

复杂钢结构焊接部位无损检测的工艺优化与技术要点

任 强

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司 浙江 杭州 310016

摘 要: 复杂钢结构异形节点、厚板焊缝数量多,施工工况复杂,传统无损检测工艺参数固化、检测方式单一,存在检测盲区与较高的漏检、误检概率,难以满足现代钢结构工程高精度质量管控要求。本文分析复杂钢结构焊接结构特征、常见缺陷成因及传统检测工艺弊端,针对性设计多技术协同检测、参数适配、设备优化及恶劣工况专项改进方案。同时梳理优化工艺的预处理、现场操作、缺陷判定、数据校核等关键技术要点。研究成果可有效提升复杂焊缝缺陷检测精度与全覆盖能力,为钢结构焊接无损检测现场施工提供可行的技术参考。

关键词: 复杂钢结构;焊接缺陷;无损检测;工艺优化;技术要点

引言: 无损检测是把控钢结构焊接质量的核心手段,但传统检测工艺通用性强、针对性弱,无法适配复杂结构及恶劣施工现场条件,检测误差与盲区问题突出。为解决现场检测技术短板,提升焊缝质量检测的准确性与规范性,本文依托现行检测规范,结合工程实操经验,开展复杂钢结构焊接无损检测工艺优化研究,明确核心技术操作要点,旨在完善现场检测工艺体系,提升钢结构焊接工程质量管控水平。

1 复杂钢结构焊接缺陷及无损检测基础理论

1.1 复杂钢结构焊接结构特点与工况特性

建筑及工业领域的复杂钢结构多以异形节点、厚板拼接、空间交叉焊缝为主,构件造型多变、受力形式复杂,和常规平面钢结构相比焊接施工难度更大。此类结构焊缝分布零散,多存在转角、坡口、重叠等特殊焊接位置,焊缝厚度不均、拘束度较高,焊接过程极易产生应力集中。多数复杂钢结构应用于厂房、桥梁、大型场馆等露天或重载工况,长期承受荷载交变、温湿度变化、风力振动等外界影响,焊接接头易出现疲劳损伤。施工现场环境复杂,高空作业、场地受限等情况,也对后续无损检测作业的操作空间和检测精度造成直接影响。

1.2 焊接常见缺陷类型、成因及危害分析

复杂钢结构焊接施工中,常见缺陷主要分为内部缺陷与表面缺陷。表面缺陷以气孔、咬边、裂纹、未焊透为主,多由焊接电流不稳定、坡口清理不到位、焊接速度把控不当导致。内部缺陷包含夹渣、未熔合、内部裂纹等,大多是多层多道焊接层间清理不彻底、焊接材料匹配不当、厚板焊接散热不均引发。这类缺陷会直接破坏焊接接头的连续性和完整性,降低焊缝抗拉、抗压及抗疲劳性能。在长期荷载作用下,微小缺陷会持续扩展,极易引发焊缝开裂、构件变形,严重时会造成钢结

构整体失稳,威胁工程结构安全与使用耐久性^[1]。

2 复杂钢结构焊接部位无损检测传统工艺及现存问题

2.1 传统无损检测工艺流程与操作规范

现阶段复杂钢结构焊接无损检测传统工艺遵循常规工程检测标准,整体流程固定。(1)前期准备阶段,主要完成焊缝表面清理、检测区域标记、设备调试与参数校准工作;(2)现场检测阶段,依据焊缝类型、板材厚度,单一采用超声波、磁粉或射线检测方式,按固定点位、固定角度完成扫查作业;(3)后期核验阶段,依托人工识别缺陷信号、记录检测数据,对照规范判定焊缝质量等级,出具检测报告。传统工艺流程固化,检测参数多沿用通用标准,未针对复杂钢结构特殊焊缝做个性化调整。

2.2 复杂工况下传统检测工艺的局限性

复杂钢结构异形节点、空间曲面、厚板多层焊缝占比高,传统检测工艺适配性不足。常规检测设备探头尺寸、扫查方式固定,无法适配狭小、转角、高空等特殊检测位置,存在检测盲区。传统工艺多采用单一检测技术,无法兼顾表面微缺陷与内部深层缺陷的同步排查,对厚薄过渡焊缝、交叉焊缝的缺陷识别适配性较差,难以适配复杂构件的检测需求。

2.3 检测误差、漏检误检问题及成因分析

传统检测模式下漏检、误检问题频发,核心成因集中三点。(1)参数固化,通用检测参数未结合构件厚度、焊接工艺、现场工况调整,缺陷信号辨识度低;(2)人为干预占比高,人工扫查稳定性不足,信号甄别、数据读数存在主观误差;(3)环境干扰抵御能力弱,施工现场振动、粉尘、温湿度变化,会干扰设备检测精度,最终导致微小缺陷漏检、杂波信号误判^[2]。

3 复杂钢结构焊接无损检测工艺优化方案设计

3.1 工艺优化的核心原则与技术指标

本次复杂钢结构焊接无损检测工艺优化严格依托钢结构施工及检测现行规范,结合异形节点、厚板焊缝、空间交叉焊缝的检测难点制定优化原则,具体如下:

(1) 工况适配原则,所有优化方案均针对施工现场高空作业、狭小空间、温湿度波动、构件异形多变等复杂工况设计,杜绝通用工艺与现场实际脱节的问题;(2) 缺陷全覆盖原则,优化工艺兼顾焊缝表面开口缺陷、近表面微小缺陷及内部深层隐蔽缺陷,消除传统单一检测工艺的检测盲区;(3) 精准可控原则,量化检测技术指标,统一参数标准、操作标准与判定标准,降低人工操作带来的主观误差;(4) 安全高效原则,在保障检测精度的前提下,简化冗余检测流程,规避射线检测等高风险工艺的不合理应用,提升现场检测作业安全性与施工效率。基于以上原则,确定核心技术优化指标,包括缺陷检出率、检测误差范围、参数适配精度、检测覆盖率等,确保优化后工艺可落地、可量化、可校核。

3.2 多检测技术协同检测工艺优化

针对传统单一检测技术局限性,结合各类无损检测技术的技术特性,构建多技术协同互补的检测工艺体系,根据不同焊缝结构形式匹配差异化检测组合方案。

(1) 厚板承重焊缝,采用超声波检测与射线检测协同工艺,以超声波完成大面积内部缺陷初筛,针对检测波形异常区域,利用射线检测精准成像复核,判定缺陷具体形态、尺寸与位置,弥补单一超声波检测定性不准的问题;(2) 异形曲面、空间转角焊缝,采用磁粉检测与渗透检测协同工艺,磁粉检测排查铁钢构件近表面隐性裂纹,渗透检测补充筛查开口性微小缺陷,解决异形结构扫查不到位的问题;(3) 高空、大跨度钢结构焊缝,优先采用超声波无损检测为主、磁粉检测为辅的组合模式,减少射线检测使用频次,规避高空辐射作业风险。多技术协同模式摒弃单一检测的固化思维,根据结构形式、受力等级、施工工况动态匹配检测组合,实现复杂焊缝缺陷全方位无死角检测。

3.3 检测参数、流程及设备适配优化

结合复杂钢结构焊接结构特性,对传统检测参数、作业流程及检测设备进行针对性优化,适配多样化检测场景。(1) 检测参数优化,摒弃统一固化的参数设置,根据板材厚度、坡口形式、焊缝宽度调整超声波探头频率、扫查速度、增益参数,针对厚板多层焊缝分层设置检测参数,匹配不同深度缺陷检测需求;(2) 检测流程优化,精简传统工艺冗余步骤,新增焊缝前置分类核验工序,根据焊缝重要等级、结构形式划分检测等级,实

行分级检测,重点承重焊缝增加重复扫查与交叉扫查工序,普通焊缝简化检测流程;(3) 设备适配优化,针对狭小空间、异形焊缝,更换小型化、可弯曲探头设备,替代传统大尺寸固定探头,调整设备扫查角度与贴合方式,解决异形焊缝贴合度差、扫查盲区多的问题,提升设备对复杂结构的适配能力。

3.4 恶劣工况下焊接部位检测工艺改进

针对施工现场高温、低温、潮湿、扬尘、高空扰动等恶劣工况,制定专项工艺改进措施,消除环境因素对检测精度的干扰。(1) 温湿度工况改进,高低温环境下提前对检测设备进行恒温适配调试,避免设备元器件受温度影响出现参数偏移,潮湿环境对焊缝检测区域进行干燥处理,杜绝水汽影响探头贴合与信号传输;(2) 户外扬尘工况改进,检测前清理焊缝表面浮尘、杂物,采用封闭遮挡作业方式,减少粉尘对检测视野和设备精度的影响;(3) 高空扰动工况改进,优化作业站位与设备固定方式,采用定点静置扫查替代动态移动扫查,降低设备晃动带来的波形杂波干扰;(4) 荷载交变工况改进,避开构件受力峰值时段开展检测作业,防止结构微变形导致的缺陷信号误判,保障恶劣工况下检测数据的稳定性与准确性^[3]。

4 优化后无损检测工艺的关键技术要点

4.1 检测前期预处理与点位精准定位技术要点

优化后检测工艺对前期预处理与点位定位提出标准化、精细化技术要求,从源头规避检测偏差,适配复杂钢结构异形焊缝、厚板焊缝的检测需求。(1) 焊缝表面预处理,彻底清除焊缝及两侧2倍板厚范围内的焊渣、氧化皮、油漆、锈蚀及飞溅物,采用机械打磨方式处理检测区域,保证表面粗糙度均匀,无凹凸毛刺,避免表面杂物干扰探头贴合与信号采集。针对高温焊接残留氧化层,需采用专用打磨设备精细化处理,禁止大面积粗磨损伤焊缝基体。(2) 检测区域划分,根据钢结构焊缝受力等级、结构形式分区定位,重点承重节点、交叉焊缝、厚板对接焊缝划定核心检测区,普通辅助焊缝划定常规检测区,区分检测精度等级。(3) 点位精准标定,采用卷尺配合水平仪定位扫查基线,针对曲面、转角异形焊缝,按照等分原则布设检测点位,标注扫查起始点、终止点及交叉扫查区域,杜绝人工随意布点导致的扫查遗漏,保证所有焊缝区域均可实现全覆盖扫查。

4.2 核心检测工序标准化操作技术要点

核心检测工序严格按照优化后协同检测工艺执行,统一操作标准,适配多工况、多类型焊缝检测场景。(1) 超声波检测操作,根据板材厚度预设探头频率、扫

查速度与增益参数, 厚板焊缝采用低频探头分层扫查, 薄板及坡口焊缝采用高频探头精细扫查, 全程保持探头与工件表面紧密贴合, 匀速移动扫查, 扫查重叠宽度不小于探头晶片宽度的1/2, 杜绝跳扫、漏扫操作。(2) 磁粉检测操作, 检测前校准设备磁化电流, 根据构件厚度、焊缝宽度调整磁化方式, 异形节点采用交叉磁化法, 保证磁场覆盖全部检测区域, 磁化后及时观察磁痕分布, 规避磁场不均引发的缺陷漏判。(3) 渗透检测操作, 严格控制预处理、渗透、清洗、显像的时间间隔, 渗透剂均匀喷涂于开口焊缝表面, 无堆积、无漏涂, 清洗工序采用轻柔擦拭方式, 避免过度清洗冲刷微小缺陷渗透剂。(4) 协同检测衔接, 不同检测工序交替作业时, 复核检测点位与区域边界, 保证表面缺陷与内部缺陷检测工序无缝衔接, 无检测盲区、无重复冗余作业^[4]。

4.3 缺陷信号识别、分析与判定技术要点

缺陷信号甄别是优化工艺的核心环节, 依托标准化判定依据, 区分有效缺陷信号与干扰杂波, 提升缺陷判定精准度。(1) 信号分类甄别, 严格区分结构杂波、工艺杂波与缺陷回波, 焊缝坡口、焊趾、层间结构产生的规则杂波统一标记为无效信号, 波形连续、峰值稳定、位置固定的异常回波判定为疑似缺陷信号。(2) 缺陷参数测定, 针对疑似缺陷信号, 精准测量缺陷埋藏深度、延伸长度、波幅高度, 记录缺陷所处焊缝位置、层段信息, 对多层多道焊缝分层判定缺陷分布情况, 区分表层缺陷与内部深层缺陷。(3) 缺陷性质判定, 结合焊缝焊接工艺与缺陷形态特征判定缺陷类型, 点状离散波形对应气孔、点状夹渣, 长条连续波形对应未熔合、未焊透, 尖锐波动波形对应裂纹缺陷, 杜绝经验化盲目判定。(4) 疑难信号复核, 针对波形复杂、无法精准判定的信号, 更换探头角度、调整检测参数进行二次扫查, 结合多种检测方式交叉验证, 保证缺陷判定结果真实准确。

4.4 检测数据处理与结果校核技术要点

优化工艺对检测数据整理、校核、归档实行标准化管控, 规范数据处理流程, 保障检测结果的真实性、可追溯性。(1) 实时数据记录, 现场检测过程中同步记

录设备参数、扫查数据、缺陷位置及波形特征, 杜绝事后补记、篡改数据, 所有原始检测数据统一留存备份。

(2) 数据标准化处理, 对采集的波形数据进行降噪、滤波处理, 剔除环境干扰、设备波动造成的无效数据, 统一数据统计标准, 量化缺陷尺寸、数量、分布范围等核心参数。(3) 多级结果校核, 实行双人校核制度, 初级由检测人员完成数据初步整理, 复核人员复检缺陷数据与判定结果, 重点构件焊缝、疑难缺陷需开展三级校核, 对比多次检测数据, 修正检测误差。(4) 结果合规判定, 严格依据现行钢结构焊接检测规范, 结合构件设计荷载、使用工况判定焊缝质量等级, 区分合格、返修、报废焊缝, 同步整理检测报告, 保证报告数据完整、结论严谨、依据充分^[5]。

结束语: 本文系统分析了复杂钢结构焊接缺陷特征与传统无损检测工艺的现存问题, 完成检测工艺的针对性优化, 构建了多技术协同检测模式, 优化了检测参数、作业流程与设备适配方案, 完善了恶劣工况下的检测改进措施。同时细化了检测预处理、现场操作、缺陷识别、数据校核全流程技术要点, 形成一套适配复杂钢结构的标准化无损检测工艺体系。优化工艺有效弥补了传统工艺适配性差、精度不足、存在检测盲区的缺陷, 可显著降低漏检误检概率。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 高泰霞. 钢结构焊接施工质量检测技术与缺陷处理措施[J]. 秋光, 2026, (2): 0286-0287.
- [3] 陈会龙, 严晓庆. 钢结构焊接技术中焊缝质量控制的关键因素[J]. 中国金属通报, 2025, (19): 158-160.
- [4] 杨长康. 钢结构焊缝无损检测技术综合应用[J]. 中国建筑, 2026, 9(12): 136-138.
- [5] 张洋洋, 乔桥, 吴江. 复杂钢结构焊接部位无损检测的工艺优化与技术要点[J]. 智能建筑与智慧城市, 2026, (6): 145-147.