

## 相控阵和 TOFD 在焊缝裂纹检测中运用分析

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]**压力容器具有较强的密闭性和承压能力,在化工、军工等行业有着极其重要的地位,能够为易燃易爆物质提供贮藏空间,为特殊化学反应提供场所。在压力容器制造过程中,焊缝质量极为关键,开展相控阵、TOFD 无损检测试验,可以进一步明确不同技术侧重点、适用场景,为检测实践提供依据。文章综合运用文献法、对比分析法等科学手段,对二者优势特征、应用策略进行展开分析。

**[关键词]**相控阵; TOFD; 焊缝裂纹检测

DOI: 10.33142/sca.v5i3.6214

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

### Application Analysis of Phased Array and TOFD in Weld Crack Detection

HUANG Xuejiang, ZHANG Zengzhi, WANG Xianjie, ZHOU Qiangfeng

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

**Abstract:** Pressure vessel has strong tightness and pressure bearing capacity. It plays an extremely important role in chemical industry, military industry and other industries. It can provide storage space for flammable and explosive substances and place for special chemical reactions. In the process of pressure vessel manufacturing, the weld quality is very critical. Carrying out phased array and TOFD nondestructive testing tests can further clarify different technical emphases and applicable scenarios, and provide basis for testing practice. This paper comprehensively uses scientific means such as literature method and comparative analysis method to analyze their advantages, characteristics and application strategies.

**Keywords:** phased array; TOFD; weld crack detection

#### 引言

相控阵和 TOFD 技术具有典型的无损检测特征,在冶金、建筑等领域均有广泛应用,其中前者以探头晶片为核心,可以通过序列、数量等的调整,对超声波束进行调整,实现形状、焦点位置等的控制优化,从而完成电子扫查;后者则以衍射波性质为依托,通过计算传播时间定位设备缺陷点,两种技术原理、手段各有不同,使用场景及侧重点也有较大差异,有必要进行深入探究和对比区分。

#### 1 试验设备及试板

试验选用武汉中科 HS PA20-Fe 型多功能相控阵超声波检测仪,其自身具备 C 扫区域定显功能和 S 扫图像翻转功能,刷新率达 60Hz,能够较好地保障图形动态效果,同时支持 TOFD、A 扫检测,可借助按键进行自由切换,在此基础上配备高度闸门、声程闸门自动报警功能,缺陷判别更加快捷。本次试验中,主要利用了相控阵、TOFD 功能,以仪器为依托激发 64 个相控阵单元,并以多次波形呈现图像,使缺陷影像与真实坡口相互对应。TOFD 扫描环节,支持时基、步进模式,可以对波幅、波峰条带图进行合成显示,结合试验需求,还可以对自带分析软件进行条件控制,优化增益、修改值等,使图像达到最佳对比度。

以往相控阵、TOFD 试验中,多使用人工刻槽方式开展研究,但分析后发现,其与自然裂缝是存在一定差别的,

因此试板选择时,均采用自然裂纹试板,材质为 20 号钢,尺寸大小为 133mm×260mm,厚度为 20mm,试板共有两块,分别命名为 A、B,前者裂纹在焊缝靠近焊缝中部,与板材表面相垂直;后者裂纹靠近根部坡口,裂开程度较为接近。

#### 2 试验过程及分析

##### 2.1 相控阵检测试验

##### 2.1.1 探头选用

探头是相控阵检测的关键所在,选择时应当从三个维度入手,首先是晶片阵列,常见的有环形、矩形及线性阵列,其中线性阵列编程相对简单,检测成本较低,应用也最为广泛。其次是频率,频率值对扫查图像影响较大,在探头频率较高的场景中,检测灵敏度较高,影像也更加清晰可见,能够为分析工作提供有力支撑,但频率过高也会加剧超声波衰减作用,给检测工作带来阻碍,因此实践时必须根据检测对象材质等进行合理把控。对于压力容器来说,通常碳钢焊缝检测频率控制在 2.5 至 5MHz 为佳,若焊缝壁本身较薄,则选择 7.5MHz 更加适宜<sup>[1]</sup>,在不锈钢焊缝检测中,探头频率可以控制在 1 到 2.5MHz,保障检测质量。

最后是规格,一般来讲规格较大的探头中,包含的晶片规格或数量也是相当可观的,可以在单次作业过程中,充分激发探头性能,获取多组有效波束,并拓宽检测覆盖

面和深度,因此实践中可以适当应用大规格探头,但对于本身规格较小的工件、探查区不规则的工件,则要考虑扫描范围限制问题,适时更换小规格探头。第四是探头偏转角度,该问题主要描述探头前方、检测主体之间的间隔距离,若检测时发现焊缝存在余高问题,则要立足实际进行优化调和,确保耦合完成。最后是晶片激活个数,该参数与超声波能量大小成正比,若检测对象管壁较厚,对声波的削弱能力较强,则可以适当增加晶片。

本次试验中,同样采用线性晶片阵列探头,型号为5L32-0.5×10,即晶片数量为32个,各晶片之间间隔0.5mm的距离,频率设定为5MHz,试验环节同时激发32个晶片开展检测。其次,为提升图像清晰度,试验中还采用了机油耦合剂,借助系统自动调整功能,提升探头与焊缝匹配度,当试验波束完整覆盖焊缝区域后,保持距离不变,控制探头作前后移动,过程中探头要始终平行于焊缝<sup>[2]</sup>,扫查完整条焊缝后进行结果整理。为防止探头、焊缝之间距离变化,还可以用磁性条进行固定,提升检测结果精准度。

### 2.1.2 声束模拟

相控阵检测环节,波束形状、序列等十分关键,操作时需要兼顾焊缝深层位置、周边区域情况等,同时合理考虑热作用影响范围,通常为保证使用效果、覆盖范围等,波束发出前,还必须进行声束模拟工作,从而明确波束传播特点,达到质量控制的总目标。推荐采用Setup Buider软件开展模拟,该软件主要以声学公式为依托,可以在差异性环境、工艺条件下,对波束进行有效计算,降低信号干扰概率,增强波束本身传播能力。比如不锈钢材质焊缝中,横波波束性能衰减问题较为严重,容易受到信号干扰等问题,可以在模拟试验的帮助下及时调整方案,选用纵向波角度输入方式,保障检测精准性和全面性。本文综合考虑试块材质、厚度后,选择横波声束,楔块折射角度设置为60°,在仿真模拟帮助下收集波形图像,继而开展角度补偿、灵敏度校准等工作,改进后设备增益65dB,可以较好地满足试验需求。

### 2.1.3 扫查方法

常见的相控阵扫查方法主要有三种,首先是线性扫查方法,该种方式面对全部阵元进行调整,可以有效控制波束传出角度,使之维持在统一状态中,并在相同聚集理念的帮助下,激活其中一组阵元开展检测。操作思路大致如下:根据实际情况确定聚焦方式,接着在相邻阵元组队理念的指引下,对n个阵元进行组合,对聚焦的阵元进行激活处理,沿着探头运动方向调整阵元位置,调整范围以一个单位步长为准,继而激活第二组阵元,重复上述操作至检测完成<sup>[3]</sup>。该种检测方法效率高、精准度好,在大规模设备的无损检测场景中,应用尤为广泛。

其次是扇形扫查方法,需要在探头的帮助下确定检测

深度,继而启用同功能晶片,找到合适的切入点开展全面扫查,前一组阵元聚集检测完毕后,重新调整波束角度,得到全新扫查范围。该方法可以较为快捷地获取扫查平面视图,在外观特殊、检测条件不佳的工件中,也能表现出较高的适用性,因此应用极为广泛。最后是动态深层扫描技术,核心构件为动态晶片,在轻薄工件中较为适用。本文综合试板材质、规格后,选用扇形扫查方法,扫查角度设定为30至70°,一个单位步进为0.5dB,同时确定聚焦深度为40mm。

## 2.2 TOFD 检测试验

### 2.2.1 检测面准备

TOFD检测技术主要依托为衍射超声波,能够对缺陷边缘上、下端反射信号进行接收、分析,辅助确定裂纹大小、尺寸,正式运行时超声波由探头处发出,进入待测试块焊缝,遇到裂纹缺陷时,在尖端发生衍射,返回记录并生成分析结果。此种工作性质下,TOFD对检测面提出了较高要求,检测前必须保证表面平整,尤其关注探头移动区,要细致清理氧化皮、锈蚀等物质,选用水、甘油、化学浆糊等耦合剂类型。如果遇到已经涂刷防腐油漆的待测工件、容器或设备,则可以从内表面入手进行排查,促进耦合效果的优化。本次试验中依照标准要求开展清理工作,设备类型不变,同样采用机油作耦合剂进行测试,试块表面较为平整,且没有多余涂料和杂物。

### 2.2.2 探头设置

在TOFD检测技术中,探头设置同样要从频率、规格等维度进行把控,面对薄壁工件时适当增大频率,为防止底波数据覆盖有效信息,直通波应当与之错开一定时间差,差值控制在20个周期以上为佳,两种波形在10%以上的波幅不能超过2个周期。若检测对象为厚壁工件或容器,则要结合焊缝位置进行分析,若焊缝裂纹距上表面较近,则要选择较大频率,反之则选择较低频率,防止超声波衰减造成的图像不清、检测失准等问题,保障声波穿透整个壁厚。通常来讲TOFD采用双探头结构,设置时要调整好两探头频率,中心频率相差20%以内较为恰当。非平行扫查环节,可以选用小规格晶片探头,以扩大波束覆盖范围。对于壁厚过大(大于50mm)的容器、工件,则要采用分区思维,在厚度方向上建立若干区域,并选择不同探头开展工作,确保声束能够覆盖25%左右的厚度<sup>[4]</sup>。

正式扫查环节,还要关注探头位置情况,双探头以焊缝中心线为准,采用左右对称的方式排布,确保检测区域全覆盖。本文选用一对5MΦ6直探头,斜楔块纵波折射角度60°,PCS设置为46mm,采用非平行扫查方式,探头对称布置,移动轨迹与焊缝长度方向一致,移动速度均匀平稳,探头、试板耦合情况良好。发现缺陷之后,为促成缺陷高度、水平定位,改换平行扫查方式继续工作,若检测环节焊缝较宽,则要考虑焊缝地面熔合区、热影响区缺

陷情况,适当引入偏置非平行扫查方式。最后,TOFD 检测中,还可能涉及到表面盲区问题,可以选用宽频带窄脉冲探头,或改变探头参数压缩盲区空间,也可采用其他方式进行补充检测。

### 2.2.3 灵敏度调整

从原理上看,TOFD 并不属于波幅法检测技术,其定量精准性也不受波幅情况限制,但检测环节增益大小同样十分重要,可能会对灵敏度产生不利影响,因此实践环节还应关注增益值设定问题,确保输出结果图像可以客观反映缺陷情况。可以采用对比试块的方法,调整试验信号波幅数值,大致为满屏的40%至80%即可,结合扫查结果优化耦合补偿;若直接采用工件、容器开展灵敏度设置,直通波波幅则应定为满屏的40%,实践环节如果发现直通波不可见,则要考虑是否被底波所覆盖,并合理调整底面反射波波幅,通常设置为满屏的80%为佳,此时设备增益可以达到2dB至20dB。部分情况下,还可能出现直通波、地面波均不可见的问题,此时要考虑材料晶粒噪声干扰问题,将之设置为满屏的5%至10%,最大限度保障检测灵敏度。本文经过调试后,最终将直通波波高的40%作为灵敏度,实践验证设备增益高达78dB,能够为检测结果质量的提升奠定基础。

### 2.2.4 A 扫描窗口设置

检测前还应检查A扫描窗口设置情况,将双探头放置在试块之上,观察耦合情况是否良好,并选择适当的延时、声程参数,根据NB/T47013-2015中相关规定,将起始位置设置在直通波到达接收探头前 $0.5\mu\text{s}$ 以上,同时调整终止位置,以直通波到达接收探头为基准,同样提前 $0.5\mu\text{s}$ 为佳,时间窗口覆盖相邻分区25%左右。

### 3 试验结果对比

相控阵检测试验中,结果以扇形扫查图形呈现,最终获得的裂纹S扫图像分辨率较高,清晰可见且特征显著,从图像中可以较为轻松地看到焊缝位置,为结果定性提供依据。设备自带的分析软件中,还进一步明确了焊缝裂纹的具体参数,其中试板A裂纹深度为11.2mm,长度为18.0mm,高度在5.0mm左右,试板B的裂纹深度则为16.0mm,长度19.2mm,高度4.2mm。

TOFD检测中,结果则显示为A扫、D扫图像,前者输出为射频波数据,后者输出为黑白灰度图,A试板的检测图像中,裂纹上下端点回波清晰,相位相反;B板的检测图像中,回波清晰度稍显欠缺,只能较为清楚地或者上端点位置,另一端则被试件底面反射波覆盖,较为模糊。同样依托设备自带工具进行量化分析,结果显示A组试块中,裂纹深度为9.6mm,长度18.6mm,高度5.8mm;B组试块

中,焊缝裂纹深度15.9mm,长度19.5mm,高度4.2mm。

为验证两种技术方案的准确性,另外设置对照组,引入UT、RT技术开展裂纹调查,前者检测结果中,显示A试块焊缝裂纹深度为12.0mm,长度16.0mm,高度4.0mm,显示B试块焊缝裂纹深度16.0mm,长度19.0mm,高度4.0mm。RT检测结果中,显示A试块焊缝裂纹长度19.5mm,B焊缝裂纹长度19.8mm。

综合检测结果可以发现,相控阵、TOFD均能检测出焊缝裂纹情况,且具有较好的定量性能,对裂纹长度的测量主要受编码器精度限制,高度测量差异不甚明显,其中TOFD由于采用衍射波原理,整体精度要相对较高,但相控阵技术可以直观呈现缺陷相对位置,辅助完成缺陷定位工作,有助于缺陷定性。因此实践检测过程中,可以先借助常规超声检测技术开展大范围扫查,大致明确缺陷存在区域,继而利用相控阵或TOFD技术进行精准测量,若有定性需求,还应优先选择相控阵方式。

### 4 结论

综上所述,相控阵以探头晶片为依托,计算机为控制平台,可以较为便捷地实现阵元激励时间、顺序控制,还能够在不移动探头的前提下,实现大范围声束覆盖,为定性检测提供支撑。而TOFD技术则借助了衍射波性能,可以对缺陷上、下端点进行精准定位,波幅可达反射波的1/8左右,在微小缺陷检测中尤为适用,实践环节要结合容器材质、壁厚、检测目的等进行系统比选,全面提升压力容器安全性与可靠性,保障工业生产的正常运行。

#### [参考文献]

- [1]段军志. 超声波相控阵技术在特种设备无损检测中的应用研究[J]. 科学技术创新,2021(32):11-13.
- [2]吕磊,涂安琪,张艳飞. 超声相控阵与TOFD检测技术测试结果对比分析[J]. 内蒙古电力技术,2021,39(3):43-46.
- [3]刘兵. 论压力容器无损检测新技术的原理和应用[J]. 清洗世界,2021,37(4):115-116.
- [4]郭破江,李敬一,古湘龙. 相控阵技术在制冷压力容器环向封闭焊缝中的研究与应用[J]. 科学技术创新,2020(35):185-186.
- [5]刘广兴,冯云国,陈聪,刘文. 相控阵和TOFD在焊缝裂纹检测中的应用[J]. 山东电力技术,2017,44(4):30-32.
- [6]孙延廷. 在用压力容器无损检测技术原理及应用分析[J]. 化工管理,2017(19):181.

作者简介:黄雪江,男,新疆机电职业技术学院,机电工程,新疆科华时代检测科技有限责任公司,技术负责人,工程师。