

基于相控阵超声的水工金属结构焊缝无损检测技术研究

亚力坤

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6909

[摘要] 水工金属结构作为水利水电工程的关键组成部分,其焊缝质量直接关系到工程的安全运行。传统常规超声检测技术在面对复杂几何形状、大厚度及各向异性焊缝时,存在检测效率低、缺陷定位定量不准确、结果重现性差等局限。相控阵超声检测(PAUT)技术通过电子方式控制多阵元换能器的聚焦法则,实现了声束的灵活聚焦、偏转与扫描,为水工金属结构焊缝的高精度、可视化检测提供了新的解决方案。本文系统阐述了相控阵超声检测的基本原理,针对水工金属结构典型焊缝类型,研究了检测工艺参数的设计方法。通过设计对比试验,验证了PAUT技术在缺陷检出率、定位精度、成像直观性方面相较于常规超声的优越性。

[关键词] 水工金属结构; 焊缝检测; 相控阵超声; 扇形扫描; 缺陷定量

中图分类号: TV222 **文献标识码:** A

Research on Nondestructive Testing Technology for Welds in Hydraulic Steel Structures Based on Phased Array Ultrasonics

Likun Ya

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design, and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] As a critical component of hydraulic and hydropower engineering, the quality of welds in hydraulic steel structures directly affects the safe operation of the project. Conventional ultrasonic testing techniques face limitations such as low inspection efficiency, inaccurate defect localization and quantification, and poor repeatability when dealing with complex geometries, large thicknesses, and anisotropic welds. Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) technology, through electronic control of the focusing rules of multi-element transducers, enables flexible focusing, deflection, and scanning of acoustic beams, offering a new solution for high-precision and visualized inspection of welds in hydraulic steel structures. This paper systematically elaborates on the basic principles of PAUT and investigates the design methods for inspection process parameters for typical weld types in hydraulic steel structures. Through comparative experiments, the advantages of PAUT technology in terms of defect detection rate, positioning accuracy, and imaging intuitiveness are demonstrated compared to conventional ultrasonics.

[Key words] hydraulic steel structure; weld inspection; phased array ultrasonics; sectorial scanning; defect quantification

引言

水工金属结构,包括钢闸门、压力钢管、启闭机、拦污栅等,是水利水电枢纽工程中不可或缺的控制性设施。这些结构长期承受复杂的动、静载荷,并处于水下或干湿交替的恶劣环境中,其安全性与耐久性直接关系到整个工程的经济效益与防洪安全。焊接作为金属结构连接的主要方式,焊缝区域往往是结构失效的薄弱环节。因此,对焊缝质量进行准确、可靠的无损检测是确保水工金属结构安全运行的关键环节。相控阵超声检测(Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT)技术起源于医学超声成像,近年来在工业无损检测领域得到迅猛发展。它利用

电子技术控制由多个独立压电晶片组成的阵列换能器,通过精确调整各阵元发射/接收声波的相位延时,实现声束的聚焦、偏转及多种扫描模式。

1 相控阵超声检测技术原理

1.1 相控阵换能器结构

相控阵超声换能器的核心是由若干独立的压电阵元按一定规律排列构成的阵列。每个阵元均可独立激发和接收超声波。根据阵列的几何形状,可分为线性阵列、环形阵列、二维矩阵阵列等。在水工金属结构焊缝检测中,应用最为广泛的是线性阵列探头,其阵元呈直线排列。

1.2 声束聚焦与偏转原理

PAUT的核心在于通过控制各阵元的发射/接收延迟时间,使各阵元发射的声波在空间中某一点达到同相位叠加,从而形成聚焦声束;通过施加线性延迟规律,使合成的波阵面沿特定方向传播,实现声束偏转。设线性阵列共有N个阵元,阵元间距为d,期望的声束偏转角度为 θ ,聚焦深度为F。若以第一个阵元为参考,则第i个阵元所需的延迟时间 Δt_i 可由几何关系推导得出。

对于仅偏转不聚焦的情况,延迟时间与阵元位置呈线性关系:

$$\Delta t_i = \frac{(i-1)d \sin \theta}{c}$$

其中,c为被检材料中的声速。

对于同时实现偏转与聚焦的情况,延迟时间由两部分组成:

$$\Delta t_i = \frac{F}{c} \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{(i-1)d}{F} \right)^2 - \frac{2(i-1)d \sin \theta}{F}} \right]$$

实际应用中,聚焦法则计算通常由仪器内置软件自动完成。通过电子方式动态改变延迟法则,可在不移动探头的情况下实现声束在空间中的快速扫查。

1.3 主要扫描模式

相控阵检测的扫描模式是实现缺陷可视化的基础,主要包括以下三种:(1)线性扫描(L-scan,也称E-scan)。在固定声束偏转角(通常为 0°)的情况下,通过电子方式沿阵列方向依次激活一组固定孔径的阵元,形成声束沿阵列方向的平移扫描。其效果等同于将常规直探头沿直线进行机械扫查,但速度极快。L-scan主要用于检测与探测面平行的缺陷,如层状撕裂、未熔合等,并对缺陷进行长度方向的定量。(2)扇形扫描(S-scan)。使用固定的一组阵元孔径,通过连续改变声束的偏转角度,获得一个扇形区域的图像。S-scan是焊缝检测中最常用、最重要的扫描模式,它能在一次探头放置位置,即可获得覆盖焊缝整个截面区域的检测图像,尤其适合于检测具有不同倾角的坡口未熔合、裂纹等面状缺陷。典型的S-scan覆盖角度范围通常为 35° 至 75° 。(3)复合扫描。将L-scan与S-scan相结合,探头在沿扫查轴移动的同时,每步进一个位置便执行一次S-scan,最终可合成三维体积或二维全景图像(如TOFD与PAUT结合),提供更全面的缺陷信息。

2 水工金属结构焊缝PAUT检测工艺设计

合理的检测工艺是确保PAUT技术应用效果的关键。针对水工金属结构常见的焊缝形式,需要系统设计探头选择、楔块匹配、聚焦法则设置、校准与灵敏度设置等环节。

2.1 探头与楔块选择

探头选择主要考虑频率、阵元数量、阵元间距以及阵列类型:(1)频率。频率决定了检测的穿透能力与分辨率。对于水工金属结构常用厚度(20mm-100mm)的钢板,推荐使用5MHz-10MHz的线性阵列探头。厚度较大(>60mm)或晶粒较粗大的材料(如铸造结构),可选用2.5MHz-5MHz的低频探头以增加穿透力;对于薄板或近表面缺陷检测,则选用10MHz的高频探头以提高分辨率。(2)阵元数量。阵元数量直接影响聚焦效果和成像质量。常

用为16、32、64或128阵元。阵元数量越多,聚焦声束的焦点尺寸越小,侧向分辨率越高,但设备成本也相应增加。对于水工金属结构焊缝检测,32阵元或64阵元探头是兼顾性能与成本的主流选择。(3)楔块。为使横波进入工件,通常需要配备有机玻璃楔块。楔块的角度和形状设计至关重要。对于平板对接焊缝,常选用与工件表面曲率匹配的直楔块或带一定角度的楔块,通过楔块中的一次波或二次波覆盖焊缝截面。对于管座角焊缝等复杂结构,则需要使用定制化的曲面楔块,以保证探头与工件良好耦合。

2.2 聚焦法则设置

聚焦法则是PAUT检测工艺的核心,包括聚焦深度和偏转角度范围的范围的设置。(1)聚焦深度。为确保检测灵敏度在目标深度范围内均匀,通常将焦点设置在目标检测区域的中部或关键深度。对于厚板焊缝,可采用“多焦点”或“动态深度聚焦”(DDF)技术,即在一次扫查中设置多个不同的聚焦深度,通过分段聚焦来优化全深度范围内的声场分布。(2)偏转角度范围。应根据焊缝坡口形式、板厚及检测标准要求设置。对于V型或X型坡口,通常设置横波折射角从 35° 到 75° 的S-scan,以保证声束能覆盖整个坡口面和热影响区。对于T型焊缝,需考虑腹板与翼板的双向扫查,角度设置可能需扩展至 25° - 85° 。

2.3 校准与灵敏度设置

PAUT系统的校准包括声速校准、楔块延时校准、角度精度校准和灵敏度校准:(1)声速与楔块延时校准。利用已知厚度的试块,通过测量回波时间差,精确校准材料声速和楔块中各阵元的延时,确保声束偏转角度与聚焦位置的准确性。(2)TCG与ACG校准。由于声束扩散、材料衰减和聚焦效应的共同作用,不同深度、不同角度的回波幅度差异很大。必须进行时间增益补偿(TCG)和角度增益补偿(ACG)。TCG对不同深度的相同反射体进行增益补偿,使得相同尺寸的缺陷在不同深度处回波幅度一致;ACG则对不同偏转角度的反射体进行补偿,确保整个扇扫范围内灵敏度均匀。校准通常在CSK-IA、CSK-IIA等标准试块或专用PAUT试块上进行,制作出TCG/ACG曲线。(3)灵敏度设置。在完成TCG/ACG校准后,根据检测标准和合同要求,使用规定尺寸的长横孔或横通孔试块(如 $\Phi 2 \times 40$ mm)设置检测灵敏度。通常将最高反射波幅调至满屏高度的80%作为基准灵敏度,再根据表面耦合补偿等因素增加一定的dB值作为最终检测灵敏度。

2.4 扫查方案设计

针对水工金属结构的不同焊缝类型,需设计专用的扫查方案:(1)平板对接焊缝。这是最典型的焊缝形式。通常采用S-scan配合编码器扫查器进行线扫查。探头放置在焊缝两侧,确保声束能够覆盖整个焊缝截面(包括根部、坡口面、盖面层)。对于厚度较大的焊缝,可能需要在焊缝两侧分别用一次波(声束不经底面反射直接进入射到焊缝)和二次波(经底面反射后入射到焊缝)进行扫查,以实现全截面覆盖。(2)T型角接焊缝。常见于闸门主梁与面板的连接。由于结构不对称,需要在腹板两侧和翼板面分别布置探头进行多角度扫查。通常采用PAUT探头配合专用扫查架,沿焊缝长度方向进行扫查,重点关注根部未熔合、翼板侧未

熔合等典型缺陷。(3)管座角焊缝。如压力钢管上的接管座焊缝。其几何形状复杂,曲率变化大。检测难点在于探头与曲面的良好耦合以及声束路径的复杂性。解决方案通常是使用曲面楔块,并结合三维建模软件进行声束覆盖仿真。利用CIVA等仿真软件,在检测前模拟不同位置、不同角度的声束是否能够有效覆盖整个焊缝融合区域,从而优化扫查方案。

3 试验验证与结果分析

为验证PAUT技术在水工金属结构焊缝检测中的有效性与优越性,设计并开展对比试验。

3.1 试验方案

制备两块厚度为40mm的Q345B钢板,加工成X型坡口后进行焊接。焊缝中预设了多种典型人工缺陷:根部未焊透(深度2mm)、坡口未熔合(长度10mm)、内部气孔(Φ 3mm)、横向裂纹(长度8mm,深度12mm)。分别采用常规超声检测(依据NB/T 47013.3标准,使用2.5MHz、K1和K2探头)和PAUT检测(使用5MHz-32阵元线性阵列探头,配备角度 35° - 75° S-scan扫查,按3.3节设置TCG/ACG灵敏度)对预设缺陷进行检测。

3.2 检测结果对比

两种方法对预设缺陷的检出情况如表1所示。从表1可以看出,对于典型的面状缺陷(坡口未熔合、根部未焊透),两者均能检出,但PAUT通过扇形扫描图像,能直观地显示缺陷的走向、长度及其在焊缝截面中的位置,定位精度更高,尤其是深度方向的定量更为准确。对于横向裂纹,常规超声受限于声束方向单一,极易漏检,而PAUT可以通过设置不同的扫查角度组合(如增加与焊缝轴线成一定角度的扫查),有效检出此类危险性缺陷。

表1 常规超声与PAUT缺陷检出结果对比

缺陷类型	预设情况	常规超声检测结果	PAUT 检测结果
根部未焊透	深度 2mm, 长度 30mm	检出, 波形特征明显, 定位略有偏差	检出, S-scan 图像清晰显示根部缺口, 定位准确
坡口未熔合	深度 10-20mm, 长 10mm	检出, 但需更换 K2 探头从不同方向探测	检出, 在 S-scan 图像中呈清晰的线状回波, 角度与坡口吻合
内部气孔	Φ 3mm, 深度 18mm	检出, 反射波高, 但难以判定形状	检出, 图像中呈弧形显示, 可大致测量尺寸
横向裂纹	长 8mm, 深度 12mm	未检出(受声束方向限制)	检出, 在 L-scan 模式或通过偏转角度非平行扫查中清晰显示

3.3 缺陷定量精度分析

在缺陷定量方面,对预设的根部未焊透长度进行测量。常规超声采用6dB法(半波高度法)测量端点回波,测得长度为29mm;PAUT通过S-scan图像中的缺陷影像,结合编码器位置信息,直接测量得到长度为30.5mm。两种方法均接近预设长度,但PAUT提供了更直观的测量方式,且重复性更好。进一步分析定位误差,对缺陷深度测量结果进行统计,结果如表2所示。试验数据表明,PAUT

由于具备可视化的图像显示和精确的聚焦延时控制,其对缺陷深度的定位精度显著优于常规超声。这种高精度的定位能力对于判断缺陷是否位于关键应力区域、指导后续返修具有重要价值。

表2 缺陷深度定位误差对比

缺陷类型	预设深度 (mm)	常规超声测量深度 (mm)	绝对误差 (mm)	PAUT 测量深度 (mm)	绝对误差 (mm)
气孔	18.0	18.6	0.6	18.1	0.1
未熔合上端	10.0	9.3	0.7	10.0	0.0
未熔合下端	20.0	20.8	0.8	20.1	0.1
裂纹	12.0	-	-	11.9	0.1

4 结语

本文系统研究了相控阵超声检测技术在水工金属结构焊缝检测中的应用。通过理论分析、工艺设计、对比试验和工程探讨,得出以下结论:

(1)相控阵超声检测技术通过灵活电子聚焦与偏转,实现了声束的精确控制,其扇形扫描、线性扫描等多种成像模式为焊缝缺陷的可视化、高精度检测提供了有力工具,在技术原理上显著优于常规超声检测。(2)针对水工金属结构的典型焊缝形式,合理的检测工艺是PAUT技术应用成功的核心。工艺设计需综合考虑探头与楔块选型、聚焦法则设置、TCG/ACG校准及扫查方案,确保检测灵敏度和覆盖率。(3)对比试验证明,PAUT在缺陷检出率,特别是对横向裂纹等取向不利的缺陷检出方面,以及缺陷的深度定位精度和定量重复性方面,均优于常规超声。其直观的图像显示极大地便利了缺陷的识别、测量与记录。(4)PAUT技术在水工金属结构领域的推广应用,需要进一步完善相关技术标准,解决复杂结构检测工艺难题,并加强检测人员的技术培训。同时,随着仿真技术、智能化算法的发展,PAUT将向着更高效、更智能、更可靠的方向发展,为保障水利水电工程的安全运行发挥更大作用。

综上所述,相控阵超声检测技术是解决水工金属结构焊缝复杂检测难题的有效手段,具有广阔的工程应用前景和重要的推广价值。

[参考文献]

- [1]强天鹏,李衍,郭伟灿.相控阵超声检测技术及其在承压设备中的应用[J].无损检测,2018,40(10):1-7.
- [2]郑晖,林莉,李建文.厚壁焊缝相控阵超声检测工艺参数优化研究[J].机械工程学报,2020,56(14):1-9.
- [3]王海涛,陈振华,赵洪伟.水工金属结构T型焊缝相控阵超声检测技术研究[J].水利水电技术,2021,52(08):89-96.

作者简介:

亚力坤(1991--),男,维吾尔族,新疆昌吉人,在职本科,工程师,研究方向为水利水电工程质量检测。