

建筑钢结构焊缝无损检测技术

张翊佳

山东齐鲁石化建设有限公司 山东 淄博 255400

摘要: 本文围绕建筑钢结构焊缝无损检测展开研究,梳理焊缝类型、缺陷成因与检测基础规范,对比超声、射线、磁粉、渗透及相控阵、TOFD 等新型检测技术原理、优劣与适用工况。结合超高层、大跨度场馆工程实例,分析现场检测选型、环境干扰、人员操作等误差来源,提出分工况组合检测、全流程质控优化方案,可为钢结构焊缝探伤施工、质量验收提供标准化技术参考。

关键词: 建筑; 钢结构焊缝; 无损检测技术

引言: 钢结构凭借自重轻、跨度大优势广泛用于高层建筑、大型场馆,焊缝作为核心连接构件,裂纹、未焊透等隐蔽缺陷易诱发结构失效。无损检测可在不损伤构件前提下排查焊缝隐患,现行多类检测技术适配场景差异显著,现场高空、温湿度、板厚等工况易降低检测精度。为此系统梳理各类检测技术特性,剖析工程实操痛点并给出优化对策,助力提升钢结构焊接质量管控水平。

1 建筑钢结构焊缝缺陷及无损检测基础理论

1.1 建筑钢结构焊缝类型与焊接特性

(1) 常用焊缝分类: 对接焊缝传力直接、受力均匀,适用于主要受力构件的等厚或近似等厚连接; 角焊缝构造简单、施工方便,广泛用于搭接与 T 形连接; 塞焊缝与槽焊缝主要用于传递剪力或封闭板件,适用于特殊搭接部位。(2) 建筑钢结构焊接工艺特点: 现场焊接受环境温湿度、高空作业等因素影响显著,质量控制难度大; 工厂预制焊接采用自动化设备,工艺参数稳定、焊接质量可控性高。(3) 不同厚度、不同材质钢结构的检测难点: 厚板焊缝检测受声束聚焦深度限制,薄板检测存在近场区干扰问题; 高强度钢材(如 Q690)对冷裂纹敏感,检测时需重点关注热影响区; 不同材质组合焊接时,声学特性差异影响缺陷检出精度。

1.2 焊缝常见缺陷类型及产生机理

(1) 内部缺陷: 气孔由焊接过程中气体未及时逸出形成,呈球形或椭圆形; 夹渣源于熔渣混入焊缝金属未浮出; 裂纹由焊接应力过大或材料淬硬倾向大引起,形态尖锐; 未焊透为根部母材未完全熔化,呈线性扁平状; 未熔合指焊道与母材或焊道之间未结合,边界清晰平直。(2) 表面缺陷: 咬边因焊接电流过大或运条速度

不当使母材边缘熔化凹陷; 焊瘤由熔池温度过高、铁水外溢形成; 表面裂纹受约束应力或冷却速度过快所致; 飞溅超标由焊接参数匹配不当引起。(3) 环境、工艺、操作因素对焊缝缺陷产生的影响: 环境湿度大易引发气孔与冷裂纹; 焊接热输入过大增加热裂纹风险; 操作角度不当易导致未熔合与咬边,多因素耦合决定最终缺陷分布特征^[1]。

1.3 无损检测技术核心原理与检测准则

(1) 无损检测技术核心特性: 非破坏性保证被检构件可继续服役; 精准性确保微小缺陷有效检出; 可重复性支撑检测结果可靠性验证; 全面性兼顾内部与表面缺陷检测需求。(2) 钢结构焊缝无损检测判定标准与行业规范依据: 主要依据 GB/T29712、GB/T29711、GB/T11345 等超声波检测标准,以及 GB/T3323 系列射线检测标准,同时遵循 JGJ81《建筑钢结构焊接技术规程》相关要求。(3) 焊缝缺陷等级划分与工程验收合格判定准则: 缺陷按尺寸、数量、间距综合评定为 I、II、III 级; I 级最严、III 级最松,工程验收时一、二级焊缝须分别满足对应等级要求,重要部位须 100% 检测且达到 I 级合格标准。

2 建筑钢结构焊缝无损检测技术分析

2.1 超声波检测技术

(1) 技术检测原理: 超声波检测利用高频声波(0.5MHz~15MHz)在焊缝介质中传播时,遇声阻抗不同的缺陷界面产生反射、折射及波形转换特性。纵波经缺陷反射形成回波信号,横波用于斜射法检测;通过分析回波幅度、传播时间及波形特征,结合 DAC 曲线或 AVG 法判定缺陷当量尺寸、埋藏深度及性质。(2) 设备组成与检测操作流程,现场检测参数调试要点: 设备

由超声探伤仪、探头（直探头/斜探头）、耦合剂及标准试块（CSK-IA、CSK-IIA、CSK-IIIA）组成。操作流程包括：检测面清理打磨、仪器水平线性与垂直线性校准、声速及探头入射点标定、DAC 曲线制作、扫查覆盖（扫查速度 $\leq 150\text{mm/s}$ 、相邻扫查线重叠 $\geq 10\%$ ）、缺陷信号记录与评定。现场调试须根据母材厚度选择探头频率（ $2.5\text{MHz} \sim 5\text{MHz}$ ）和 K 值（ $1.0 \sim 3.0$ ），调节检测灵敏度至 $\Phi 3 \times 40$ 横孔当量，实测表面耦合补偿量（通常 $3\text{dB} \sim 6\text{dB}$ ）以消除粗糙度影响，并依据环境温度修正声速参数^[2]。（3）技术优势：检测深度大（单面可达数米），设备轻便、检测成本低，无辐射危害，对未熔合、未焊透等面积型缺陷检出率高，适用于平板、管件及复杂空间节点等多类型焊缝。（4）技术局限：对薄壁焊缝（ $< 8\text{mm}$ ）因近场区盲区影响显著，表面微小缺陷（如微裂纹、咬边）检出困难；缺陷定性及定量精度依赖操作人员波形判读经验，缺乏直观图像记录，检测结果可追溯性相对较弱。

2.2 射线检测技术

（1）X 射线、 γ 射线检测技术原理与成像机制：X 射线和 γ 射线穿透焊缝时，因缺陷区域（气孔、夹渣、裂纹等）与母材密度差异导致透射强度不同，缺陷处吸收射线量少于致密金属，在胶片上形成黑度差异（气孔呈圆形黑斑、裂纹呈黑色细线），通过底片黑度分布与几何投影关系精准判定缺陷位置、形态及尺寸。（2）检测工艺流程、防护措施及现场施工适配要求：工艺流程包括检测部位标记、射线源布置（焦距通常 $600\text{mm} \sim 900\text{mm}$ ）、胶片装夹（使用铅增感屏）、曝光参数（管电压/管电流/时间）选定、暗室处理及底片评定（黑度 ≥ 2.0 、像质计灵敏度达标）。现场须设置控制区与监督区并配备铅屏蔽防护，个人剂量监测与安全距离符合 GB18871 标准； γ 射线源（如 Ir-192、Se-75）适用于野外现场及高空作业，X 射线机更适合工厂预制固定检测^[3]。（3）技术优势：检测图像直观清晰，缺陷定位精准（精度 $\pm 1\text{mm}$ ），可永久留存底片作为质量追溯依据，对气孔、夹渣等体积型缺陷检出灵敏度高且定性准确，验收判据明确。（4）技术局限：存在电离辐射危害，检测作业须严格执行防护管理，检测成本高（设备投入及胶片耗材）、效率偏低；对厚壁钢结构（ $> 100\text{mm}$ ）穿透能力受限，对裂纹类面积型缺陷检出率受透照角度影响明显，且难以检测近表面缺陷。

2.3 磁粉与渗透检测技术

（1）磁粉检测原理：铁磁材料（碳钢、低合金钢）磁化后，缺陷处（表面及近表面深度 $\leq 2\text{mm}$ ）磁力线逸

出形成漏磁场吸附磁粉，在合适光照下形成磁痕显示缺陷位置与形状；采用连续法或剩磁法检测，灵敏度可检出宽度 0.01mm 级表面裂纹。（2）渗透检测原理：利用毛细管渗透作用将渗透液渗入焊缝表面开口缺陷，经清洗去除多余渗透液后施加显像剂，通过反向毛细管作用吸出渗液，在显像剂层形成放大缺陷显示；适用于各类钢材及有色金属，不受材料磁性限制。（3）两种技术的操作要点、适用场景及优缺点对比：磁粉检测操作简便、检测速度快，但仅限铁磁性材料且需断电后观察；渗透检测适用材质广，但对表面清洁度要求极高、工序时长（渗透时间 $10\text{min} \sim 30\text{min}$ ）。前者适用于铁磁性材料焊缝表面及近表面缺陷检测，后者适用于奥氏体不锈钢、铝合金及复杂形状焊缝表面开口缺陷检测。

2.4 新型无损检测技术

（1）超声波相控阵检测技术：采用多阵元探头（ $16 \sim 256$ 阵元）通过电子延迟控制声束偏转与聚焦，可对复杂焊缝截面进行扇形扫查（S 扫）和线性扫描，成像清晰、检测数据可存储，对 T 型接头及管节点等复杂焊缝缺陷精准定位能力显著优于常规超声。（2）红外热成像检测技术：基于主动或被动热激励方式，通过红外热像仪采集焊缝表面温度场分布，缺陷区域因热扩散异常形成热图像差异，实现非接触式快速扫描检测，适用于大面积钢结构焊缝批量筛查及在役桥梁、场馆定期巡检。（3）激光全息检测技术：利用激光干涉原理记录焊缝表面微小变形（精度可达微米级），通过全息图像分析识别缺陷区域，适用于薄板焊缝、复合材料结构及压力容器的新型工程应用场景，具有全场测量、非接触、高灵敏度的技术优势。（4）衍射时差法超声检测技术：基于缺陷端点衍射波传播时间差对缺陷高度进行精确定量，不受缺陷取向影响，配合 TOFD 扫查成像能够对厚板焊缝内部缺陷进行高效深度定位与尺寸测定。

3 建筑钢结构焊缝无损检测技术工程应用问题与优化策略

3.1 不同工况下检测技术选型原则

（1）基于焊缝厚度、缺陷类型的检测技术选型标准：薄壁焊缝（ $< 8\text{mm}$ ）优先采用射线检测或相控阵超声以规避近场区盲区；中厚板（ $8\text{mm} \sim 100\text{mm}$ ）首选超声检测，对未熔合、未焊透等面积型缺陷检出率高；厚壁焊缝（ $> 100\text{mm}$ ）选用 γ 射线或 TOFD 技术。气孔、夹渣类体积型缺陷优先选用射线检测；裂纹类缺陷采用超声或磁粉检测并实施多角度扫查^[4]。（2）基于施工场景的检测方案适配策略：高空作业选用轻便、电池供电的数字超声仪或磁粉探伤仪；露天作业强光环境下射线

底片须加遮光罩,超声耦合剂选用防冻型或高黏度型;潮湿环境须强化仪器绝缘保护,焊缝表面干燥处理后方可检测;低温条件下($<-5^{\circ}\text{C}$)选用耐低温耦合剂并对检测区域预热。(3)新建钢结构与老旧在役钢结构的检测技术差异化选型:新建钢结构表面条件良好,可综合选用超声、射线、磁粉等多种方法全面检测。老旧在役钢结构受涂层覆盖及锈蚀影响,优先选用穿透能力强且无需大面积清理的超声检测;对表面开裂隐患采用磁粉或渗透检测(局部除漆);对长期服役结构增加相控阵超声或 TOFD 技术进行缺陷高度精确定量。

3.2 现场检测常见问题及误差成因分析

(1)设备校准不当、参数设置不合理导致的检测误差:仪器线性超差使缺陷定位定量产生偏差,垂直线性误差超过 $\pm 5\%$ 时缺陷当量评定偏差可达 $2\text{dB}\sim 4\text{dB}$;滤波、增益等参数偏离实际工况亦引入附加误差。(2)现场环境干扰、焊缝表面处理不达标引发的检测偏差:电磁干扰使超声信号出现杂波降低信噪比;焊缝表面粗糙或氧化皮未清除导致声能衰减增加且耦合不良,缺陷回波可能湮没于噪声中。(3)操作人员专业能力不足、判定标准把控不准造成的结果偏差:对缺陷波形特征辨识不足易误判或漏判;对标准中等级评定界限理解不一致,同一缺陷评定差异可达一个等级。

3.3 检测技术优化与质量控制策略

(1)优化检测工艺流程:划分为前期准备(图纸审查、检测面预处理)、现场检测(仪器调试、灵敏度设定、扫查实施)和结果判定(缺陷评定、报告出具)三阶段,每阶段设定质量控制点并实施二级复核制度。(2)构建组合式无损检测方案:一级焊缝采用“超声全覆盖+射线抽检”组合;复杂节点采用“相控阵超声成像+磁粉/渗透表面检测”组合;厚壁焊缝采用“TOFD+常规超声”联合检测,实现缺陷高度精确定量与定性互为印证。(3)强化质量管控体系:检测人员持证上岗并定期参加能力验证比对;设备管理实行“日校准、周比对、月检定”制度^[5]。

3.4 工程应用案例分析

(1)高层建筑钢结构焊缝检测实例:某超高层核心筒与外框柱节点全熔透对接焊缝,厚度 $60\text{mm}\sim 80\text{mm}$,采用超声为主、射线抽检组合方案,检测前严格打磨表面并实测耦合补偿,梁柱焊缝I级合格率达 100% 。(2)大跨度钢结构场馆焊缝缺陷检测与隐患整改案例:某体育中心屋面钢结构焊缝数量多、高空作业面达 27m 。检测团队采用数字超声仪严格按GB/T29712标准实施全覆盖扫查,精准检出超标缺陷并标注定位后反馈施工方返修,复检合格后方进入下一工序,确保了改造工程质量。(3)案例总结:复杂工况下无损检测技术应用经验与改进方向为:技术选型须因地制宜,厚板高层优先超声、高空场馆选用便携设备;检测前表面处理与过程控制是核心;推广相控阵与TOFD成像技术实现数据化检测,推进爬壁机器人应用,建立多技术融合方案。

结束语

综上,建筑钢结构焊缝检测需依据板厚、工况、焊缝等级组合选用无损检测技术,常规检测与相控阵、TOFD新技术融合可兼顾缺陷定性与精确定量。现场误差多源于设备校准、表面处理及人员能力,落实分级质控与二级复核可有效降低漏检误判。后续可推进自动化爬壁探伤、智能成像识别技术落地,持续完善多场景标准化检测体系,筑牢钢结构工程安全底线。

参考文献

- [1] 高峰.建筑钢结构焊缝检测中的超声波无损检测技术应用[J].城市开发,2025,26(04):162-164.
- [2] 吴朝阳,韩宝,于征.超声波技术在建筑钢结构对接焊缝缺陷检测中的应用[J].工程建设与设计,2024,31(15):206-208.
- [3] 韦智.浅议无损检测技术在钢结构建筑工程检测中的应用[J].中国建筑装饰装修,2024,12(13):82-86.
- [4] 李传瑞.超声波无损检测技术在建筑钢结构焊缝检测中的应用[J].新材料·新装饰,2022,19(7):148-150.
- [5] 刘文超.无损检测技术在建筑工程检测中的应用浅析——以某钢结构厂房工程为例[J].房地产世界,2022,24(12):90-97.