

钢结构焊缝质量检测技术研究及应用进展

张祖军

西南科技大学工程技术中心, 中国·四川 绵阳 621000

摘要: 钢结构因强度高、自重轻、抗震好、施工快等优势, 广泛用于高层、超高层、大跨度桥梁、工业厂房等工程。焊缝质量直接关系到结构安全, 焊接过程易产生气孔、裂纹、未焊透、咬边、表面裂纹等缺陷, 成为结构失效主要因素之一。本文系统梳理了钢结构焊缝质量检测技术的研究现状及工程应用, 对比了各技术的选用原则与适配场景, 总结分析了应用环节的核心要点, 以期为保障焊缝质量提供参考。

关键词: 钢结构; 焊缝质量; 检测技术; 工程应用

Research and Application Progress of Quality Inspection Technology for Steel Structure Welds

Zhang Zujun

Engineering Technology Center of Southwest University of Science and Technology, China Sichuan Mianyang 621000

Abstract: Steel structures are widely used in high-rise, super high-rise, large-span bridges, industrial plants and other projects due to their advantages of high strength, light weight, good seismic resistance, and fast construction. The quality of welds is directly related to structural safety, and the welding process is prone to defects such as porosity, cracks, incomplete penetration, undercutting, and surface cracks, which become one of the main factors causing structural failure. This article systematically reviews the research status and engineering applications of steel structure weld quality inspection technology, compares the selection principles and adaptation scenarios of various technologies, and summarizes and analyzes the core points of the application process, in order to provide reference for ensuring weld quality.

Keywords: Steel structure; Weld quality; Detection technology; Engineering application

0 引言

由于强度高、韧性好且施工便捷, 钢结构已成为现代基础设施建设的主要结构型式之一, 被广泛用于高层建筑、桥梁、体育场馆、海洋平台及航空航天等重要工程领域^[1]。焊接作为钢材连接的主要方式, 其质量直接关系到结构的安全状态及服役寿命。然而, 钢结构构件往往尺寸较大、设计复杂、母材较厚且焊缝类型多样, 难以完全或部分采用自动化焊接设备, 通常依赖手工多层多道焊接工艺。这一过程中难免会产生裂纹、气孔、夹渣、未熔合等多种焊接缺陷^[2]。此类缺陷隐蔽性强、潜在危害大且修复困难。即便在制造与出厂前已进行质量检测, 仍可能有部分缺陷被漏检或无法检出。在服役荷载作用下, 这些缺陷有可能逐渐扩展, 最终导致灾难性事故。因此, 针对钢结构焊缝开展定期的在役检测与维护, 对确保设施安全、稳定运行至关重要。伴随检测技术的持续进步, 焊缝质量检测正快速向高效、精准、智能、数字化方向演进。本文在现有研究成果基础上, 系统梳理并综述了钢结构焊缝质量检测技术的研究进展及其工程应用情况, 以期在实际工程

应用和技术创新提供参考。

1 常规无损检测技术

1.1 超声检测 (UT)

超声检测利用高频声波在材料中传播和反射的特性, 通过检测超声波反射、折射、散射等现象来评估材料内部缺陷。该技术具有高灵敏度、深度穿透能力强、适用于各种厚度工件快速扫描等优点, 是目前钢结构焊缝内部缺陷检测应用最为广泛的技术之一。在建筑工程钢结构焊接节点缺陷识别中, 超声检测对裂纹、气孔、夹渣等缺陷具有较好的检出能力^[3-4]。

超声检测的核心优势在于其对内部缺陷的灵敏检测和缺陷尺寸的准确定量能力。然而, 该技术也存在一定局限性, 体现在对检测人员经验要求较高, 缺陷定性依赖操作者判断; 对近表面缺陷检测能力有限; 对于粗晶材料 (如奥氏体不锈钢) 和薄板 (8mm 以下) 的检测效果不佳^[5]。陈劲等^[6] 提出一种钢管混凝土结构构件无损检测方法。结果表明, 红外热成像法与超声波法相结合可以较为准确地识别钢管混凝土柱的脱空缺陷以及内部缺陷。

1.2 射线检测 (RT)

射线检测利用 X 射线或 γ 射线穿透焊缝, 因金属密度差异形成衰减梯度, 经探测器接收后形成二维透射图像, 可清晰显示焊缝内部的气孔、夹渣、未熔合等缺陷。该技术提供直观的二维图像, 便于缺陷定位和尺寸评估, 在厚板、大直径钢管等部位的内部缺陷检测中应用广泛^[7-8]。X 射线探伤被认为是焊缝质量评估的“金标准”。射线检测的优势在于结果直观可视、有永久性图像记录、对体积型缺陷检测灵敏度高。但其不足同样明显: 设备成本高、辐射防护要求严格、检测周期较长、对裂纹等面积型缺陷的方向敏感性较强。

1.3 磁粉检测 (MT)

磁粉检测通过在磁化后的焊缝表面施加磁粉, 利用磁粉在漏磁场处的聚集来显示表面和近表面缺陷。该技术操作简便、成本低、结果直观, 特别适用于铁磁性材料的快速筛查^[9-10]。在钢结构检测中, 磁粉检测主要用于螺栓、螺母、焊接接头等部位的表面缺陷检测。徐羊等^[11]研究了建筑钢结构焊缝常见缺陷及磁粉检测技术, 系统分析了磁粉检测在表面裂纹、气孔等缺陷检出中的有效性, 指出该方法操作简便、成本低, 适用于铁磁性材料的快速筛查。磁粉检测的优点是对表面裂纹灵敏度极高、操作便捷, 但局限性也较突出: 仅适用于铁磁性材料、不能检测埋藏缺陷、检测前需进行表面清理。

2 新兴无损检测技术

2.1 相控阵超声检测 (PAUT)

相控阵超声检测通过集成多通道微型探头阵列, 以电子方式控制超声波束的聚焦与偏转^[12-13]。检测时探头沿焊缝表面扫描, 系统按预设程序激发不同阵元, 生成多角度声束覆盖焊缝根部、趾部及热影响区, 反射回波经高速采集后形成可视图像。与传统超声检测相比, PAUT 能够实现声束的电子扫描和多角度覆盖, 检测速度更快、缺陷定位更精确、检测结果更直观。在深度学习技术赋能下, 基于 PAUT 数据的自动缺陷检测取得了显著进展。

Irtiza 等^[14]将相控阵超声检测技术与精益原则相结合, 应用于制造焊接工艺的效率与质量改进, 研究通过优化探头布置和扫描路径, 在船舶制造、压力容器焊接中验证了 PAUT 在结构可靠性保障方面的潜力。Barshok 等^[15]提出了一种融合卷积特征提取器与自注意力机制的 CATT-S 模型, 该模型采用了全连接网络、卷积神经网络及新型卷积注意力时间转换器等多种深度学习架构, 并在模拟 CIVA 数据及焊接、复合材料试件等真实数据集上完成了训练,

可用于基于相控阵超声检测 (PAUT) 数据的自动缺陷识别。该模型在复杂异质材料无损检测实验数据集上实现了 99.4% 的检测准确率和 0.905 的 F1 分数, 显著提升了缺陷检测的智能化水平。PAUT 适用于板材、管材、焊缝的全聚焦相控阵检测, 尤其适合 T 型、Y 型和 K 型三种管状节点焊缝、奥氏体不锈钢等复杂结构检测。目前该技术已在船舶制造、压力容器和桥梁钢结构等焊接质量检测领域得到应用。

2.2 衍射时差法超声检测 (TOFD)

衍射时差法超声检测利用超声波在缺陷尖端产生的衍射波来确定缺陷的位置和尺寸。TOFD 凭借对人体无害、实时性好、检测精度高等优势, 在桥梁钢结构质量保证中得到了广泛采用。其核心特点是检测覆盖范围大、检测速度快、缺陷检出率高, 并能精确量化缺陷尺寸。在智能化方面, Gong 等^[16]开发了一种基于增强型生成对抗网络的 TOFD 焊缝图像两阶段缺陷检测方法。该方法首先利用 YOLOv8 (实时目标检测算法) 定位感兴趣区域, 再通过自注意力生成对抗网络进行缺陷分析, 在不依赖大量缺陷样本的情况下实现了 86% 的曲线下面积, 相较于现有最先进方法高出 5 个百分点。此外, Yang 等^[17]提出了一种融合图像特征和波形变化特征的图像与波形联合特征 (CFIW) 方法, 用于焊缝衍射时差法 (TOFD) 缺陷类型识别。该方法整合了技术人员评估中使用的领域专业知识, 在实际焊缝 TOFD 缺陷数据集上取得了 85.76% 的分类准确率。

2.3 数字射线检测 (DR)

数字射线检测利用数字阵列探测器或存储荧光成像板将透射 X 射线信号直接转换为数字图像。DR 技术可快速生成高分辨率二维透射图像, 图像采集时间仅需 3 秒, 支持实时存储与分析。与传统的胶片射线照相相比, DR 技术具有成像速度快、图像可数字处理、便于存储和传输、辐射剂量相对较低等显著优势^[18]。王俊龙等^[19]针对焊缝数字射线检测图像, 提出了一种基于高效特征提取与精准定位的智能识别方法。该方法能够自动识别焊缝图像中的典型缺陷, 提高了检测效率与一致性。

基于非晶硅数字检测系统的焊缝 DR 检测方法, 通过叠加曝光降低图像噪声、依据射线衰减指数规律进行对数解调以凸显缺陷特征、运用非锐化掩模滤波增强特征, 使焊缝缺陷特征更加清晰可辨。DR 在钢结构焊缝批量检测、压力容器和桥梁钢结构焊接质量检测领域应用前景广阔^[20]。ISO 10893-7 规定了采用计算机放射成像或数字探测器阵列技术对自动熔化弧焊钢管纵缝或螺旋焊缝进行数字射线

检测的要求。

2.4 红外热成像检测 (IRT)

红外热成像检测利用红外相机捕获焊缝表面的温度分布,通过热异常识别内部缺陷如脱粘等。作为一种非接触式检测方法,该技术适用于大面积快速扫描。在钢结构检测中,红外热成像主要用于检测焊接接头、螺栓连接等部位热影响区的缺陷,如过热和热影响区裂纹等^[21-22]。

邵富强^[23]基于红外热成像技术,研究了一种建筑钢结构连接柱焊接质量检测方法。该方法利用红外相机捕获焊缝表面温度分布,通过热异常识别内部缺陷,实现了非接触式快速扫描,适用于大面积焊缝的初步筛查。然而,该技术对被测表面的热发射率要求较高,检测精度受环境温度和表面状态影响较大,目前主要作为快速筛查手段,与超声、射线等精确检测方法配合使用。

3 结语

基于不同焊接缺陷无损检测方法的原理及其应用特性,每项技术都具备各自独特的优势、局限及适用条件,需要综合应用不同无损检测的技术优势,才能有效检测焊接缺陷。常规超声、射线、磁粉检测仍广泛应用,但分别存在依赖经验、辐射防护及仅限表面缺陷等局限。相控阵超声(PAUT)、衍射时差法(TOFD)、数字射线(DR)及红外热成像(IRT)等新技术则实现了快速成像、定量精确及非接触扫描等突破。此外,深度学习与PAUT、TOFD等技术的融合使缺陷识别准确率显著提升,检测正朝着智能、高效、精准方向快速发展。

参考文献:

[1] Ji Z, Xu D, Wang H, et al. Recent Advances in Non-Destructive Testing Technology for Coated Steel Structure Welds[J]. Sensors, 2025, 25(22): 6923-6923.

[2] 刘文超. 无损检测技术在建筑工程检测中的应用浅析——以某钢结构厂房单体建筑工程为例[J]. 房地产世界, 2022(12): 61-63.

[3] 孙德胜, 滕继源. 超声波检测在钢结构焊接接头缺陷识别中的应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2025(12): 84-86.

[4] 郭欢. 超声波探伤技术在钢结构检测中的应用[J]. 住宅与房地产, 2020(06): 207.

[5] 焊缝超声检测类标准: GB/T 11345—2023《焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定》标准摘要[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2024(04): 22.

[6] 陈劲, 陈晓东, 赵辉等. 基于红外热成像法和超声

波法的钢管混凝土无损检测技术的试验研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2): 444-453.

[7] 陈少波, 畅三军, 刘红亮. 钢结构平板对接焊缝射线检测时缺陷深度定位的方法研究[J]. 无损探伤, 2024, 48(06): 8-11.

[8] 杨羿, 张建东, 李昊. 钢结构桥梁焊接无损检测技术应用及发展[J]. 轻工科技, 2020, 36(12): 70-71+114.

[9] 周祥. 建筑钢结构焊缝常见缺陷及磁粉检测方法分析[J]. 江西建材, 2023(05): 116-117.

[10] 贺全伟. 磁粉检测交叉磁轭法的有效磁化区和系统灵敏度的测试方法[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 828-830+846.

[11] 徐羊. 建筑钢结构焊缝常见缺陷及磁粉检测技术研究[J]. 科技资讯, 2026, 24(04): 155-157.

[12] 徐万宝, 杨昊, 张炜豪等. 相控阵超声检测技术在钢结构建筑工程检测中的应用研究[J]. 安徽建筑, 2022, 29(09): 164-166.

[13] 文武. 超声相控阵在钢结构检测中的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(05): 172-174.

[14] Irtiza M C, Silwal B, Kardel K, et al. Implementing Phased Array Ultrasonic Testing and Lean Principles Towards Efficiency and Quality Improvement in Manufacturing Welding Processes[J]. Applied Sciences, 2025, 15(20): 11271.

[15] Barshok K, Choi I J, Lee J. Deep Learning-Based Approach for Automatic Defect Detection in Complex Structures Using PAUT Data[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2025, 25(19): 6128.

[16] Gong Y, Chen Z, Zhang H, et al. Automated detection of weld defects in TOFD images for steel bridges using generative adversarial networks[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 22: e04841.

[17] Yang D, Jiang H, Sun Y, et al. Cross-fusion of image features and wave variation features for weld time-of-flight diffraction defect type recognition[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 1511136-1151.

[18] 梅兰, 文杰, 罗杰等. 数字射线检测核级管道焊缝缺陷模拟研究[J]. 核电子学与探测技术, 2025, 45(04): 561-566.

[19] 王俊龙, 徐喆, 刘伟达等. 基于高效特征提取与精准定位的焊缝 DR 缺陷智能识别[J]. 金属加工(热加工), 1-11[2026-04-24].

[20] 王娟娟, 赵中辉, 王利中等. 超声波与数字射线检

测在焊缝检测中的应用[J]. 建筑机械化, 2025, 46(02): 26-30.

[21] 陈劲, 陈晓东, 赵辉等. 基于红外热成像法和超声波法的钢管混凝土无损检测技术的试验研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2): 444-453.

[22] 冯舸, 吕学成, 杨怀滨等. 基于红外热成像技术的建筑围护结构快速诊断方法的研究与应用[J]. 区域供热,

2022(3): 13-17.

[23] 邵富强. 基于红外热成像的建筑钢结构连接柱焊接质量检测方法[J]. 焊接技术, 2024, 53(01): 126-130.

作者简介: 张祖军 (1975.03-), 男, 汉族, 安徽省萧县, 工学硕士, 副教授, 研究方向: 主要从事机械工程, 表面工程方面的研究工作。