

钢结构工程焊缝无损检测技术

沈 强

呼和浩特市四方工程质量检测试验有限公司 内蒙古 呼和浩特 010030

摘 要：钢结构焊缝质量直接关乎工程结构安全，无损检测是保障焊缝质量的关键技术。本文先分析钢结构焊缝内部与表面缺陷类型及材料、工艺、环境成因；再系统阐述超声波、射线等传统无损检测技术，以及相控阵超声、超声波衍射时差法等现代创新技术的核心要点与实施流程；最后探讨各检测技术在施工、运营、特殊环境阶段的具体应用。研究旨在为钢结构工程焊缝无损检测提供技术参考，助力提升焊缝质量控制水平，保障工程结构安全稳定。

关键词：钢结构工程；焊缝无损检测；技术；应用

引言：随着钢结构工程在建筑、桥梁等领域的广泛应用，焊缝作为结构连接核心，其质量缺陷易引发结构安全隐患，甚至导致工程事故。传统检测手段精度与效率有限，难以满足复杂工程对焊缝质量的严苛要求。无损检测技术因具有不破坏构件、检测精准等优势，成为焊缝质量管控的核心手段。

1 钢结构焊缝常见缺陷类型及成因

1.1 内部缺陷

钢结构焊缝内部缺陷是指隐藏在焊缝金属内部或焊缝与母材结合面内部的缺陷，无法通过肉眼直接观察。常见的内部缺陷主要包括气孔、夹渣、未熔合、未焊透以及裂纹等。这类缺陷会破坏焊缝金属的连续性和致密性，降低焊缝的承载能力，尤其内部裂纹会显著削弱焊缝的韧性和抗疲劳性能，对钢结构的结构安全构成潜在威胁。

1.2 表面缺陷

表面缺陷是指暴露在焊缝表面及近表面的缺陷，可通过肉眼或简单辅助工具观察发现。主要类型有咬边、焊瘤和表面裂纹等。表面缺陷虽位于焊缝表层，但会破坏焊缝表面的完整性，形成应力集中区域，在使用过程中易成为缺陷扩展的源头，影响焊缝的外观质量和使用寿命。

1.3 缺陷成因与影响

焊缝缺陷的产生受多种因素综合影响，核心可归结为材料、工艺和环境三大类。材料因素主要与焊接材料自身质量以及母材的材质相容性相关；工艺参数的合理性直接决定焊接质量，如焊接过程中的层间温度控制、焊接速度、电流电压匹配等均会影响缺陷形成；环境因素则包括焊接作业时的湿度、温度等外界条件。这些缺陷不仅会降低焊缝的力学性能，还会影响钢结构的耐久性，增加后期维护成本，严重时可能导致结构失效^[1]。

2 传统无损检测技术

2.1 超声波检测（UT）

超声波检测借助超声波在不同介质中传播特性差异探测焊缝内部及近表面缺陷，核心要点如下：（1）前期准备。明确焊缝规格、母材参数，依据标准确定探头类型、探测频率（常规2MHz-5MHz）等工艺参数；清理检测区域杂质，保证探头与表面良好耦合。（2）耦合处理。涂抹甘油、机油等耦合剂，减少空气间隙反射损耗，确保耦合稳定且不腐蚀母材。（3）操作与分析。采用平稳匀速扫查覆盖焊缝及热影响区，实时观察检测仪波形判断缺陷有无及大致位置；综合工艺参数、探头位置排除伪信号，依据标准定性定量分析形成结论，详细记录关键信息并编制规范报告。

2.2 射线检测（RT）

射线检测利用射线穿透性和衰减特性成像检测内部缺陷，核心要点如下：（1）射线源选择。射线穿过焊缝时，缺陷与正常金属衰减差异导致射线强度不同，通过感光胶片或数字设备成像；根据焊缝厚度和环境选X射线机（中薄焊缝、机动性强）或 γ 射线源（厚大焊缝、野外作业）。（2）工艺与准备。依据焊缝厚度、母材确定射线能量、曝光时间、焦距确保成像清晰；清理检测区域杂质，放置像质计和标记牌，划定安全防护区，操作人员佩戴辐射剂量计。（3）成像与评定。胶片成像需经显影、定影等暗室处理，数字成像可直接获取图像提升效率；观察图像识别缺陷信号，测量尺寸评估是否超标，归档图像并编制检测报告。

2.3 磁粉检测（MT）

磁粉检测利用铁磁性材料磁化后缺陷漏磁现象探测表面及近表面缺陷，核心要点如下：（1）原理与适用。铁磁性材料磁化后，表面及近表面缺陷产生漏磁场，磁粉聚集形成磁痕；仅适用于铁磁性材料，检测深度通常

不超过6mm。(2)磁化与准备。根据焊缝形状尺寸选轴向通电磁化、绕电缆磁化或磁轭磁化等方式,保证磁场方向与缺陷垂直;清理打磨检测表面,去除超厚涂层避免影响磁痕观察。(3)操作与后处理。磁化后施加干式磁粉或湿式磁悬液,在自然光或专用光源下区分有效与伪磁痕;检测完成后对构件退磁、清理磁粉,记录缺陷信息并依据标准评定编制报告。

2.4 渗透检测 (PT)

渗透检测借助毛细作用探测表面开口缺陷,不受材料磁性限制,核心要点如下:(1)原理与适用。渗透液渗入开口缺陷后,经清洗、施加显像剂,缺陷内渗透液被吸附形成显示痕迹;适用于多种材质,仅能检测表面开口缺陷。(2)前期处理。严格清理检测表面杂质、毛刺,打磨至符合粗糙度要求,确保表面干燥洁净无残留清洗剂。(3)渗透与清洗干燥。均匀施加渗透液覆盖检测区域,控制渗透时间和环境温度;水洗型用清水、溶剂型用专用溶剂清洗,控制力度避免冲掉缺陷内渗透液,清洗后自然或热风干燥。(4)显像与评定。施加显像剂形成均匀薄膜,在自然光或紫外线灯下区分有效与伪痕迹,记录信息并依据标准评定编制报告^[2]。

3 现代无损检测技术创新技术

3.1 相控阵超声检测 (PAUT)

相控阵超声检测通过多阵元探头的相位控制实现超声波束的聚焦、偏转与扫查,提升检测的灵活性和精度。其核心技术要点及实施流程如下:(1)探头与系统选型。根据焊缝类型、厚度及检测需求,选择相控阵探头的阵元数量、频率、晶片尺寸等参数,阵元数量越多波束控制精度与检测效率越高;配套系统需具备波束合成、扫描成像、数据存储功能,满足参数调节与数据处理需求。(2)检测工艺参数设定。设置波束聚焦深度、偏转角度、扫查范围等核心参数,聚焦深度精准匹配焊缝厚度以增强缺陷信号,偏转角度覆盖焊缝本体及热影响区避免漏检,同时根据母材与焊缝结构设定检测频率,平衡精度与穿透能力。(3)检测前准备与扫查采集。清理焊缝检测区域,保证探头贴合,必要时用定制楔块辅助耦合;校准检测系统确保数据准确,复杂结构可建立几何模型辅助参数优化;采用线性或扇形扫查全面探测,保持探头平稳移动,实时采集信号并转化为二维/三维图像呈现焊缝内部状况。(4)数据处理与评定。利用系统数据分析功能去除噪声、增强缺陷信号对比度,依据标准对缺陷定性定量分析,确定尺寸、位置与分布,判断焊缝质量等级,形成含图像数据的检测报告,提升结果可追溯性。

3.2 超声波衍射时差法 (TOFD)

超声波衍射时差法通过捕捉缺陷上下端点的衍射波信号实现精确定位和定量,尤其适用于厚大焊缝检测。其核心技术要点及实施流程如下:(1)检测原理与设备配置。利用一对收发分离探头,超声波传播遇缺陷时,其上下端点产生衍射波,通过计算衍射波到达两探头的时间差确定缺陷位置与高度;配置TOFD专用探头、检测主机、数据采集卡及分析软件,按焊缝厚度和材质选型确保有效捕捉衍射波信号。(2)检测工艺参数与前期准备。根据焊缝厚度、母材声速确定探头间距、探测频率、声束入射角度等参数,探头间距匹配焊缝厚度以覆盖整个截面,探测频率兼顾精度与穿透能力,厚大焊缝选用较低频率;清理打磨检测表面保证平整,用标准试块校准声速、探头延迟、灵敏度等,确保数据准确可靠。(3)扫查操作与缺陷评定。采用平行于焊缝的扫查方式,探头中心连线垂直于焊缝中心线,匀速平稳移动确保信号采集完整;检测主机实时记录衍射波信号并生成TOFD图像呈现缺陷轮廓;通过软件处理图像识别衍射信号,计算缺陷深度、高度等参数,结合标准定性定量评定,形成详细检测报告为厚大焊缝质量评估提供依据。

3.3 声发射检测 (AE)

声发射检测是动态无损检测技术,通过监测焊缝受力或环境变化产生的弹性波(声发射信号),判断缺陷活性与扩展趋势,适用于在线监测和完整性评估。其核心技术要点及实施流程如下:(1)检测原理与传感器选型。焊缝缺陷受力、升温扩展或变形时释放弹性波,通过表面布置的声发射传感器捕捉信号分析缺陷状态;传感器选型需考虑频率范围、灵敏度与耦合方式,匹配检测对象与环境。(2)传感器布置与前期准备。根据焊缝长度、形状及重点区域合理布置传感器,确保全覆盖,相邻间距根据信号衰减特性确定避免漏检;用标准声源校准系统确保精度;清理焊缝表面保证传感器耦合,采用耦合剂或粘结剂固定,根据工况确定平稳加载方案避免信号干扰。(3)信号采集处理与分析评定。加载或工况运行中,实时采集信号并记录加载力、温度等参数,滤波去除环境与设备噪声,提取峰值幅度、上升时间等有效特征参数;通过软件统计分析参数,判断信号来源,识别活性缺陷位置与扩展趋势,依据标准评估焊缝完整性与安全性,缺陷扩展明显时及时预警,形成动态检测报告。

3.4 红外热像检测

红外热像检测利用材料热传导特性差异,通过红外热像仪捕捉焊缝表面温度分布图像,识别缺陷导致的温度异常区域实现检测。其核心技术要点及实施流程如下:(1)检测原理与设备选型。焊缝存在缺陷时,缺陷区域

与正常金属热传导系数不同,外部热激励或自身散热过程中会出现温度升高缓慢、降温延迟或分布不均现象,热像仪捕捉该差异形成热像图判断缺陷;选型需关注热像仪分辨率、测温范围、帧频,高分辨率可清晰识别微小温度差异,满足检测精度要求。(2)热激励方式与前期准备。根据材质、厚度及缺陷类型选择主动热激励或被动热激励,主动热激励可控制加热强度与时间,适用于多数场景,被动热激励适用于无法主动加热工况;清理检测表面杂质保证发射率均匀,根据热激励方式与检测对象设定热像仪拍摄频率、测温范围等参数,确保清晰捕捉温度差异信号。(3)热像采集处理与缺陷评定。热激励过程中或结束后,连续采集热像图记录温度变化,通过软件增强、降噪、伪彩色处理提升差异辨识度,精准识别异常区域位置与范围;结合焊缝结构、热传导特性判断异常是否由缺陷引起,排除环境波动、表面不平整等伪异常,初步判定缺陷类型与尺寸,依据标准评定焊缝质量,编制检测报告提供质量控制参考^[3]。

4 无损检测技术在钢结构工程焊缝中的具体应用

4.1 施工阶段焊缝检测应用

施工阶段无损检测需贯穿焊接全流程,实现质量前置控制,核心应用要点:(1)焊接前预检测。核查母材坡口加工质量,清理表面杂质与潜在缺陷;确认焊接材料与母材的适配性,排除材料层面的质量隐患。(2)过程阶段性检测。针对多层多道焊工艺,每道焊缝完工后开展抽检,重点排查工艺性缺陷,及时反馈并调整焊接参数,避免缺陷叠加。(3)完工全面检测。依据焊缝重要等级,选用单一或组合检测技术,全面覆盖焊缝本体及热影响区,确保检测无遗漏。(4)闭环管理实施。记录缺陷信息并反馈施工班组指导返修,返修后对对应区域重新检测,直至符合质量标准,形成完整的检测-整改-复检记录。

4.2 运营阶段焊缝监测应用

运营阶段检测聚焦焊缝长期使用中的损伤演化,保障结构安全,核心应用要点:(1)制定周期性抽检计划。结合结构使用年限、工作环境及焊缝受力等级,明确抽检频次与范围,重点覆盖动载荷承载焊缝。(2)动态监测技术应用。采用声发射、红外热像等动态检测技

术,实现运营状态下的在线监测,实时捕捉缺陷扩展信号与温度异常,及时触发安全预警。(3)适配性检测优化。针对运营场景限制,选用便携式检测设备,优化扫描路径与工艺参数,减少对正常运营的干扰。(4)数据归档与趋势分析。建立检测数据库,汇总历次检测数据,通过对比分析缺陷发展趋势,为维护保养计划制定提供数据支撑。

4.3 特殊环境焊缝检测应用

特殊环境下检测需应对环境干扰,保障检测精度与安全,核心应用要点:(1)环境适配准备。根据高空、海洋、高低温等环境特点,选用专用防护设备与防腐、耐高温检测仪器,配备适配的辅助工具。(2)检测工艺优化。针对环境干扰调整参数,如海洋环境增强耦合剂抗水性,高温环境选用耐高温探头;采用屏蔽措施减少电磁、振动等噪声影响。(3)安全规范操作。制定专项安全作业规程,操作人员配备对应防护装备,严格按流程实施检测,避免环境因素导致操作失误。(4)结果交叉验证。采用多种检测技术联合验证,排除环境干扰产生的伪缺陷信号,确保检测结果的准确性与可靠性^[4]。

结束语:钢结构工程焊缝无损检测是保障工程安全的重要环节,传统与现代检测技术各有适配场景。传统技术成熟可靠,适用于基础检测需求;现代创新技术在检测精度、效率与适用范围上优势显著,更适配复杂工况。施工、运营、特殊环境下的针对性应用,实现了焊缝质量全生命周期管控。未来,应进一步推动无损检测技术的智能化、集成化发展,优化技术应用方案,提升检测自动化水平,为钢结构工程质量安全提供更坚实的技术保障。

参考文献:

- [1]梁鹏.钢结构工程焊缝无损检测技术[J].江苏建材,2024(1):6-8.
- [2]刘海平.钢结构工程焊缝无损检测技术应用研究[J].中国厨卫,2024,23(10):71-73.
- [3]魏海峰.钢结构工程焊缝无损检测技术应用探析[J].石油石化物资采购,2024(23):112-114.
- [4]武建鹏.钢结构工程焊缝无损检测技术应用探讨[J].科技与创新,2022(12):29-31+34.