

本文参考文献引用格式:沈建民,张子健,许波,等.基于几种常用超声方法的承压设备对接焊缝检测对比[J].电焊机,2021,51(6):75-80,91.

基于几种常用超声方法的承压设备 对接焊缝检测对比

沈建民¹,张子健²,许波¹,吴家喜²,胡健²,张小龙²,柴军辉^{1,2}

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

摘要:脉冲反射法超声检测、衍射时差法超声检测、常规线阵超声相控阵和全聚焦相控阵等几种常用超声方法是承压设备对接焊缝埋藏缺陷检测的有效手段,其适用范围、检测灵敏度、分辨率、缺陷定量精度等方面存在众多差异。针对这些差异性,首先通过阐述检测原理比较几种方法的不同及其优缺点,其次针对43 mm厚的对接焊缝模拟试板进行检测对比,并分析结果,明确几种方法的适用情况,为今后承压设备对接焊缝埋藏缺陷的检测提供了一定的技术参考。

关键词:对接焊缝;脉冲反射法超声检测;衍射时差法超声检测;超声相控阵检测

中图分类号:TH142 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2003(2021)06-0075-07

DOI:10.7512/j.issn.1001-2303.2021.06.14

0 前言

特种设备领域的承压设备主要包含锅炉、压力管道和压力容器,目前国内大型石油化工企业成套装置内压力容器和压力管道数量众多,在设备制造和连续长周期运行过程中,压力容器和压力管道的对接焊缝会产生各类缺陷,主要包括未焊透、未熔合、夹渣、气孔和裂纹^[1]。在制造阶段中,GB 150.4-2011《压力容器 第4部分:制造、检验和验收》和GB/T20801.5-2020《压力管道规范 工业管道 第5部分:检验与试验》规定了对于埋藏缺陷的检测方法和比例,此处提及的超声检测方法包括:衍射时差法超声检测(TOFD)、可记录的脉冲反射法和不可记录的脉冲反射法;在役定期检验过程中,TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》和TSG D7005-2018《压力管道定期检验规则——工业管道》中规定了采用超声方法检测埋藏缺陷。

目前使用较为广泛的几种超声检测方法主要有脉冲反射法超声检测、衍射时差法超声检测、常规线阵超声相控阵、全聚焦超声相控阵,这几种超声检测方法在使用过程中存在众多差异,适用范围和检测侧重点也不同。文中采用这几种常用声学方法,并结合标准要求,设计了43 mm厚对接焊缝模拟试块,并比对检测结果,分析总结每种方法的特点与适用性,为今后承压设备制造和使用过程中的埋藏缺陷检测提供一定的技术支撑。

1 检测方法与原理

1.1 脉冲反射法超声检测(A超)

(1)检测原理。

超声波探头产生的脉冲波进入到工件中,以一定的方向和速度向前传播,当遇到两侧声阻抗存在差异的界面时,部分声波被反射并被检测设备接收

收稿日期:2021-02-07

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:沈建民(1980—),男,硕士,高级工程师,主要从事承压类特种设备质量安全管理。E-mail:shenjianmin@nbanji.com。

通讯作者:张子健(1989—),男,硕士,工程师,主要从事无损检测新技术研究与应用工作。E-mail:zhangzj@nbanji.com。

和显示,通过分析声波幅度和位置等信息,评估是否存在缺陷及其大小、位置等。主要方法包括缺陷回波法、底波高度法和多次底波法,其中对接焊缝检测使用较多的是缺陷回波法,通过传播时间对缺陷定位,通过回波幅度对缺陷定量^[2]。

(2) 优点。

穿透能力强,可对较大厚度范围内的试件内部缺陷进行检测;缺陷定位较准确;对面积型缺陷的检出率较高;检测成本低、速度快,设备轻便,对人体及环境无害,现场使用较为方便。

(3) 局限性。

难以对缺陷进行精确的定性、定量,尤其是缺陷测高;对具有复杂形状或不规则外形的试件进行超声检测困难;材质、晶粒度等对检测有较大影响;检测结果显示不直观且无直接见证记录;对人员技术要求较高。

1.2 衍射时差法超声检测(TOFD)

(1) 检测原理。

衍射时差法超声检测是通过超声波与缺陷相互作用所产生的衍射波来评价对接焊缝焊接质量的超声检测方法,通常选用纵波斜探头,采用一发一收模式。此方法一般将探头分布于焊缝两侧,在工件无缺陷部位,发射超声脉冲后,首先到达接收探头的是直通波,然后是底面反射波。有缺陷存在时,在直通波和底面反射波之间,接收探头还会接收到缺陷处产生的衍射波。扫查方式分为非平行扫查、平行扫查和偏置非平行扫查^[3]。

(2) 优点。

缺陷的衍射信号与缺陷的方向无关,缺陷检出率高;覆盖范围大;缺陷自身高度测量精确;实时成像,可储存分析;定量不依赖于缺陷的回波幅度。

(3) 局限性。

存在扫查面盲区和底面盲区,需采用有效手段进行补充检测;衍射波信号较弱,容易被噪声干扰;焊缝中下部缺陷容易被夸大,对于数据分析能力要求较高。

1.3 常规线阵超声相控阵(PAUT)

(1) 检测原理。

常规线阵超声相控阵技术通过控制换能器阵列中各阵元激励脉冲的时间延迟,改变各阵元发射声波到达物体内某点时的相位关系,就可实现聚焦点和声束方位的变化,从而进行扫描成像。通过设置

扫查角度范围、聚焦深度和焦点尺寸等参数,在一定程度上克服了A超由于声束的方向性导致的在缺陷检出和定量上的限制,其中波束偏转和波束聚焦都是基于波的叠加和干涉以及惠更斯原理^[4]。

(2) 优点。

具有较高检测效率,可在不移动或少移动探头的情况下进行快速线扫查或扇形扫查,免去了锯齿形扫查;可设置声束角度,通过设定多个检测角度,可以对复杂形状设备和在役设备进行检测;可以对所要关注的部位进行聚焦扫查,适用于现场大规模快速检测。

(3) 局限性。

扇扫过程中需要采用一次反射波进行表面扫查,检测设备较为昂贵,对于不同规格的管道需要设置不同扫查工装。

1.4 全聚焦超声相控阵(TFM)

(1) 检测原理。

全聚焦相控阵检测过程主要包括两个部分:全矩阵数据采集(FMC)和全聚焦成像算法(TFM)。全矩阵数据采集原理如下:假定相控阵探头具有 n 个阵元,依次激发每一个阵元,所有阵元接收回波信号并储存,按照此规律依次激发所有阵元,直到最后一个阵元被激发,并被所有阵元接收,最后采集得到 $n \times n$ 列时域超声回波信号,因为被采集数据可看作存储在一个 n 行 n 列的矩阵中,所以称之为全矩阵数据采集。全聚焦成像算法原理如下:针对所检测区域设定一个自定义成像区,得到任意一点 $P(x, y)$ 到任意一对晶片组合 (M, N) 的声程分别为: $S_{M,P}$ 为探头晶片 M 到 P 点的声程, $S_{P,N}$ 为 P 点到探头晶片 N 的声程,以成像区中的声程数据为依据,对FMC数据进行相干叠加处理,获得表征该点信息的幅值 $I(x, y)=f(FMC, S_{M,P}, S_{P,N})$,采用该算法得到自定义成像区内每点的成像,最终得到各点能量高度聚焦的效果^[5]。

(2) 优点。

全聚焦超声相控阵最大的优点是可实现检测范围的实时全部聚焦,具有较高信噪比、成像分辨率和检出率,尤其针对于小缺陷,测量精度较高,对于焊缝裂纹定性和定量具有较高的准确性。

(3) 局限性。

首先检测设备较为昂贵,其次检测速度比常规线阵相控阵慢,存储数据较大,对于设备要求较高,

一般不用于大批量对接焊缝扫查,通常用于缺陷精确定量。

2 检测结果及讨论

2.1 模拟试板

针对承压设备对接焊缝的常见缺陷进行设计,尤其是危害性较大的表面裂纹和埋藏裂纹,加工了43 mm厚对接焊缝模拟试块,如表1、图1所示。

表1 模拟试块设计参数

Table 1 Design parameters of simulation block

试块名称	规格/mm	材质	焊接方法
对接焊缝模拟试块	400×400×43	20#	氩弧焊+焊条电弧焊
表面状态	检测时机	加工缺陷性质	坡口形式
打磨表面	焊后24h	表横裂纹、表纵裂纹、未焊透、纵向裂纹、夹渣	X

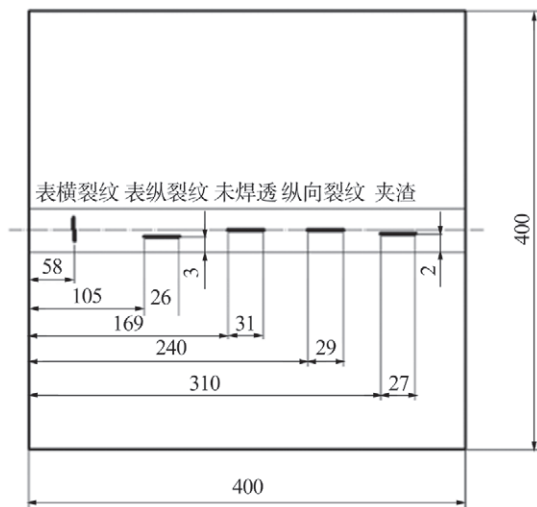


图1 43 mm厚对接焊缝模拟试块

Fig.1 43 mm thick butt weld simulation block

2.2 检测工艺

2.2.1 脉冲反射法超声检测

检测工艺如表2所示。

表2 脉冲反射法超声检测工艺

Table 2 Pulse reflection ultrasonic testing technology

执行标准	仪器型号	探头规格	试块型号	
NB/T 47013.3-2015	CTS-1010	2.5P 13×13 K1	CSK-IA、CSK-IIA	
耦合剂	耦合补偿	检测灵敏度	检测面	扫查方法
机油	3 dB	$\phi 2 \times 60-14$ dB	双面双侧	锯齿形扫查、斜平行扫查

2.2.2 衍射时差法超声检测

检测工艺如表3所示。

表3 射时差法超声检测工艺

Table 3 Ultrasonic detection technology by jet lag method

执行标准	仪器型号	耦合剂	编码器	扫查方式
NB/T 47013.10-2015	PUX-910	机油	轮式编码器	非平行扫查
通道	探头参数	检测灵敏度	PCS	焦点深度
第一通道	5P, $\phi 6, 60^\circ$	直通波的80%	98 mm	30 mm

2.2.3 常规线阵超声相控阵

本次检测所用设备是以色列ISONIC 2009相控阵检测仪器,探头为16晶片的线阵横波探头,频率4 MHz,楔块角度 36° ,折射中心角度 55° 。相控阵检测主要参数如下:扫查方式为沿线扫查+扇扫描,记录模式为编码器,编码器步进1 mm,扇扫范围 $32^\circ \sim 75^\circ$,角度步进 1° ,聚焦深度43 mm,声速5 900 m/s,评定线灵敏度为 $\phi 2 \times 60-14$ dB,扫查灵敏度为 $\phi 2 \times 60-8$ dB,检测面为双面单侧,扫查速度 ≤ 30 mm/s,耦合补偿为3 dB。

2.2.4 全聚焦超声相控阵

全聚焦相控阵检测采用M2M公司的GEKKO便携式相控阵探伤仪,探头参数如下:64晶片线阵探头,频率10 MHz,晶片中心距0.3 mm,长度19.15 mm,宽度8 mm,楔块角度 36° 。检测主要参数如下:采用轮式编码器,步进1 mm,全聚焦的波型模式为TT(横波-横波),全聚焦范围宽度40 mm,高度45 mm,分辨率5.5采样点/mm,基准增益为75 dB,扫查增益为6 dB。

2.3 检测结果

2.3.1 脉冲反射法超声检测结果

常规A超检出了模拟试板中的所有缺陷,统计结果如表4所示。检测波形如图2所示。

2.3.2 衍射时差法超声检测结果

TOFD检出了所有缺陷,统计结果如表5所示。TOFD检测D扫结果如图3所示。

2.3.3 常规线阵超声相控阵检测结果

由于常规线阵相控阵扇扫存在一定范围的盲区,所以采用单侧双面的方法进行检测,通过正反两面的扫查,检出所有缺陷,统计结果如表6所示。常规线阵相控阵检测图谱如图4所示。

2.3.4 全聚焦超声相控阵结果

表 4 脉冲反射法超声检测结果统计

Table 4 Statistics of ultrasonic testing results by pulse reflection method

缺陷编号	缺陷性质	缺陷始端-终端/mm	缺陷长度 L/mm	缺陷深度 H/mm	偏离焊缝中心位置	最大波高位置	缺陷波高	缺陷波幅区域	评定等级
1	表横裂纹	58	—	1	—	120斜	SL+13 dB	III	III
2	表纵裂纹	105~130	25	42	-3	127	SL+12 dB	III	III
3	未焊透	169~200	31	22	0	175	SL+5 dB	II	III
4	裂纹	240~269	29	32	0	255	SL+12 dB	III	III
5	夹渣	310~335	25	15	-2	326	SL+15 dB	III	III

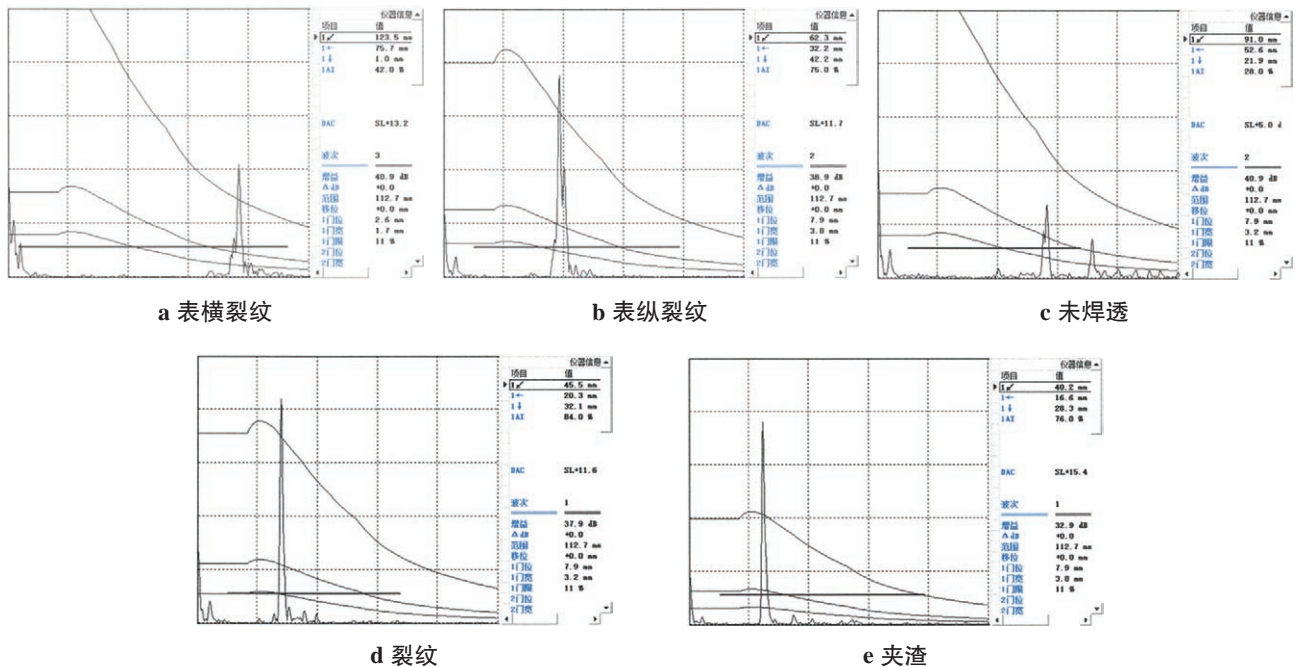


图 2 脉冲反射法超声检测波形

Fig.2 Pulse reflection ultrasonic testing waveform

表 5 TOFD 检测结果统计

Table 5 Statistical table of TOFD test results

缺陷编号	缺陷性质	缺陷始端-终端/mm	缺陷长度 L/mm	缺陷深度 H/mm	自身高度/mm
1	表横裂纹	46	—	上开口	3
2	表纵裂纹	95~125	30	39	4
3	未焊透	160~186	28	21	3
4	裂纹	225~264	39	30	6
5	夹渣	295~325	31	13	4

采用全聚焦超声相控阵从单面单侧进行扫查, 检出了所有缺陷, 缺陷情况如表 7 所示。全聚焦超声相控阵检测图谱如图 5 所示。

2.4 讨论分析

对以上 4 种常用声学检测方法的结果进行汇

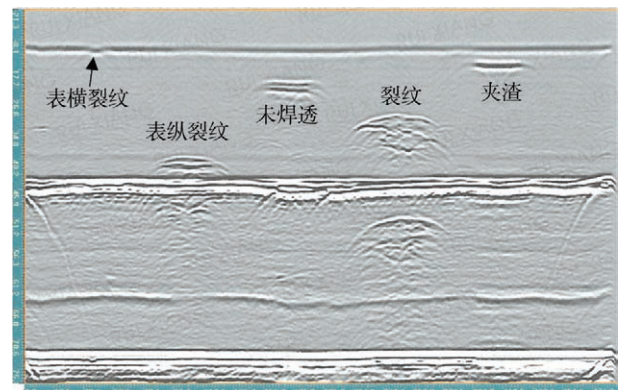


图 3 TOFD 检测 D 扫描

Fig.3 D-scan of TOFD

总比, 重点关注缺陷长度、深度和自身高度的测量结果, 如表 8 所示。

由表 8 可知:(1) 对于缺陷长度的测量, A 超

表6 常规线阵相控阵检测结果统计

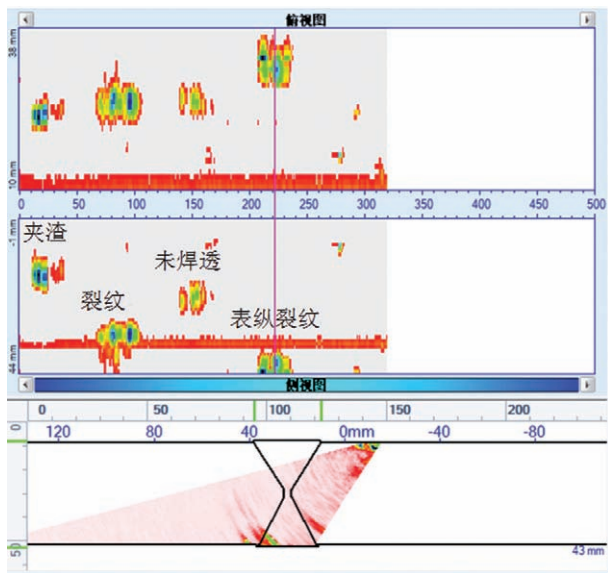
Table 6 Statistics of test results of conventional linear phased array

缺陷编号	缺陷性质	缺陷长度 L/mm	缺陷深度 H/mm	自身高度 /mm	检出面
1	表横裂纹	7.3	0	3.0	反面
2	表纵裂纹	26.0	39.4	3.6	正面
3	未焊透	30.0	19.4	5.5	正面
4	裂纹	32.7	30.0	5.2	正面
5	夹渣	26.0	12.4	6.1	正面

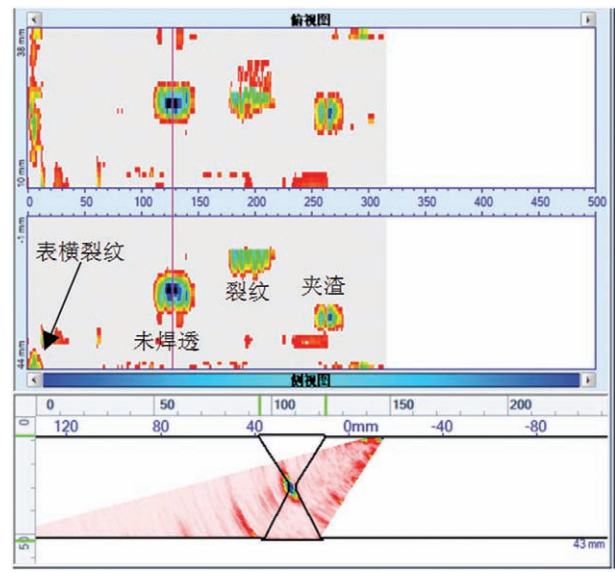
表7 全聚焦超声相控阵检测结果统计

Table 7 Statistics of testing results of fully focused ultrasound phased array

缺陷编号	缺陷性质	缺陷长度 L/mm	缺陷深度 H/mm	自身高度 /mm
1	表横裂纹	12.2	3.9	2.3
2	表纵裂纹	32.3	39.0	3.7
3	未焊透	32.3	21.5	3.5
4	裂纹	39.6	31.0	6.6
5	夹渣	32.9	13.5	3.8



a 正面检测



b 反面检测

图4 常规线阵超声相控阵检测图谱

Fig.4 Spectrum of conventional linear ultrasonic phased array

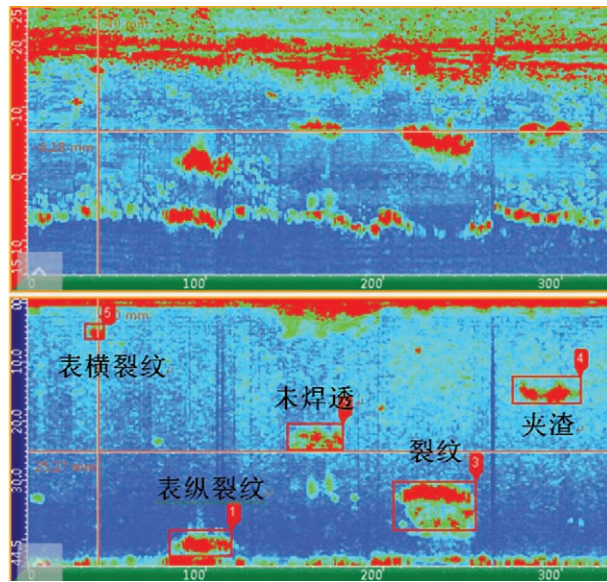
表8 4种常用声学方法检测结果比对

Table 8 Comparison of detection results of four common acoustic methods

缺陷名称	长度/mm				A超	深度/mm				自身高度/mm		
	A超	TOFD	PAUT	TFM		A超	TOFD	PAUT	TFM	TOFD	PAUT	TFM
表横裂纹	—	—	7.3	12.2	1	上开口	0	3.9	3	3.0	2.3	
表纵裂纹	25	30	26.0	32.3	42	39	39.4	39.0	4	3.6	3.7	
未焊透	31	28	30.0	32.3	22	21	19.4	21.5	3	5.5	3.5	
裂纹	29	39	32.7	39.6	32	30	30.0	31.0	6	5.2	6.6	
夹渣	25	31	26.0	32.9	15	13	12.4	13.5	4	6.1	3.8	

由于是基于半波法进行测长,测量精度低于其余三种,TOFD和TFM的测长结果最为接近,考虑到TOFD检测原理和TFM检测原理,可认为两者在缺陷测长方面具有较高的可靠性,PAUT的测长准确性略低于TOFD和TFM;(2)对于非表面开口缺陷深

度的测量,仍然是TOFD和TFM两者的测深结果最为接近,A超的测量精度明显提高,与TOFD和TFM差距较小,PAUT的结果与A超类似,误差较小,因此在测深方面,四种声学技术均具有较高的准确性,但值得注意的是,对于表横裂纹这类表面



a C 扫和端视图

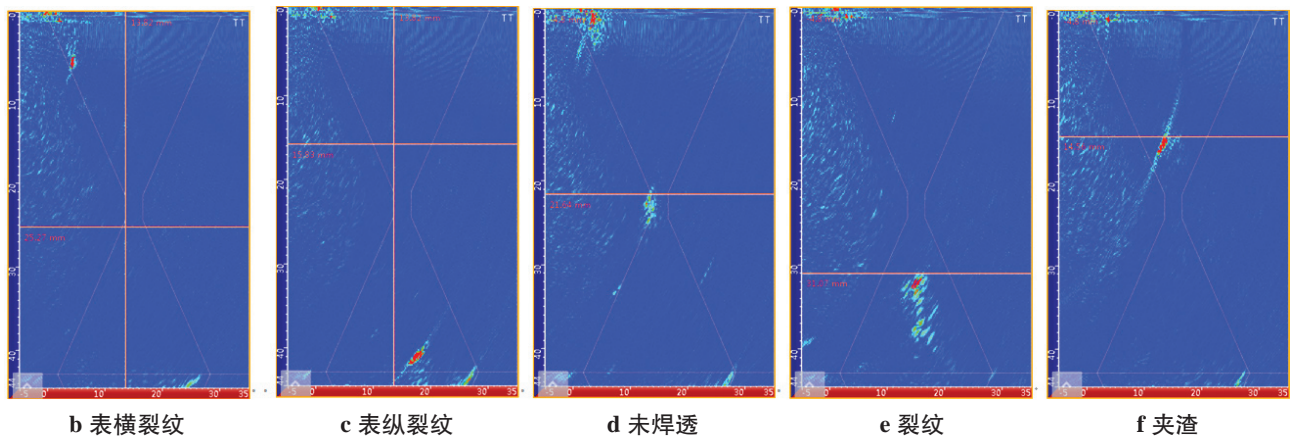


图5 全聚焦超声相控阵检测图谱

Fig.5 Full focus ultrasound phased array testing Atlas

开口缺陷,TFM 法由于近场区的影响,测量会不准确,需采用单侧双面或者双面双侧进行扫查,A 超测出的是缺陷最高回波处的深度,PAUT 采用了单面双侧检测,TOFD 通过测量直通波下沉情况进行判断,具有较高的准确性;(3)对于缺陷自身高度的测量,虽然 NB/T47013.3-2015《承压设备无损检测第 3 部分:超声检测》给出了 A 超缺陷测高方法,但实际应用难度较高,需要较高的操作水平且测量结果易受杂波干扰,所以应用不广泛,综合考虑 TOFD 检测原理与试板加工预制缺陷情况,认定 TOFD 测高结果最为接近真实状况,通过数据比对,可以得出 TFM 结果与 TOFD 结果最为接近,但仍需注意近场区的影响,PAUT 测量准确性次之,因此在缺陷测高方面,TOFD 检测结果最为可靠,TFM 和 PAUT

检测结果具有较高的可靠性,A 超一般不用于测高。

3 结论

(1)脉冲反射法超声检测、衍射时差法超声检测、常规线阵超声相控阵和全聚焦相控阵都可用于在制或者在役承压设备对接焊缝埋藏缺陷的检测。

(2)基于碳钢材质的中厚板对接焊缝,单从缺陷测长精度方面考虑,首选 TFM 和 TOFD 方法,其次是 PAUT,最后是 A 超,但实际应用时需综合考虑检验检测效率与成本,目前承压设备定期检验中使用较为广泛且可靠性较高的方法是 PAUT,对缺陷精确定量时采用 TFM 和 TOFD 方法。

(3)对于缺陷测深和测高,首选是 TOFD 方法,其次是 TFM 方法,然后是 PAUT,最后是

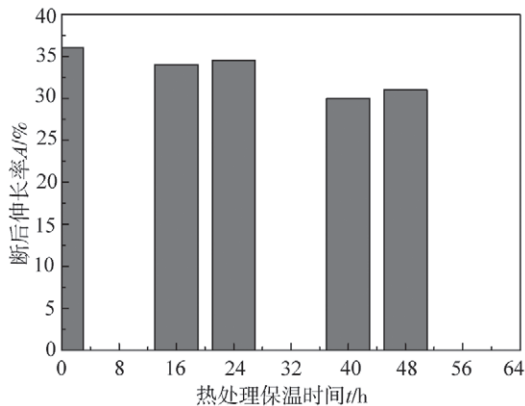


图 11 不同保温时间的熔敷金属断后伸长率

Fig.11 Elongation of deposited metal after fracture at different holding times

(2) 研制的 E309L-16 焊条适用范围宽, 热输入在 0.99~2.55 kJ/mm, 熔敷金属断后伸长率均能满足技术条件要求。

(3) 研制的 E309L-16 焊条经过 $608^{\circ}\text{C} \times (0\sim 48)\text{h}$

的焊后热处理, 熔敷金属断后伸长率均能满足技术条件要求。

参考文献:

- [1] 邱振生, 柳猛, 匡艳军, 等. 国产核岛主设备焊接技术现状及发展趋势分析[J]. 焊接, 2016(12): 13-20.
- [2] 薛小怀, 王志颖, 李天宇, 等. CAP1400 蒸汽发生器压力边界焊接接头的显微组织[J]. 机械工程材料, 2018, 42(2): 22-26.
- [3] 王苗苗. 核电核岛主设备关键焊接技术研究[J]. 电子世界, 2018(15): 188-190.
- [4] 吴新丽, 邹杰, 李恩, 等. 蒸汽发生器关键焊接技术[J]. 电焊机, 2019, 49(4): 49-53.
- [5] 王莉, 杜玉华. AP1000 核岛主设备不锈钢堆焊层首层铁素体含量研究[J]. 电焊机, 2019, 49(12): 29-31.
- [6] 汪丽丽, 王培培, 杨巨文. 焊后热处理对 309L 熔敷金属性能的影响[J]. 发电设备, 2018, 32(5): 340-343.
- [7] 顾佳磊, 张文杨, 丁阳. 焊后热处理对 309L 不锈钢焊缝金属性能的影响[J]. 压力容器, 2017, 34(7): 5-10.

Page 80

A 超。A 超只能测定缺陷最高回波处的深度, 与实际深度存在一定偏差, 若采用 TOFD 方法, 需针对表面盲区和底面轴偏离盲区采取有效的检测手段进行弥补, 会增加一定的工作量, 目前承压设备对接焊缝埋藏缺陷的检测方法主要是采用 PAUT 大面积快速扫查, 对于需要精确测高的缺陷, 采用 TOFD 或者 TFM 方法进行定量。

参考文献:

- [1] 张子健, 吴家喜, 张小龙, 等. 压力管道对接焊缝典型缺

陷的相控阵 CIVA 仿真与检测[J]. 无损检测, 2019, 41(3): 45-51.

- [2] 龚浩, 邓志刚. 可记录脉冲反射法超声检测的试用实例[J]. 中国特种设备安全, 2013, 29(7): 45-46.
- [3] 杨晶, 赵亮, 王希. 相控阵和超声衍射时差法在球罐裂纹检测中的应用[J]. 无损检测, 2019, 41(1): 35-38.
- [4] 蔡亮, 高帅, 牛志勇, 等. 超声相控阵技术在压力容器焊缝无损检测中的应用[J]. 石油和化工设备, 2020, 23(11): 75-77.
- [5] 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.