

水利工程钢构件焊接缺陷相控阵超声量化检测研究

杨 瑞 刘雅婧

水利部长春机械研究所 吉林 长春 130012

摘要：水利工程长期运行过程中，其钢构件会受到水流压力、水质冲刷及多种腐蚀性介质侵入等复杂荷载作用。而钢构件焊接质量会直接影响其结构的稳定安全性，若焊接不到位加之复杂荷载作用的影响，会导致钢构件出现质量缺陷问题，降低结构的使用性能，危害水利工程整体运行安全。基于此，本文先分析了水利工程钢构件的焊接特点及缺陷类型，阐述了相控阵超声检测技术原理等相关内容，后深入研究相控阵超声技术在钢构件焊接缺陷量化检测中的应用，以及通过实验的设计分析，以期不断改进技术的检测工艺，提高技术的应用水平，为水利工程稳定安全运行提供保障。

关键词：水利工程；钢构件；焊接缺陷；相控阵超声量化监测

引言：传统的钢结构质量检测方法包括超声波检测、射线检测等，但存在监测范围有限、对缺陷类型的识别能力不足等局限问题，难以实现对钢结构质量的全面、精准评估^[1]。相控阵超声检测技术是近年来无损检测领域的一项革命性进展，其具有高灵敏度、非接触、高分辨率等特征优点，在钢构件焊接缺陷检测方面可发挥较好的应用效果。所以现阶段为提高钢构件结构的稳固性、耐久性，还应有效运用相控阵超声技术对钢构件存在的焊接缺陷问题进行精准定位和量化分析，进而及时解决质量缺陷，推动水利工程安全运行。

1 水利工程钢构件的焊接特点及缺陷类型

1.1 焊接结构特点

水利工程钢构件通常具有以下几点特征。①结构尺寸巨大。目前水利工程钢构件的尺寸较大，这使得焊缝长度较长，焊接作业量较多。②接头形式及焊接位置复杂多样。涉及T型、对接、角接等多种接头形式，以及平、横、立等多种焊接位置。③板厚大。水利工程整体建设规模较大，这种情况下像水电站压力钢管等钢构件其对应的板材厚度较大，基本 > 30mm，甚至部分钢构件板厚会 > 100mm，增加焊接难度。④材料等级高。通常水利工程钢构件材质多为低合金高强度钢，此类钢材对焊接工艺等条件要求较高。⑤环境条件差。水利工程所处的环境条件较为恶劣，钢构件会长期受到水、泥沙等复杂荷载作用，更易发生腐蚀等问题^[2]。

1.2 焊接缺陷类型

首先，平面型缺陷。该类缺陷主要包括裂纹、未熔合、未焊透等，是疲劳断裂和脆性断裂的最危险源，会严重降低钢构件的耐久性、强度，整体危害程度最高^[3]。其次，体积型缺陷。该类缺陷主要包括气孔、夹渣等，

缺陷发生后会进一步缩小焊缝的承载面积，还可能引发应力集中现象，导致裂纹问题的出现，使得钢构件发生变形，降低强度和稳定性。最后，成形不良缺陷。该类缺陷主要包括焊瘤、咬边等，其中像焊瘤，其会对钢构件的应力分布、外观等产生负面影响；像咬边，其会导致截面突变，容易成为钢构件疲劳的发端。

2 相控阵超声检测技术概述

2.1 技术原理

相控阵超声技术原理主要基于压电晶片的逆压电效应和电信号控制声波的聚焦与扩展，通过精确控制压电晶片阵列中的各个单元的激励时间、激励幅度和激励模式，可实现对超声波能量在空间上的精确控制与引导^[4]。

对于钢构件焊接缺陷来说，应用相控阵超声技术，可通过发射一系列聚焦或发散的超声波，对钢构件内部存在缺陷的位置进行定位、定性及定量检测，其可有效识别出裂纹、气孔等多种焊接缺陷，且信号处理速度快，可在更短时间内检测出钢构件是否存在焊接缺陷问题。

2.2 系统组成

相控阵超声技术应用系统通常由超声相控阵探头、控制系统、数据处理与分析软件构成，其中像超声相控阵探头来说，主要由多个独立的压电晶片组成阵列，负责发射和接收超声波。像控制系统来说，包括信号发生器、脉冲发生器等设备模块，负责产生和控制超声波的发射脉冲序列^[5]。

2.3 技术特点

对于相控阵超声技术的优势特点来说，主要包括以下几点。①高分辨率。通过对超声波束的精细控制，可精准检测到更微小的焊接缺陷，检测分辨率较高。②自动化检测。相比传统检测技术来说，该技术可与计算机

技术等结合运用,实现自动高效检测,降低人为干预引发的误差。③灵活性强。该技术可适用于不同材质、不同尺寸、不同形状的钢结构工程。④高成像能力及多角度检测。运用该技术可从多角度射入超声波,全方位检测钢构件内部存在的焊接缺陷,且检测效率高,可快速成像,以及还可提供实时动态图像。

3 相控阵超声技术在钢构件焊接缺陷量化检测中的应用

3.1 检测工艺设计

首先,应根据所需检测的钢构件的厚度、范围等条件,正确选择探头频率、压电晶片数量、楔块角度等。选择合适的楔块角度是为保证声束能够到达焊缝全部区域位置,而选择正确的探头频率是为保证超声波可有效穿透钢构件,通过对于板厚较大的水利工程钢构件来说,探头频率一般为2-5MHz。其次,根据不同焊缝形式选择合适的扫描方式,如若是对接焊缝,则选择单晶扇扫结合探头移动的方式,或者一发一收的双晶串列扫描方式。若是T型或角接焊缝,则需进一步制定针对性扫描方法,确保声束能够到达焊根、焊趾等位置。再次,为充分体现相控阵超声技术的高灵敏度、高分辨率等优势作用,应根据焊缝截面,以及所需重点检测的焊缝区域位置,使用动态深度聚焦方式。最后,提前校准编码器,保证编码器能够精准记录探头位置,确保生成的图像能够与空间位置相对应。同时,对于焊缝较长的钢构件来说,可使用自动扫查装置,提高扫查的一致性、稳定性。

3.2 缺陷量化方法

针对钢构件焊接缺陷量化检测来说,主要涉及以下几个步骤:

缺陷定位:在使用超声波检测生成图像后,检测工作人员可在B扫描图像或S扫描(扇形扫描)图像上读取像素坐标,根据声速、延时等数值进行计算,得出焊接缺陷距离探头索引点的水平距离与深度。该技术应用时对焊接缺陷的定位精度可精准至±1mm。

缺陷长度测量:检测工作人员使用端点衍射法、幅度阈值法等闸门工具,同样在B扫描图像或S扫描图像中测量缺陷延伸方向的最远点,以得到焊接缺陷的长度。

缺陷自身高度测量:传统量化检测方法难以精准得到缺陷自身高度,而相控阵超声技术的运用可有效解决此类难点问题。如采取衍射时差法,可测量焊接缺陷端点的衍射波信号,所得到的数值相对精准,而对于远近表面缺陷测量存在盲区,需要根据实际情况合理选择应用。采取多角度声束交汇法,不同角度声束会产生不同

的反射特性,可利用此特性对焊接缺陷进行空间定位和高度估算。采取全聚焦方法(TFM)成像法,所生成的TFM图像可精准、清晰显示焊接缺陷的端点、轮廓等,检测工作人员可对图像中缺陷的纵向延伸进行测量,测量结果相对精准,也是当前最有潜力的量化检测方法。

3.3 缺陷定性分析

检测工作人员可根据S扫描图像中焊接缺陷的动态响应特征对其缺陷类型展开定性分析。其中像裂纹等平面型焊接缺陷来说,其在特定角度下有较强的反射,其他角度下反射幅度差异较大。像气孔等体积型焊接缺陷来说,其不同角度下的反射都相对稳定,无显著的幅度变化。而像点状焊接缺陷来说,主要在图像上呈“点”状,条形焊接缺陷则呈连续或断续的线条^[6]。

4 实验分析

为研究分析水利工程钢构件焊接缺陷中相控阵超声技术的量化检测效果,本文针对性设计了相关实验流程,以下作出具体分析。

4.1 实验材料与对比试块设计

本实验采用水利工程钢结构常用的钢材低合金高强度钢,参考水电站压力钢管、水闸主梁结构,将试板厚度设计为40mm。试块主体为两块钢板,使用X型坡口对接焊,模拟双面焊工艺。两块钢板的长度、宽度及厚度为400mm、150mm、40mm。焊接中间位置保留一块质量完好的区域为参考标准,其他区域采取有效手段预留多个模拟焊接缺陷,如缺陷1(坡口侧未熔合)、缺陷2(疲劳微裂纹)、缺陷3(弧立夹渣)、缺陷4(密集型气孔群)、缺陷5(咬边)、缺陷6(近表面气孔)等。模拟的焊接缺陷在试块加工完成后应使用专业测量机器确定各缺陷的三维坐标、尺寸数值。

4.2 检测系统与参数优化设置

提高实验开展的规范性、有效性,突出相控阵超声技术的作用价值,应配置性能齐全的硬件系统,设计完善的扫描方案,以及相关校准及参数设置工作。

首先,选用OmniScan MX2相控阵仪器设备,配备128个并行采集通道。选择频率为5MHz的探头,配置64晶片,确保其具备较强的穿透力和较高的分辨率。选用SA10-N55S型标准楔块,入射角设定为55°。为预防遗漏或特殊情况未完成问题的发生,还要准备一块入射角为36°的楔块进行备用,以用于补充检测。同时,选用带线性编码器的精密二维扫查架,以及准备高粘度水基超声耦合剂。

其次,设计制定双晶串列S扫描方案,检测垂直方向的面状缺陷。选择5MHz/64晶片探头2个,一个用于

发射,一个用于接收,按要求精准对称,分布在焊缝两侧。每个探头进行S扫描,扫描角度为35-75°,步进角0.5°。通过电子延时,实现声束在焊缝体积内的“Z”字形交叉覆盖。为保证检测区域声能集中,选择多区深度聚焦方法,根据焊接缺陷区域等条件在不同位置设置焦点。此方案在检测未熔合、裂纹等焊接缺陷方面具有较强的精准性、灵敏度,但为实现对所有焊接缺陷的有效检测,还应在此方案设计的基础上制定辅助检测方案,即单探头S扫描方案。主要使用单探头从焊缝一侧进行扫描,扫描角度为40-70°,采集的数据进行转化分析生成C扫描图像,可有效显示气孔等体积型焊接缺陷的情况。

最后,在质量完好的预留区域进行声速和延时校准。同时,还要按相控阵超声技术检测要求等,准确设置灵敏度,通常应将检测灵敏度统一增益至基准线以上6dB,确保能够精准检测出微小焊接缺陷。

4.3 数据采集处理与量化检测

采集处理数据信息,生成S扫描图像,通过图像了解焊缝轮廓、焊接缺陷的具体位置。通过B扫描图像了解焊接缺陷在厚度方向的分布。

针对检测出的焊接缺陷,进一步结合运用上文所分析到的端点衍射法、衍射时差法、多角度声束交汇法、全聚焦方法(TFM)成像法等方法完成焊接缺陷的量化检测,全面掌握缺陷位置、长度、自身高度等参数信息,了解缺陷类型。

4.4 实验结果与分析

本次实验的6个预制焊接缺陷均被有效检出,相关焊接缺陷的量化测量结果与误差分析详见表1。

由此可知,相控阵超声技术在钢构件焊接缺陷的长度、高度,以及近表面检测中都可得到精准的检测结果,相比于传统检测技术来说,该技术的检出率高达100%,且效率高,误差小,同时还能输出带尺寸标注的图像化、数字化报告,整体应用优势显著。

表1 相关焊接缺陷的量化测量结果与误差分析

缺陷编号	缺陷类型	地面真值 (mm)	量化测量值 (mm)	绝对误差 (mm)	备注
#1	坡口侧未熔合	长度: 25.0 高度: 1.8	长度: 24.8 高度: 1.7	长度: 0.2 高度: 0.1	线状显示
#3	弧立夹渣	深度: ~3.0	深度: ~3.2	深度: ~0.2	簇状显示
#5	咬边	长度: 40.0 深度: 1.5	长度: 39.2 深度: 1.6	长度: 0.8 深度: 0.1	点状显示
#6	近表面气孔	直径2.0 埋深3.0	直径2.2 埋深3.1	直径0.2 埋深0.1	圆状显示

结语:综上所述,相控阵超声技术在水利工程钢构件焊接缺陷量化检测中具有较好的应用效果。但本实验主要是针对平板对接焊缝,而像水利工程钢构件中T型等接头焊缝更为复杂,这种情况下需要设计更精准、多样的扫描方案,以及配置更复杂的探头等装置设备,以及在实验中还会存在噪声干扰等问题。所以现阶段及未来发展中还应持续优化创新,能够将自适应信号处理、AI技术等更多先进手段融入量化检测中,进一步提高技术应用的高效化、规范化、智能化,为提高钢构件稳固性及耐久性、推动水利工程稳定长久运行提供保障。

参考文献

[1] 李亮亮,郑世伟,单清群,等. 转向架焊接结构件深度

缺陷超声相控阵检测及三维可视化[J]. 焊接,2021(9):44-50.

[2] 文武. 超声相控阵在钢结构检测中的应用[J]. 中国建筑金属结构,2024,23(5):172-174.

[3] 杨德成,魏晓东,王冠,等. 钢结构焊接施工技术中焊缝缺陷检测试验[J]. 安装,2025(12):70-72.

[4] 简添福,郭志贤,林东文. 基于相控阵超声检测技术的钢构件角焊缝检测[J]. 化工装备技术,2021,42(3):38-40.

[5] 李家伟,刘黄鹤,杜燕伶,等. 超声相控阵在钢结构检测中的应用研究[J]. 品牌与标准化,2025(3):121-123.

[6] 李建伟. 超声相控阵技术在钢结构工程质量缺陷检测中的应用研究[J]. 山西建筑,2024,50(23):67-69,82.