

钢箱梁桥梁工厂焊接与现场焊接施工缺陷成因与防治 对策研究

孙加启

昆明市盘龙区市政基础设施建设管理处

DOI: 10.32629/ems.v8i9.22148

[摘 要] 桥梁工程建设离不开钢箱梁结构作为核心支撑载体，其施工质量会直接左右城市桥梁、跨江跨海桥梁等构筑物的结构安全、耐久性能以及服役年限，焊接施工是钢箱梁制作安装的核心关键工序，它负责工厂预制成型、现场拼接固结、结构整体成型以及质量隐患排查等工作，该环节既要把控构件成型质量与焊缝达标效果，又要规范现场施工工艺，还要在缺陷出现时快速定位问题根源并落实整改举措，以此全方位保障钢箱梁桥梁工程的施工质量与长期运营稳定性。桥梁焊接施工场景差异较大，工厂预制与现场拼装施工条件不同，作业人员操作水平参差不齐，且现阶段焊接质量管控体系仍存在短板，诸多现实问题致使钢箱梁焊接施工频繁出现质量隐患，比如气孔夹渣多发、未熔合未焊透、焊接裂纹滋生、构件变形超标、外观成型较差等问题，这些情况一方面会降低焊缝力学性能与结构整体性，另一方面会造成桥梁结构应力集中，长期荷载作用下易引发病害扩展，最终给桥梁整体运营安全埋下重大隐患。本研究依托昆明市拓东体育馆应急避难疏散通道项目金汁河 25 米钢箱梁桥梁施工实际工况，全面梳理、辨析工厂焊接与现场焊接施工中的常见缺陷类型及深层成因，通过系统性探究挖掘各类缺陷产生的本质诱因，再从焊接工艺标准化管控、施工环境与操作规范升级、质量管理体系与责任体系完善三大维度，提出针对性、可落地的缺陷防治优化对策。旨在构建全过程、闭环式的钢箱梁焊接质量管控体系，切实提升桥梁焊接施工的规范性、精准度与可靠性，为保障钢箱梁桥梁高品质施工、长效安全运营提供坚实的技术与质量保障。

[关键词] 钢箱梁桥梁；工厂焊接；现场焊接；焊接缺陷；防治对策

引言

桥梁工程对于区域交通联通、路网完善、民生出行、经济发展及基础设施稳固而言是核心基建工程，具备工程量大、施工精度高、质量标准严苛的特点，钢箱梁焊接施工是防范桥梁结构质量风险的核心屏障，也是钢结构桥梁施工管控的核心环节，其质量管控价值不言而喻，焊接质量不仅决定桥梁施工阶段的成型品质，更贯穿桥梁全服役周期，保障结构受力稳定与耐久运行，是把控桥梁工程整体质量的重中之重。近些年，国内路桥基建工程建设规模持续扩大、施工标准不断升级，焊接裂纹、焊缝破损、构件变形、结构耐久性衰减等质量问题频发，严重影响钢箱梁桥梁的结构稳定性与长期安全性。想要彻底规避此类质量病害，就需要全面识别工厂焊接与现场焊接的施工难点与缺陷问题，深度挖掘工艺操作、施工环境、设备材料、管理制度、人员能力等方面的深层诱因，搭建覆盖预制、拼装、焊接、检测、整改的全流程标准

化缺陷防治体系，这是提升钢箱梁桥梁施工质量、强化工程运营安全的必要举措。本文结合钢箱梁桥梁工厂预制、现场拼装的实际施工场景，系统梳理焊接缺陷问题、剖析核心成因、总结优化防治方案，可为同类钢结构桥梁焊接质量管控、缺陷治理提供有效的参考依据。

一、钢箱梁工厂与现场焊接施工常见缺陷及特征差异

钢箱梁焊接施工分为工厂预制焊接与现场拼接焊接两大环节，两类作业场景、施工条件、管控标准差异显著，产生的焊接缺陷在类型、特征、隐蔽性、危害性上均存在明显区别，同时存在部分共性质量缺陷，直接影响焊缝成型质量与桥梁结构整体稳定性。

1.1 工厂焊接缺陷特征，隐蔽性工艺缺陷突出

工厂焊接作业在封闭式标准化车间内开展，施工环境稳定、配套设备齐全、工序流程规范、施工干扰少，整体施工条件可控性强，极少产生显性外观缺陷，缺陷问题多集中在

隐蔽性、工艺性内部缺陷。主要包含内部密集气孔、细微夹渣、层间未熔合、轻微残余变形等隐性问题，此类缺陷无法通过肉眼直接识别，具备极强的隐蔽性，必须依托超声波、射线等无损检测手段才能排查发现。工厂焊接缺陷多为精细化工艺偏差导致，整体外观成型质量较好，无明显焊瘤、咬边、烧穿等表面问题，但内部细微缺陷若未及时检测返修，会长期留存于焊缝内部，持续影响焊缝力学性能，在后期荷载作用下逐步扩展，成为威胁桥梁结构安全的长期性隐患^[1]。

1.2 现场焊接缺陷特征，多样性显性缺陷频发

现场焊接多为露天高空作业，施工环境复杂、外界干扰因素多、作业空间受限、拼装精度有限、施工难度大幅提升，缺陷问题呈现多样化、显性化、高危害的特点，缺陷发生率远高于工厂焊接施工。除气孔、夹渣等共性内部缺陷外，极易出现表面焊接裂纹、焊瘤堆积、焊缝咬边、母材烧穿、焊缝错位、弧坑凹陷等外观缺陷，同时大面积焊接变形、焊缝应力集中、延迟裂纹等结构性高危缺陷频发。受户外风速、空气湿度、环境温度等不可控因素影响，现场焊接焊缝氢含量极易超标，诱发延迟性氢致裂纹，此类缺陷隐蔽性强、后期爆发风险高，对钢箱梁桥梁结构的整体安全性、稳定性威胁极大，是现场焊接质量管控的核心难点。

二、钢箱梁工厂与现场焊接缺陷深层成因剖析

2.1 工厂焊接缺陷核心成因，工艺与管控偏差为主

工厂焊接施工环境稳定，环境因素基本不会诱发质量缺陷，各类质量问题主要源于焊接工艺参数不合理、焊材管控不规范、构件加工装配精度不足、设备运维不到位等人为与工艺管控漏洞。其一，焊接工艺参数匹配不合理，工艺执行不标准。钢箱梁厚板多层多道焊接施工中，焊接电流、电弧电压、焊接速度、热输入量参数配比失衡，是诱发内部缺陷的首要因素。焊接电流偏小、施焊速度过快，会造成熔深不足、层间熔合不彻底，形成层间未熔合缺陷；焊接热输入过大，会导致焊缝金属晶粒粗大、焊缝韧性下降，滋生细微内部裂纹。同时多层焊接层间清渣不彻底，残留杂质无法完全清理，会在焊缝内部形成持续性夹渣缺陷。其二，焊接材料全过程管控存在漏洞。焊条、焊丝、焊剂等核心焊材未按照规范开展防潮储存、高温烘焙、保温存放作业，受潮焊材施焊过程中会分解析出氢气，熔池凝固后形成密集气孔缺陷。

同时施工过程中存在过期焊材、破损焊材投入使用，或焊材与钢箱梁母材材质不匹配等问题，直接导致焊缝力学性能不达标，产生结构性内部质量缺陷。其三，构件加工与装配精度管控不足。钢箱梁板件数控切割、坡口打磨加工精度不达标，坡口角度、坡口间隙、板面平整度不符合设计规范要求，构件拼装错位、间隙过大或过小，都会造成焊接熔深不均、焊缝成型失衡，引发各类焊接缺陷。

2.2 现场焊接缺陷核心成因，环境与现场管控缺失为主

现场焊接缺陷具备随机性、突发性特点，核心诱因集中在恶劣施工环境干扰、现场操作不规范、施工管控体系不完善三大方面，多重因素叠加导致缺陷频发。首先，户外施工环境条件恶劣，干扰性极强。露天焊接作业风速超标，风速大于 2m/s 时会破坏气体保护焊的保护效果，造成焊缝氧化；空气湿度过高、雨雪天气违规施焊，会导致坡口及母材表面受潮，焊缝氢含量超标，诱发气孔缺陷与氢致裂纹。低温施工环境下，母材与焊缝冷却速度过快，焊缝脆性大幅提升，极易产生冷裂纹，严重破坏焊缝结构性能^[2]。其次，现场施焊操作不规范，人为偏差突出。高空作业空间狭窄、施工视野受限、作业姿态受限，焊工难以保持标准施焊状态，极易出现电弧摆动不均、施焊停顿、焊缝收尾不饱满等操作问题，进而形成咬边、弧坑、未焊透等外观缺陷。部分施工人员质量意识薄弱，未严格落实厚板焊前预热、焊后缓冷工艺，温差控制不达标，大幅提升裂纹缺陷产生概率。最后，现场全过程质量管控流于形式。钢箱梁现场拼装精度无法达到工厂标准化标准，构件对接错位、拼接间隙偏差较大，大幅增加焊接施工难度。同时现场工序衔接混乱，焊前坡口清理不彻底，坡口两侧油污、锈蚀、灰尘、水分残留，多层焊接层间清理不到位，多重管控漏洞叠加，持续加剧气孔、夹渣、未熔合等缺陷滋生。

三、钢箱梁工厂与现场焊接缺陷综合防治优化对策

3.1 规范工厂焊接标准化管控，根除隐蔽工艺缺陷

针对工厂焊接隐蔽性、工艺性缺陷特点，以标准化工艺管控、精细化焊材管理、精准化构件加工、全覆盖检测排查为核心，构建闭环管控体系，从源头杜绝内部质量缺陷。第一，优化焊接工艺方案，严格工艺标准化执行。结合钢箱梁母材材质、板件厚度提前完成焊接工艺评定，精准匹配焊接

电流、电压、施焊速度、热输入量等核心参数，编制专项焊接作业指导书。严格落实多层多道焊施工工艺，规范施焊顺序，每层焊接完成后彻底清渣，精准把控层间温度，杜绝层间未熔合、夹渣、细微裂纹等工艺缺陷，保证焊缝内部成型均匀、受力稳定。第二，落实焊材全流程精细化管控。搭建专用恒温防潮库房用于存放各类焊材，严格执行焊条、焊剂高温烘焙、恒温保温、随用随取制度，杜绝焊材受潮变质。施工前严格核对焊材型号规格，保证焊材与母材完全匹配，严禁受潮、过期、破损、不合格焊材投入施工，从源头阻断气孔、裂纹等缺陷诱因^[3]。第三，提升构件加工装配精度，做好成型质量管控。采用数控设备完成板件切割、坡口加工，严格把控坡口角度、平整度、装配间隙，保证构件加工精度符合规范要求。优化工装限位固定体系，焊接前精准定位、牢固固定构件，焊接完成后采用时效处理消除残余应力，有效控制焊接残余变形。构件焊接完工后，采用超声波、射线无损检测开展全覆盖排查，及时发现并彻底返修隐蔽缺陷，杜绝带缺陷构件投入后续施工。

3.2 强化现场焊接专项管控，严控显性多发缺陷

针对现场焊接环境复杂、操作受限、缺陷多发的特点，聚焦环境防护、规范操作、全程监管三大方向，落实专项治理举措，全面降低现场焊接缺陷发生率。一是做好现场施工环境专项防护。所有露天焊接作业统一搭设标准化防风、防雨、防潮防护棚，严格控制作业风速在 2m/s 以内；空气湿度大于 80%、雨雪天气、极端低温天气严禁开展施焊作业。低温施工时提前对母材进行预热处理，焊接完成后及时做好保温缓冷养护，有效规避氢致裂纹、冷裂纹等高危缺陷。二是规范现场焊接标准化操作流程。开展全员岗前技术交底与技能培训，明确现场焊接施工标准与操作规范，严格落实焊前清理制度，彻底清除坡口及两侧 20mm 范围内的油污、锈蚀、水分、灰尘等杂质。优化高空作业施工方案，改善作业视野与施工条件，统一施焊手法，杜绝咬边、焊瘤、未焊透等操作类缺陷。施工前精准调整构件对接偏差，严控拼装精度，最大限度降低焊接施工误差。三是搭建现场三级质量管控体系。落实焊前核查、焊中巡查、焊后复检的全过程管控模式，焊前核查施工环境、焊材状态、构件拼装精度；焊中全程监

督工艺参数执行情况，及时纠正违规施焊行为；焊后同步开展外观检查与无损检测，对排查出的裂纹、气孔、夹渣等缺陷，严格按照规范流程彻底返修，坚决杜绝带缺陷焊缝留存。

3.3 完善长效管控机制，筑牢焊接质量底线

从人员培训、制度建设、技术升级三个维度搭建常态化、长效化质量管控体系，从根本上减少各类焊接缺陷，保障钢箱梁焊接施工质量长效稳定。定期组织焊工技能培训、实操考核与质量警示教育，持续提升施工人员专业操作能力与质量责任意识，杜绝人为操作失误引发的质量缺陷。完善焊接质量管理制度，细化工厂预制、现场拼装、焊接施工、质量检测、缺陷返修各环节岗位职责与管控标准，形成权责清晰、闭环落实的质量管控体系。主动升级施工与检测技术，引入智能化焊接设备、高精度无损检测仪器，替代传统人工操作模式，提升焊接施工的标准化、精细化、智能化水平，全方位降低缺陷发生率，持续提升钢箱梁桥梁焊接施工整体质量。

结语

钢箱梁焊接施工是钢结构桥梁工程质量管控的基础性、关键环节，直接决定桥梁结构安全性、耐久性与服役年限，是保障路桥工程长效稳定运营的核心支撑。现阶段我国钢箱梁桥梁施工标准持续升级，质量监管要求日趋严格，焊接施工质量管控亟需朝着标准化、精细化、规范化、长效化方向全面升级。施工单位需结合两类焊接施工的不同特点，落实全过程差异化管控，优化施工工艺、规范操作流程、严控施工环境、完善管理制度，系统性治理各类焊接缺陷。通过构建全流程闭环质量管控体系，切实提升钢箱梁桥梁焊接施工质量，有效规避结构安全隐患，助力钢结构桥梁工程实现高质量、安全化、可持续发展。

[参考文献]

- [1] 吴映墙. 市政道路桥梁工程中钢箱梁安装施工技术[J]. 四川水泥, 2025, (7): 196-198.
- [2] 王双. 标准化引领下自动化焊接技术在高速桥梁钢箱梁质量提升中的应用[J]. 中国品牌与防伪, 2025, (11): 202-204.
- [3] 曹阳. 钢箱梁桥梁连接处的应力分析及优化设计[J]. 工程建设与设计, 2025, (2): 71-73.