

核电厂厚壁高密度聚乙烯管道热熔接头的相控阵超声检测

周路生¹, 黄 骄¹, 吴 双², 邱晓东², 王立仁¹

(1. 国核电站运行服务技术有限公司, 上海 200233; 2. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233)

摘要: 分析了核电厂厚壁高密度聚乙烯管道热熔接头体积检查的主要难点。基于对高密度聚乙烯材料的声学性能和相控阵超声声场的建模分析,定制了自聚焦相控阵超声探头和特殊结构相控阵水楔块,有效解决了壁厚大于 90 mm 的高密度聚乙烯热熔接头的超声检测问题。通过对国内某核电站厂用水系统 32 英寸高密度聚乙烯管道的现场检测,验证了该检测技术的有效性。

关键词: 核电厂; 高密度聚乙烯; 热熔接头; 相控阵超声

中图分类号: TH142.2; TG441.7; TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2022)01-0010-06

Phased array ultrasonic testing for hot melt joint of thick wall high density polyethylene pipe in nuclear power plant

ZHOU Lusheng¹, HUANG Jiao¹, WU Shuang², QIU Xiaodong², WANG Liren¹

(1. State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai 200233, China;

2. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: The main difficulties of the volume inspection for thick wall HDPE pipe hot melt joint were analyzed. Based on the acoustic properties of HDPE material and the acoustic field modeling analysis of phased array ultrasonic, self-focusing phased array ultrasonic probe and special structure water wedge are customized, which effectively solves the ultrasonic detection problem of HDPE hot melt joint with wall thickness greater than 90 mm. The effectiveness of the detection technology was verified by the field inspection of 32 inch HDPE pipeline of the water system in a nuclear power plant.

Key words: nuclear power plant; HDPE; hot melt joint; phased array ultrasonic

核电厂厂用水系统(SWS)利用海水通过设备冷却水系统的热交换器带走核岛设备的热量,达到冷却的目的^[1]。二代及二代加核电厂输送海水介质的管道主要为不锈钢管道、内衬防腐涂层或水泥砂浆的碳钢管道、钢筋混凝土管等^[2]。基于高密度聚乙烯(HDPE)材料良好的耐腐蚀及抗氧化、老化性能,1998 年美国卡巴托核电站在常规的水管系统中

首次使用了 HDPE 管道,运行多年后,管道服役状态仍良好。国内 AP1000 三代依托项目(三门和海阳核电机组)厂用水系统(非安全级)已采用外径为 30 inch(1 inch=25.4 mm)的 HDPE 管道,2017 年中广核大亚湾核电站的循环水(CFI)系统首次将 HDPE 管道应用到核安全级系统中^[3],另外,CAP1400 及 CAP1000 后续项目的厂用水系统用到的 HDPE 管道,其最大壁厚已超过 100 mm。目前国内已有的行业标准 JB/T 10662—2013《无损检测 聚乙烯管道焊缝超声检测》适用于检测输送燃气和自来水介质的非核用聚乙烯管道的熔接接头,即壁厚小于 60 mm 的聚乙烯管道热熔接头。对于核电厂用的大口径(外径 30 inch 以上)、超厚壁(大于 90 mm)HDPE 管道热熔接头,国内尚无相应的

收稿日期: 2021-09-23

基金项目:核电厂结构健康检测分析与评价先进技术研究项目
(2018ZX06002008)

作者简介:周路生(1982—),男,高级工程师,主要从事核电厂在役检查技术研究工作

通信作者:周路生,zhouls@snpse.com

检测标准。因此,开展核电厂大口径超厚壁 HDPE 管道热熔接头缺陷的检测技术研究尤为必要。

1 材料声学性能测试

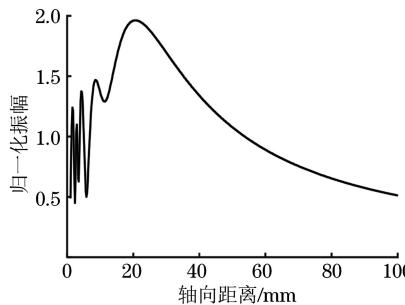
以国内某在建三代机组厂用水系统外径为 32 inch 的 HDPE 管道热熔接头为研究对象,对其主要声学性能参数(如材料声速和声衰减系数)进行研究。HDPE 为粘弹性材料,超声波在该类材料中传播时能量损失尤为严重。相较于纵波,横波波长较短,穿透能力更差,无法有效穿透厚壁 HDPE 管道熔接接头的全厚度范围,因而通常采用纵波对 HDPE 材料进行检测。

1.1 声速测量

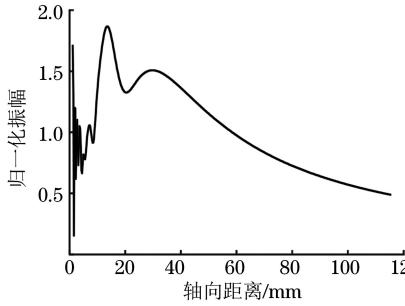
以国内某核电供应商生产的牌号为 PE4710,壁厚为 90 mm 的 HDPE 管道母材材料作为试验对象,在不同温度下,采用脉冲回波法从试件的各截面进行材料纵波声速测量试验,测量结果如表 1 所示。由表 1 可知,核电厂用 HDPE 材料在 10~50 °C 下,其纵波声速为 2 107~2 388 m/s,且声速随着材料温度升高而减小,呈一定的线性变化。

1.2 声衰减试验

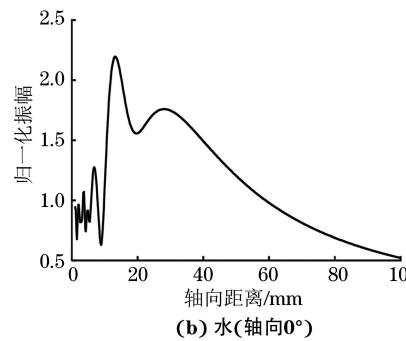
引起超声波衰减的主要原因有波束扩散、晶粒



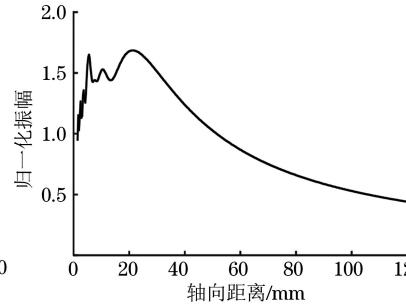
(a) HDPE 材料(轴向 0°)



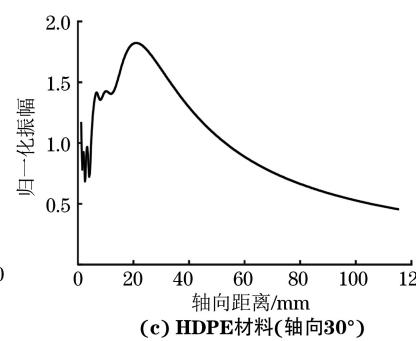
(d) 水(轴向 30°)



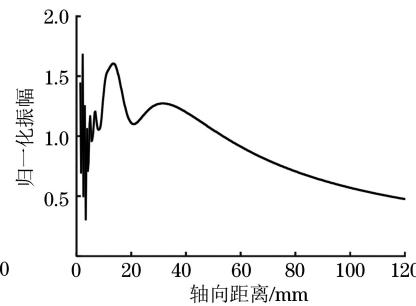
(b) 水(轴向 0°)



(e) HDPE 材料(轴向 45°)



(c) HDPE 材料(轴向 30°)



(f) 水(轴向 45°)

图 1 不同偏转角度下 HDPE 材料和水中声场轴向方向质点的振幅分布

为提高超声波主声束的能量,通常采用低频探头来检测 HDPE 材料,采用水浸法对 HDPE 材料管材试件进行检测。对超声波在水与 HDPE 材料双层介质中的声场分布进行建模分析,建模选择的

表 1 HDPE 材料纵波声速测量结果

试验温度 / °C	测量结果 / (m·s ⁻¹)	
	轴向	径向
10	2 301	2 388
20	2 260	2 310
30	2 219	2 242
40	2 178	2 181
50	2 140	2 107

散射和介质吸收。HDPE 材料类似于超声探头的吸声材料,吸收衰减是其主要的衰减原因。经测量得到试件的衰减系数为 $0.72 \text{ dB} \cdot \text{mm}^{-1} \sim 0.74 \text{ dB} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。该衰减系数是散射衰减、吸收衰减和扩散衰减的综合体现。

2 聚焦声场建模

结合材料的声学性能及国内外对 HDPE 材料的相控阵检测技术研究可知,采用水作为液体楔块可获得扫查所需的偏转角度,最大可偏转 89°。不同偏转角度下 HDPE 材料和水中声场轴向方向质点的振幅分布如图 1 所示。由图 1 可知,振幅随着偏转角度的变化而变化,焦点处的能量仍较高,焦点范围逐渐增大时仍可满足检测精度的要求。

相控阵探头中心频率为 2 MHz,阵元数量为 16,阵元尺寸为 $10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ (长 \times 宽),阵元间距为 0.1 mm,水中声程为 15 mm,其在 HDPE 材料中的聚焦深度为 20 mm,垂直聚焦与偏转聚焦的声场分

布如图 2 所示。

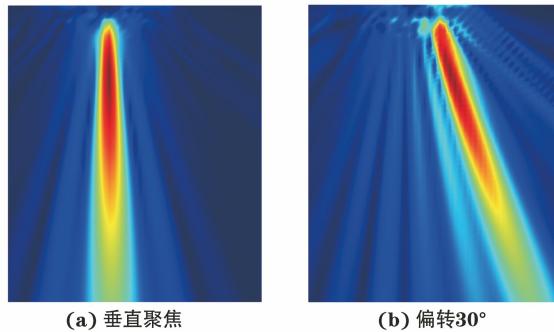


图 2 垂直聚焦与偏转聚焦时 HDPE 材料中的声场分布

3 热熔接头缺陷类型

HDPE 热熔管道接头熔接过程中出现的缺陷主要分为两类,一类是外观缺陷,另一类是熔接工艺缺陷,文章重点分析熔接过程中产生的工艺缺陷。

3.1 冷焊缺陷

管件在熔合过程中接头热量不足会导致熔合面局部形成缝隙或局部聚乙烯分子粘结不牢固,形成热熔接头冷焊缺陷,使得熔接接头性能下降。热熔接头冷焊缺陷外观如图 3 所示。带冷焊缺陷的热熔接头外观良好,服役初期接头的强度可满足使用要求,但在服役过程受环境、工作条件的影响,易出现整体脆断。冷焊缺陷是热熔焊缝中最危险的缺陷,也是热熔接头检测中最容易漏检的缺陷之一。在实际热熔熔接过程中该缺陷产生的主要原因有:①热熔后接头未完全冷却便拆除夹具,并给管道接头施加了一定的力矩,使熔合面的聚乙烯分子因受拉应力而粘结不牢,或因冷却时间不足而产生未熔合类缺陷;②熔接后接头冷却不均匀使得熔合面局部产生大量微小缩孔,导致熔合面的粘结强度下降;③熔接端面未铣削平整导致凹陷处受热不足,也可能使得聚乙烯分子的粘结强度下降。



图 3 热熔接头冷焊缺陷外观

3.2 气孔、孔洞

熔接过程中,如果接头处夹杂有较大固体颗粒或局部存在气体未逃逸出熔合区,就会形成气孔或不规则孔洞。上述缺陷产生的主要原因是聚乙烯管

材熔接端面清洗不彻底,材料内部存在空气、端面粘有水珠或管材放置时间过长而吸潮。管材壁厚过大或接头冷却过程中散热不均也易导致熔融区的中心部位出现收缩,进而形成冷却缩孔。

3.3 裂纹

热熔合面局部出现宏观裂缝或局部分子纠缠不牢靠时,焊接接头的性能会下降。该类型缺陷比较罕见,但危害较大,属于重点关注的缺陷类型。热熔接头裂纹缺陷外观如图 4 所示。

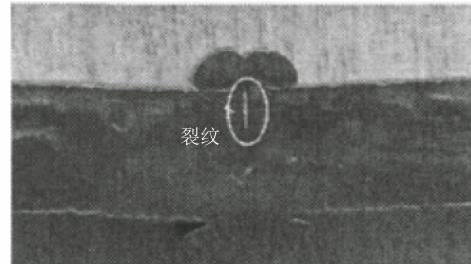


图 4 热熔接头裂纹缺陷外观

3.4 熔合面夹杂

熔合面夹杂是指熔合面上的微小水滴或不洁净杂质遗留在焊接面上,导致接头之间的分子无法纠结牢固造成熔接接头性能下降的工艺缺陷,其表现为熔合面的整体失效或大面积不均匀韧性脆断。

4 相控阵检测技术研究

4.1 检测区域确定

ASME(美国机械工程师协会)锅炉及压力容器规范第 III 卷强制性附录 XXVI 规定了使用的检测技术应有效覆盖热熔接头熔合中心线两侧各 6 mm 的范围。

4.2 试块设计

采用与国内某核电厂 SWS 使用的 HDPE 管件相同的材料及生产工艺,制作试验所需的各种类型试块,重点设计了声学性能试块、标准试块、参考试块和模拟能力验证试块等。各类型试块的说明如下。

(1) 声学性能试块。该试块用于 HDPE 材料声速、衰减系数等声学性能的测试。

(2) HDPE 管道标准试块。该试块用于校准相控阵超声检测探头的参数,类似于 CSK-IA 标准试块,主要反射体有 R35 和 R70 圆弧面及 $\phi 0.5$ mm 横通孔,试块外观如图 5 所示。

(3) 热熔接头参考试块。根据国内某核电厂 SWS 管道规格,设计加工制作了 2 种规格的热熔接头参考试块,其外观如图 6,7 所示。在外径为 10 inch 的热熔接头试块中,横孔直径分别为 0.5,



图 5 HDPE 管道标准试块外观

1 mm, 孔间距为 5 mm。在外径为 32 inch 的热熔接头试块中, 横孔直径分别为 1.0, 2.0 mm, 孔间距为 10 mm。最小可检缺陷尺寸不低于 ASME 规范第 III 卷强制性附录 XXVI 要求的 1 mm 或 10% 壁厚(取二者的大值)。



图 6 外径为 10 inch 的热熔接头参考试块外观



图 7 外径为 32 inch 的热熔接头参考试块外观

(4) 模拟能力验证试块。依据 ASME 规范第 III 卷附录 XXVI 的要求, 用于核电厂核三级 HDPE 管道的检测技术应在能力验证试块上通过验证后才可用于现场检测。试验根据 ASME 规范对能力验证试块的设计要求, 利用缺陷植入技术制作了 HDPE 管道模拟缺陷试块。主要在验证试块外表面和中部区域植入了异质材料(分布在 30%~90% 壁厚间)。

4.3 相控阵探头定制

根据前期对 HDPE 材料声学性能参数的研究结果可知, 要保证超声波在 HDPE 材料中有良好的穿透力, 应在满足缺陷检测精度的前提下, 尽量采用低频检测, 以获得足够的信噪比和灵敏度余量。为了提高探头能量, 设计制作了瓦型自聚焦的一维相控阵探头, 具体参数说明如下。

(1) 采用 2.25~5 MHz 频率检测外径为 8 inch,

壁厚为 23 mm 的小管径 HDPE 管道; 采用 1.5 MHz 或更低的频率来检测外径为 32 inch, 壁厚为 110 mm 的大口径厚壁 HDPE 管道。

(2) 阵元数量。探头阵元数量的选择与被检对象的壁厚、检测设备的配置及聚焦法则均有较大关系。随着晶片阵元数量的增加, 波束主瓣宽度逐渐变窄, 声束指向性得到改善, 栅瓣幅值减小。试验采用 16 阵元的探头检测外径为 8 inch 的 HDPE 热熔接头, 采用 64 阵元探头检测外径为 32 inch 的热熔接头。

(3) 阵元宽度。根据超声仿真软件的计算发现, 随着阵元宽度的增加, 主瓣宽度减小, 有利于提高声束指向性和改善聚焦性能, 但会产生较多的栅瓣。在探头尺寸不受限制的情况下, 可增大阵元宽度, 有利于获得更好的聚焦效果。

(4) 阵元间距。阵元间距对检测过程中波束聚焦的指向性和分辨力影响较大。通常随着阵元间距的增加, 主瓣宽度逐渐变窄, 声束指向性增强, 但当阵元间距大于波长时, 声束将出现明显栅瓣。

检测外径为 8 inch 和 32 inch 的 HDPE 热熔接头的相控阵探头型号分别为 2.25L16-12×12-A1 和 1.5L64-48×12-A2。

4.4 探头楔块

HDPE 材料的纵波声速与有机玻璃楔块材料的声速基本一致, 因而采用有机玻璃作为楔块材料将无法获得需要的偏转折射角, 不满足 ASME 规范对热熔接头全体积覆盖检测的要求。通过技术调研和方法试验, 最终确定采用水作为声束偏转介质, 水中纵波的声速为 $1480 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 小于 HDPE 材料的纵波声速(2300 m/s), 在理论上可获得检测所需的声束偏转角。

试验针对定制相控阵探头的参数, 设计了多款适用于 DN200~DN900 的 HDPE 管道热熔接头相控阵检测水楔块, 楔块采用空腔设计, 将水包裹在楔块框内, 通过不断给楔块充水来确保楔块内没有空气, 并保证探头激发的超声信号进入被检 HDPE 管件中。定制的水楔块型号分别为 SA1-N68L-AOD8(用于外径为 8 inch 的热熔接头) 和 SA2-N68L-AOD32(用于外径为 32 inch 的热熔接头)。水楔块外观如图 8 所示。

5 检测试验

采用定制的相控阵探头, 设置激活起始阵元和结束阵元, 检测外径为 8 inch 的管道时, 聚焦深度设



图 8 相控阵探头水楔块外观

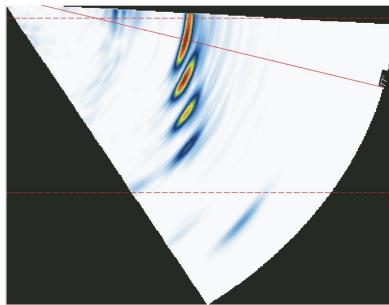
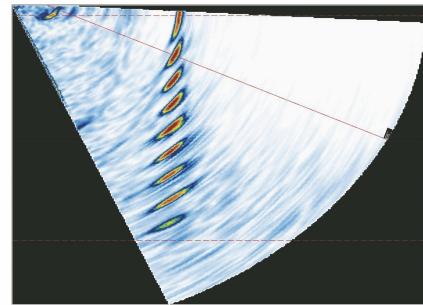
置为 15 mm; 检测外径为 32 inch 的管道时, 聚焦深度设置为 75 mm。扫描方式为扇形扫查, 角度范围为 35°~89°, 扫描间距为 1°。两个热熔接头参考试块上横孔反射体的检测图像如图 9,10 所示。试验结果表明, 采用定制的探头和楔块可有效发现试块内不同深度的所有横孔, 缺陷的定位精度、信噪比和灵敏度余量均满足检测要求。两个热熔接头参考试块所有横孔的检测数据如表 2,3 所示。

表 2 外径为 8 inch 热熔接头试块所有横孔的检测数据

横孔直径为 0.5 mm					横孔直径为 1.0 mm				
孔深/ mm	测量值/ mm	定位偏差/ mm	信噪比/ dB	灵敏度 余量/dB	孔深/ mm	测量值/ mm	定位偏差/ mm	信噪比/ dB	灵敏度 余量/dB
5	4.7	-0.3	23.3	83.7	5	5.3	+0.3	28.0	86.4
10	10.5	+0.5	26.0	84.5	10	10.4	+0.4	28.0	86.4
15	15.3	+0.3	27.7	80.2	15	15.4	+0.4	27.3	83.3
20	19.8	-0.2	24.2	76.7	20	20.4	+0.4	22.7	78.7

表 3 外径为 32 inch 热熔接头试块所有横孔的检测数据

横孔直径为 0.5 mm					横孔直径为 1.0 mm				
孔深/ mm	测量值/ mm	定位偏差/ mm	信噪比/ dB	灵敏度 余量/dB	孔深/ mm	测量值/ mm	定位偏差/ mm	信噪比/ dB	灵敏度 余量/dB
10	7.1	-2.9	22.0	70.4	10	7.9	-2.1	24.4	79.7
20	15.3	-4.7	23.8	76.7	20	20.5	+0.5	24.4	84.2
30	27.4	-2.6	21.9	78.9	30	31.0	+1.0	23.1	85.4
40	37.0	-3.0	20.0	78.9	40	40.3	+0.3	23.1	85.2
50	48.3	-1.7	20.9	78.9	50	50.5	+0.5	23.1	83.2
60	57.8	-2.2	21.9	78.9	60	60.3	+0.3	20.9	82.3
70	68.2	-1.8	21.6	78.6	70	70.5	+0.5	21.9	84.4
80	78.4	-1.6	21.0	76.9	80	80.7	+0.7	20.9	84.7
90	87.4	-2.6	20.3	74.8	90	90.3	+0.3	22.7	85.6

图 9 外径为 8 inch 的热熔接头试块上 ϕ 0.5 mm 横孔的检测图像图 10 外径为 32 inch 的热熔接头试块上 ϕ 1.0 mm 横孔的检测图像

6 现场检测应用

受国内某核电站委托, 采用项目开发的核电厂用厚壁 HDPE 热熔接头相控阵超声检测技术和扫查装置, 对电站在建厂用水系统 32 inch 的 HDPE 管道的 10 条热熔接头进行了抽检。

6.1 检测方案

采用型号为 1.5L64-48×12-A2 的相控阵探头及配套水楔块, 按照设置的检测工艺进行超声数据采集及分析。采用 CIVA 或仪器配套采集软件的声束仿真模块进行 32 inch HDPE 管道热熔接头相控阵超声声束覆盖范围仿真, 并对检测工艺的相关参

数进行确认。采用 32 inch 热熔接头校准试块上不同深度的 $\phi 1$ mm 横孔制作 TCG(距离-波幅)曲线, 采用软件的自补偿修正功能建立基准灵敏度。扫查灵敏度应至少在基准灵敏度的基础上提高 14 dB, 在材料结构噪声太大无法实施检测的情况下, 扫查灵敏度应在基准灵敏度的基础上提高 6 dB 以上。

由于该技术采用的是充水式水楔块, 超声耦合效果是实施现场检测的关键, 检测时可从 3 个方面保证耦合效果。首先, 调整扫查装置的压紧机构和管径调节机构, 确保带曲率的相控阵探头水楔块与管件外表面耦合良好并有足够的压紧力。其次, 对除盐水耦合剂进行消气泡处理, 确保除盐水在喷水过程中无气泡附着在探头和管外壁上。最后, 对 HDPE 管件外表面的不平整进行处理并在扫查前对管外壁进行润湿。

由于 HDPE 热熔接头存在固有的内外表面翻边的情况, 所以检测过程中, 相控阵超声检测图像存在明显的, 有规律性的几何结构信号(见图 11)。检测过程中可以观察该信号的变化, 有效地判断疑似

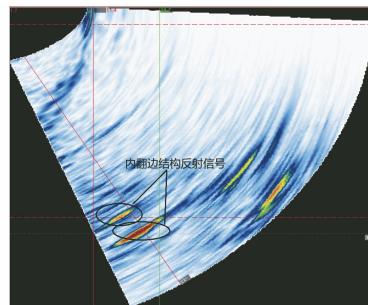


图 11 热熔接头的结构反射信号

(上接第 9 页)

为一致, 并有较好的信噪比; ② 对于脱模剂法制作的试块, 在特定织物层上涂抹脱模剂方法制作的人工缺陷均未检出; 去除两层织物之间的胶层并在缺陷上涂抹脱模剂方法制作的人工缺陷能有效检出, 但信噪比较差, 实际埋深与理论埋深较为一致, 人工缺陷测量尺寸与设计尺寸偏差较大; ③ 对于脱模膏法制作的试块, 各人工缺陷均能有效检出, 人工缺陷测量尺寸及埋深与设计尺寸及埋深较为一致, 但信噪比欠佳。

4 结语

(1) 对采用贴膜法及插拔钢片法制作的人工缺

陷信号。

6.2 检测结果

现场检测结果表明该技术和配套装置可完全满足现场检测的要求, 主要体现在: ① 相控阵探头与配套充水式楔块可有效地适应 HDPE 管道不同的表面状态, 保证超声信号的稳定性; ② 可有效发现 HDPE 管道热熔接头内表面翻边的固有结构信号; ③ 开发的相控阵检测工艺优化了扫查方式, 有效地提高了现场检测的效率。

7 结语

研究解决了壁厚大于 90 mm 的 HDPE 热熔接头全体积范围缺陷检测的难题。试验和现场应用结果均表明开发的检测技术可满足以下指标: ① 缺陷的深度定位精度最大偏差为 4.7 mm, 小于 5% 壁厚; ② 缺陷检测精度不低于 $\phi 0.5$ mm 当量的横孔(壁厚小于 30 mm)和 $\phi 1$ mm 当量的横孔(壁厚大于 90 mm); ③ 缺陷信噪比大于 20 dB, 检测灵敏度余量大于 70 dB。

参考文献:

- [1] 刘世辉, 王艳文, 朱清. 核电厂 SWS 系统阀门腐蚀原因分析和应对措施[J]. 设备监理, 2018(5): 57-61.
- [2] 刘飞华, 任爱, 杨帆, 等. 核电站海水冷却系统的腐蚀与防腐蚀设计[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(6): 313-316.
- [3] 倪正超, 樊敏江, 钮彬皓, 等. 核安全级架空高密度聚乙烯材料管道设计方法的研究和应用[J]. 压力容器, 2018, 35(10): 31-36.

陷试块进行水浸超声检测, 能有效检出试块中不同埋深及大小的人工缺陷, 可得到较好的信噪比, 同时能够准确定量人工缺陷的大小及埋深。

(2) 对采用脱模剂法及脱模膏法制作的对比试块进行水浸超声检测, 检测效果较差。

参考文献:

- [1] 谢富原. 先进复合材料制造技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017.
- [2] 刘晶晶. 碳纤维增强树脂基复合材料结构的超声检测[J]. 无损检测, 2016, 38(10): 64-66.
- [3] 刘松平, 刘菲菲. 先进复合材料无损检测技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017.