

# 衬里复合钢管对接焊缝的自动超声检测

常 宇  
(海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

**摘 要:** 分析了衬里复合材料的检测难点, 基于相控阵 AUT(自动超声检测)技术, 制作了一系列焊接缺陷, 并对比分析缺陷的 AUT 检测结果与缺陷宏观切片结果, 评估 AUT 对于不同位置缺陷的检出率及缺陷定量精度, 验证了衬里复合材料焊缝 AUT 检测的可靠性。

**关键词:** 自动超声检测; 衬里复合材料; 检测精度

中图分类号: TG115.28      文献标志码: B      文章编号: 1000-6656(2022)09-0063-03

## AUT inspection of welding seam of cladded composite steel pipe

CHANG Yu  
(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

**Abstract:** This paper analyzes the difficulties in the detection of lining composite materials. Based on the phased array AUT detection technology, a series of welding defects were made, and the AUT detection results of defects and the macro sectioning results of defects were compared and analyzed. The detection rate and quantitative accuracy of defects at different positions were evaluated, and the reliability of AUT detection of lining composite welds was verified.

**Key words:** AUT; cladded composite material; detection precision

随着 AUT(自动超声检测)技术的发展, 其在海底管线焊缝检测中得到了越来越广泛的应用。不锈钢复合材料管线的内表面增强了一层不锈钢材料, 以增强管线的抗腐蚀性, 其管端常采用堆焊方式进行焊接以保证检测的可行性。焊缝填充材料与堆焊材料一致, 通常为镍基 625 不锈钢, 此类焊缝材料晶粒粗大, 与碳钢层存在清晰的界面, 该界面会导致超声发生反射, 偏转, 折射及衰减, 给超声检测带来极大的困难。文章采用相控阵 AUT 技术对焊缝进行检测, 获得了较好的检测效果, 达到了海底管线系统标准的要求, 为工程应用提供了可靠的技术支撑。

### 1 衬里复合钢管对接焊缝 AUT 检测难点

典型的衬里复合材料对接焊缝如图 1 所示。AUT 检测时, 声波在复合材料与碳钢材料的界面处会产生反射、折射, 由于焊缝内部晶粒粗大及存在各

向异性, 声波散射严重, 信噪比较低。另外, 采用常规横波检测技术进行检测时, 声束偏转严重, 定位偏差大, 无法实施有效检测。

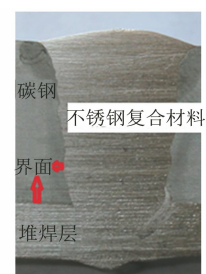


图 1 典型的衬里复合钢管对接焊缝

### 2 相控阵 AUT 检测原理

#### 2.1 相控阵基本原理

相控阵技术通过控制阵列中的每个晶片延时发射激励脉冲, 形成所需角度的声束及焦距, 从而实现对结构关键部位的检测<sup>[1-2]</sup>。典型的聚焦声场如图 2 所示。

相控阵探头相当于一个较长的常规超声探头, 其由许多小晶片组成, 每个小晶片都可以独立激发。典型相控阵线性阵列探头结构如图 3 所示。

收稿日期: 2022-03-21  
作者简介: 常 宇(1984—), 男, 工程师, 主要从事海底管线检测技术的研究与应用工作  
通信作者: 常 宇, changyu@cnooc.com.cn

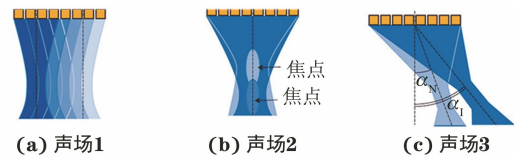


图 2 相控阵典型的聚焦声场



图 3 典型的相控阵线性阵列探头结构示意图

2.2 分区法检测原理

分区法检测时,将焊缝声波沿壁厚方向划分为若干个分区,每个分区高度为 1~3 mm,每个分区配置独立的检测波束,波束沿焊缝中心线对称布置。典型分区法波束配置示意如图 4 所示。检测结果以带状图方式显示,典型带状图如图 5 所示<sup>[3-4]</sup>。

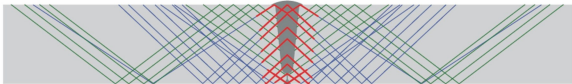


图 4 典型分区法波束配置示意

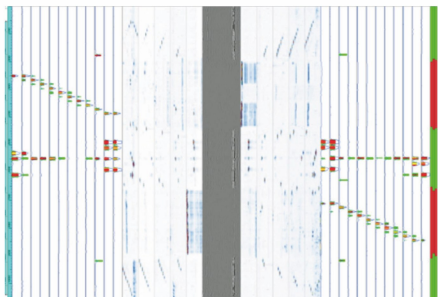


图 5 相控阵检测典型带状图显示

3 相控阵 AUT 检测工艺设置

检测时应选择合适的频率,波束类型及探头类型,以获得良好的检测灵敏度。试验选用 64/128(总通道数为 128 个,一次可激发 64 个)相控阵检测系统,采用线性相控阵探头,使用一次纵波检测方式,对焊缝进行常规的分区法检测,检测结果以带状图显示。对上表面区域增加爬波检测,将探头沿着焊缝中心线对称放置,以实现焊缝的检测及缺陷的准确评定<sup>[5]</sup>。典型检测波束路径如图 6 所示。

4 检测过程

4.1 缺陷制作

使用两种规格(外径为 273 mm,壁厚为 18.9 mm 及外径为 219 mm,壁厚为 14.1 mm)的管道制作缺

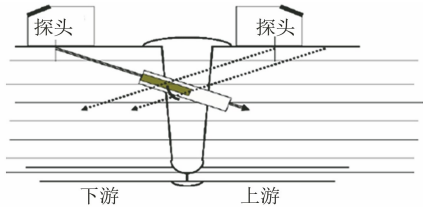


图 6 典型检测波束路径示意

陷,坡口形成为 U 型,堆焊层高度约为 3 mm,母材材料为 API 5L X65,堆焊层及焊缝填充金属材料为镍基 625,缺陷分别位于焊缝外表面填充区,热焊区,根部及内部填充区域,缺陷高度为 1~3 mm,长度为 10~20 mm,类型为侧壁未熔合、层间未熔及气孔。缺陷高度分布如图 7 所示。共制作 330 个焊接缺陷,选择 130 个缺陷进行切片,同时每个位置缺陷数量大于 30 个,以满足检测能力评估的需求。

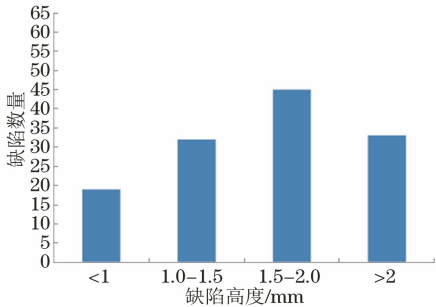


图 7 缺陷高度分布

4.2 数据记录及评定

记录检测数据,包括缺陷的长度、高度、深度,选择不同位置的缺陷进行宏观切片(见图 8),测定缺陷的实际尺寸。对比检测数据与切片尺寸的偏差,使用统计学原理进行检出率(POD)分析,检出率分析结果如图 9 所示,AUT 检测数据与宏观切片数据对比如表 1 所示。

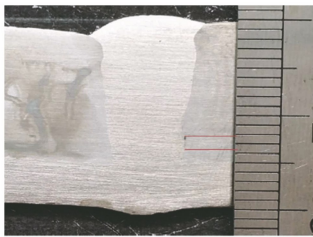


图 8 缺陷宏观切片显示

由表 1 可知,AUT 检测工艺可检测出焊缝外表面填充区,热焊区,根部及内部填充区域位置的缺陷。计算缺陷 AUT 测量尺寸与宏观切片尺寸的偏差可得到,对于缺陷高度,盖面区域的最大偏差为 1 mm,热焊区域的最大偏差为 0.8 mm,填充区域的最大偏差为 0.9 mm,根部区域的最大偏差为 0.7 mm;对于

表 1 AUT 检测数据与宏观切片数据对比

序号	焊口号	缺陷编号	AUT 数据/mm			宏观切片测量数据/mm			位置	AUT 数据与宏观切片测量数据的偏差/mm	
			长度	高度	深度	高度	深度			高度	深度
1	W01	3	10	1.8	4.9	0.8	7.1	盖面		1	-2.2
2	W01	10	12	1.8	3.2	1.5	5.9	填充		0.3	-2.7
3	W01	12	7	2.2	7.8	1.3	5.9	填充		0.9	1.9
4	W01	14	6	1.5	12.2	1.7	12.2	填充		-0.2	0
5	W02	1	7	2	18.9	1.3	18.9	根部		0.7	0
6	W02	2	13	2.2	18.9	2	18.9	根部		0.2	0
7	W02	10	10	1	5.1	1.1	4	盖面		-0.1	1.1
8	W02	11	10	1	11.8	1.3	12.5	填充		-0.3	-0.7
9	W05	1	23	1.7	11.9	1.8	12.6	填充		-0.1	-0.7
10	W05	3	20	2.3	4	2.2	3.4	盖面		0.1	0.6
11	W06	8	8	0.9	18.9	1.3	18.9	根部		-0.4	0
12	W06	9	26	1.3	3.8	1.9	2.9	盖面		-0.6	0.9
13	W06	10	27	2.4	5.4	1.9	5.2	盖面		0.5	0.2
14	W07	3	20	1.2	10.5	1.5	12.2	填充		-0.3	-1.7
15	W07	5	8	1.7	3.2	2.5	2.75	盖面		-0.8	0.45
16	W07	10	21	1.1	4.9	0.7	5.1	盖面		0.4	-0.2
17	W09	1	11	2.8	4.9	2.8	2.8	盖面		0	2.1
18	W09	2	12	1	17.3	1	16.5	热焊		0	0.8
19	W09	10	28	1.8	13.8	1.4	12.9	填充		0.4	0.9
20	W09	11	12	1.7	10.3	1.8	11.8	填充		-0.1	-1.5
21	W09	12	17	1.8	18.9	2.2	18.9	根部		-0.4	0
22	W09	13	10	2	18.9	1.8	17.9	根部		0.2	1
23	W09	14	13	2.6	15	1.8	13.1	热焊		0.8	1.9
24	W10	1	10	2	4	1	4.9	盖面		1	-0.9
25	W10	2	6	2.2	16.9	1.5	15.9	根部		0.7	1
26	W11	6	28	2.6	14.7	2.1	15	热焊		0.5	-0.3
27	W17	13	14	1.4	14.1	2	14.1	根部		-0.6	0
28	W18	1	25	0.8	14.1	1	14.1	根部		-0.2	0
29	W18	2	13	1.5	11.4	1.4	11.5	热焊		0.1	-0.1
30	W18	3	21	3.6	3.6	2.7	3.9	盖面		0.9	-0.3

缺陷深度，盖面区域的最大偏差为 2.2 mm，热焊区域的最大偏差为 1.9 mm，填充区域的最大偏差为 2.7 mm，根部区域的最大偏差为 1 mm。

由图 9 可知，衬里复合钢管对接焊缝 AUT 检测工艺在置信度为 95%，检出率为 90% 时，缺陷高度为 0.9 mm，满足海底管线系统标准的要求（-1~1 mm）。

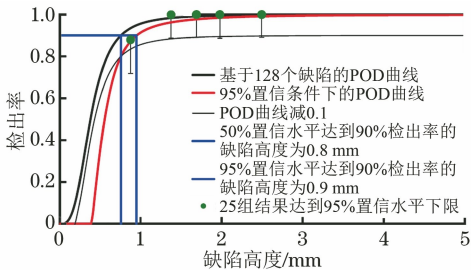


图 9 检出率分析结果

5 结语

对衬里复合钢管对接焊缝进行 AUT 检测并对

比分析了其结果与宏观切片结果，表明了 AUT 可检测出焊缝不同位置的焊接缺陷，缺陷高度最大偏差为 1 mm，缺陷深度最大偏差为 2.7 mm，在置信度为 95%，检出率为 90% 条件下，缺陷高度为 0.9 mm，满足标准要求。

参考文献：

[1] 黄晶. 超声相控阵理论及其在海洋平台结构焊缝缺陷检测中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.

[2] 吴员, 陈亮, 张俊杰, 等. 海底管道无损检测技术评定的破坏性试验[J]. 无损检测, 2019, 41(11): 34-35, 47.

[3] 陈亮. 海底管道不锈钢复合管焊缝的全自动超声检测工艺认证[J]. 无损检测, 2021, 43(01): 53-55.

[4] 陈亮, 孙晓明, 尤卫宏, 等. 海底管线耐蚀合金环焊缝的 AUT 检测[J]. 无损检测, 2015, 37(2): 44-46.

[5] 陈亮, 张立艳. AUT 校准试块的制作和质量控制[J]. 无损检测, 2017, 39(2): 64-66.