

# 对比分析超声波衍射时差法与超声波相控阵检测方法

黄雪江 章增智 王宪杰 周强峰

新疆科华时代检测科技有限责任公司, 新疆 克拉玛依 834000

**[摘要]**近几年,运用无损技术对工件等实体进行检测成为主流,文章以此为落脚点,首先介绍了 TOFD、超声相控阵的诞生背景,其次对二者进行了对比,分别叙述了 TOFD 的优势、不足,超声相控阵的特点、优势,最后结合某管道检测项目,对二者的实际运用效果进行了分析,结合最终检出率得出“超声相控阵检出率优于 TOFD”的结论。希望能给相关人员以帮助,为日后检测工作的高效开展提供理论参考。

**[关键词]**超声波相控阵; TOFD 技术; 对比分析

DOI: 10.33142/ec.v5i7.6397

中图分类号: TG441.7

文献标识码: A

## Comparison Analysis of the Ultrasonic Diffraction Time Difference Method and Ultrasonic Phased Array Detection Method

HUANG Xuejiang, ZHANG Zengzhi, WANG Xianjie, ZHOU Qiangfeng

Xinjiang Kehua Shidai Testing Technology Co., Ltd., Karamay, Xinjiang, 834000, China

**Abstract:** In recent years, the use of nondestructive technology to detect workpieces and other entities has become the mainstream. Taking this as the foothold, this paper first introduces the birth background of TOFD and ultrasonic phased array, then compares them, describes the advantages and disadvantages of TOFD, the characteristics and advantages of ultrasonic phased array, and finally analyzes the actual application effect of TOFD and ultrasonic phased array combined with a pipeline inspection project. Combined with the final detection rate, it is concluded that the detection rate of ultrasonic phased array is better than TOFD. I hope it can help relevant personnel and provide theoretical reference for the efficient development of testing in the future.

**Keywords:** ultrasonic phased array; TOFD technology; comparative analysis

### 引言

TOFD 是以被测样品内部端点、端角所提供衍射能量为依据,对结构缺陷进行检测的技术,通常被用来对缺陷进行定位及定量。随着社会的发展,工业生产规模及复杂程度均有所增加,该技术所能发挥作用变得十分有限,强调无损检测的超声相控阵应运而生,针对二者间所存在异同展开对比研究成为大势所趋。

### 1 研究背景

现阶段,国内检测领域所使用检测技术均为无损技术,其中,最具代表性的技术为 TOFD。早在本世纪初,由 Isonotron NDT (以色列)所开发超声检测系统便被引入我国,与此同时,多家企业对该系统进行了运用,在经过数次创新与升级后,最终形成了符合国情、检测需求的全新扫查系统,即 TOFD<sup>[1]</sup>。此后,该技术开始被频繁用于工业检测,其优势也以更加直观的方式被呈现了出来。

该技术的创新之处在于引入了超声波成像,强调先在恰当位置安装收/发探头,保证各探头对入射点间距合理,在此基础上,有序开展后续检测工作。事实证明,该技术在检测环焊缝、直径在 500mm 以上的纵缝、焊接缝等方面,均有较常规技术更加突出的优势,但也要意识到该技术同样存在不足,例如,无法检测形状或结构过于复杂的实体工件,再例如,对焊缝进行检测期间极易出现盲区。

在此背景下,业内人士纷纷提出对超声相控阵加以运用<sup>[2]</sup>。该技术被引入我国的时间同样为本世纪初,引入初期多被用于医疗检测,获得与被测器官相符的图像,随着医疗行业的持续发展,该技术所能发挥作用变得十分有限,其不足主要体现在成本昂贵、系统相对复杂和无法在固体中快速、稳定传播等方面,将数据自动分析、压电复合材料等先进技术与该技术相结合成为必然选择,可以预见的是,未来该技术将拥有更加广阔的发展空间,围绕现有检测技术展开讨论,明确不同技术既有优势及有待解决的问题,其现实意义有目共睹。

### 2 关于 TOFD 和超声波相控阵检测的对比

#### 2.1 TOFD 技术

##### 2.1.1 优势

TOFD 的优点主要体现在四个方面,分别是检出缺陷的能力较强,时效性理想,可保证缺陷定量精确,安全系数极高。除特殊情况外,基于 TOFD 所获得数据均能够得到永久的保存。下文将对其优势进行更加详细的介绍,供相关人员参考:

(1) 高灵敏度,该技术所发出衍射波信号在灵敏度方面具有极为突出的表现,无形中提高了工作的检出率,这点需要引起重视。

(2) 影响较小,事实证明,缺陷方向、焊缝结构给

该技术所产生影响极小,换言之,即使缺陷方向不确定、焊缝结构复杂多变,该技术仍然能够快速得到结果,同时保证检测结果真实且具有实际意义。

(3)数据完整,TOFD在时效性方面的表现有目共睹。一般情况下,该技术均能够在检测的同时对相关数据进行存储,通过打印或是存盘的方式,使数据得到永久保存,为日后分析以及处理等工作的开展提供便利<sup>[3]</sup>。

(4)灵活度高,检测人员可在加工现场运用该技术有序开展检测工作,以现场情况为依据,对检测模式(自动检测/手动检测)加以确定。

(5)价格低廉,一方面,该技术不需要搭配使用其他易耗设备或零件,另一方面,该技术通常无需接触被测样品,设备磨损程度可得到有力控制,其成本自然较其他技术更低。此外,该技术可被用来对接触面温度在200℃或以上的工件进行检测,强调根据现行评定标准对缺陷进行评定,对缺陷进行修复期间尽量避免剖开裂缝,此举在无形中缩短了检测与生产的间隔,问题发生的概率也被降至最低,其经济性不言而喻。

(6)精度理想,该技术并未沿用常规的计算方式,而是改用衍射时差法对缺陷实际高度进行计算,事实证明,基于衍射时差进行计算,既能够保证结果准确,又可使计算速度得到大幅提升。

(7)漏检概率低,衍射波极为灵敏,可利用图像对检测所得数据进行完整记录,在重复性方面同样具有良好表现。

(8)工作效率高,对该技术加以运用,通常只需进行线性扫查,便可准确掌握焊缝情况,其覆盖范围较常规单探头检测更大,优势自然也更加明显。

(9)安全系数高,该技术给检测人员所造成伤害或负面影响极小,通常可以忽略不计。

### 2.1.2 不足

实践表明,该技术仍有较为明显的不足存在,具体表现在以下几个方面:首先,由于TOFD的灵敏度较高,对焊缝进行检测时,有一定概率出现夸大良性缺陷的情况。其次,对该技术加以运用,需要分别在焊缝两侧预留安装探头的位置,保证预留空间满足探头安装要求。再次,TOFD极易出现检测盲区,运用该技术对工件表面2mm~10mm这一区域进行检测,通常无法保证检测结果完全准确。最后,该技术的检测效率相对较低。现阶段,基于TOFD所衍生出的扫查方式有两种,分别是平行扫查、非平行扫查,其中,平行扫查的优点是定量精度理想,但效率相对较低,更适合被用来对指定缺陷进行定位、定量,或是在实验室内加以使用<sup>[4]</sup>。非平行扫查虽然能够使检测速度得到提升,但无法准确判断缺陷所处位置,无形中增加了后续定位等环节的难度,通常需要经过数次扫查,才能对缺陷位置加以确定,检测效率自然难以得到提高。现阶段,国内检测所使用方法多为非平行扫查,这点应当有所了解。

## 2.2 超声波相控阵检测

超声相控阵强调以多晶片为依托,对声束聚焦进行控制,确保即使不更改探头位置,同样能够凭借较大角度和声束完成扫查指定范围的任务,在对形状较为复杂的工件进行检测方面,具有极为突出的表现。

### 2.2.1 特点

如果将其他常见检测技术作为参照物,那么,超声相控阵的特点可被归纳如下:其一,该技术强调通过电子方法对声束聚焦以及扫描加以控制,能够在极大程度上提升检测速度。检测人员可视情况随意变换超声波束的方向;焦点可调,如果有特殊需求,还可通过焦点进行动态聚焦;新增电子扫描功能,扫描速度明显快于光栅扫描;在不更改探头所处位置的情况下,通过线扫、扇扫等方式,获得相对完整的图像。其二,该技术在声束可达性方面的表现极为突出,可被用来对形状复杂的实体进行快速且全面的扫查。一方面,以往所运用检测技术相对单一,超声相控阵仅通过探头,便能够将多种应用涵盖在内;另一方面,常规检测技术无法保证特定检测结果准确,该技术则有效解决该上述问题,强调以阵列探头为依托,确保检测工作得到有序开展。其三,该技术省去了辅助扫查作业开展的装置,被测对象和探头不需要直接进行接触。另外,还强调将检测所得参数转化成电子数据,直接存储在计算机内,不仅操作难度小、测量步骤灵活多变,其成本也较常规技术更低。其四,该技术先后对焦区深度、声束方向以及焦点尺寸进行了优化,由此而产生的积极影响,便是检测信噪比、灵敏程度还有分辨率均得到了较大幅度的提升。

除此之外,该技术通常需要搭配仿真成像相关技术加以运用,这样做的优势可被归纳如下:可降低对结构复杂的实体工件进行检测的难度。可快速确定缺陷特征及其所处位置。以检测所得参数为依据,有序开展轨迹追踪等工作。在检测的同时生成相应的图像,并根据A扫数据对图像进行微调。现阶段,该技术已在焊缝检测领域得到了广泛运用,检测人员可通过该技术,对焊缝真实情况进行全面且准确的了解,这对日后各项工作的开展,具有极为重要的现实意义。

### 2.2.2 优势

以往扫描成像技术均需要检测人员手动操控探头,通过左右移动的方式完成检测工作,超声相控阵则有效解决了上述问题,该技术创造性地提出了探头(即阵列换能器),强调在规定声场内运用探头对被测样品进行扫查,确保探头能够在计算机的远程操控下,高效完成扫查工作。常规的B型扫描技术和C型扫描技术,均由单探头负责发出声束,考虑到单探头相关参数均为固定参数,在不更改探头所处位置的情况下,通常无法得到完整且清晰的图像<sup>[5]</sup>。超声相控阵则有效解决了上述问题,该技术搭配使用的探头可随时更改参数,确保检测人员即使不更改探头所处位置,仍然能够得到分辨率较高且较为清晰的优质图像。

虽然通过超声全息技术,可获得与被测样品实际情况相符的立体图像,考虑到该技术在分辨率、灵敏度等方面的表现均不理想,加之采用该技术需要购入较为昂贵的设备,目前,该技术尚未得到大范围的推广与运用。本文所讨论超声相控阵,不仅在分辨率、灵敏度等方面具有较上述技术更为突出的表现,其还能够根据扫描声束所提供数据,有序开展计算重建等工作,进而获得与被测样品相符的立体图像。除特殊情况外,检测人员均可通过二维探头得到三维图像,同时图像的真实性及完整性均能够得到保证。另外,近几年,超声显微镜的使用频率也有所提高,该设备成像所使用换能器性能较为理想,使得其在分辨率方面拥有较为突出的表现。但该设备也存在着明显的不足,即:该设备仅能被用来对实体近表面或是表面结构进行探查。超声相控阵则通过控制频率、分辨率的方式,加深了检测深度,事实证明,通过该技术对实体工件内部情况进行检测,通常能够得到较为准确的结论。

### 3 实际应用

#### 3.1 项目概况

相关人员计划运用上述方法检测某段长输管道,通过开挖管道的方式,对检测结果是否准确进行验证。该段管道的规格为 1220mm×26mm,相关人员分别从未熔合、表面气孔数量和裂纹数量等角度出发,对不同技术所具有实用性进行了分析。

#### 3.2 检测结果

##### 3.2.1 未熔合缺陷

该段管道未熔合点的数量为 10 个,相关人员随机选取某处未熔合,对检测所获得图像进行对比,结果如下:

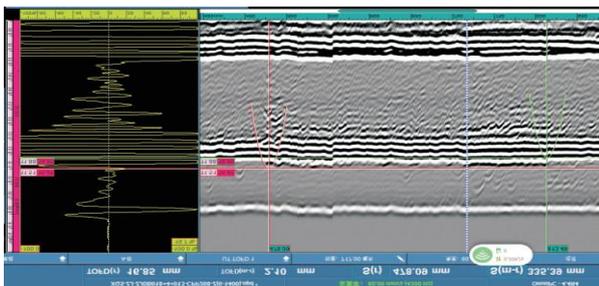


图 1 未熔合 TOFD 图

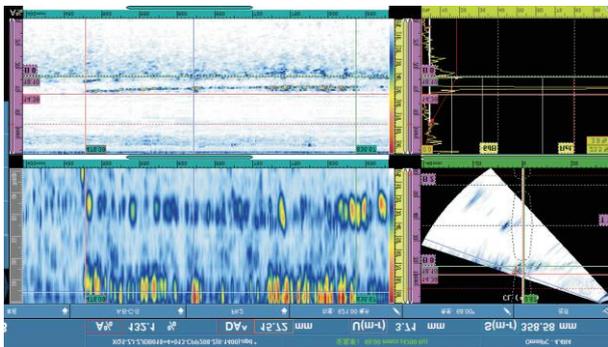


图 2 未熔合相控阵图

表 1 未熔合定量及定位结果

检测技术	定量		定位	
	缺陷长度	缺陷高度	起始位置	缺陷埋深
TOFD	335mm	2.2mm	480mm	16.9mm
超声相控阵	360mm	3.7mm	480mm	15.8mm

综上,TOFD、超声相控阵均能够获得相对具体的数据,明确指出该缺陷与管道表面的距离约为 16mm,其自身高度处于 2mm~4mm 这一范围,属于典型的层间未熔合缺陷,具有高度小、长度较长的特点,在焊缝内部较为常见。导致问题出现的原因,主要是焊接期间没有根据情况确定熔深以及电弧长度不符合要求。

##### 3.2.2 气孔数量

检测结果表明,该段管道共存在 8 处气孔,相关人员随机选择某气孔,对 TOFD、超声相控阵所得图像进行分析。在本项目中,气孔 TOFD 图像为图 3,超声相控阵图像为图 4:

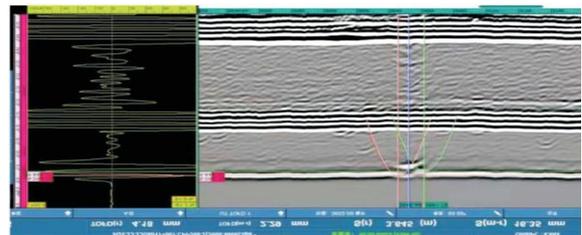


图 3 气孔 TOFD 图

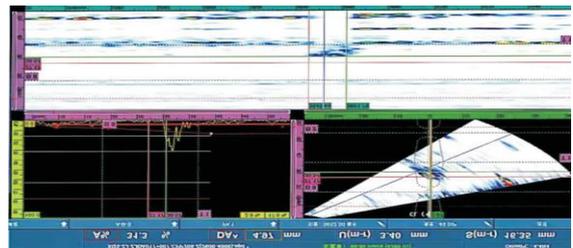


图 4 气孔相控阵图

检测期间所获得缺陷信息如下:

表 2 气孔定量及定位结果

检测技术	定量		定位	
	缺陷长度	缺陷高度	起始位置	缺陷埋深
TOFD	16.3mm	2.3mm	3645mm	4.2mm
超声相控阵	16.3mm	3.3mm	3645mm	5.0mm

由图可知,该段管道所存在气孔和表面的距离约为 4.5mm,具有埋深小的特点,加之缺陷高度相对较小,运用不同技术所得出检测结果不存在明显差异,其中,缺陷长度相关数据完全相同,其他项数据的差别均不超过 3mm。

##### 3.2.3 裂纹数量

开挖检测所发现裂纹数量为 5 处,随机选择某裂纹,对相关检测图像进行对比。图 5 为 TOFD 图像,图 6 为超声相控阵图像:

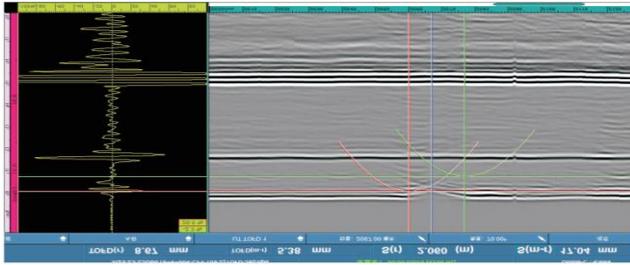


图5 裂纹 TOFD 图

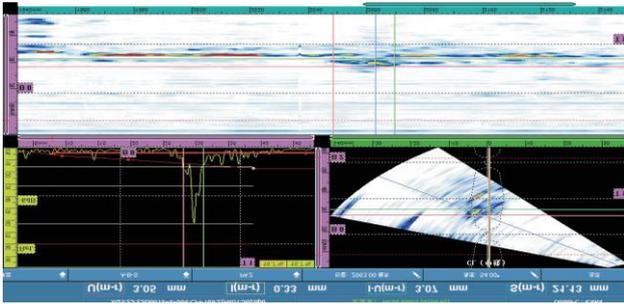


图6 裂纹相控阵图

表3 裂纹定量及定位结果

检测技术	定量		定位	
	缺陷长度	缺陷高度	起始位置	缺陷埋深
TOFD	17.1mm	5.4mm	2060mm	8.7mm
超声相控阵	21.1mm	3.1mm	2050mm	7.2mm

TOFD、相控阵图像均对裂纹各项数据进行了详细记录,检测所得结果基本相同。经开挖验证可得出以下结论:该段管道的裂纹距表面较近,长度相对较短,同时存在一定高度。

### 3.3 检出率说明

本次检测所发现缺陷总数为42个,其中,TOFD所检出缺陷的数量为39个,而超声相控阵所检出缺陷的数量为42个。由此可见,超声相控阵在检出率方面具有极为

突出的表现,而TOFD未能检出全部缺陷的原因,主要是其存在较大检测盲区,这同时也是该技术逐渐被工业领域所淘汰的原因。

### 4 结语

通过上文的分析不难看出,超声相控阵在声束偏转、聚焦等方面具有极其突出的表现,运用该技术进行检测已成为大势所趋。可以预见的是,未来该技术将逐渐取代TOFD等常规技术,在对各类实体进行检测的过程中得到广泛运用,相关人员应加大对无损检测进行研究的力度,结合实践所积累经验,对其所存在缺陷进行弥补,同时对其所具有优势进行突出,以此来保证该技术的价值可得到最大程度实现。

### [参考文献]

- [1]王郑,吴新团,杨爱萍.超声波加相控阵超声波技术在管道检测中的应用[J].石油工业技术监督,2021,37(12):33-35.
  - [2]吴建良,卞德存,童小龙,等.基于超声波相控阵CT扫描技术的套筒灌浆饱满度检测研究[J].施工技术(中英文),2021,50(21):32-36.
  - [3]江雁山,高杰宗,刘礼良,等.核电站主给水系统管道对接焊缝的超声波衍射时差法检测工艺[J].无损检测,2021,43(10):40-43.
  - [4]王子阁.相控阵超声波检测技术在石油专用管材检测领域的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(16):49-50.
  - [5]毛国均,张子健,柴军辉,等.基于覆材侧的不锈钢复合板球罐超声波衍射时差法检测[J].无损检测,2020,42(5):52-58.
- 作者简介:黄雪江,男,新疆科华时代检测科技有限责任公司。