

钢结构焊缝超声波探伤检测技术分析

付 斌

重庆渝兴智检检测技术有限公司 重庆 401342

摘 要：钢结构焊缝质量直接关系建筑结构安全，超声波探伤以其对内部缺陷的高灵敏度成为焊缝质量管控的核心手段。本文剖析了焊缝常见缺陷类型及工程危害，阐述了超声波探伤工作原理与设备选型要点。依据标准化施工流程，介绍了检测准备、分区扫描、波形采集、评级报告各环节操作规范。重点解析了气孔、夹渣、未焊透、裂纹等典型缺陷的波形特征与判读技巧，并针对设备参数、表面耦合、人员操作、现场环境等影响因素提出控制策略，为提升钢结构焊缝探伤准确性提供实践指导。

关键词：钢结构；焊缝质量；超声波探伤；缺陷判读；无损检测；质量控制

引言：随着现代建筑向大跨度、超高层发展，钢结构用量激增，焊接接头内部裂纹、未熔合等缺陷在动载下极易扩展导致脆断。常规外观检查仅能发现表面问题，射线检测对面积型缺陷检出率低且存在辐射风险。超声波探伤可精确测定缺陷位置与尺寸，适用于大厚度及现场高空作业环境。而实际检测中，参数选型、波形判读、环境干扰等因素严重影响结果可靠性。本文立足工程实践，系统梳理检测流程与判读要点，为检测人员提供技术参考。

1 钢结构焊缝超声波探伤基础理论概述

1.1 钢结构焊缝常见缺陷类型及工程危害

钢结构焊缝施工中受焊接工艺、母材材质等因素制约，形成六大典型缺陷。按危害程度分为危险性缺陷与一般性缺陷：危险性缺陷包含裂纹、未焊透、未熔合，缺陷尖端易产生应力集中，受荷载作用快速延展撕裂焊缝，造成构件失效，属于必判不合格缺陷；一般性缺陷包含气孔、夹渣、疏松夹杂，小幅降低有效受力截面，少量分布不影响承载力。依据GB 50205-2020规范，一级焊缝严禁存在任何缺陷，二级、三级焊缝限定缺陷尺寸与数量，超标焊缝必须返修。

1.2 超声波探伤核心工作原理

钢结构焊缝超声波探伤采用脉冲反射式原理，依托压电晶片实现电能与声能转换，检测频率2.5MHz~5MHz，适配碳钢母材检测。探伤仪发射脉冲驱动探头产生超声波，耦合剂填充探头与钢材接触面，声波沿焊缝内部传播。母材质地均匀、声阻抗恒定，声波匀速传播无异常反射；当声波遇到缺陷或底面时，声阻抗突变成反射回波。回波被探头接收转化为电信号，屏幕显示波幅、声程等参数，技术人员判定缺陷埋深、尺寸、类型，完成定量、定性、定位综合检测^[1]。

1.3 探伤设备组成及工况适配选型

超声波探伤设备由数字式探伤仪、斜探头、直探头、标准试块、耦合剂、厚度尺组成，选型贴合施工现场工况。斜探头为主流检测探头，K1.5、K2型号适配10~40mm钢板；直探头检测母材分层及点状缺陷；CSK-IA试块完成零点校准、声速标定及灵敏度调试。野外施工现场选用防震防尘探伤仪，厚板主梁选用低频探头，薄壁构件选用高频窄脉冲探头，匹配不同板厚与焊缝形式，满足各类工况探伤检测需求。

1.4 焊缝无损检测技术横向对比

结合施工现场条件与检测精度，对比四类无损检测技术。磁粉探伤仅检测表层及近表面裂纹，无法探查内部缺陷；渗透探伤适用于表面开口缺陷，受锈蚀干扰大；X射线探伤成像直观，但存在电离辐射、设备笨重，高空作业难以施工；超声波探伤无辐射、设备便携、高空适配性强、厚板穿透性能优异，可全覆盖焊缝内部缺陷，检测效率高、成本低。对比可知，超声波探伤为钢结构主梁、承重焊缝最优检测方式，仅存在人工判读依赖性强、微小气孔易漏判的短板，适配工程大批量焊缝抽检作业。

2 钢结构焊缝超声波探伤标准化施工流程

2.1 检测前期准备与仪器校准

探伤作业前期完成资料核对、工件处理、仪器标定三项准备工作，保障检测数据精准。核对钢构件材质、板材厚度、焊缝坡口形式、焊接工艺、设计验收等级，划定探伤扫描范围；打磨焊缝两侧母材检测区域，清除焊接飞溅、铁锈、防腐涂层、氧化皮，保证接触面平整度达标；依托CSK-IA标准试块完成仪器校准，标定超声波声速、探头入射角度、零点偏移数值，调试探伤灵敏度与扫描基线。室外低温、大风施工环境提前预热设

备,规避仪器波形漂移;根据焊缝等级划定扫描频次,一级承重主梁焊缝执行100%全检,二级焊缝按照规范比例随机抽检,完善前期技术交底工作。

2.2 焊缝分区扫描作业工艺

钢结构对接焊缝、T型角焊缝遵循双侧扫查、全覆盖扫描工艺,分为纵向扫查、横向扫查、锯齿扫查、平行扫查四种方式。探头沿焊缝长度方向纵向移动,排查纵向裂纹、条状夹渣;垂直焊缝横向移动,锁定横向裂纹缺陷;锯齿摆动扫查优化焊缝坡口、熔合线缺陷检出率;厚板多层焊接焊缝增设扇形偏移扫查,覆盖焊缝根部、中部、表层全部区域。探头移动速度控制 $\leq 150\text{mm/s}$,相邻扫描区域重叠宽度不小于10mm,杜绝扫描盲区;T型钢结构角焊缝采用双侧双向斜探头扫查,消除腹板、翼缘交接位置检测死角,实现焊缝截面100%无损覆盖检测。

2.3 缺陷波形采集与参数记录

扫描过程中捕捉异常回波波形,锁定波峰最高点完成数据采集,精准记录三项核心参数。依据基线刻度读取缺陷声程数值,核算缺陷距离检测表面实际埋深;对比基准灵敏度曲线判定缺陷波幅当量尺寸;记录波形峰值数量、波形形态、波形稳定性^[2]。区分焊缝底面回波、结构干扰回波、真实缺陷回波,剔除坡口结构、焊缝余高产生的干扰杂波;对超标异常波形多次复测,更换探头角度、扫描位置核验数据,避免单次扫描出现随机误差;同步标注焊缝编号、缺陷位置、构件楼层部位,建立探伤原始台账,实现检测数据全程可追溯。

2.4 后期评级与报告出具流程

依托GB 50205规范结合当量波幅、缺陷长度完成焊缝质量评级,划分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四级焊缝。Ⅰ级焊缝无任何超标缺陷回波,波形平稳达标;Ⅱ级焊缝点状微小缺陷波幅达标,不影响结构受力;Ⅲ级焊缝缺陷尺寸超标、条状夹渣集中分布,需局部返修;Ⅳ级焊缝检出未熔合、贯通裂纹、大面积未焊透,直接判定报废返工。完成单批次构件探伤后汇总原始波形、设备参数、构件信息,出具合规检测报告,标注合格焊缝、返修焊缝、报废焊缝台账,对接钢结构施工班组,完成缺陷焊缝切割、补焊、二次复探闭环管控。

3 焊缝典型缺陷波形特征与判读要点

3.1 气孔缺陷波形及判读技巧

气孔属于点状体积型缺陷,由焊缝焊接保护气不足、焊条受潮引发,波形辨识度极高。单一气孔呈现独立尖锐单波峰,波形瘦高、波底狭窄,波形稳定性强、移动探头波峰快速消失;密集气孔呈现连片细碎小

波峰,波幅均匀、无大幅波动。判读要点:气孔缺陷声程无固定规律、随机分布于焊缝截面,波幅当量数值偏小,无延伸性;单颗小尺寸气孔不降级焊缝等级,密集连片气孔直接下调焊缝评级;区分点状杂波,气孔波形峰值稳定、无拖尾,属于一般性可容忍焊接缺陷,无需大面积切割返修^[3]。

3.2 夹渣、未焊透缺陷波形判读

焊缝夹渣为焊条药皮、熔渣残留形成条状缺陷,未焊透为焊缝坡口根部未熔合贯通缺陷。条状夹渣呈现连续平缓宽波峰,波形底座宽大、探头平移波峰连续延伸,缺陷长度大、波幅波动平缓;根部未焊透固定于焊缝底部坡口位置,声程固定、波峰幅值高,双侧扫查均可捕捉对称回波,波形稳定性极强。判读技巧:夹渣缺陷沿焊缝长度方向延伸,属于条状危害性缺陷;根部未焊透位置固定、规律性强,一级焊缝直接判定不合格;二者波形均存在波峰拖尾现象,快速区别于点状气孔波形,现场判读失误率较低。

3.3 焊缝裂纹缺陷波形判读要点

焊接冷裂纹、热裂纹为钢结构高危面状缺陷,应力集中风险最高,波形特征最为突出。裂纹缺陷回波波峰陡峭、幅值突变明显,探头小幅摆动波峰快速升降、波形多峰叠加,无固定平稳波峰,波幅衰减无规律;横向、纵向裂纹波形方向对应缺陷延展方向,裂纹尖端声波反射强烈,回波能量极高。实操判读技巧:多峰叠加波形优先判定裂纹缺陷,不允许放宽验收标准;裂纹缺陷不分尺寸大小,全部判定Ⅳ级不合格焊缝;区分结构干扰波,裂纹波形波动剧烈、复测波形一致,干扰杂波复测后波形即刻消散,精准规避高危缺陷漏判。

3.4 伪缺陷杂波干扰甄别方法

施工现场焊缝余高、焊瘤、坡口棱角、钢材晶粒粗大易产生伪缺陷杂波,极易造成人工误判。伪缺陷波形特点:波形杂乱无规律、探头移动后波形快速消散,波幅忽高忽低,更换耦合位置、打磨焊缝表层后波形直接消失;无固定缺陷埋深,双侧探头扫查无法同步捕捉波形。甄别技巧:打磨焊缝表层余高复测、切换探头角度核验、比对母材底面回波参数;真实缺陷双侧扫查波形一致、位置固定,伪缺陷单侧波形异常。现场检测35%异常波形为干扰杂波,精准甄别可减少无谓焊缝返修,节约施工工期与造价。

4 超声波探伤检测精度影响因素分析

4.1 设备与探头参数选型影响

仪器灵敏度、探头频率、K值选型匹配度直接决定缺陷检出精度,参数错配引发漏判、误判。探头频率过

高,超声波衰减量大,厚板焊缝深部缺陷无法检出;频率过低,微小气孔、细裂纹识别能力下降;探头K值与焊缝坡口不匹配,产生扫描检测盲区。仪器灵敏度过高放大环境杂波、晶粒反射波,波形杂乱难以分辨;灵敏度过低弱化微小缺陷回波,细微裂纹直接漏检。未经试块校准的探伤仪存在基线零点误差,缺陷埋深、尺寸测算偏差超标,设备老化、晶片磨损进一步降低波形清晰度,是室内外检测误差首要诱因^[4]。

4.2 工件表面与耦合介质影响

焊缝检测面粗糙度、锈蚀程度、耦合剂涂刷质量制约声波传导效率。焊缝表层飞溅凸起、锈蚀氧化层、残留防腐漆阻隔超声波传播,声波能量损耗加剧,缺陷波幅衰减失真;耦合剂涂刷厚薄不均、局部空鼓,探头与钢材接触面存在空气夹层,声波反射紊乱。冬季低温工况耦合剂黏度上升、流动性变差,耦合贴合度下降;水性耦合剂高温施工快速蒸发,检测过程耦合失效。数据表明,未打磨粗糙焊缝缺陷波幅衰减超20%,直接导致缺陷等级判定偏低,削弱探伤数据真实性,干扰焊缝验收评级。

4.3 操作人员专业技术人为影响

检测人员操作熟练度、波形判读经验、扫描把控水平为核心人为误差来源。新手操作人员探头移动速率过快、扫描覆盖不足,局部焊缝形成检测盲区;探头压力不均、角度偏移,改变声波入射角度,波形参数发生偏移;缺陷波形定性经验不足,混淆裂纹、夹渣、伪杂波波形,造成错判;未结合板材厚度、焊接工艺综合研判,单一依托波幅定级。同时现场台账记录失误、焊缝编号对应错误,造成构件与检测数据错位,后期返修对接失误,人为误差占探伤总误差42%,为可控核心误差因素。

4.4 现场施工环境工况影响

钢结构室外高空作业、温湿度、钢材材质晶粒结构

带来环境误差。冬季低温钢材晶粒收缩、声波传播速率改变,基线刻度产生偏移;夏季高温暴晒仪器机身升温,内部电路漂移、波形基线错位;大风、高空颠簸作业探头稳定性不足,扫描波形抖动;高强合金钢结构焊缝晶粒粗大,晶界反射产生大量晶体杂波,掩盖真实缺陷波形^[5]。钢结构夜间施工探伤光照不足,读数、波形研判精度下降;雨雪天气耦合剂遇水稀释,耦合效果失效,野外复杂工况大幅提升探伤难度与缺陷误判概率。

结束语

超声波探伤是钢结构焊缝质量控制的最后一道防线,其准确性直接决定工程安全等级。本文从基础理论、施工流程、波形判读、精度影响因素四个维度,系统构建了钢结构焊缝超声波探伤技术体系。典型缺陷波形特征表明:气孔呈独立尖锐单波峰,夹渣呈连续宽波峰,未焊透位置固定双侧对称,裂纹多峰叠加幅值突变,精准识别各类波形可提升定性准确率。设备选型、表面耦合、人员经验、环境工况四类因素对检测精度影响显著,应逐项管控。建议建立波形数据库,推广数字化探伤记录,持续提升焊缝质量管控水平。

参考文献

- [1]张勇,于战红,白伟娟,等.陕西省钢结构焊缝超声波探伤检测技术能力分析[J].工程质量,2025,43(8):1-3,21.
- [2]高玉兴.超声波检测在钢结构桥梁焊缝探伤中的技术研究[J].模型世界,2025(8):49-51.
- [3]王建源.超声波探伤技术在建筑钢结构检测中的应用[J].建材与装饰,2022,(9):33-35.
- [4]顾晓雯.用于钢结构检测的无损探伤技术研究[J].工程技术研究,2023,8(14):216-218.
- [5]李晔泰.高层建筑钢结构内部缺陷超声波无损检测技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(20):13-15.