

建筑钢结构工程焊缝无损检测技术研究

文 / 肖钦政 广东科信工程质量检测有限公司

摘要：随着现代建筑行业的持续发展，为解决建筑钢结构工程焊接质量隐患问题，本文对建筑钢结构工程焊缝无损检测技术进行研究，分析了钢结构工程焊接常见问题，详细探讨建筑钢结构工程焊缝无损检测技术类型及应用，如超声检测、射线检测、磁粉检测和渗透检测；以广东省综合停车场工程为例探讨超声无损检测技术的实际应用要点及注意事项。

关键词：建筑；钢结构工程；焊缝；无损检测技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.021

引言

建筑钢结构工程是以型钢、钢板等钢材为主的结构，作为建筑物承重骨架，钢结构建筑总体强度更高且重量轻，钢结构构件自重轻且截面小，能够减少地基负担，适用于地质条件较差的地区。钢结构工程机械化程度高，施工周期更短，符合建筑领域的可持续发展需求。建筑钢结构工程施工中焊接环节至关重要，同样也是质量控制的重点和难点，要严格执行焊接工艺评定并进行无损检测，对此文章针对建筑钢结构工程焊缝无损检测技术进行专题分析与研讨有重要实践意义和价值，有利于推动建筑业的转型与升级。

一、建筑钢结构工程焊接常见问题

建筑钢结构工程需采用焊接进行结构连接，焊接质量直接影响整个钢结构主体的安全稳定和耐久性。常见焊接问题可划分为内部缺陷和外部缺陷两种。

一是外部缺陷，如焊缝高度或宽度不足、焊缝尺寸偏差导致焊接承载面积减小、强度不足，或尺寸过大引发应力集中，沿焊缝的母材部位产生了沟槽或凹陷等情况，极易成为疲劳裂纹的起源点。另外焊接过程中容易出现焊流、弧坑、表面气孔、飞溅等情况，焊流为金属熔化流淌至焊缝外形成金属流，影响美观，且常伴随未熔合等内部缺陷问题。弧坑内多含有气孔、缩孔等缺陷，焊接过程中熔滴溅落到母材金属表面颗粒飞溅，严重时可能影响表面裂纹^[1]。

二是内部缺陷，内部缺陷为内部气孔、夹渣、未焊透或熔合、裂纹等缺陷问题均属于焊接不到位、内部存在孔隙、杂质未熔透现象，裂纹为焊缝或热影响区出现的局部撕裂，应力高度集中会导致钢结构突然脆性破坏，是灾难性的缺陷。建筑钢结构工程焊接施工中，外部缺陷可通过肉眼或低倍放大镜进行观察和发现，也可通过施工现场质量检验和监理进行管理，内部缺陷则需要通过无损检测方法进行排查，以保障焊接质量。

二、建筑钢结构工程焊缝无损检测技术分析

当前建筑钢结构工程焊缝无损检测技术体系中相对常用的检测方法为超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测等。

（一）超声检测技术

超声检测技术应用1~5MHz高频声波穿透金属材料，如声波传播过程中遇到气孔、夹渣、裂纹等内部缺陷或工件、边界会发生反射、折射等，通过反射信号和仪器显示屏展现的波形进一步分析缺陷所处位置和影响范围。应用超声检测技术开展焊缝无损检测需要在探头和待检测工件表面涂抹甘油、机油等耦合剂，充分排除空气，保障声波的有效传入。根据工件厚度和检测目标选择适宜的探头，调节探头角度和频率，如焊缝厚度<20mm可选用2.5~5.0MHz探头，>20mm则选择1.0~2.5MHz探头，探头入射角度调整为45°~70°，从两侧进行焊缝扫查，并根据焊缝的几何形状调节探头角度。如工件表面相对粗糙，可适当增加耦合剂用量或对工件表面进行适当打磨，提高缺陷信号的信噪比。超声探头扫描时需保持恒定速度和压力，于检测面上移动做锯齿形扫查，其中，要使用标准试块校准仪器的灵敏度等指标，由操作人员通过分析波幅、波形位置和形状，判断缺陷性质、深度和当量大小。以超声检测开展钢结构工程焊缝无损检测灵敏度高，定位准确，设备轻便，应用成本低，操作效果好，尤其对厚截面焊缝检测效果好，穿透能力强，且对人体无害。但是该技术检测结果呈现效果和直观性较差，无法直接精准成像缺陷，更多依赖操作人员的经验技能和判读水平，尤其是表面和近表面缺陷检测时易存在盲区，焊缝或工件表面相对粗糙也会影响耦合和检测效果^[2]。

（二）射线检测技术

该技术以X射线或γ射线穿透工件，技术原理在于钢结构焊缝如存在气孔、夹渣等缺陷问题，其对射线的吸收能力与完好部位不同，导致穿透后射线强度差异，

将其反映于胶片或成像器上可形成黑白对比影像，进而检测缺陷性质。应用射线无损检测技术之前需合理确定射线源胶片和焊缝或待检测工件的相对位置，保障最佳角度和清晰度，在每次曝光时使用像质计验证影像灵敏度和成像质量。开展射线检测时要严格划定控制区和管理区，周边设置警示标志，避免无关人员进入检测现场。胶片处理时要保证暗室，并严格按照操作流程或使用数字化成像技术进行成像，由持证评片人员进行精准评片，评定缺陷影像的形状、大小和黑度等等。射线检测技术更加直观准确，可获取二维图像，定性与定量分析效果好，且底片可用于追溯和复查，对焊缝或钢结构内部的气孔、夹渣等体积性缺陷显示更加直观。但是射线无损检测技术有辐射风险，需要做好安全防护，相关设备成本昂贵，检测速度较慢，如涉及管材结构需进行双壁透照综合检测，灵敏度下降；如钢结构焊缝表面存在裂纹等面状缺陷，且方向与射线束不平行，会进一步提高漏检率。

（三）磁粉检测技术

铁磁性材料被磁化后表面或近表面位置存在缺陷，会形成漏磁场，使吸附在表面的磁粉形成肉眼可见的磁痕，显示缺陷位置和形状。将磁粉检测技术应用于建筑钢结构工程焊缝检测中需选择适宜的磁化方法，如通电法、线圈法等，确保磁场方向与预计缺陷方向保持垂直，至少需进行两个近似垂直方向的磁化，以确保检测出不同方向的缺陷问题。磁化同时或之后要均匀喷洒磁粉悬浮液，在充足光照下观察，对有要求的工件和检测环节进行退磁处理。磁粉检测更适用于表面或近表面的线性缺陷，尤其是裂纹等灵敏度和检出率极高，可直接观察磁痕形状，设备简单，操作便捷，应用成本低，但只限于钢铁等材料，无法用于铝、铜以及奥氏体不锈钢等材料。磁粉检测技术无法检测深层内部缺陷，复杂形状的工件和焊缝磁化难度更高，完成无损检测后需要及时清理焊缝表面剩余磁粉，提高了无损检测流程复杂性。

（四）渗透检测技术

渗透检测是应用荧光或着色染料施加到焊缝表面，使其渗入表面开口缺陷，去除多余染料渗透液后配合显影剂在可见光或紫外光下观察缺陷痕迹，渗透检测更加适用于表面缺陷检测，需要保障待检测区域无油污、锈蚀、涂层等。施加渗透液后预留足够的渗透时间，使渗透液充分渗入缺陷，去除多余渗透液，如过度清洗会洗掉缺陷中的渗透液，而清洗不足也会导致背景过高，掩盖缺陷显示。去除渗透液后要在焊缝表面施加薄而均匀的显像基层，等待一段时间后显示缺陷。此种无损检测技术设备最简单，应用成本最低，但表面粗糙的焊缝或工件

缺陷检测敏感度不佳，应用化学制剂可能对自然环境和操作人员产生影响^[3]。

三、建筑钢结构工程焊缝无损检测技术应用案例分析

（一）项目概况

以广东省A综合停车场工程为例，A工程为地面大型停车场，主体结构为8层钢框架结构，钢柱截面主要为箱型，钢柱最长为9.57m，单体钢柱最重约为7.3t，钢梁截面主要为H型钢，钢柱、钢梁及相关节点板材质均为Q355B。此类结构节点复杂，焊缝集中，受力大，对焊接质量要求极高，该工程根据高层钢结构的安装特点，对比了多种钢材焊接方法的焊接质量、施工速度、操作便捷程度及焊接性能等，选择了半自动实芯焊丝CO₂气体保护焊(GMAW)为主要焊接方法，并采取专项防风措施，焊条电弧焊(SMAW)用于深窄坡口的打底焊接及点固焊、返修焊等零星焊接，半自动药芯焊丝CO₂气体保护焊(FCAW)用于氧焊部位和重要焊缝的打底、填充和盖面焊接。焊接材料选择如表1所示。

表1 焊接材料参数

项目	焊材	焊接形式	规格
焊条	E5015	SMAW	φ 3.2
实芯焊丝	ER50-6	GMAW	φ 1.2
药芯焊丝	E501T-1	FCAW	φ 1.2

（二）焊接质量检查标准

焊接质量等级要求方面，工地安装的坡口全熔透焊缝竖向构件为一级，水平构件为二级，贴角焊缝为三级，但其外观质量需符合《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205)中二级焊缝的要求。焊接质量检查包括外观和无损检测，外观检查按照《钢结构焊接规范》(GB 50661-2011)规范执行；无损检测采取超声检测技术，按照《GB/T 11345-2013 焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定》执行，一级焊缝100%检验，二级焊缝抽检20%，并且在焊后24h内检测(图1)。



图1 焊缝探伤

（三）超声无损检测技术的应用

1. 检测前准备

应用超声无损检测技术之前需详细对照检测要求，阅读设计图纸和规范，明确一级焊缝、二级焊缝的位置和数量，制定超声检测作业指导书，明确检测区域、探头选择、校准参数、扫描方式以及验收标准。所有无损检测操作人员必须持有专业资格，且有丰富检测经验，能准确判读超声波形^[4]。A工程中应用数字式超声探伤仪，选用斜探头，折射角、k值的选择依据为板厚和焊缝坡口角度，确保可覆盖全部焊缝截面，箱形柱、T形连接或接头位置联合应用双晶斜探头或直探头，检测翼板与腹板的结合情况。设置校准试块测定探头入射点、k值以及绘制距离波幅曲线，设定敏感度。选取化学甘油等黏度适中的耦合剂，确保在垂直立面和高空作业时不易流淌。焊缝表面处理方面，将探头移动的检测区域打磨至露出金属光泽，全面去除检测区域焊渣、飞溅、锈蚀、油漆等杂质，使表面粗糙度 $RA \leq 25 \mu m$ ，打磨宽度一般保持在1.5倍跨距。

2. 现场检测流程

由操作人员进行仪器校准与灵敏度测定，在CSK-I A试块测定探头前沿、入射点和k值参数在仪器中输入，并使用RB-2试块上的 $\phi 3mm$ 横孔，绘制距离-波幅曲线(DAC)，此曲线是判定缺陷大小的基准，将该曲线增益至评定敏感度，确定验收等级。在母材焊缝两侧位置开展锯齿形扫查，联合前后、转角扫查实现100%覆盖，探头扫查移动间距 \leq 探头晶片直径的15%；箱型柱对接焊缝位置需在四面壁板外表面进行扫描；H型钢梁柱刚性连接节点要重点扫描助臂板外侧对应于梁翼缘和腹板的位置；T形接头则需在地板表面进行扫描，检测腹板与翼板的熔合情况。当检测仪器屏幕上有超过评定线的反射波出现即锁定波幅最高点，通过仪器深度、水平读数确定缺陷在焊缝中的所处位置、深度水平和距离，移动探头找到缺陷最高波幅，将其与DAC曲线比较，确定当量大小，测出缺陷的指示长度，根据检测标准中的验收等级判定该缺陷是否合格。任何超标缺陷均需标记于焊缝位置，详细记录缺陷类型、位置、波幅等信息，出具无损检测报告，不合格焊缝及时向施工方发放返修通知单，以便精准返修^[5]。

3. 相关注意事项

开展超声无损检测时，要保证焊接后24小时内检测，旨在及时发现裂纹等情况，Q355B钢焊接完成后扩散氢在应力作用下聚集，可能经过一段时间后才会上诱发裂纹，24小时内开展无损检测可有效捕捉高风险缺陷，提高钢结构的安全性。虽然焊接作业时A工程应用了防风措施，

但露天作业环境可能使保护气体效果产生波动，进而出现气孔、未熔合的情况超声探伤，无损检测时操作人员要重点关注气孔等缺陷的波形特征，气孔多表现为丛状波，未熔合波形相对陡直尖锐，二者需做好区分。操作人员要全面了解焊接工艺，针对返修焊等部位排查夹渣和未焊透情况，主焊缝排查未熔合和气孔，有针对性地调整扫描重点。A工程涉及较多箱形柱节点，内部多设置钢板，声波传播路径复杂，容易产生结构型反射波，出现伪缺陷信号，因此操作人员要详细了解节点构造，通过动态波形分析精准区分缺陷。

（四）检测结果分析

A工程中全面应用超声无损检测技术进行钢结构质量检验，严格执行了无损检测技术标准和验收规范要求，能够高效可靠地检测出焊缝内部几乎所有的重要平面缺陷和体积缺陷问题，尤其是裂纹、未熔合、未焊透等，保证焊缝质量，满足工程验收标准。应用超声无损检测技术可精准定位缺陷深度和长度，为后续返工和精准打磨提供指导，避免盲目返修造成母材损伤。超声无损检测技术为A工程钢结构骨架的整体性与耐久性提供重要保障，使其能够安全承受设计荷载，延长钢结构主体的使用寿命，从根本上杜绝了因焊接缺陷引发的安全事故。

结语

总而言之，建筑钢结构工程是现代建筑行业发展的重要部分，代表了建筑工业化和现代化的发展方向。为更好契合“双碳”目标战略，助力建筑业转型，要积极强化建筑钢结构工程质量检验，文章着重分析了钢结构工程焊缝无损检测技术，探究常见焊接问题及焊缝无损检测技术应用的必要性，从超声检测技术、射线检测技术、磁粉检测技术和渗透检测技术4个方面概述了焊缝无损检测技术类型及应用要点；将广东省A综合停车场工程作为案例，重点分析钢结构工程焊接质量检查标准以及超声无损检测技术的实际应用情况，希望能够为其他钢结构工程无损检测技术的应用提供参考。

参考文献

- [1] 李昂. 无损检测技术在某钢结构工程中的应用效果分析[J]. 中国建筑金属结构, 2025, (9): 130-132.
- [2] 姜永. 建筑钢结构焊缝无损检测技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(3): 137-140+161.
- [3] 莫生学. 钢结构工程焊缝超声波无损检测技术探讨[J]. 工程技术研究, 2024, 9(17): 61-63.
- [4] 杜学亮. 钢结构桥梁工程检测技术及评估策略探讨[J]. 工程技术研究, 2025, 10(1): 220-222.
- [5] 武金林. 有关建筑工程钢结构焊接施工技术应用要点的探索[J]. 中国建筑金属结构, 2025, (14): 16-18.