

水利水电金属结构超声无损检测标准探讨

李奉育¹ 张凯¹ 王康¹ 关子龙²

1 江苏省水利科学研究院, 江苏南京, 210017;

2 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏淮安, 223005;

摘要: 近年来随着我国科技发展脚步的不断加快, 无损检测技术在水利水电技术结构中的应用越来越广。无损检测技术在一定时间之内可以对被检测主体进行不间断使得重复检测, 并且不会破坏被检测主体, 无损检测技术不仅仅可以检测被检测主体的物理量, 还可以进行长距离远距离的物理检测。例如对于混凝土强度质量的检测, 对钢筋腐蚀的检测、对金属结构内部性质的检测等等。无损技术在水利水电工程中的应用, 提高了水利水电工程企业相关的发展。本文就研究了无损检测技术的优势以及无损检测技术的衡量标准, 并提出了一定建议。

关键词: 水利水电工程; 金属结构; 超声检测

DOI: 10.69979/3029-2727.26.02.054

1 无损超声检测的优势

1.1 检测范围广, 适配性强

超声无损检测可针对水利水电金属结构的多种缺陷类型进行探测, 包括内部裂纹、气孔、夹渣、未焊透、未熔合等体积型或面积型缺陷, 同时能对构件的厚度、焊缝质量、材料均匀性等进行检测。无论是厚壁压力钢管的内部缺陷排查, 还是薄壁闸门面板的焊缝质量检测, 该技术均能适配不同厚度(通常可检测厚度从几毫米到数米)、不同材质(碳钢、合金钢、不锈钢等常用水利金属材料)的构件, 且不受构件形状的过多限制, 对异形构件、大型构件的检测兼容性优于许多其他无损检测技术。

1.2 检测深度深, 缺陷定位精准

超声波在金属材料中传播衰减较小, 能够穿透较深的构件厚度, 可有效检测到构件内部深处的缺陷, 这一优势对于厚度较大的水利水电金属结构(如大型压力钢管、闸门主梁)至关重要。同时, 通过超声波探头的扫描与信号分析, 结合相关检测仪器的数据处理功能, 能够精确定位缺陷的埋藏深度、平面位置、延伸范围等关键参数, 为缺陷评估和维修方案制定提供准确的数据支撑, 降低因缺陷定位模糊导致的维修不彻底或过度维修问题。

1.3 无损特性, 保障结构安全与经济性

超声无损检测无需对检测构件进行切割、破坏, 检测过程不会影响构件的原有力学性能和运行功能, 可实

现在对在役水利水电金属结构的定期巡检、在线监测, 避免了破坏性检测导致的构件报废、工程停运等损失。此外, 该技术检测效率较高, 检测设备便携性较强(尤其是便携式超声检测仪), 可适应水利工程现场复杂的作业环境(如大坝坝体、水电站厂房、河道闸门等场所), 检测成本相对较低, 相较于射线检测等技术, 无需特殊的防护措施和场地限制, 进一步提升了检测的经济性和实用性。

1.4 检测信号直观, 数据可追溯

超声检测过程中, 超声波在缺陷处会发生反射、折射、散射等现象, 形成的反射信号会被探头接收并转化为电信号, 通过仪器显示为波形图(如A扫描波形)。检测人员可通过波形的幅值、位置、形状等特征直观判断缺陷的存在及性质, 同时检测数据可实时记录、存储, 便于后续的数据分析、对比和追溯。对于长期运行的水利水电金属结构, 可通过不同时期的超声检测数据对比, 跟踪缺陷的发展变化趋势, 提前预判结构的安全风险, 为工程的运维管理提供科学依据。

2 无损超声检测的劣势

2.1 对检测表面要求较高, 受耦合条件影响大

超声波需通过耦合剂(如机油、甘油、水等)实现与检测构件表面的有效接触, 才能保证超声波顺利传入构件内部。若水利水电金属结构的检测表面存在严重的锈蚀、氧化皮、油污、涂层或凹凸不平的缺陷, 会导致超声波传播受阻、信号衰减严重, 甚至无法形成有效检

测。因此,检测前需对构件表面进行打磨、清理等预处理,增加了检测的前期准备时间和工作量。尤其在水利工程现场,构件长期处于潮湿、多尘环境,表面易产生锈蚀和污垢,进一步提升了表面处理的难度。

2.2 对缺陷定性存在局限性, 依赖检测人员经验

超声检测虽能精准定位缺陷的位置和尺寸,但对缺陷的定性分析(如判断缺陷是裂纹、气孔还是夹渣)存在一定局限性,主要依赖检测人员对超声波形的解读经验。不同类型的缺陷可能产生相似的超声信号,若检测人员经验不足,易出现缺陷误判或漏判的情况。此外,对于一些形状不规则、走向复杂的缺陷(如斜裂纹、断续裂纹),超声波的反射信号较弱,难以准确识别缺陷的真实性质和延伸范围,增加了检测结果的不确定性。

2.3 对薄壁构件和特殊部位检测效果较差

当检测构件厚度较薄(通常小于 2-3mm)时,超声波在构件上下表面的反射信号易相互叠加,难以区分缺陷信号与界面反射信号,导致薄壁构件的缺陷检测灵敏度大幅下降。同时,对于水利水电金属结构的一些特殊部位,如构件的边角、焊缝的根部、法兰连接部位等,由于超声波在此类部位易产生反射、散射等干扰信号,会影响检测信号的准确性,难以有效检测这些部位的缺陷。

2.4 受材料特性和环境因素干扰

超声检测的效果受检测构件材料特性的影响较大,若构件材料存在严重的晶粒粗大、组织不均匀(如铸造金属构件),会导致超声波传播衰减加剧、信号杂乱,降低缺陷检测的灵敏度和准确性。此外,水利工程现场的环境因素(如温度变化、风力、振动等)也会对检测结果产生干扰,例如温度过高或过低会影响耦合剂的性能,导致超声波耦合效果下降;现场振动会影响探头与构件表面的稳定接触,产生虚假信号。

3 水利水电金属结构的超声无损检测标准

3.1 金属超声检测标准

SL101-2014、SL432-2008 及 SL425-2017《水利水电起重机安全规程》等水资源保护与水利行业标准,均明确超声无损检测的检测水平为 B 级。

B 级检测的核心要求可参照 GB 系列标准明确:GB11345-89 规定,B 级检测通过角度探针检测焊缝单

侧或双侧,实现对整个焊接部位的全面检测。

相较于 GB11345-89,GB/T11345-2013 新增检测级别划分(共定义四个级别),并扩大了 B 级检测的探针角度范围;同时明确,B 级检测的探针角度及布设位置需根据板厚、焊接接头形状灵活调整。水利水电项目以平对接焊、丁字焊为主,需依据上述标准匹配对应的 B 级检测参数。

3.2 检测技术的应用与规范要求

几何结构内在参数与几何公差의精准检测,是表征液体金属结构表面状态的常用手段,同时也是评判水利水电技术结构制造及安装质量的重要依据。

随着我国水利水电事业的持续发展,高坝建筑建设规模逐步扩大,水工金属结构的制造与安装质量随之提升,与之对应的几何公差及尺寸检测工作难度也显著增加。为提高测量精度,检测工具已从传统的钢卷尺、千分尺、百分表,逐步升级为基于现代坐标与计算机成像技术的高精度设备。其中,3D 坐标测量技术可大幅提升几何公差与尺寸测量的精准度,其核心原理是将被测对象几何元素的测量数据转化为具体点坐标,再通过专业计算软件,依据既定评估标准,拟合出被测对象的形状、尺寸及相对位置关系。

该技术具备工作效率高、计算精度高、操作简便灵活的优势,原则上可实现所有几何元素参数的测量,不仅广泛应用于水利水电工程的制造与安装环节,在水电工程故障诊断与变形测量领域也发挥着重要作用,例如新疆山田电厂的压力钢管变形测量、电厂闸门圆形结构变形监测等场景均有成熟应用。目前,完善的三维坐标测量系统已形成体系,涵盖大型三维坐标测量系统、便携式三维摄影测量系统、激光跟踪测量系统,以及高精度三维坐标测量与激光扫描测量系统等多种类型。

在焊缝质量检测环节,SL101-2014、SL432-2008 及 SL425-2017《水利水电起重机安全规程》等水利行业标准,均明确要求超声无损检测需采用 B 级检测水平。其技术要求可参照 GB 系列标准进一步明确:GB11345-89 规定,B 级检测通过角度探针检测焊缝单侧或双侧,实现对整个焊接部位的全面覆盖检测。相较于这一旧版标准,GB/T11345-2013 重新划分检测级别(共定义四个级别),不仅扩大了 B 级检测的探针角度范围,还明确该级别的探针角度及布设位置需根据板厚、焊接接头形状灵活调整。结合水利水电项目以平对接焊、

丁字焊为主的焊接结构特点,实际检测中需严格依据上述标准匹配对应的 B 级检测参数。

4 水利工程质量检测关键方法说明。

4.1 混凝土碳化深度与钢筋保护层厚度联合检测

4.1.1 碳化深度测量流程

在项目实际质量检查阶段,检测人员需按以下规范步骤操作:第一步,采用电锤工具在指定检测部位钻孔;第二步,彻底清理钻孔内的残留物及粉末,确保检测面洁净;第三步,在钻孔内壁涂刷 1%酚酞醇溶液;第四步,使用深度计测量溶液涂刷后颜色变化层的距离,该距离值即为混凝土碳化深度检测结果。

4.1.2 钢筋保护层厚度测量要求

选用钢筋定位扫描仪作为核心测量设备,实现对钢筋保护层厚度的精确测量。该设备可将保护层厚度值以数字形式直观呈现,同时能准确反映内部钢筋的分布布局,通过机械化、数字化测量手段,有效提升检测结果的科学准确性。

4.1.3 检测结果综合分析

检测工作完成后,需及时对两类检测数据进行系统性整理与对比分析,核心判断标准如下:若混凝土碳化程度远超规范标准要求,且钢筋保护层厚度未达到设计规定,将导致混凝土钝化膜破损,进而丧失对内部钢筋的保护作用;若混凝土内部碳化腐蚀深度小于钢筋保护层厚度,则内部钢筋不会发生腐蚀问题,结构防护性能符合基本要求。

4.2 金属结构专项检测

水利水电工程金属结构的焊接施工质量直接决定工程整体稳定性,因此需通过针对性检测评估实现焊接质量的有效管控。水利工程金属结构检测主要涵盖两大核心方向。

4.2.1 焊接缺陷检测

该方法具备检测全面性强、针对性突出、结果直观清晰、覆盖范围广等优势,可精准识别焊接过程中产生的各类缺陷(如裂纹、气孔、夹渣、未焊透等),是金属结构焊接质量检测的核心手段。

4.2.2 防腐涂层检测

该方法在应用过程中存在一定局限性,适用场景相对特定,主要用于检测金属涂层内部松动、涂层针孔等专项问题,无法实现对金属结构质量的全面评估,需与

其他检测方法配合使用。

5 超声无损检测焊接验收标准

水利水电金属结构(如闸门、压力钢管、启闭机等)的焊接质量直接关系到工程安全与使用寿命,超声无损检测作为核心检测手段,其焊接接收标准以国家及行业专用标准为核心依据,明确了检测实施要求、缺陷评定规则及合格判定准则。以下是基于核心规范的详细梳理,主要依据《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》(GB/T 11345-2013)及水利行业专用标准《水工金属结构 T 形接头角焊缝和组合焊缝超声检测方法和质量分级》(SL 581-2012)编制。

5.1 核心适用范围与基础前提

5.1.1 适用对象

适用于水利水电工程中母材厚度 8~120mm 的铁素体钢熔化焊接头,包括闸门、拦污栅、压力钢管、启闭机吊杆等核心金属结构的 T 形接头角焊缝、对接与角接组合焊缝;其他钢熔化焊接头及在役水工金属结构的检验可参照执行。检测环境温度需控制在 0~60℃,超出此范围需采用特殊检测工艺并在标准中明确规定。

5.1.2 基础实施要求

接收标准的执行需满足前置条件:一是检测人员需经 GB/T 9445 标准培训认证,取得 1 级及以上通用资格证书及水利部门相应等级证书,其中检测规程编制/审核需 3 级人员负责,质量评定及报告审核需 2 级及以上人员承担;二是检测设备(A 型脉冲反射式超声波探伤仪、探头等)需具备产品合格证,仪器水平线性误差 $\leq 1\%$ 、垂直线性误差 $\leq 5\%$,系统有效灵敏度裕量不小于 10dB;三是检测前需清除焊缝表面锈蚀、飞溅等干扰物,表面粗糙度符合检测要求,确保声束有效穿透。

5.2 核心缺陷评定与接收准则

焊接接收标准的核心是缺陷的定量评定,需根据缺陷类型(纵向、横向)、尺寸、回波幅度等指标判定,重点关注未焊透、裂纹、夹渣、气孔等致命缺陷。

5.2.1 缺陷分类与评定方法

缺陷按延伸方向分为纵向显示(平行于焊缝轴向)和横向显示(垂直于焊缝轴向),横向缺陷对结构强度影响更大,接收标准更严格。评定采用两种核心方法:一是基于缺陷长度和回波幅度的定量评定;二是基于缺陷特性和尺寸的探头移动法评定,具体方法需在检测前

明确。

5.2.2 特殊焊缝的专项要求

T 形接头组合焊缝作为水利金属结构的典型接头形式, SL 581-2012 规定其未焊透深度评定需区分坡口类型: I 形坡口角焊缝和大钝边组合焊缝按标准专用条款评定; 其他组合焊缝需严格按照水工金属结构制造、安装验收规范或标书、图纸要求执行。十字接头角焊缝的检测需参照 T 形接头要求, 确保焊脚部位缺陷全覆盖。

5.2.3 检测记录与报告要求

接收标准的有效执行需配套完整的记录与报告体系, 作为合格判定的依据:

检验记录: 需详细记录检测设备参数 (仪器型号、探头规格、频率)、检测等级、灵敏度设定、缺陷位置 (纵向、横向、深度)、缺陷尺寸、回波幅度等关键信息;

检测报告: 需由 2 级及以上人员审核签发, 内容包括检测对象信息、检测标准依据、检测等级、缺陷评定结果、合格判定结论等, 必要时需附缺陷位置示意图及数字波形图存档;

不合格处理: 检出不可接收缺陷时, 需按纠正规程返修, 返修后需对返修部位及周边扩大检测范围 (扩检比例不低于 20%), 直至检测合格。

6 结论

尽管水工金属结构在水利水电工程建设中的占比相对有限, 但其质量安全性是决定工程运行质量的核心因素之一。当前, 伴随我国行政体制改革的持续深化, 水利水电工程领域水工金属结构的行政审批制度亦随之调整完善。与此同时, 我国水利水电工程建设不断推进, 水工金属结构的复杂度日趋提升, 且逐步投入日常运营场景, 这对相关从业人员的技术能力提出了更高要求。在此背景下, 运用各类检测技术等质量保障手段, 对推动水利水电工程高质量发展具有重要现实意义。

参考文献

- [1] 王光旭, 李维树, 谭新. 水利工程中金属焊缝缺陷的超声检测方法比较研究[J]. 声学技术, 2020, 39(04): 439-444. DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.04.010.
- [2] 郭晓波. 水利水电金属结构超声无损检测标准探讨[J]. 四川水泥, 2020, (04): 149.
- [3] 丁鹏, 艾文波, 李京鸿. 水利水电金属结构超声无损检测标准探讨[J]. 水利技术监督, 2018, (04): 21-22+40.