规 A 型超声在检测插入式接管角焊缝时主要存在以下难点:① 缺陷波识别难度大, 干扰回波较多;② 缺陷定位困难;③ 工艺复杂, 需要较多的操作经验。超声相控阵技术采用多通道、多晶片技术检测, 可对缺陷进行成像, 并能进行精确定位与测量, 具有检测效率高、漏检率低、灵活性好、成像方式多等优点<sup>[4]</sup>。

笔者采用 CIVA 软件仿真了针对插入式接管角焊缝的相控阵检测工艺, 并与模拟试块的试验数据进行了比对, 为承压设备插入式接管角焊缝的内部缺陷检测提供了参考。

## 1 CIVA 软件仿真

### 1.1 CIVA 建模

根据 GB 150.3—2011 标准附录 D 中规定的全焊透 T 型接头尺寸进行建模, 选取规格为 168 mm × 10 mm(外径×壁厚)的接管, 壳体厚为 30 mm, V 型坡口, 焊缝中包含未焊透、未熔合、气孔、夹渣、裂纹等常见缺陷, 模型尺寸如图 1 所示。

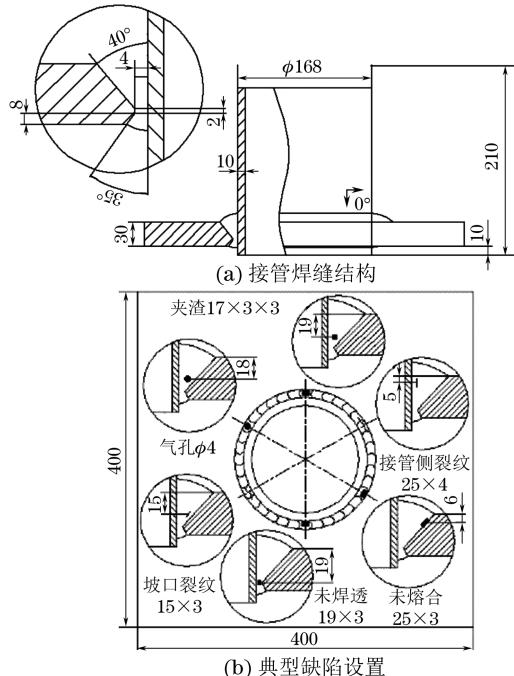


图 1 CIVA 模型尺寸示意

CIVA 三维模型如图 2 所示, 三维模型中的 6 个人工缺陷沿圆周 360° 均布, 其中: 未焊透采用多面缺陷模型进行仿真, 包含 4 个矩形反射面; 坡口未熔合模型采用单个矩形反射面进行设置; 气孔采用球形缺陷模型进行设置; 夹渣采用圆柱形夹渣专用模型进行设置; 裂纹分为坡口侧和接管侧, 均采用多面缺陷模型进行设置, 缺陷设置过程中的具体尺寸

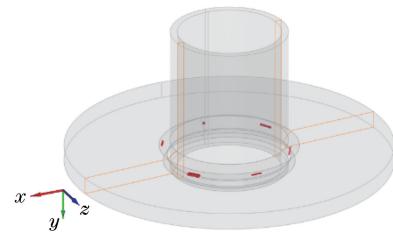


图 2 CIVA 三维模型

与设计图纸中的相同, 确保后期能与模拟试块的检测进行比对分析。

### 1.2 检测工艺设置

选用一维线性阵列相控阵探头, 阵元数  $n=32$ , 晶片间距  $p=0.5$  mm, 晶片间隙  $g=0.1$  mm, 晶片高度  $W=10$  mm, 晶片宽度  $e=0.4$  mm, 主动窗长度  $A=n \times e + g \times (n-1)=15.9$  mm, 探头频率为 5 MHz, -6 dB 带宽为 60%, 采用横波折射角为 55° 的楔块。采用扇型扫查, 扇扫角度为 34°~74°, 扇扫步进为 0.5°, 采用一次波和二次波同时覆盖进行扫查, 探头前沿距离焊缝边缘 30 mm, CIVA 模型检测工艺设置如图 3 所示。

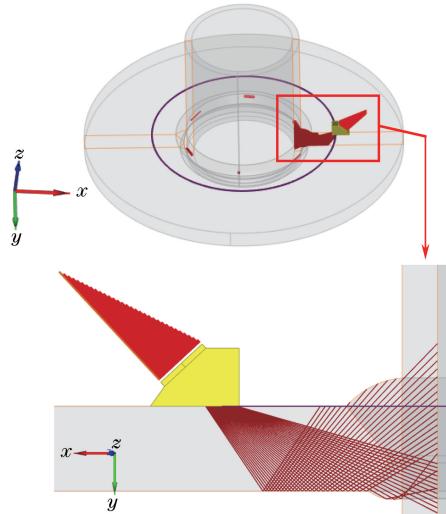


图 3 CIVA 模型检测工艺设置

从图 3 可以看出, 一次波覆盖焊缝中下部, 二次波覆盖焊缝上部, 可以实现焊缝内部全覆盖, 针对插入式接管角焊缝设置的检测工艺合理有效。

### 1.3 声场计算

声场的强弱代表相控阵检测能量的大小, 对需要重点检测的部位, 要求能量较高且集中, 才能确保缺陷响应效果好。故, 针对检测工艺进行声场能量计算, 计算过程不考虑波形转换, 仅计算横波声场。

一次波、二次波声场计算结果分别如图 4,5 所示, 从计算结果可以看出, 所选择的相控阵探头声束能量集中, 一次波-6 dB 声场范围能完全覆盖焊缝

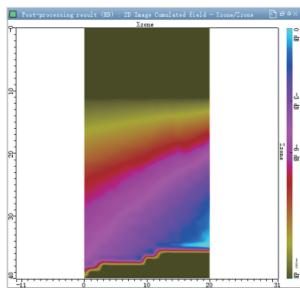


图 4 一次波声场计算结果

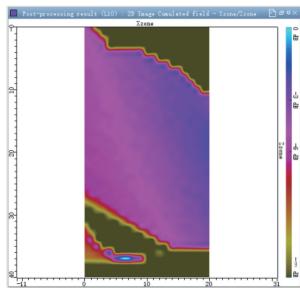


图 5 二次波声场计算结果

下部,二次波-6 dB声场范围能完全覆盖焊缝中上部,但声场能量弱于一次波,两者结合可以实现焊缝内部的全覆盖。

表 1 未焊透缺陷检测波形成分分析

信号	成份	占比/%	解释	归类
1	TrbTdT	87.5	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波接收	二次波
	TdTrbT	7.3	横波发射-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	其他
	TdT	4.7	横波发射-缺陷作用-横波接收	一次波
	TrbTdTrbT	0.5	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	其他

根据成分分析可知,回波信号 1 的组成成分主要是二次波,夹杂小部分一次波和其他波形。

#### 1.4.2 未熔合模拟检测结果

未熔合缺陷模拟检测结果如图 7 所示,从检测结果可以看出,坡口未熔合缺陷在整个 C 扫中具有最高波,且扇扫结果信噪比较高,波形信号较为单一,这是由于坡口未熔合基本与二次波主声束呈 90°,且未熔合缺陷定位较为准确,波形分析见表 2。

表 2 未熔合缺陷检测波形成分分析

信号	成份	占比/%	解释	归类
1	TrbTdTrbT	99.9	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	二次波
	TrbTdT	<0.1	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波接收	其他
	TdTrbT	<0.1	横波发射-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	其他
	TdT	<0.1	横波发射-缺陷作用-横波接收	一次波

根据成分分析可知,未熔合回波信号较为单一,均为二次波信号,成分越单一的波形信号,对缺陷的定量和定位越有利。

#### 1.4 缺陷响应

采用经过声场覆盖验证的检测工艺对 CIVA 三维模型进行沿焊缝相控阵 C 扫成像,并对回波波形进行成分分析,为了简化计算,仿真过程不考虑波形转换,仅计算横波声场缺陷的响应结果。

##### 1.4.1 未焊透模拟检测结果

未焊透缺陷模拟检测结果如图 6 所示,从检测结果可以看出,未焊透缺陷回波较整个 C 扫中的最高回波低 15 dB,扇扫图中回波信号较为杂乱,这是由于未焊透具有多个反射面,同时对两个回波较大信号进行成分分析,回波 1 的波形成分分析如表 1 所示。

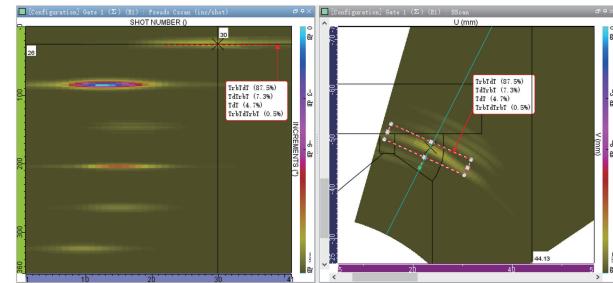


图 6 未焊透缺陷模拟检测结果

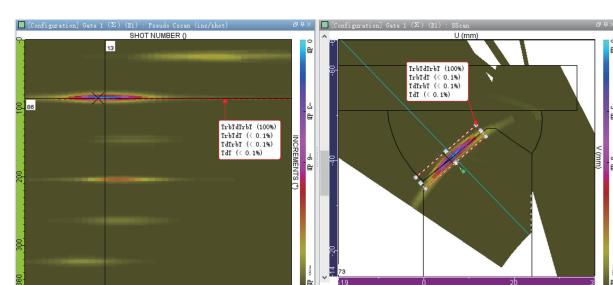


图 7 未熔合缺陷模拟检测结果

##### 1.4.3 气孔模拟检测结果

气孔缺陷模拟检测结果如图 8 所示,从检测结果可以看出,气孔检测结果信噪比较高,气孔缺

陷回波较整个 C 扫中的最高回波低 24 dB, 波形成分分析见表 3。

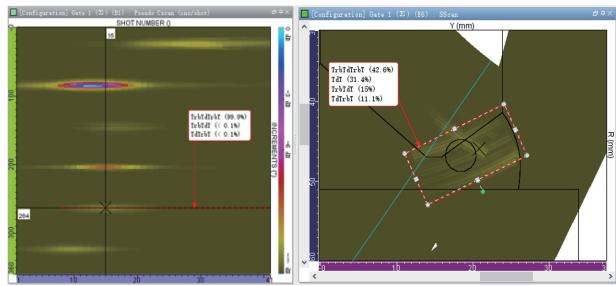


图 8 气孔缺陷模拟检测结果

根据成分分析可知,气孔回波信号成分主要为一次波和二次波,二次波占比较大。

#### 1.4.4 夹渣模拟检测结果

夹渣缺陷模拟检测结果如图 9 所示,从检测结

果可以看出,夹渣检测结果信噪比较高,夹渣缺陷回波较整个 C 扫中的最高回波低 11 dB,由于夹渣所处的位置,同时被一次波和二次波检测到,波形成分分析见表 4。

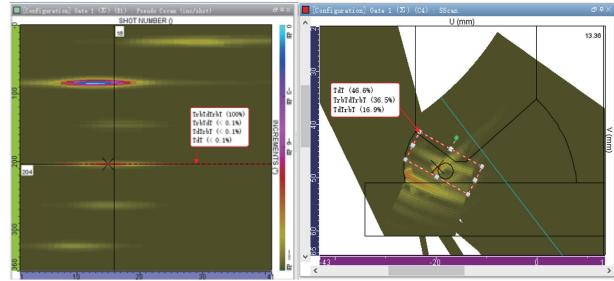


图 9 夹渣缺陷模拟检测结果

根据成份分析可知,夹渣回波信号主要为一次波和二次波成分,一次波占比较大。

表 3 气孔缺陷检测波形成分分析

信号	成分	占比/%	解释	归类
1	TrbTdTrbT	42.6	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	二次波
	TdT	31.4	横波发射-缺陷作用-横波接收	一次波
	TrbTdT	15	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波接收	其他
	TdTrbT	11.1	横波发射-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	其他

表 4 夹渣缺陷检测波形成分分析

信号	成分	占比/%	解释	归类
1	TdT	46.6	横波发射-缺陷作用-横波接收	一次波
	TrbTdTrbT	36.5	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	二次波
	TdTrbT	16.9	横波发射-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	其他

#### 1.4.5 坡口裂纹模拟检测结果

坡口裂纹缺陷模拟检测结果如图 10 所示,从检测结果可以看出,坡口裂纹检测结果信噪比较高,回波较整个 C 扫中的最高回波低 21 dB,波形成分分析见表 5。

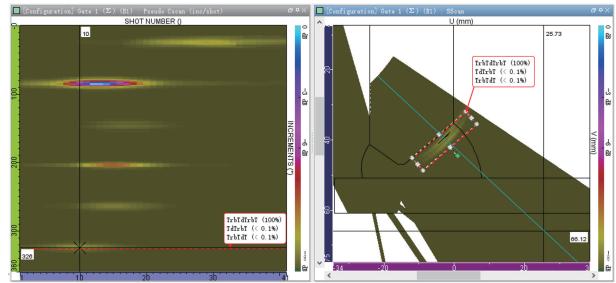


图 10 坡口裂纹缺陷模拟检测结果

根据成分分析可知,坡口裂纹回波信号较为单一,均为二次波信号。

#### 1.4.6 接管侧裂纹模拟检测结果

接管侧裂纹缺陷模拟检测结果如图 11 所示,从检测结果可以看出,接管侧裂纹检测结果信噪比较

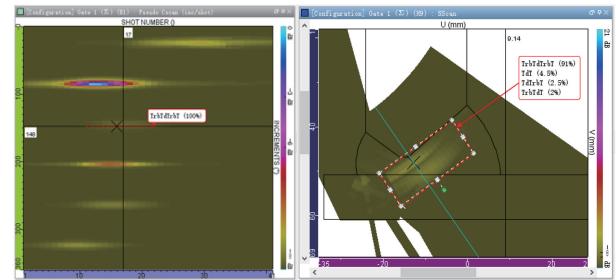


图 11 接管侧裂纹缺陷模拟检测结果

高,但回波较弱,是整个 C 扫中信号最弱的缺陷,比最高波低 28 dB,原因是接管侧裂纹走向为竖直方向,与二次波波束方向夹角较小,反射信号最弱,波形成分分析见表 6。

根据成分分析可知,接管侧裂纹回波信号仅为微弱的二次波反射信号,信号极弱,采用试验的检测工艺容易漏检,需采用其他方法进行补充检测,如采用相控阵柔性直探头进行内检测,此方法针对接管侧裂纹具有较高的检测灵敏度,因为声束方向与缺陷基本呈 90°夹角,反射最强。

表 5 坡口裂纹缺陷检测波形成分分析

信号	成份	占比/%	解释	归类
1	TrbTdTrbT	99.9	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	二次波
	TrbTdT	<0.1	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波接收	其他
	TdTrbT	<0.1	横波发射-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	其他
	TdT	<0.1	横波发射-缺陷作用-横波接收	一次波

表 6 接管侧裂纹缺陷检测波形成分分析

信号	成份	占比/%	解释	归类
1	TrbTdTrbT	91	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	二次波
	TdT	4.5	横波发射-缺陷作用-横波接收	一次波
	TdTrbT	2.5	横波发射-缺陷作用-横波-底面反射-横波接收	其他
	TrbTdT	2.0	横波发射-底面反射-横波-缺陷作用-横波接收	其他

## 2 模拟试管检测

### 2.1 检测设置

为了验证检测工艺的有效性和 CIVA 仿真结果的可靠性,根据图 1 相关尺寸,加工模拟试管,采用以色列 ISONIC 2009 相控阵设备进行检测,探头型号为 5L32-0.5×10,楔块几何角度为 36°,采用直射波及一次反射波扇扫检测,探头前沿距离焊缝边缘 30 mm,采用角焊缝专用扫查器进行距离控制,同时采用角焊缝专用编码器记录行走的路程,扇扫角度为 34°~74°,扫查步进为 0.5°,检测灵敏度为  $\phi 2 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} - 18 \text{ dB}$ ,扫查现场如图 12 所示,相控阵扫查探头实物如图 13 所示。



图 12 插入式接管角焊缝扫查现场



图 13 相控阵扫查探头实物

### 2.2 检测结果

#### 2.2.1 未焊透扫查结果

通过扇扫结果可以看出,未焊透同时具有一次波和二次波信号,略显杂乱,与 CIVA 仿真结果相似度较高,经过测量,未焊透长度为 17.0 mm,高度为 4.1 mm,深度为 18.6 mm,波高为 99%。未焊透缺陷扫查结果如图 14 所示。

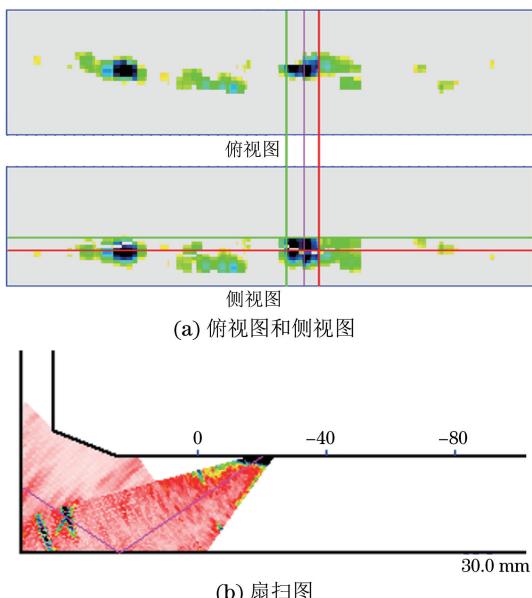


图 14 未焊透缺陷扫查结果

#### 2.2.2 未熔合扫查结果

通过扇扫结果可以看出,未熔合信号为二次波信号,信噪比高,与 CIVA 仿真结果相似度极高,经过测量,未熔合长度为 27.0 mm,高度为 4.1 mm,深度为 7.1 mm,波高为 130%。未熔合缺陷扫查结果如图 15 所示。

#### 2.2.3 气孔扫查结果

通过扇扫结果可以看出,气孔信号为一次波信

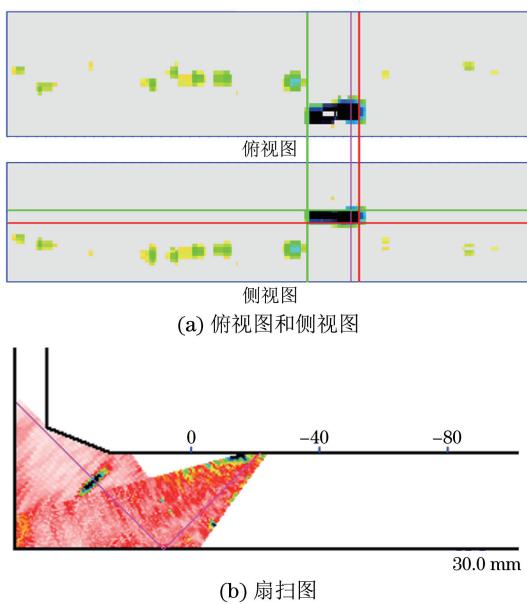


图 15 未熔合缺陷扫查结果

号,信噪比较高,与 CIVA 仿真结果相似度高,经过测量,气孔当量为  $\phi 3.3$  mm,深度为 18.7 mm,波高为 90%。气孔扫查结果如图 16 所示。

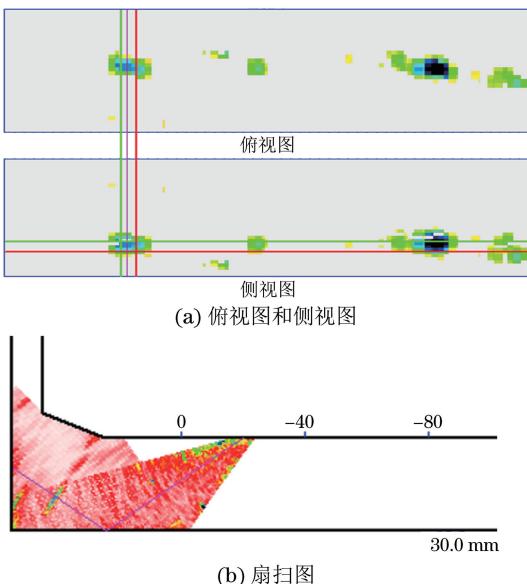


图 16 气孔缺陷扫查结果

#### 2.2.4 夹渣扫查结果

经过测量,夹渣长度为 14.0 mm,高度为 3.3 mm,深度为 19.2 mm,波高为 102%。夹渣缺陷扫查结果如图 17 所示。

#### 2.2.5 坡口裂纹扫查结果

经过测量,坡口裂纹长度为 13.5 mm,高度为 4.6 mm,深度为 16.6 mm,波高为 130%。坡口裂纹缺陷扫查结果如图 18 所示。

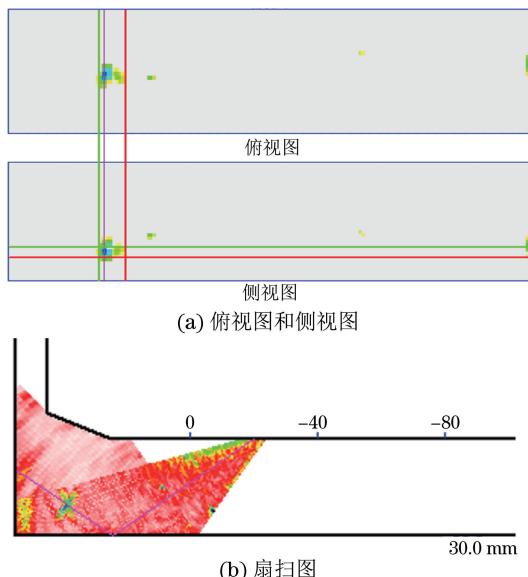


图 17 夹渣缺陷扫查结果

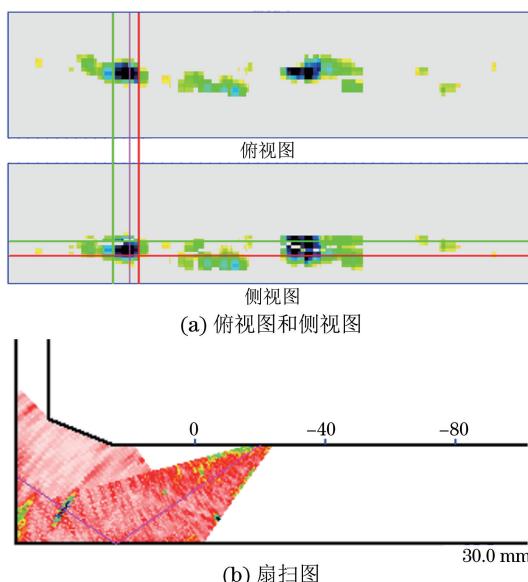


图 18 坡口裂纹缺陷扫查结果

#### 2.3 比对研究

参考 NB/T 47013.3—2015《承压设备无损检测 第 3 部分:超声检测》中 6 dB 法测量缺陷长度,对 CIVA 仿真结果中的缺陷进行尺寸测量,并与模拟试管实测数据进行比对,结果见表 7。

从比对结果可以看出:① 接管侧裂纹在模拟试管检测中未检出,且 CIVA 仿真中回波波高也最低,仅为 2%,因此在实际检测时需要增加其他方法进行补充检测,例如采用相控阵柔性直探头进行内检测;② CIVA 仿真中回波波高与模拟试管检测的回波波高具有一定的相似规律,回波从高到低:未熔合回波波高>夹渣回波波高>未焊透回波波高>坡口

裂纹回波波高>气孔回波波高>接管侧裂纹回波波高,但由于仿真和实际存在一定的差异,实际检测中坡口裂纹存在较高回波,可能是在试管加工中预制裂纹时,生成了与相控阵声束呈90°夹角的反射面;③CIVA仿真测量结果与设计参数误差较小,其中深度最接近实际值,长度和高度由于采用6dB法,存在一定的误差,但可接受,分析原因为CIVA仿真

预埋的是标准规则反射体,且几何尺寸完全准确;④模拟试管检测结果与设计参数存在一定误差,对于长度的测量还是较为准确的,这体现出了相控阵技术的优势,同样采用6dB法测高则误差较大,深度方面的误差一部分原因是试管加工过程中存在一定的偏差,模拟试管加工的精度直接影响着相控阵检测结果的误差大小。

表7 CIVA仿真与模拟试管实测数据比对

缺陷类型	设计参数/mm	CIVA仿真结果测量值/mm	CIVA仿真结果与设计参数误差/mm	CIVA仿真波高/%	模拟试管测量值/mm	模拟试管测量值与设计参数误差	实际检测波高/%
未焊透	长度 19	18.0	-1			17	-2
	高度 3	3.5	0.5	14	4.1	1.1	99
	深度 19	19.2	0.2			18.6	-0.4
未熔合	长度 25	24.5	-0.5			27	2
	高度 3	4.0	1	100	4.1	1.1	120
	深度 6	6.0	0			7.1	1.1
气孔	直径 4	φ 5	1	6	φ 3.3	-0.7	90
	深度 18	17.8	-0.2			18.7	0.7
夹渣	长度 17	15.9	-1.1			14.0	-3
	高度 3	3.1	0.1	29	3.3	0.3	102
	深度 19	18.9	-0.1			19.2	0.2
坡口裂纹	长度 15	14.8	-0.2			13.5	-1.5
	高度 3	2.8	-0.2	9	4.6	1.6	130
	深度 15	15.0	0			16.6	1.6
接管侧裂纹	长度 25	23.7	-1.3			未检出	-
	高度 4	3.2	-0.8	2	未检出	-	-
	深度 5	5.2	0.2			未检出	-

### 3 结论

针对承压设备插入式接管角焊缝普通超声检测存在的难点,提出了超声相控阵检测工艺。通过CIVA仿真模拟了检测工艺,分析了波形信号成分,并加工了模拟试管,运用CIVA仿真计算的工艺进行了检测,同时对CIVA仿真的测量数据和实际检测数据进行了误差分析。结果表明:相控阵检测技术对此类结构具有良好的检测效果,验证了工艺的有效性,可为此类结构的相控阵检测提供经验。值得注意的是,试验是基于假设容器直径较大,近似为平面进行的,因此未考虑不同扫查位置因焊缝横截面变化导致的缺陷定位问题,以及声束对缺陷的覆盖角度变化问题,解决此类问

题需要采用专用多自由度接管焊缝扫查器与专用插入式角焊缝模块计算软件,根据探头实时位置对缺陷进行修正并准确定位。

### 参考文献:

- [1] 杨晶,祝加轩,王波.电厂锅炉管座角焊缝相控阵超声检测[J].无损检测,2018,40(10):56-59.
- [2] 丁春辉.在役压力容器管座角焊缝的相控阵超声检测[J].管道技术与设备,2017(4):23-25.
- [3] 刘长福,蔡文河,郭德瑞,等.承压设备中、小径管管座角焊缝的超声检测[J].无损检测,2018,40(8):28-33.
- [4] 朱沈宾,费凡,王冲,等.超声相控阵技术在压缩机缓冲罐焊缝检测上的应用[J].北京石油化工学院学报,2017,25(3):20-23.