

钢结构桥梁制造中的焊接质量控制与检测技术

邓定付

身份证号: 420982197909206013

DOI:10.61369/ETQM.2025090019

摘 要： 钢结构桥梁的焊接质量直接影响其结构安全与耐久性，当前研究聚焦工艺参数优化、缺陷机理分析及智能化检测技术应用。通过数值模拟与实验验证协同调控电流、电压等参数，结合超声波、相控阵超声（PAUT）等多技术融合检测，显著提升气孔、裂纹等缺陷识别精度。基于《钢结构焊接规范（2025）》要求，构建涵盖设计、施工、验收的全流程质量管理体系，集成物联网动态监控与PDCA持续改进机制，推动焊接工艺标准化与人员技能认证规范化。未来需突破高成本检测设备环境适应性局限，强化数字化平台与人工智能算法的协同创新。

关 键 词： 钢结构桥梁；焊接质量控制；无损检测技术

Welding Quality Control and Inspection Technology in Steel Structure Bridge Fabrication

Deng Dingfu

ID: 420982197909206013

Abstract： The welding quality of steel bridges directly affects their structural safety and durability, and the current research focuses on the optimisation of process parameters, the analysis of defect mechanisms and the application of intelligent detection technology. Through numerical simulation and experimental verification of the synergistic regulation of current, voltage and other parameters, combined with ultrasonic, phased array ultrasound (PAUT) and other multi-technology fusion detection, significantly improve the accuracy of identification of defects such as porosity, cracks and so on. Based on the requirements of "Steel Structure Welding Code (2025)", build a whole-process quality management system covering design, construction and acceptance, integrate IOT dynamic monitoring and PDCA continuous improvement mechanism, and promote the standardisation of welding process and personnel skills certification. In the future, it is necessary to break through the limitations of the environmental adaptability of high-cost testing equipment, and strengthen the digital platform and the synergistic innovation of artificial intelligence algorithms.

Keywords： steel bridge; welding quality control; non-destructive testing technology

引言

钢结构桥梁作为现代交通基础设施的核心承载单元，其焊接质量直接决定了桥梁的力学性能与服役寿命。随着大跨度、高负荷桥梁工程的增多，焊接接头的复杂性及服役环境严苛性显著提升，传统质量控制方法面临气孔、裂纹等缺陷检出率不足、工艺参数动态调控滞后等挑战。近年来，政策层面持续强化钢结构焊接标准化建设，如《钢结构焊接规范（2025）》明确要求采用全流程质量管理框架，并强调焊接工艺评定（WPS/PQR）与无损检测技术的协同应用。同时，2025年新修订的《钢结构工程施工质量验收规范》进一步细化焊缝尺寸偏差与内部缺陷的验收标准，推动超声波、相控阵超声检测（PAUT）等技术的普及。在此背景下，焊接质量控制体系逐步向智能化与数字化方向演进，例如基于物联网的焊接参数动态监控系统与数字孪生技术的集成，可实现工艺自适应调整与缺陷预测。本文旨在系统探讨焊接工艺优化、缺陷机理、检测技术革新及管理体系构建等关键问题，为提升钢结构桥梁焊接质量提供理论支撑与实践路径。

一、焊接工艺参数对焊接质量的影响

（一）焊接工艺参数的关键性

焊接工艺参数是决定焊缝成形质量的核心变量^[1]，其物理作用机理直接影响焊缝的微观组织与宏观性能。电流强度作为主要能量输入参数，通过调节电弧热源密度控制熔池深度与宽度：电流过高易导致熔深过大、热影响区晶粒粗化，增加裂纹敏感性；电流不足则可能引发未熔合缺陷。电压与电弧长度呈正相关，影响熔滴过渡稳定性及熔池表面张力，电压过高时易形成飞溅与气孔，电压不足则导致电弧不稳定，造成焊缝表面凹凸不平。焊接速度直接关联热输入量，速度过快时熔池冷却速率加快，可能引发淬硬组织与残余应力集中；速度过慢则导致热输入过量，加剧母材变形与晶界偏析^[2]。三者相互制约，需基于材料特性与接头形式实现动态平衡，以保障焊缝致密性、力学性能及抗疲劳能力。

（二）工艺参数优化方法

焊接工艺参数的优化需结合数值模拟与实验验证构建多尺度协同调控体系^[4]。数值模拟技术通过有限元分析（FEA）或计算流体力学（CFD）模型，可精准预测不同参数组合下的温度场、应力场分布及熔池流动行为，揭示热循环过程对微观组织演变的影响规律^[3]。例如，基于热-力耦合模型可量化焊接速度与冷却速率对残余应力的贡献度，为抑制变形提供理论依据。实验验证则通过正交试验设计或响应曲面法，系统分析参数交互作用对焊缝成形质量的影响权重，结合金相观察、硬度测试及拉伸试验获取实际性能数据。通过模拟结果与实验数据的迭代修正，可建立参数优化数据库，并开发自适应控制算法，实现焊接过程的动态闭环调控。该策略已在厚板多层焊与异种钢焊接中成功应用，显著降低返修率并提升接头服役寿命。

二、常见焊接缺陷类型及成因分析

（一）内部缺陷分析

焊接内部缺陷的成因与材料特性、工艺条件及环境因素密切相关。气孔的形成主要归因于熔池内气体逸出受阻，氢、氧等气体在快速凝固过程中滞留，其来源包括焊材受潮、保护气体纯度不足或环境湿度过高。裂纹可分为热裂纹与冷裂纹：热裂纹由低熔点共晶物在晶界处偏析引发，常见于硫、磷含量较高的钢材^[5]；冷裂纹则与氢致脆性（HIC）及残余应力叠加相关，尤其在厚板焊接或预热不足时显著^[6]。夹渣多因熔池流动性差或焊道清理不彻底，熔渣未能充分上浮至表面，焊材中非金属夹杂物含量超标或焊接速度过快进一步加剧此类缺陷。

（二）外部缺陷分析

外部缺陷主要由工艺参数失配或操作规范性不足导致。咬边表现为母材与焊缝交界处的凹陷，源于电弧对母材的过度熔化，电流过高、焊枪角度偏离或焊接速度过慢是典型诱因。未熔合指焊缝与母材间未完全熔接，多发生于多层焊的层间区域，焊接热输入不足、坡口设计不合理或焊枪行进轨迹偏移均可能引发该缺陷。焊缝尺寸偏差包括余高不足、宽度不均等，与送丝速度波动、电弧电压不稳定或操作者技能水平直接相关。此类缺陷不仅降低结构承载能力，还可能成为应力集中源，加速疲劳失效

进程。

三、焊接质量检测技术的分类与应用

（一）传统检测技术

1. 目视检测与渗透检测的适用场景与局限性

目视检测作为最基础的表面缺陷筛查手段，通过直接观察或借助放大工具识别焊缝表面的裂纹、咬边及成形不良，适用于施工初期的快速质量评估，但其有效性受限于检测人员经验与环境光照条件^[7]。渗透检测通过毛细作用将显影剂吸附至表面开口缺陷中，可检测微米级裂纹与气孔，尤其适用于非磁性材料或复杂曲面结构，但对内部缺陷无响应，且检测前需彻底清洁表面油污与氧化层^[8]。两者的共同局限性在于仅能评估表面或近表面缺陷，对焊接接头深层质量缺乏定量分析能力。

2. 超声波检测在内部缺陷识别中的应用实例

超声波检测利用高频声波在材料中的反射与衰减特性，可精准定位气孔、夹渣及裂纹等内部缺陷的尺寸与埋深^[9]。在钢结构桥梁焊接中，纵波斜探头常用于检测厚板对接焊缝的未熔合缺陷，横波探头则适用于角焊缝内部裂纹的识别^[10]。通过调整探头频率与入射角度，可优化缺陷分辨力，例如采用2.5MHz探头检测20mm厚钢板时，灵敏度可达Φ1mm平底孔当量。实际工程中，结合B扫描成像技术可重构缺陷三维分布，为返修决策提供可视化依据，但其准确性受耦合剂均匀性、材料晶粒度及操作者判读水平影响。

（二）先进无损检测技术

1. 射线检测（RT）与相控阵超声检测（PAUT）的技术对比

射线检测通过X射线或γ射线穿透焊缝生成二维投影图像，对体积型缺陷（如气孔、夹渣）的检出率较高，且结果直观易存档，但存在辐射防护成本高、对裂纹类面状缺陷灵敏度不足的缺陷。相控阵超声检测采用多阵元探头动态聚焦声束，可实现焊缝截面实时成像与缺陷三维定位，尤其适用于异形接头与狭窄空间检测，其多角度扫描能力显著提升未熔合与微小裂纹的检出概率。两者在检测效率上呈现互补性：射线检测更适用于批量焊缝的快速抽检，而PAUT在复杂工况下的精细化检测中更具优势。

2. 红外热像检测在焊接残余应力分析中的潜力

红外热像检测通过捕捉焊接过程中材料表面的温度场分布，间接表征热循环引起的残余应力状态。焊接接头冷却时，高应力区域因热弹性效应呈现温度异常，通过红外热像仪可非接触式获取全场温度数据，结合热-力学模型反演应力分布。该技术在识别焊接变形敏感区与评估后热处理效果方面展现出潜力，例如在桥梁钢箱梁焊缝中，红外热像可快速定位应力集中区域，指导局部锤击或加热消应力工艺。然而，其精度受表面发射率稳定性与环境热噪声干扰，需与数字图像相关（DIC）或X射线衍射法交叉验证以提升可靠性。

四、钢结构桥梁焊接质量控制体系的构建

（一）质量管理体系的建立

1. 焊接质量全流程管理框架

焊接质量全流程管理需贯穿桥梁钢结构的设计、制造与验收

阶段。设计阶段需明确接头形式、坡口尺寸及材料匹配性，通过有限元仿真验证焊缝受力合理性，并制定焊接工艺预研方案。施工阶段实施动态监控，包括焊前环境温度湿度控制、焊材烘干管理及工艺参数实时记录，采用数字孪生技术模拟焊接变形趋势以指导工艺调整。验收阶段依据规范对焊缝进行分级检测，结合无损检测报告与力学性能测试数据形成质量档案，确保缺陷闭合率达标。全流程管理通过信息化平台整合设计参数、施工记录与检测结果，实现质量溯源与责任划分。

2. 基于 PDCA 循环的持续改进机制

PDCA 循环通过计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）、处理（Act）四阶段驱动焊接质量持续优化。计划阶段基于历史缺陷数据与工艺短板制定改进目标，如降低气孔率或提升检测效率；执行阶段通过工艺试验与参数优化落实改进措施；检查阶段借助统计过程控制（SPC）分析质量波动规律，识别系统性偏差；处理阶段将有效方案固化为标准作业程序（SOP），并更新培训教材与检测规程。该机制依托大数据分析工具，实现质量问题的快速闭环，推动管理体系从合规性向卓越性演进。

（二）焊接工艺标准化

1. 焊接工艺评定（WPS/PQR）的关键要求

焊接工艺评定（WPS/PQR）是标准化作业的核心依据，需严格遵循 AWS D1.1 或 ISO 15614 标准。评定试件的母材、焊材及坡口形式须与实际工程一致，覆盖全位置焊接工况。试验项目包括宏观金相检验、弯曲试验及冲击韧性测试，重点关注热影响区硬度梯度与缺陷容限。评定报告需明确参数允许波动范围，如电流 $\pm 5\%$ 、层温 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ，并通过回归分析验证参数组合的鲁棒性。未通过评定的工艺需重新设计或引入焊后热处理补偿措施。

2. 焊接参数动态监控与实时反馈技术

动态监控系统通过高精度传感器实时采集电流、电压、送丝速度及层间温度数据，结合物联网（IoT）技术传输至中央处理器。算法基于工艺评定数据库与机器学习模型，对偏离预设阈值的参数发出预警，并自动调整焊接电源输出特性。例如，电弧跟踪系统通过激光视觉实时修正焊枪位姿，避免未熔合缺陷；红外测温模块可动态调控预热温度，抑制冷裂纹产生。该技术将人工经验转化为数字化规则，显著提升工艺稳定性与缺陷预防能力。

（三）人员技能与培训机制

1. 焊工资质认证与技能考核标准

焊工资质认证需依据 ISO 9606 或 EN 287 标准分级实施，考

核内容包括平、立、横、仰四种位置的板对接与管对接操作。理论测试涵盖材料特性、缺陷成因及安全规范，实操考核采用盲样检测与破坏性试验结合，如射线检测合格率 $\geq 95\%$ 、弯曲试样无开裂。资质证书需定期复审，并针对特殊材料（如高强钢、耐候钢）增设专项认证。焊工技能档案纳入企业管理系统，确保人员能力与工程难度匹配，降低人为失误风险。

2. 焊接质量意识教育与典型案例分析

质量意识教育通过定期培训、缺陷图片展及事故案例复盘强化焊工责任认知。培训内容涵盖标准焊缝形貌图谱、常见缺陷的即时自检方法及纠正措施，例如通过调整焊枪角度避免咬边。典型案例分析聚焦高频缺陷的工艺诱因与连锁后果，如某桥梁因层间未熔合导致疲劳裂纹扩展的失效过程。通过虚拟现实（VR）模拟焊接缺陷产生场景，使操作者直观理解参数偏差的影响，促进从“被动遵守”到“主动防控”的行为转变。

五、总结

焊接质量控制与检测技术的研究表明，工艺参数动态调控、缺陷精准识别与全流程管理体系是保障钢结构桥梁服役安全的核心要素。通过数值模拟与实验验证协同优化焊接参数，可有效抑制气孔、裂纹等缺陷的产生；传统检测技术（如超声波、射线检测）与先进无损方法（如相控阵超声、红外热像）的组合应用，显著提升了缺陷检出率与应力评估精度。质量控制体系的构建强调工艺标准化、参数实时监控与人员技能认证的闭环联动，PDCA 循环机制推动质量管理的持续改进。

未来发展方向聚焦于多技术融合与智能化升级：基于物联网的焊接参数动态反馈系统可与数字孪生平台集成，实现工艺自适应调整；人工智能算法嵌入无损检测设备，通过缺陷图像特征库训练模型，提升裂纹自动识别效率；区块链技术应用质量档案管理，确保数据不可篡改与全程追溯。当前技术局限性体现在高精度检测设备的购置与运维成本较高，复杂环境（如高湿度、低温）下传感器稳定性不足，以及跨平台数据融合的兼容性壁垒。改进建议包括开发低成本嵌入式传感模块、增强检测算法的环境抗干扰能力，并建立行业级焊接质量数据库，推动检测标准与工艺规范的协同优化。

参考文献

[1] 郑健. 公路桥梁钢结构焊接质量控制与检验 [J]. 城市建设理论研究：电子版，2011(34).
[2] 周立红, ZHOU, Li-hong, 等. 浅析大型钢结构焊接变形控制技术 [J]. 工程建设与设计, 2017(5):4.
[3] 沈高飞, 汤泓. 公路桥梁钢结构焊接结构可靠性控制及其检验 [J]. 中国建筑金属结构, 2013(9X):1.
[4] 徐小宝, 张志伟, 刘晓斌, 等. 超大跨度钢结构桥梁焊接质量控制技术 [J]. 焊接技术, 2015(9):2.
[5] 郭自创. 桥梁钢结构施工质量控制措施 [J]. 引文版：工程技术, 2016, 000(006):92-92.
[6] 高伟, 陈永松, 罗剑. 关于高速公路钢结构桥梁焊缝的无损检测应用探讨 [J]. 工程与建设, 2023, 37(1):209-213.
[7] 李淑义, 张吉海. 加强钢结构桥梁焊接质量控制的策略 [J]. 汽车博览, 2022(27):239-242.
[8] 王志强. 钢结构桥梁焊缝超声波无损检测质量控制研究 [J]. 2021.
[9] 姜松波, 李拯. 钢结构桥梁施工质量控制研究 [J]. 冶金丛刊, 2021, 006(017):152-153.
[10] 文正辉, 王茂欣. 钢结构箱型桥梁焊接质量控制技术 [J]. 建材发展导向 (下), 2016.