

钢结构焊接质量超声检测技术的精细化研究与实践

贺洪亮

宁夏中测计量测试检验院(有限公司) 宁夏 银川 750000

摘要: 本文围绕钢结构焊接质量超声检测技术的精细化研究与实践展开,阐述了该技术的基础,包括基本原理、焊接缺陷的超声反射特性及检测系统构成。探讨了精细化方法、实践应用路径,分析了技术瓶颈与改进方向,涉及参数优化、信号处理等关键环节,为提升钢结构焊接质量检测水平提供参考。

关键词: 钢结构焊接; 超声检测; 焊接缺陷; 精细化检测; 检测技术

引言: 钢结构焊接质量直接关系到工程结构的安全性与稳定性,超声检测技术作为评估焊接质量的重要手段,其精细化应用尤为关键。随着钢结构在大型工程中应用日益广泛,对焊接缺陷的检测精度要求不断提高。本文深入研究超声检测技术的精细化方法与实践路径,为准确识别焊接缺陷、保障结构安全提供技术支持,具有重要的工程应用价值。

1 钢结构焊接质量超声检测技术基础

1.1 超声检测基本原理

超声检测技术,利用超声波在固体介质中的传播特性实现对焊接质量的评估。超声波由探头产生,通过耦合剂传入钢结构焊接区域,在材料内部以纵波、横波或表面波的形式传播。当遇到不同介质界面时,部分声波发生反射,其余则继续传播或发生折射,反射信号被探头接收并转化为电信号^[1]。声波传播过程中,波长与频率共同决定检测分辨率,频率越高波长越短,对微小缺陷的识别能力越强,但衰减也更快,适用于较薄焊件检测;低频声波穿透力强,适合厚壁结构检测。声波在均匀材料中传播路径稳定,遇到焊接缺陷时,因缺陷与基体材料声学特性差异,反射信号的幅度、相位等参数发生变化,通过分析这些变化可判断缺陷存在与否及大致位置。

1.2 焊接缺陷的超声反射特性

不同类型焊接缺陷的超声反射特性存在明显差异。裂纹多呈线性分布,与声波传播方向垂直时反射信号强烈且边缘清晰,信号持续时间短;平行于声波方向时反射较弱,易形成漏检。气孔为球形或椭圆形空腔,反射信号呈现单一峰值,幅度随气孔大小变化,密集气孔会产生多个连续峰值。夹渣多为不规则块状,反射信号幅度中等且波形杂乱,伴随明显的信号衰减。未焊透形成的面状缺陷反射信号稳定,幅度较高,在焊缝根部位置易形成固定反射区域。缺陷的尺寸和埋藏深度也影响反射特性,浅层缺陷反射信号强但传播时间短,深层缺陷

信号较弱但传播时间长,通过分析信号时差可大致推算缺陷深度。

1.3 检测系统构成及工作机制

检测系统由超声探头、主机、耦合剂和数据显示装置组成。探头是发射与接收声波的核心部件,按工作原理分为压电式和磁致伸缩式,压电式探头通过压电晶体的逆压电效应产生声波,正压电效应接收反射波,适用于多数钢结构检测场景。主机负责控制超声波的发射频率、脉冲宽度等参数,将接收的电信号进行放大和处理。耦合剂的作用是排除探头与工件表面之间的空气,常用机油、甘油等,确保声波高效传入工件。数据显示装置以波形形式呈现处理后的信号,操作人员通过观察波形变化判断焊接质量。系统工作时,探头与焊件表面保持稳定接触,主机触发探头发射超声波,声波在焊件内部传播并与缺陷相互作用,反射波被探头捕获并转化为电信号,经主机处理后在显示装置上形成波形,完整呈现声波传播过程中的能量变化,为缺陷判断提供直观依据。

2 超声检测技术的精细化方法研究

2.1 检测参数优化策略

检测参数的优化需结合钢结构焊接件的材质与厚度展开。针对高强钢等特殊材质,需调整探头频率以适应材料对声波的衰减特性,避免因频率过高导致信号弱化为不可识别状态。对于厚壁焊接结构,选择较低频率配合大直径探头,增强声波穿透力,确保能探测到深层缺陷;薄壁结构则采用高频探头,提升对微小气孔、细小组分的识别能力^[2]。探头折射角的选择需匹配焊缝坡口形式,直角坡口适合使用45度折射角探头,能更好地覆盖焊缝根部区域;V型坡口可搭配多角度探头组合,通过不同方向的声波传播实现对坡口两侧热影响区的全面检测。耦合剂的选择需兼顾流动性与黏附性,粗糙表面采用黏度较高的耦合剂,减少因间隙导致的声波反射损

失；光滑表面则可使用低黏度耦合剂，便于探头移动时保持稳定接触。

2.2 缺陷定位与定量分析方法

缺陷定位通过声波传播时间与速度的计算实现。利用不同深度反射信号的时差，结合声波在材料中的传播速度，可确定缺陷的埋藏深度。水平方向定位则通过探头移动过程中信号最强点的位置判断，配合刻度标尺记录缺陷在焊缝长度方向的具体坐标。对于倾斜缺陷，需结合多角度探头检测结果，通过几何关系换算确定实际位置。定量分析基于缺陷反射信号的幅度与波形特征。同一类型缺陷的反射幅度随尺寸增大而增强，可通过与标准试块中人工缺陷的信号对比，估算实际缺陷的大致尺寸。波形的持续时间能反映缺陷的延伸范围，狭长裂纹的波形持续时间较短且峰值尖锐，而大面积未焊透的波形则呈现宽幅震荡。通过多组检测数据的综合分析，可降低单一参数判断的误差，提升定量结果的可靠性。

2.3 复杂焊接结构的检测路径规划

复杂焊接结构的检测路径需依据结构形态分段设计。箱型构件的角焊缝检测，采用环绕式路径规划，探头沿焊缝边缘做螺旋式移动，每移动一定距离进行一次定点检测，确保对四个直角焊缝的全覆盖。管道环焊缝则采用轴向与周向结合的路径，轴向移动检测焊缝深度方向缺陷，周向移动保证整圈焊缝无检测盲区。对于梁柱节点等异形结构，需划分多个检测单元，每个单元对应特定的探头角度与移动轨迹。节点连接处的圆弧过渡区域，采用小步距移动方式，减少因探头倾斜导致的信号失真。路径规划需避开结构表面的凸起与凹陷，在不平整区域增加耦合剂用量，维持探头与工件的稳定接触，避免因路径颠簸造成的信号波动。

2.4 信号处理与降噪技术

信号处理以突出缺陷特征为核心目标。采用滤波技术剔除环境电磁干扰产生的高频噪声，保留与缺陷相关的有效信号频段。对于多缺陷叠加产生的复杂波形，通过波形分离算法将不同深度的反射信号拆解，单独分析每个缺陷的特征参数。针对焊接区域组织不均匀导致的背景噪声，采用自适应降噪算法，通过实时分析信号变化趋势，自动调整降噪阈值，在去除噪声的同时不丢失微小缺陷信号。对信号进行平滑处理可减少探头抖动产生的毛刺，使波形边缘更清晰，便于识别缺陷的起始与终止位置。经过处理的信号需保留原始波形的关键特征，为后续的缺陷定性分析提供完整依据。

3 精细化检测技术的实践应用路径

3.1 不同焊接工艺下的检测适配方案

电弧焊形成的焊缝表面易产生飞溅物，检测前需对焊缝区域进行打磨处理，去除表面凸起以保证探头贴合紧密。选用高频探头配合小角度折射，可有效识别熔合线附近因电流不稳定产生的微小裂纹^[3]。埋弧焊焊缝厚度较大且热影响区宽，需采用低频探头与高耦合性介质组合，增强声波在厚层金属中的穿透能力，重点检测焊缝根部可能出现的未熔合缺陷。气体保护焊缝成型较规整但易出现气孔，检测时采用多探头阵列沿焊缝走向同步扫描，通过不同角度声波叠加捕捉分散气孔的反射信号。激光焊焊缝窄且热影响区小，需搭配聚焦探头精准定位，避免因光束偏移导致的微小未焊透被遗漏。对于电阻焊形成的焊点，采用表面波探头环绕检测，通过声波在焊点边缘的反射变化判断焊接强度是否达标。对于搅拌摩擦焊的焊缝，因其接头平整但易存在内部疏松，需采用斜探头从不同方向交叉检测，通过声波在疏松区域的散射特征识别缺陷。电子束焊焊缝深宽比大，内部易有针状气孔，需用细长探头沿焊缝深度方向分层检测，捕捉垂直方向的微弱反射信号。

3.2 检测流程的标准化构建

检测前需对设备进行全面检查，校准探头灵敏度与主机信号放大倍数，确保不同检测批次的参数一致性。工件表面处理需达到规定光洁度，去除氧化皮、油污等杂质，耦合剂涂抹均匀且厚度适中，避免因涂层不均影响声波传播。检测过程中探头移动速度保持稳定，每移动一段距离停留一次，确保信号采集的完整性。数据记录需包含检测位置、探头角度、信号波形等关键信息，采用连续编号方式对焊缝分段标记，便于后续追溯。检测完成后对设备进行清洁保养，探头需单独存放于防潮盒内，主机定期通电预热以维持电路稳定性。每道工序均需明确操作规范，避免因人为操作差异导致的检测结果偏差。检测人员需经过系统培训，熟悉不同工艺焊缝的检测要点，操作时严格遵循流程步骤，确保每个环节都符合标准化要求。检测区域需设置警示标识，与焊接作业区保持安全距离，防止现场操作干扰检测进程。

3.3 检测结果的可视化呈现方式

将检测数据转化为二维灰度图像，通过像素明暗程度反映缺陷信号强度，灰度值越高代表反射信号越强，可直观呈现缺陷在焊缝长度方向的分布状态。三维建模技术可还原缺陷在深度方向的形态，通过不同颜色区分缺陷类型，裂纹以线性亮色带显示，气孔表现为分散的高亮圆点。截面投影图能清晰展示缺陷与焊缝坡口的相对位置，帮助判断缺陷是否位于关键受力区域。波形图谱与焊缝位置一一对应，将原始信号波形按检测路径排

列,可观察缺陷信号随检测位置的变化规律。可视化呈现需保留原始数据特征,避免过度修饰导致信息失真,为后续质量评估提供直观且准确的参考依据。检测结果需与焊缝结构图叠加显示,标注缺陷在实际构件中的具体方位。对于连续分布的缺陷,采用动态演示方式呈现声波传播路径与缺陷的相互作用过程,使检测人员更易理解缺陷形成机理^[4]。可视化输出格式需统一,便于不同检测环节的数据传递与对比分析。通过分层显示技术,可将不同深度的缺陷信息逐层呈现,清晰展示缺陷在三维空间中的分布态势,进一步提升检测结果的可读性。

4 技术瓶颈与改进方向

4.1 现有技术的局限性分析

现有超声检测技术在面对复杂焊接结构时易出现检测盲区。厚壁焊缝的多层焊接区域,声波在不同焊道界面发生多次反射,易与缺陷信号混淆,导致微小裂纹被掩盖。高合金钢等特殊材料的焊接件,因晶粒粗大造成声波严重散射,信号信噪比降低,难以准确识别缺陷。探头与工件表面的耦合稳定性受环境影响较大,高温环境下耦合剂易挥发,低温环境下则易凝固,均会导致声波传播效率下降。对于曲面焊缝,探头贴合度不足,局部压力变化会引发信号波动,影响缺陷判断的一致性。长时间连续检测后,设备元器件老化会导致灵敏度漂移,需频繁校准才能维持基本精度。多探头协同工作时,信号同步性易受电路延迟影响,不同通道数据拼接处易出现信息断层,增加缺陷定位误差。

4.2 提升检测精度的创新思路

开发自适应探头调节系统,通过微型传感器实时监测探头与工件的接触状态,自动调整压力与角度,确保耦合稳定性。采用多频复合探测技术,同一探头同时发射不同频率的声波,高频信号识别微小缺陷,低频信号探测深层区域,实现不同尺度缺陷的同步检测。引入波形识别算法,通过深度学习分析大量缺陷信号特征,建立缺陷类型与波形参数的关联模型,提升对相似信号的区分能力。设计可柔性变形的阵列探头,贴合曲面焊缝轮廓,减少因几何形状差异导致的检测盲区,增强复

杂结构的覆盖能力。在信号预处理阶段增加动态滤波模块,根据材料声学特性自动切换滤波频段,进一步抑制噪声干扰。

4.3 技术融合与发展趋势

将超声检测与电磁感应技术结合,利用电磁信号定位焊缝位置,引导超声探头精准对准检测区域,提高自动化程度。光学成像技术与超声检测的融合,可通过光学图像确定焊缝宏观形态,为超声检测路径规划提供空间坐标参考,实现宏观与微观检测的相互印证^[5]。发展无线传输的便携式检测设备,摆脱线缆束缚,适应大型钢结构的现场检测需求。开发集成化数据处理平台,实时整合多组检测数据,通过三维重建技术还原缺陷立体形态,为焊接质量评估提供更全面的信息支持。引入数字孪生技术构建虚拟检测环境,通过虚拟仿真优化检测方案后再应用于实际工件,减少试错成本。技术融合将推动检测过程向智能化、一体化发展,逐步解决现有技术复杂环境下的应用局限。

结束语

钢结构焊接质量超声检测技术的精细化研究与实践,为焊接质量评估提供了更精准的手段。从技术基础到实际应用,再到瓶颈突破,形成了完整体系。通过不断优化方法、融合技术,结合实际场景调整策略,该技术将更好适应复杂结构检测需求,为钢结构工程质量提升提供有力保障,推动相关领域持续发展。

参考文献

- [1]文建伟.超声检测技术在建筑钢结构焊接中的应用研究[J].中国建筑装饰装修,2023(21):88-90.
- [2]王晓艳.超声波无损检测技术在钢结构焊缝中的运用[J].中国建筑金属结构,2024,23(2):97-99.
- [3]曾宪文.建筑钢结构焊缝检测中超声波无损检测技术的应用[J].中国房地产业,2024(30):66-69.
- [4]罗科夫.超声波探伤在建筑钢结构检测中运用研究[J].建筑·建材·装饰,2023(18):169-171.
- [5]刘伟,程锦辉,张杰.无损检测技术在建筑工程检测中的应用研究[J].塑料包装,2025(2):43-45,196.