

# 基于 DNVGL-ST-F101 规范的海底管线碳钢 U 型坡口焊缝的 TOFD 和 PAUT 检测

陈亮

(海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

**摘要:** 基于 DNVGL-ST-F101—2017 规范的要求, 结合海底管线 U 型坡口焊缝的特点, 选择直径为 168 mm, 壁厚为 18.6 mm 及管径为 508 mm, 壁厚为 31.8 mm 的两种规格管线, 制作一系列焊接缺陷, 焊接缺陷分布于焊缝根部、热焊、填充及表面区域, 缺陷类型包括未熔合、气孔及层间未熔合等。使用 TOFD(超声衍射时差法)和 PAUT(相控阵超声检测)工艺对试验焊缝进行扫查, 评定不同位置缺陷的尺寸, 对所有评定的缺陷进行金相试验, 通过对比 TOFD 和 PAUT 测量结果与金相试验结果的偏差, 确定 TOFD 和 PAUT 检测的准确性及可靠性。

**关键词:** 超声衍射时差法; 相控阵超声检测; U型坡口焊缝; 碳钢

中图分类号: TG115.28

文献标志码: B

文章编号: 1000-6656(2022)01-0056-04

## TOFD and PAUT testing of carbon steel U-type groove weld in submarine pipeline based on DNVGL-ST-F101 code

CHEN Liang

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

**Abstract:** Based on the requirements of DNVGL-ST-F101—2017 and in combination with the characteristics of U-groove welds of submarine pipelines, two types of pipeline were selected for the test, in which the diameter of one pipeline is 168 mm with its wall thickness being 18.6 mm, and the diameter of the other one is 508 mm with its wall thickness being 31.8 mm. A series of defects including non-fusion, porosity and inter-run etc were made for the two types of pipeline, and the locations of welding defects were distributed in the root, hot pass, filling and surface of the weld. TOFD(time of flight diffraction) and PAUT(phased array ultrasonic testing) technique were used to scan the test welds, and furthermore evaluation of the defects, sizing and metallographic test for all the defects were carried out in order to determine the sizing result deviation. By comparing the differences between TOFD and PAUT measurement results and metallographic test results, the accuracy and reliability of TOFD and PAUT testing can thus be determined.

**Key words:** time of flight diffraction; phased array ultrasonic testing; U-type groove weld; carbon steel

自动焊接技术广泛应用于海底管线铺设过程中, 自动焊接的坡口形式为 U 型, 坡口角度通常为 3°~6°。近年来, 随着衍射时差(TOFD)技术及相控阵超声检测(PAUT)技术的发展与应用, DNVGL-

ST-F101—2017《海底管线系统》规范允许使用相控阵扇形/线性扫描技术及 TOFD 检测技术进行海底管线的焊缝检测。单一 PAUT 技术无法可靠地完成 U 型坡口焊缝的检测, 目前此类焊缝检测主要采用射线检测和一发一收超声检测。笔者通过将 TOFD 技术与 PAUT 技术有效结合, 实现了 U 型坡口焊缝的有效检测, 通过对大量缺陷的检测, 充分验证了 TOFD 与 PAUT 检测工艺的准确性及可靠性, 为工程实践提供了经验参考。

收稿日期: 2021-07-09

作者简介: 陈亮(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事海底管线检测工艺开发与应用工作

通信作者: 陈亮, chenliang@mail.cooec.com.cn

## 1 U型坡口的特点及其检测工艺配置

### 1.1 U型坡口缺陷的检测特点

U型坡口主要包括根部、热焊及填充区域，填充区角度小，典型U型坡口结构如图1所示。在U型坡口焊缝焊接过程中，由于焊接设备及焊接操作的问题，坡口面区域容易产生未熔合类缺陷，该类缺陷方向与坡口面平行，是检测的重点。对于根部及热焊区域，常规脉冲回波能够获得良好的检测效果，

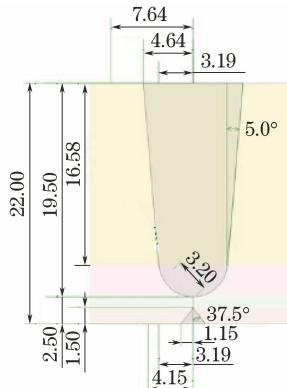


图1 典型U型坡口结构示意

但对于填充区域，由于其填充角度较小，脉冲回波无法有效检测，因此在配置检测工艺时，需增加相关扫描方式，以满足U型坡口填充区域检测的要求。

### 1.2 TOFD和PAUT检测工艺配置

采用相控阵检测系统，依据U型坡口的特点，设置一组TOFD探头<sup>[1]</sup>，覆盖焊缝内部检测区域，TOFD工艺配置如图2所示，选用的TOFD探头频率为10 MHz，晶片直径为3 mm，配置楔块角度为70°，深度聚焦位置在检测壁厚的2/3处，覆盖距离上表面4 mm以下及距离内表面2 mm以上区域。同时设置一组相控阵探头，对称放置于焊缝两侧，每个探头设置扇形扫描波束覆盖焊缝内外表面区域，PAUT工艺配置如图3所示。采用5L32-A31型相控阵探头，SA31-N55S型楔块，扇形扫描角度为35°~75°，角度步进为1°，激发晶片数量为16个，确保波束对焊缝上表面的有效覆盖，以检测TOFD检测时存在的内外表面盲区，实现U型坡口焊缝的有效检测。采用机械化扫查进行数据采集，编码记录数据，一次周向扫查即可完成整个焊缝的检测。

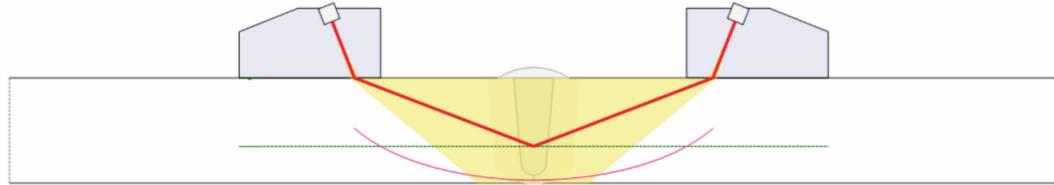


图2 TOFD工艺配置示意

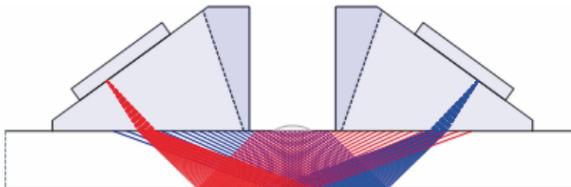


图3 PAUT工艺配置示意

## 2 试验方法

### 2.1 检测系统

使用奥林巴斯的OMNISCAN MX2检测系统，配置一组TOFD探头，一组相控阵探头，探头对称布置于焊缝两侧，采用轨道式扫查装置（见图4），编码记录数据，电机驱动探头行走可实现焊缝的实时检测及数据评判。

### 2.2 试验焊缝

选用管径为168 mm，壁厚为18.6 mm及管径为508 mm，壁厚为30 mm的两种碳钢管材，坡口形式为U型，坡口角度为6°，材料为API 5L X65。



图4 轨道式扫查装置外观

采用自动熔化极气体保护焊焊接工艺，通过调整工艺参数制作一系列焊接缺陷，缺陷长度为10~20 mm，缺陷高度为0.5~3.0 mm，位置分布于内外表面、填充区、热焊区等区域，类型为坡口面未熔合及焊缝内部体积型缺陷。

### 2.3 检测数据分析

对制作的缺陷焊缝进行TOFD和PAUT检测，逐一记录所有缺陷显示通道和波幅，按照数据评定方法进行缺陷高度、长度及深度的评定，对所有缺

陷进行金相检验,测量缺陷的实际高度及深度<sup>[2]</sup>,将每个缺陷的 TOFD 和 PAUT 检测结果与金相检验

结果进行对比分析,验证 TOFD 和 PAUT 检测结果的准确性,缺陷检测结果如表 1 所示。

表 1 缺陷焊缝的检测结果

mm

焊缝编号	壁厚	缺陷编号	位置	类型	TOFD 和 PAUT		金相检验		TOFD 和 PAUT 与金相的偏差	
					高度	深度	高度	深度	高度偏差	深度偏差
W01	18.6	1	根部	未焊透	0.8	18.6	0.5	18.6	-0.3	0.0
W01	18.6	3	根部	未焊透	0.6	18.6	1.4	18.6	0.8	0.0
W01	18.6	4	根部	未焊透	1.1	18.6	0.7	18.6	-0.4	0.0
W01	18.6	6	根部	未焊透	0.9	18.6	1.1	18.6	0.2	0.0
W01	18.6	7	根部	未焊透	0.9	18.6	1.0	18.6	0.1	0.0
W02	18.6	4	盖面	未熔合	2.1	2.1	1.3	1.3	-0.8	0.8
W02	18.6	5	盖面	未熔合	1.2	1.2	0.8	1.5	-0.4	-0.3
W02	18.6	6	盖面	未熔合	1.5	2.1	1.4	1.4	-0.1	0.7
W04	18.6	1	热焊	未熔合	1.6	16.7	2.5	16.7	0.9	0.0
W04	18.6	5	热焊	未熔合	1.3	15.0	0.5	14.9	-0.8	0.1
W04	18.6	6	热焊	未熔合	1.0	15.7	0.5	14.7	-0.5	1.0
W04	18.6	7	填充	层间未熔合	1.5	5.2	0.9	6.4	-0.6	-1.2
W07	18.6	1	填充	未熔合	1.1	4.8	0.8	4.8	-0.3	0.0
W07	18.6	2	填充	未熔合	1.4	6.5	1.0	6.6	-0.4	-0.1
W07	18.6	3	填充	未熔合	1.0	7.0	1.0	7.5	0.0	-0.5
W07	18.6	4	填充	未熔合	1.4	11.1	1.8	10.0	0.4	1.1
W07	18.6	6	填充	未熔合	1.4	15.2	1.4	14.0	0.0	1.2
W08	18.6	7	填充	层间未熔合	1.5	5.9	0.7	6.0	-0.8	-0.1
W08	18.6	8	填充	密集气孔	3.2	10.4	3.4	11.4	0.2	-1.0
W01	31.8	6	根部	未焊透	1.9	31.8	1.3	31.8	0.6	0.0
W01	31.8	10	根部	未焊透	1.9	31.8	2.1	31.8	-0.2	0.0
W01	31.8	17	根部	未焊透	1.7	31.8	1.1	31.8	0.6	0.0
W01	31.8	20	根部	未焊透	1.1	31.8	1.4	31.8	-0.3	0.0
W01	31.8	22	根部	未焊透	1.8	31.8	0.9	31.8	0.9	0.0
W02	31.8	7	盖面	未熔合	0.7	0.7	1.1	2.5	-0.4	-1.8
W02	31.8	8	盖面	未熔合	1.4	1.4	0.5	1.6	0.9	-0.2
W02	31.8	10	盖面	未熔合	2.5	3.1	1.6	2.8	0.9	0.3
W02	31.8	11	盖面	未熔合	2.4	3.1	1.5	2.2	0.9	0.9
W02	31.8	12	盖面	未熔合	1.7	2.5	1.5	2.5	0.2	0.0
W03	31.8	13	填充	未熔合	2.2	7.1	1.6	5.9	0.6	1.2
W03	31.8	15	填充	未熔合	1.6	15.8	1.9	14.0	-0.3	1.8
W03	31.8	16	填充	未熔合	2.0	17.3	1.8	18.4	0.2	-1.1
W03	31.8	17	填充	未熔合	1.5	21.0	1.7	20.6	-0.2	0.4
W03	31.8	18	填充	未熔合	2.0	26.5	1.4	27.5	0.6	-1.0
W03	31.8	19	热焊	未熔合	1.5	27.2	2.0	28.7	-0.5	-1.5
W03	31.8	20	热焊	未熔合	2.0	27.6	1.7	28.6	0.3	-1.0
W03	31.8	21	热焊	未熔合	2.2	29.0	1.8	29.7	0.4	-0.7
W03	31.8	22	热焊	未熔合	2.0	28.2	1.9	29.5	0.1	-1.3
W03	31.8	23	热焊	未熔合	1.6	31.8	1.5	30.0	0.1	1.8

由表 1 可知,根部区域有 10 个缺陷,高度为 0.5~2.1 mm;热焊区域有 8 个缺陷,高度为 0.5~2.5 mm;填充区域有 10 个缺陷,高度为 0.8~1.9 mm;盖面区

域有 8 个缺陷,高度为 0.8~1.6 mm;焊缝内部缺陷有 2 个。TOFD 和 PAUT 检测工艺能够有效检测出两种尺寸焊缝坡口面不同位置的未熔合类面积型

缺陷及焊缝内部的层间未熔合、密集气孔等体积型缺陷,检测结果与金相检验结果一致,高度测定平均偏差为 0.1 mm,最大偏差为 0.9 mm;深度测定平均偏差为 0.05 mm,最大偏差为 1.8 mm。根部区域高度平均偏差为 0.2 mm,最大偏差为 0.9 mm,最小偏差为 0.1 mm;热焊区域缺陷的高度平均偏差为 0,最大偏差为 0.9 mm,最小偏差为 0.1 mm,深度偏差最大为 1.8 mm;填充区域缺陷的高度平均偏差为 -0.6 mm,最大为 -0.8 mm,最小为 0,深度偏差最大为 1.8 mm;盖面区域缺陷的高度平均偏差为 0.15 mm,最大偏差为 0.9 mm,最小偏差为 0.1 mm,深度偏差最大为 1.8 mm。

通过对缺陷高度及深度测定的误差分析,可知 TOFD 和 PAUT 的检测结果与缺陷实际尺寸具有良好的一致性,检测精度能够达到 DNVGL-ST-F101 标准的要求。

### 3 结语

对于碳钢材料 U 型坡口焊缝,TOFD 检测能够有效发现焊缝内部坡口面及焊缝中心缺陷,

PAUT 能够有效发现 TOFD 检测上下表面盲区内的缺陷。对不同位置、不同类型焊接缺陷的检测验证表明,TOFD 和 PAUT 检测工艺能有效检测出各个位置的缺陷,尺寸测量结果与金相检验结果具有较高的一致性,高度测量结果与实际尺寸最大偏差为 0.9 mm,深度测量结果与实际尺寸最大偏差为 1.8 mm,满足标准对检测精度的要求,同时可为 U 型坡口焊缝 TOFD 和 PAUT 检测技术的应用提供可靠的参考。

相比于分区法自动超声检测技术,基于便携式相控阵设备开发的 TOFD 和 PAUT 检测工艺的检测精度及可靠性可达到 DNVGL-ST-F101 标准的要求。

### 参考文献:

- [1] 陈亮,吴员,张天江.相控阵超声扇形扫描技术在海底管道焊缝检测中的应用[J].无损检测,2020,42(9):25-27.
- [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.

(上接第 52 页)



图 16 采用厚度补偿块技术后 F 区的检测结果

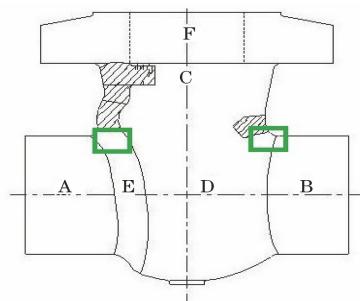


图 17 连接转角处未检测区示意

### 3 射线检测的局限性

射线检测容易检出那些存在局部厚度差的缺陷,

对铸件中气孔和疏松类的缺陷有很高的检出率,对裂纹类缺陷的检出率则受到透照角度的影响。为保证产品的质量,对铸件内外表面可能存在的开口型细小缺陷宜再补充渗透检测。如对于法兰、焊端等机加工部位,在机加工后宜再补充渗透检测和超声检测。

### 4 结语

经试验验证,严格按照文章提出的射线检测工艺实施检测,可以确保典型产品止回阀的全体积检测,检测效果良好,K 值、黑度和灵敏度都符合要求。射线检测中所采取的措施和注意事项,对于其他类似铸件阀体的射线检测具有参考价值。

### 参考文献:

- [1] 张俊哲,戚克鹏,刘春海,等.高速列车变截面铸钢件的 X 射线数字成像检测[J].无损检测,2011,33(12):66-68,99.
- [2] 王增勇,汤光平,李建文,等.工业 CT 技术进展及应用[J].无损检测,2010,32(7):504-508.
- [3] 强天鹏.射线检测[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2007:107-108.