

# 超声波探伤技术在建筑钢结构焊缝质量检测中的应用与实操要点

何文煌

441481\*\*\*\*\*2250

**摘要:**建筑钢结构作为现代建筑的核心承重体系,其焊缝质量直接决定结构的安全性与耐久性。超声波探伤技术凭借穿透能力强、灵敏度高、对人体无害等优势,成为建筑钢结构焊缝质量检测的主流方法。本文系统阐述超声波探伤的技术原理,结合建筑钢结构焊缝的特点分析其应用场景,重点细化检测全流程的实操要点——从检测前准备到结果评定,再到质量控制与改进,并探讨未来技术发展趋势。研究旨在为工程实践提供可操作的指导,确保焊缝检测的准确性、可靠性,助力建筑钢结构质量提升。

**关键词:**超声波探伤;建筑钢结构;焊缝检测;质量控制;实操要点;无损检测

**DOI:** 10.69979/3029-2727.25.11.085

## 引言

随着城市化进程加速,建筑钢结构因强度高、自重轻、施工速度快等优势,广泛应用于高层建筑、大跨度场馆、工业厂房等领域。焊缝作为钢结构的关键连接部位,其内部缺陷(如裂纹、未熔合、夹渣、气孔)会严重削弱结构承载力,甚至引发安全事故。传统检测方法(如射线检测、磁粉检测)存在辐射风险、对内部缺陷灵敏度低或仅能检测表面缺陷等局限,难以满足建筑钢结构焊缝的检测需求。超声波探伤技术通过高频声波在材料中的传播与反射,可有效检测焊缝内部深层缺陷,且对人体无伤害,逐渐成为建筑钢结构焊缝质量检测的首选方法。本文围绕超声波探伤在建筑钢结构中的应用,从技术原理到实操细节展开研究,为工程实践提供理论支撑。

## 1 超声波探伤技术的核心原理与适用特性

超声波探伤的本质是利用高频机械波(频率通常在0.5~10MHz之间)在材料中的传播特性,通过分析回波信号判断材料内部缺陷的存在。其核心原理可拆解为三个关键环节:首先是声波的产生与传播。探伤仪通过发射电路产生电脉冲,激励探头中的压电晶片振动,将电能转化为高频声波传入工件。声波在均匀介质中沿直线传播,遇到声阻抗不同的界面(如焊缝中的缺陷、工件底面)时,会发生反射、折射或散射。反射回波被探头接收后,转化为电信号,经放大、滤波后显示在仪器屏幕上,形成时基线与回波峰。其次是建筑钢结构的

声学特性适配。建筑钢结构多采用Q235、Q345等低碳钢或低合金钢,其声阻抗均匀、衰减小,适合超声波传播。焊缝区域的组织因焊接热循环会发生改变,形成熔合区、热影响区,这些区域的声阻抗与母材存在差异,缺陷(如裂纹)的声阻抗与钢材差异更大,因此回波信号明显,便于识别。最后是探伤方法的分类。建筑钢结构焊缝检测常用脉冲反射法,即通过缺陷回波与底波的对比判断缺陷。该方法又分为缺陷回波法与底波高度法:缺陷回波法直接捕捉缺陷产生的回波,根据回波的幅度、位置、形状判断缺陷大小与类型;底波高度法通过监测底波的衰减判断缺陷是否存在——若底波幅度下降超过一定阈值,说明焊缝内部有缺陷吸收声能。此外,穿透法也可用于厚板焊缝检测,通过发射探头与接收探头分别置于焊缝两侧,根据透射波的衰减判断缺陷,但因需要双面操作,在建筑钢结构复杂部位应用较少。

## 2 建筑钢结构焊缝的特点与超声波探伤的应用场景

建筑钢结构焊缝类型多样,包括对接焊缝、角焊缝、T型焊缝、十字焊缝等,其几何形状、受力状态与缺陷类型各有不同,超声波探伤的应用场景需结合以下特点设计。

### 2.1 梁柱节点焊缝:多方向缺陷的精准检测

梁柱节点是建筑钢结构的核心受力部位,焊缝多为多方向交汇的角焊缝与对接焊缝,缺陷类型包括裂纹、未熔合、夹渣。这些缺陷多位于焊缝根部或热影响区,

传统射线检测难以穿透厚板，磁粉检测仅能发现表面缺陷。超声波探伤通过选择合适角度的斜探头（如 45°、60°），可沿焊缝方向扫查，声波能深入焊缝内部，反射回波能清晰显示缺陷的位置与大小。例如，针对节点处的未熔合缺陷，斜探头的声波能从焊缝侧面入射，捕捉到未熔合界面的反射回波，准确判断缺陷的范围<sup>[1]</sup>。

## 2.2 桁架与支撑结构焊缝：空间曲面的适应检测

桁架与支撑结构的焊缝多为曲面（如圆管相贯焊缝、角钢与钢板的连接焊缝），表面不平整，传统检测方法难以贴合表面。超声波探伤使用的耦合剂（如甘油、水）可填充探头与工件之间的空隙，确保声能有效传入；同时，通过调整探头的扫查角度（如沿曲面切线方向），可实现对复杂曲面的全覆盖检测。例如，圆管相贯焊缝的缺陷多位于焊缝根部，斜探头沿圆管轴向扫查时，能跟随曲面变化调整入射角度，有效发现根部的裂纹缺陷。

## 2.3 厚板焊缝：深层缺陷的穿透检测

建筑钢结构中的厚板焊缝（如厚度超过 50mm 的柱与基础连接焊缝），内部缺陷（如深层裂纹、大尺寸夹渣）难以通过表面检测发现。超声波探伤的高频声波（如 2.5MHz、5MHz）具有较强的穿透能力，可深入焊缝内部 300~500mm，捕捉深层缺陷的回波。例如，厚板对接焊缝中的深层裂纹，其回波会在时基线上显示为延迟出现的峰值，通过计算声程可确定缺陷的深度与长度。

## 3 超声波探伤实操全流程的关键要点

超声波探伤的准确性依赖于严格的实操流程，从检测前准备到结果评定，每个环节都需精准控制：

### 3.1 检测前准备：基础条件的严格把控

检测前准备是确保检测结果可靠的前提，需重点做好四项工作：一是工件表面处理。焊缝表面的氧化皮、油污、焊渣会干扰声波传播，需用砂轮或钢丝刷打磨至表面粗糙度  $R_a \leq 12.5 \mu m$ ，确保探头与工件良好耦合。对于表面凹凸不平的部位，需用腻子填补，避免探头悬空。二是探头选择。根据焊缝类型与厚度选择探头：对接焊缝多用斜探头（如 45°、60°），角焊缝可用直探头或小角度斜探头（如 30°），厚板焊缝选用低频探头（如 1MHz）以提高穿透能力。探头的晶片尺寸需根据焊缝宽度调整，宽焊缝用大晶片探头（如  $\phi 14mm$ ），窄焊缝用小晶片探头（如  $\phi 6mm$ ），避免声束覆盖不全。三是耦合剂选用。耦合剂的作用是填充探头与工件之间

的空隙，减少声能损失。建筑钢结构检测中，常用甘油（黏度大，适合粗糙表面）或水（黏度小，适合光滑表面），禁用机油或化学试剂，避免污染工件<sup>[2]</sup>。四是仪器校准。使用标准试块（如 CSK-IA、CSK-IIIA）校准仪器：通过 CSK-IA 试块校准探头的入射点、折射角与水平定位精度；通过 CSK-IIIA 试块校准灵敏度，确保回波信号的一致性。校准需在每次检测前进行，若环境温度变化超过 10°C，需重新校准。

### 3.2 检测过程：扫查与信号分析的精准执行

检测过程是发现缺陷的核心环节，需控制扫查方式、灵敏度调节与缺陷定位三个关键步骤：一是扫查方式。根据焊缝类型选择扫查路径：平板对接焊缝采用锯齿形扫查（探头沿焊缝方向做往复运动，间距不超过 10mm），确保声束覆盖整个焊缝；曲面焊缝采用网格状扫查（探头沿焊缝横向与纵向移动，形成网格），避免遗漏缺陷；角焊缝采用直线扫查（探头沿焊缝长度方向移动），重点检测根部区域。扫查速度需控制在 100~200mm/s，过快易漏掉缺陷，过慢影响效率。二是灵敏度调节。以对比试块（如 RB-1）的人工缺陷（如  $\phi 2mm$  横孔）为基准，调节仪器增益，使人工缺陷的回波幅度达到满刻度的 80%，确保能检测到最小规定尺寸的缺陷。对于厚板焊缝，需增加增益以补偿声能衰减，但需避免杂波干扰。三是缺陷定位。缺陷定位需结合时基线与声程计算：水平定位通过时基线的刻度，根据声波传播速度（如钢材中声速为 5960m/s）计算缺陷的水平位置；深度定位通过声程差，结合工件厚度，计算缺陷的深度。

### 3.3 检测后处理：结果记录与评定的规范管理

检测完成后，需及时整理结果并评定缺陷等级：一是结果记录。记录内容包括工件编号、焊缝类型、检测设备（探头型号、仪器型号）、耦合剂类型、扫查方式、灵敏度设置、缺陷位置（水平坐标、深度）、缺陷大小（长度、宽度）、回波幅度等。记录需清晰、准确，便于后续追溯<sup>[3]</sup>。二是缺陷评定。根据 GB/T 11345-2013《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》标准，将缺陷分为四个等级：I 级（无缺陷或仅有微小缺陷，合格）、II 级（有少量缺陷，不影响结构安全，合格）、III 级（有较多缺陷，需修复，不合格）、IV 级（有严重缺陷，必须返工，不合格）。评定需结合缺陷的位置、大小与数量：例如，焊缝根部的裂纹缺陷，即使长度较小，也需评定为 III 级或 IV 级，因裂纹易扩展引发断

裂。三是报告出具。检测报告需包含工件基本信息、检测工艺、缺陷情况、评定结论与建议。报告需由持证检测人员签字，加盖检测机构公章，作为钢结构验收的依据。

## 4 超声波探伤的质量控制与改进措施

为确保超声波探伤的准确性，需从人员、仪器、工艺与环境四方面实施质量控制：

### 4.1 人员资质：专业能力的根本保障

检测人员需持有国家认可的 UT 二级或三级证书，熟悉超声波探伤的理论知识（如声波传播原理、缺陷回波特征）与建筑钢结构焊缝的常见缺陷类型。定期开展培训，更新知识与技能，例如学习新型探头的使用、数字化探伤软件的操作。

### 4.2 仪器管理：定期校准与维护

探伤仪与探头需定期校准（每 6 个月一次），确保性能稳定。仪器需存放在干燥、阴凉的环境中，避免受潮或碰撞；探头需避免摔落，定期清洁晶片表面，防止耦合剂残留影响性能。

### 4.3 工艺规程：标准化的操作指南

制定详细的检测工艺规程，明确不同焊缝类型的探头选择、扫查方式、灵敏度设置与评定标准。例如，针对 Q345 钢对接焊缝，规定使用 45° 斜探头，扫查方式为锯齿形，灵敏度以 CSK-IIIA 试块的 φ2mm 横孔为基准，缺陷评定按 GB/T 11345-2013 执行。

### 4.4 环境控制：减少外界干扰

检测环境温度需控制在 5-35℃，湿度不超过 80%，避免温度过高导致探头灵敏度下降，或湿度太大产生杂波。检测区域需远离振动源（如电焊机、空压机），避免振动干扰回波信号。

## 5 超声波探伤技术的未来发展趋势

随着数字化与智能化技术的融入，超声波探伤技术在建筑钢结构检测中的应用将更高效、精准。

### 5.1 数字化超声波探伤：数据处理的升级

传统超声波探伤仪以模拟信号为主，数字化探伤仪将回波信号转化为数字信号，可实现存储、分析与远程传输。例如，采用相控阵超声技术（PAUT），通过控制

多个阵元的激励时间延迟，实现声束的偏转与聚焦，可快速扫描复杂焊缝，提高检测效率；采用 TOFD 技术（time-of-flight diffraction），利用缺陷端点的衍射波检测缺陷，可精准测量缺陷的长度与位置，尤其适合检测裂纹等线性缺陷<sup>[4]</sup>。

### 5.2 智能化分析：AI 辅助缺陷识别

通过机器学习算法，训练模型识别超声波回波信号中的缺陷特征（如裂纹的尖锐回波、夹渣的宽钝回波），实现缺陷的自动识别与分类。智能化分析可减少人为误差，提高检测一致性，尤其适用于大规模工程中的批量检测。

### 5.3 远程检测：物联网技术的应用

结合物联网技术，将探伤仪与云端平台连接，实现检测数据的实时传输与远程分析。检测人员可在现场采集数据，工程师通过云端平台查看回波信号、评定缺陷，无需亲临现场，提高工作效率，尤其适用于偏远地区的大型钢结构项目。

## 6 结论

超声波探伤技术凭借其独特的优势，成为建筑钢结构焊缝质量检测的核心方法。本文从技术原理、应用场景到实操要点展开系统研究，明确了检测前准备、过程执行与结果评定的关键环节，强调了质量控制的重要性。未来，随着数字化、智能化技术的发展，超声波探伤技术将更高效、精准，为建筑钢结构的质量安全提供更有力的保障。工程实践中，需严格遵循操作规程，结合项目特点选择合适的检测工艺，确保焊缝质量符合标准要求，助力建筑钢结构行业的健康发展。

## 参考文献

- [1] 刘堃. 钢结构工程超声波探伤检测的应用 [J]. 科技与企业, 2014(7): 191.
- [2] 张哲语. 超声波探伤技术在钢结构无损检测中的应用 [J]. 冶金管理, 2021(13): 45-46.
- [3] 丁爱香. 超声波无损检测技术在建筑钢结构焊缝检测中的应用 [J]. 建材与装饰, 2019(19): 63-64.
- [4] 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(2): 97-99.