

市政工程钢结构桥梁现场焊接质量管控研究

范瑜龙

(上海市工程建设咨询监理有限公司, 上海市 200433)

摘要: 鉴于市政现场焊接受空间、环境及焊工水平等影响,传统“经验型”管理模式存在焊接参数不可视与环境感知滞后等问题,为保证钢结构结构安全,依托某市政高架桥梁工程,针对钢箱梁现场焊接体量大、周期长、环境多变的特点,系统识别人、材、机、法、环等关键控制指标。通过利用物联网技术和 BIM 平台,实现了对焊接全过程要素的实时监控与闭环管理。实践表明,该模式有效解决了传统管理中存在的弊端,项目焊缝无损检测一次合格率在 95% 以上,有效证明了数字化管控手段在改善焊接质量上具有明显优势,其经验与模式可供类似市政钢结构的现场焊接质量控制借鉴。

关键词: 桥梁工程;现场焊接;质量管控;数字化管控

中图分类号: TU711

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0398-05

Research on Quality Control of On-site Welding for Steel Structure Bridges in Municipal Engineering

FAN Yulong

(Shanghai Engineering Construction Consultation and Supervisor Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: Given that on-site welding in municipal areas is affected by factors such as space, environment and welders' skills, the traditional “experience-based” management model has problems such as invisible welding parameters and lagging environmental perception. To ensure the safety of steel structures, relying on a municipal elevated bridge project, and aiming at the characteristics of large volume, long cycle and variable environment of on-site welding of steel box girders, the key control indicators such as personnel, materials, machinery, methods and environment are systematically identified. By leveraging IoT technology and BIM platforms, the real-time monitoring and closed-loop management of welding process elements are achieved. The practice shows that this model effectively addresses the shortcomings of traditional management, and the first-time pass rate of non-destructive testing of project welds is over 95%, which effectively proves that digital control measures have obvious advantages in improving welding quality. Its experience and model can be used as a reference for on-site welding quality control of similar municipal steel structures.

Keywords: bridge engineering; on-site welding; quality control; digital control

0 引言

近年来,钢结构桥梁凭借其显著的技术优势,在市政工程中应用日益广泛,特别是在城市中心区、交通繁忙路段等对工期和环保要求严格的场景。然而,钢结构桥梁的结构安全性与耐久性依赖于构件间的焊接质量,焊接质量不仅影响构件的传力路径,更直接关系到桥梁的抗疲劳性能、抗震能力和服役寿命^[1]。

目前,国内外学者已针对钢结构焊接技术开展了大量研究,涵盖焊接材料优化、工艺参数模拟、无

损检测技术等领域,但现有成果多聚焦于工厂预制阶段的稳定工况下的焊接作业,对市政工程现场焊接的特殊性关注不足^[2]。市政桥梁现场焊接常面临作业空间受限、环境温湿度波动大、焊后检测条件苛刻等问题,导致现场焊接质量往往成为质量控制的薄弱环节,传统“经验型”管理模式及事后抽检机制难以满足精细化质控需求。为突破这一局限,智能监测技术正在被引入现场焊接管控,如彭程构建了基于物联网技术对焊接三要素进行采集并可视化处理的系统^[3]。周海峰等利用智能传感器实时采集焊接过程中的温度、电流、电压等关键参数,并结合算法对焊接缺陷进行识别和分类,该方法有效的提升了焊接质量合格率^[4]。

因此,探索利用数字化手段解决现场焊接质控

收稿日期: 2026-05-13

作者简介: 范瑜龙(1976—),男,本科,高级工程师,从事工程咨询工作。

难题,实现从“人防”向“技防”的转变,对提升工程质量、保障运营安全具有重要的理论价值与工程意义。本文基于市政工程特点,结合典型项目实践,从人、材、机、法、环等要素探讨借助数字化技术实现实时动态监控与闭环管理,为同类工程提供参考。

1 桥梁工程现场焊接案例概况

1.1 桥梁工程基本信息

某大型市政桥梁工程包括高架桥主线、上下匝道桥以及相关附属结构工程,高架桥长度约 2.5 km。主线高架桥采用小箱梁、连续钢箱梁、钢-混凝土组合梁形式组成,整个项目钢结构总量约 2.8 万 t。钢箱梁采用整体式钢梁断面,单箱四室,梁高 2 m,桥宽 25.1 m。腹板间距 4.6、5.0 m,中腹板竖直,边腹板采用 1:4 斜腹板,箱梁顶宽 25.1 m,底宽 18.41 m,两侧悬臂长 2.95 m,底板水平,钢材材质为 Q345qD。

1.2 现场焊接任务概述

该项目钢箱梁采用一体化整幅单箱四室多腹板断面设计,现场焊接管控的核心聚焦于顶板、底板及腹板的纵向对接环缝和横向对接缝,以及横隔板与加劲肋的角接焊缝,这些关键部位的质量直接影响桥梁的疲劳寿命与长期服役安全。

项目面临的最大挑战在于超长的施工周期与庞大的焊接体量,现场焊接总里程逾 22 km,焊缝数量达数千条,焊接时间跨越春、夏、秋、冬四个季节,且钢梁结构存在显著的线性温度变形特性,焊接作业必须应对四季温差带来的热胀冷缩效应以及日温差带来的温度应力。这种时间跨度长、环境因素多变及结构几何线性变化显著的复合工况,对施工组织统筹、焊接工艺在全气候下的稳定性保持,以及全过程质量验收体系均提出了极为严苛的技术与管理挑战。加之作业空间受限、监测手段匮乏等传统难题,使得常规的经验型管理模式在本项目中难以适用,迫切需要通过数字化手段实现对人、材、机、法、环等全要素的实时动态监控与闭环管理。

2 焊接质量管控方法比选

结合前文对市政钢结构桥梁现场焊接特殊性和超长周期、大体量、工况多变等典型项目特征的分析,本章将重点围绕现场焊接质量的关键要素展开。通过识别关键控制指标,系统比较传统经验型管理与数字化管控在“人、材、机、法、环”等方面的特点与效果差异,从而为建立精细化质量管理体系提供理

论支撑和技术路径^[5]。

2.1 关键质量控制指标识别

现场焊接质量的波动性主要受“人、材、机、法、环”五大要素的交叉影响,本文将从以上五个维度分析现场焊接质量控制的关键指标并对焊接外观质量检查进行分析。

2.1.1 人员

焊接从业人员是焊接实施的直接或间接参与者,是焊接质量控制中的重要组成部分,焊接人员的专业素质是焊接质量的关键因素^[6]。然而在管理实践中,往往只重视焊工的资格,而忽略了焊接检验人员、无损检验人员和焊接热处理人员的资格审查及技能水平考察,给整个工程质量埋下安全隐患。因此,焊接从业人员资质合格、技能水平是人员因素中的关键指标。

2.1.2 材料

焊接材料是影响钢结构焊接质量最直接、最重要的因素之一,其选用、进场检验、储存保管诸环节都必须严格按有关标准及规范执行^[7]。因此焊材的规格、存储及领用发放为材料因素中的关键指标。

2.1.3 机械设备

焊接设备的选型、调试及维护保养都是施工现场焊接作业顺利、可靠进行的基础条件,因此焊接设备的型号及保养是机械设备因素中的关键指标^[8]。

2.1.4 工艺和管理方法

基于本项目周期长及大体量等特点,本文从焊接工艺及焊接质量管理体系两方面考虑“法”。

2.1.5 环境

焊接环境是影响钢结构桥梁现场焊接质量的决定性变量之一,在复杂多变的市政工程施工现场,环境因素常成为质量失控的主要诱因^[9]。空气湿度过高容易导致焊缝氢气孔和冷裂纹,风速过大会吹散保护气体,导致气孔、未熔合的质量问题,低温会急剧增加冷裂纹产生的概率^[10]。因此,温度、湿度和风速是环境因素中的关键指标。

2.1.6 焊缝外观检查

焊缝外观检查是焊接质量控制中最经济且不可或缺的第一道防线,是工艺验证的关键环节,所有焊缝在冷却到环境温度后,应进行 100% 外观检查。通过外观检查可以立即发现焊瘤、咬边、表面气孔等肉眼可见的缺陷,直接反映了焊接参数及操作是否规范,是工艺过程失控的早期警报。

2.2 各指标传统管控方法及局限性

针对上述关键指标,传统的“经验型”管控模式主要依赖于人工巡检、纸质记录及事后检测等方法,其在复杂的工况下暴露出明显的局限性。

2.2.1 人员管理粗放

传统的焊工资质核查主要是进场一次性核验辅以过程中的特殊作业人员资质抽查,难以做到人员资质全过程全覆盖检查及杜绝证件过期或人证不符现象。

2.2.2 材料追溯困难

焊材的进出场记录多为手写或记录简略,未能精准查询到每卷焊材的进出库时间及是否烘焙。

2.2.3 焊接设备管理粗放

传统的焊接设备信息多以纸质或电子表格登记,甚至未做任何管理,设备状态数据实时性不足。

2.2.4 工艺参数不透明和管理筹备不足

传统模式下,焊接参数主要依赖检验员巡检或焊工经验,然而焊接热输入(电流、电压、速度)的微小扰动会显著改变焊缝微观组织与力学性能,例如电流过大易诱发烧穿,速度过快则导致未熔合及成型不良^[1]。以往的钢结构施工专项方案更多的偏向于钢结构吊装安全的管控,缺少对于时空影响下钢结构吊装、焊接顺序对焊接质量的管控。

2.2.4.1 环境感知滞后

传统管理模式中环境数据多采用手持式温湿度计进行抽查收集,无法实时收集昼夜温差及四季交替带来的连续温变数据,导致预热及后缓冷措施与实际需求不符。

2.2.4.2 有限空间内焊缝外观质量检查缺失

传统外观检查主要依赖人工近距离肉眼观察,然而在钢箱梁内部因其空间狭窄、视角受限,检测人员难以检查所有焊缝,导致部分焊缝处于视觉盲区,无法实现外观质量检查的100%全覆盖。

2.3 数字化管控方法及其特点

为解决传统模式的弊端,提高本项目的焊缝质量,本项目采用基于物联网及BIM智能化管理平台的数字化管控模式,通过在关键指标节点部署智能传感设备和数据采集终端,实现对人员设备全过程管理及对焊接全过程的透明化与可视化。

2.3.1 人员考核实名制管理

项目部在焊接作业前,根据《钢结构焊接规范》(GB 50661—2011)第3.0.4条关于钢结构焊接相关人员资格的规定审查焊接从业人员的资质,并在焊接

工作开始前对焊接从业人员进行理论和实操测试,经测试合格后方可进行焊接作业及检查。对于考核合格的人员信息录入到BIM平台并制作胸牌,过程管控中对比人脸、胸牌,并通过胸牌上的二维码查询人员信息。

2.3.2 材料全生命周期追溯

本项目采用FCAW-G焊接方法,使用CE71T-1型号焊丝,焊丝直径1.2 mm,焊材进场检验时核查焊接材料的型号是否和焊接工艺评定中的一致,检查焊材的质量证明文件,再辅以外观检查、抽样检测等手段验证其质量是否符合国家标准。经检查合格的焊丝方准许入库,并为每一卷焊丝贴上二维码,实现焊材从入库、烘焙、领用到施焊全过程扫描溯源。

2.3.3 焊接设备实名制管理

项目部在设备选型时根据工程特点、焊接工艺要求及施工环境条件,合理选择性能稳定、操作简便的焊接设备,并为每一台设备进行编号并张贴二维码,焊工领用时,通过对焊工胸牌二维码及焊接二维码扫描匹配,并将信息同步至BIM平台。

2.3.4 管理体系

工艺参数透明化及基于PDCA循环的焊接质量管理体系:(1)采用数字化焊机,实时记录并传输施焊的电流、电压、速度及焊接时长等参数,并通过和焊接工艺比对,及时示警非规范操作;(2)基于PDCA循环的焊接质量管理体系坚持“风险前置、流程可控、责任闭环”的理念,通过编制专项实施方案,建立从管理层到作业层的全链条质量责任制,具体如图1所示。

2.3.5 环境数据实时采集

布设物联网环境传感器,建立全天候温湿度及风速监测网络,数据实时上传BIM平台,超限自动预警,有效应对四季温差带来的不确定性。

2.3.6 焊缝检查机器人

由于钢箱梁内部作业空间极度受限,部分区域处于视觉盲区,因此采用爬行式焊缝检查机器人对箱室内焊缝进行全覆盖检查与高清录像。该技术不仅有效解决了狭小空间视觉盲区多的问题,还实现了隐蔽工程验收的全过程影像留存,为质量验收提供了直观的影像证据。

2.4 传统方法与数字化方法的比选分析

为直观展示两种模式在应对市政工程钢结构桥梁焊接特殊工况时的差异,对上述关键指标进行系统性比选,结果见表1。

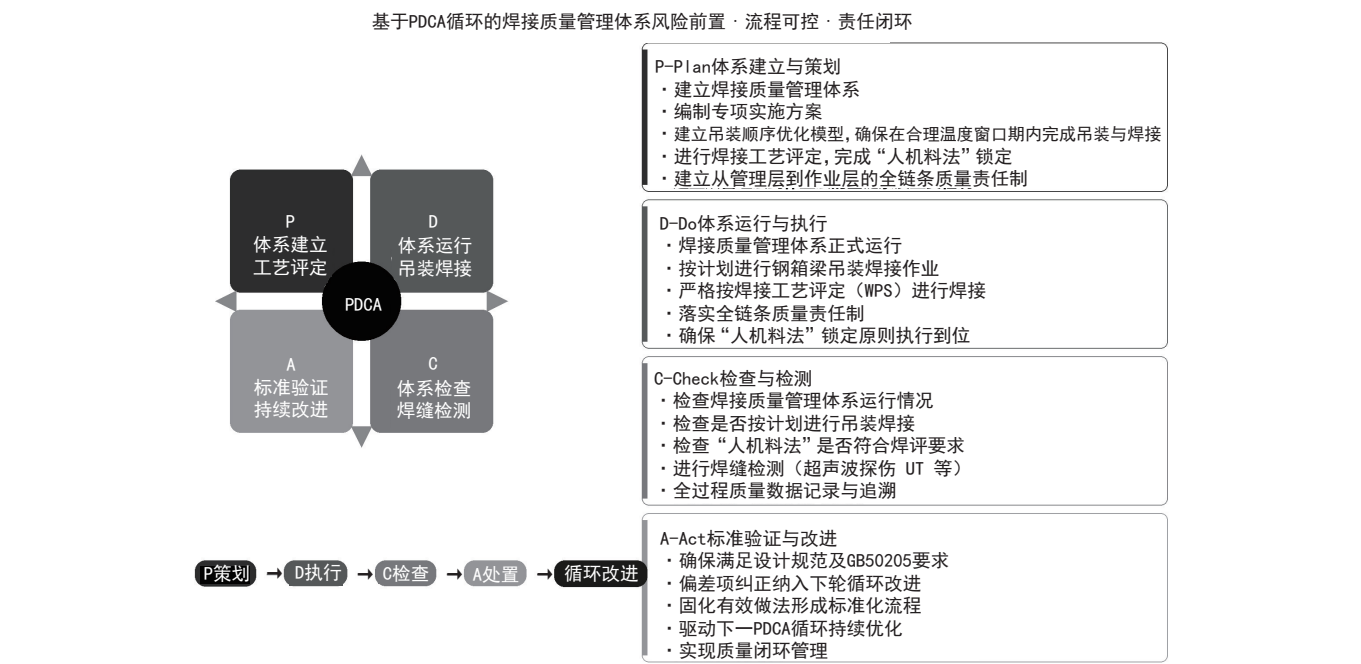


图 1 焊接质量管理体系流程图

表 1 焊接质量管控传统模式与数字化模式对比分析表

因素	关键指标	传统管控方法	数字化管控方法	差异特点
人员	资质、技术水平	进场查验、监理巡查	人员考核、实名制管理、过程复查	由“松”到“严”: 杜绝无证上岗, 保证焊接技术水平
焊材	规格、存储、发放	手工台账记录	二维码扫码流转, 全过程溯源	由“粗”到“细”: 实现精准溯源
设备	焊机的型号及保养	手工台账记录	二维码扫描流转, 状态信息实施更新	由“粗”到“细”: 实现状态实时掌控
工艺及方法	焊接工艺、管理体系	人工调节、纸质记录、事后抽查、偏安全管理	参数实时采集, 异常及时纠偏; “风险前置、流程可控、责任闭环	由“黑”到“白”: 消除工艺黑箱; 由“粗”到“细”: 实现全链条质量管理
环境	温度、湿度、风速	仪器抽查, 经验驱动	实时监测, 超限自动报警	由“点”到“面”: 实现连续覆盖
外观检查	外观	近距离肉眼检查	焊缝检查机器人, 全覆盖检查及高清录像	由“缺”到“全”: 消除视觉盲区, 实现全面覆盖

3 数字化管控方式实施成效

3.1 人员、焊材及焊机的规范化管理

3.1.1 焊接从业人员资质动态管控

本项目在焊接工作开始前对焊接从业人员进行理论和实操测试, 通过测试, 剔除了 6% 技术不达标的焊接从业人员, 通过实名制及过程管控中对比人脸、胸牌及 BIM 平台信息, 识别出多起人证不符事件并及时处理。

3.1.2 焊材全生命周期追溯

利用焊材全生命周期的二维码追溯系统, 管理人员可通过扫码实时查询焊材的领用、出库及回收状态。该系统在例行检查中发挥了重要作用, 通过对现场焊材的随机扫码核查, 识别出多起因管理疏漏导致的“焊材在外过夜”的事件。不仅及时消除了因焊材保管不当可能引发的焊接质量隐患, 也对现

场作业人员形成了强有力的震慑作用, 切实保障了焊材存储环境的合规性。

3.1.3 焊机实时状态管控

本项目对所有焊机实施了唯一编号与二维码绑定管理以实现焊接设备的精细化管理, 通过移动端扫码, 实时更新焊机的日常检查、保养及维修状态。管理人员可随时扫码核查每日作业前是否对设备进行规定的检查与维护, 从而有效的避免了因设备带病作业、仪表失准或电缆老化等隐患导致的焊接质量问题, 确保焊机始终处于良好状态, 从源头上保障焊缝成形的稳定可靠。

3.2 焊接工艺稳定性提升

焊接工艺评定作为贯通理论体系与工程实体、衔接设计规范与现场作业的核心枢纽, 是保障钢结构桥梁焊接质量本质安全与合规性的基石。其核心在于将评定合格的工艺参数 (PQR) 转化为现场可执

行的标准(WPS),旨在确保现场每一道焊缝均为实验室合格试件的“高保真复现”,从而将设计安全性精准落地于现场每一个焊接接头上。在项目实施过程中,项目部对焊接检验人员及焊工进行专门的技术交底,要求焊接时在WPS允许范围内结合环境因素进行微调。并通过实时记录并传输施焊的电流、电压及速度,预热、层间、缓冷温度等参数,消除焊接参数不透明,并通过平台预警,实现了10 min内纠正未按焊接工艺评定进行的违规操作。

3.3 环境监测响应时效显著提高

在焊接处布置移动式雨棚进行防风、防雨处理,并布设物联网环境传感器,建立全天候温湿度及风速监测网络,数据实时上传BIM平台,平台内预设湿度不得大于90%,温度不得低于0℃,风速不得超过2 m/s。超限自动预警,系统发出警报到管理人员处置的平均响应时间不超过10 min,对比传统模式发现滞后有巨大的差异。

3.4 焊缝外观检查全覆盖

传统的外观检查时在焊接完后并冷却至环境温度后借助焊缝检验尺及以目视方式或借助5倍放大镜对焊缝表面进行观察,检验其几何形状、尺寸精度及表面缺陷。然而在箱室内存在区域狭窄,人员不便进入或视野盲区,利用焊接机器人进行焊缝外观录像,以达到焊缝外观100%检查的目的。同时利用焊缝检查机器人结合传统的外观检查方式,有助于实现钢箱梁内外焊缝的外观全覆盖检查与高清录像,实现了隐蔽工程施工过程的全过程影像留痕与可追溯,为质量验收提供了直观的影像证据。

4 结 语

焊接质量是钢结构桥梁安全的“生命线”,本文

针对市政高架桥梁现场焊接质量管控难题,通过深入对比传统经验型管理模式与数字化管控模式在人员、材料、工艺、环境等维度的差异,总结了数字化手段在提升过程透明度与管控精度方面的显著优势。工程实践结果表明,该项目焊缝无损检测一次合格率稳定在95%以上,充分验证了数字化管控模式在复杂工况下的有效性与适用性。该模式通过构建“全过程追溯+生产要素锁定+数字化监测”三位一体的管控体系,为行业提供了可复制、可推广的管理模式。

参考文献:

- [1] 赵俊平. 高架桥钢箱梁焊接工艺及质量控制探讨[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(7): 107-109.
- [2] 范军旗, 王楠, 徐向军. 钢桥现场自动化焊接技术应用分析与展望[J]. 焊接技术, 2025, 54(12): 1-3; 74.
- [3] 彭程, 徐源, 王杰. 基于物联网技术的焊接监测系统[J]. 电子技术与软件工程, 2021(9): 68-70.
- [4] 周海峰, 袁起, 韦超, 等. 智能传感技术在船舶焊接质量监测中的应用[J]. 珠江水运, 2025(18): 88-90.
- [5] 陈铭旭. 提高海上钢结构焊接一次合格率[J]. 机电工程技术, 2021, 50(11): 290-292; 300.
- [6] 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(18): 27.
- [7] 刘梅, 江林成. 高架桥钢结构安装质量监理过程控制[J]. 建筑施工, 2023, 45(5): 886-888.
- [8] 陈思. 北支江过江通道桥梁钢箱梁现场焊接工艺[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(8): 71-75.
- [9] 杜伟华. 大型桥梁钢箱梁工地现场焊接技术与质量控制措施[J]. 智能城市, 2021, 7(10): 143-144.
- [10] 张红云, 陈华. 建筑钢结构现场焊接质量控制[J]. 现代制造技术与装备, 2017(5): 127-128.
- [11] 鲁伟. 建筑钢结构焊接影响因素及焊接质量管控[J]. 工程机械与维修, 2023(4): 278-280.