

钢结构焊接全过程质量控制措施研究

张俊 朱林峰

浙江大东吴建筑科技有限公司 浙江 湖州 313000

摘要: 以上海交通大学闵行北校区未来技术策源创新区钢结构工程为研究载体, 该项目涵盖高层钢框架-混凝土核心筒、多层钢框架、高空钢连廊、大跨度圆管桁架, 母材采用 Q355B、Q390B, 板厚 8~50mm, 包含箱型、圆管、T/Y 型相贯、栓钉等复杂焊接节点, 现场焊接受大风、高湿、冬季低温等环境干扰, 高强钢冷裂纹、焊缝未熔合、焊接变形等质量风险突出。本文从焊接事前预控、过程动态管控、焊后检验返修、特殊工况专项质量管控四大维度, 系统构建钢结构全流程质量控制体系, 分别针对人员、原材料、设备、环境、工艺五大核心要素提出标准化管控措施, 总结厚板、圆管相贯、高空、冬雨季焊接质量缺陷预防手段, 可为同类多单体复合型钢结构工程焊接质量管理提供实践依据。

关键词: 钢结构; 现场焊接; 质量控制; 高强厚板; 工艺评定; 缺陷防治

引言

高强钢、大跨度桁架、高空连廊已成为现代钢结构工程常见构造形式, 但 Q355B、Q390B 厚板焊接冷裂纹风险高, 露天高空作业受温湿度、风速影响大, 焊缝缺陷频发。现行规范对焊接施工提出强制要求, 而现场普遍存在管控碎片化、工序管控不严等问题, 现有研究缺少多工况成套管控方案。本文以复合型钢结构项目, 围绕人、机、料、法、环构件焊接闭环质量管控体系, 梳理各环节标准化管控措施与缺陷防治方法, 提升焊缝探伤一次合格率。

1 工程概况

上海交通大学闵行北校区未来技术策源创新区项目坐落于上海市闵行紫竹科学园区, 总建筑面积 140661m², 包含 1# 塔楼 17 层、1# 裙房、2# 楼 5 层、4# 楼 01-02 分塔 4 层、4# 楼 03 分塔单层及多层架空钢连廊, 地下 1 层。主体结构体系为钢框架、钢桁架、混凝土核心筒、型钢混凝土劲性柱组合体系, 地下室、地上塔楼大量采用材质为 Q355B、Q390B 钢材, 最大钢板厚度 50mm, 钢柱截面包含圆管、箱型、十字型, 钢梁截面采用 H 型钢、箱型, 4# 楼 03 分塔屋面设置跨度 32.6m 拱形钢桁架, 楼栋间设置多层架空钢连廊, 最大连廊主梁跨度 41.3m。

现场以 CO₂ 气体保护焊为主要焊接方式, 焊缝等级分为一级、二级, 一级焊缝 100% 超声波探伤。为解决复杂节点与恶劣施工环境带来的质量隐患, 项目开工前编制专项焊接方案系统梳理全流程质量控制措施, 实现焊缝探伤一次合格率达到 99%。

2 现行规范与管控现状

现行《钢结构焊接规范》GB50661-2011、《钢结构工程施工质量验收标准》GB50205-2020 对焊评、焊工、焊材、探伤等作出强制规定, 但施工现场普遍存在管控碎片化: 焊工无证上岗、厚板预热不到、高空无防风措施、工序验收流于形式等问题, 导致焊缝缺陷频发。现有研究多聚焦单一焊接工艺, 缺少多单体、高空桁架、冬雨季复合工况下成套质量管控体系。本文结合完整施工方案与焊评报告, 形成覆盖事前、事中、事后的闭环质量控制措施^[1]。

3 研究思路与重点

本文以项目焊接专项方案、全套焊接工艺评定报告为基础, 围绕“人、机、料、法、环”五要素建立质量管控框架, 重点研究: ① 焊接前期预控措施; ② 现场焊接过程动态质量管控要点; ③ 焊后外观与无损检测、缺陷返修控制; ④ 冬季、雨季、高空特殊工况专项质量保障措施; ⑤ 焊接裂纹、变形、气孔等典型缺陷预防控制手段。

4 工程焊接质量管控难点

母材材质复杂, 裂纹风险高: 主体钢材为 Q355B (8~50mm)、Q390B (8~40mm), 属于低合金高强钢, 碳当量较高, 厚板冷却速度快, 极易产生延迟冷裂纹, 对预热、后热、焊材防潮要求严苛。

焊接节点类型繁多: 包含箱型柱对接、圆管 6G/6GR 相贯 T/Y 节点、H 型钢梁柱刚接、主次梁连接、高空钢连廊箱型大梁、拱形桁架圆管相贯、栓钉穿透焊, 不同接头焊接工艺参数差异大, 管控标准多; 现场作业环

境恶劣：项目位于上海，春夏季多雨、空气湿度长期大于 85%，冬天气温低，高空作业风速常超过 2m/s，CO₂ 气体保护焊极易产生气孔、未熔合缺陷^[2]；高空焊接量大：1# 塔楼 80m 高空钢柱、多层钢连廊无封闭作业条件，防风、保温、防火措施不到位直接影响焊缝成型与内部质量；焊缝检测标准严格：框架主体一级焊缝 100% UT 探伤，二级焊缝 20% 抽检，焊后需静置 24h 方可检测，缺陷返修流程复杂且同一部位返修次数受限。

5 焊接事前质量预控措施

事前预控是杜绝系统性质量问题的核心，从人员、材料、设备、工艺评定、施工方案、作业环境六大方面提前管控。

5.1 焊工资质与培训管控

准入考核制度：所有现场施焊焊工必须持有对应焊接方法、材质、焊接位置的有效资格证书，无证人员严禁施焊；进场前组织专项培训，针对厚板多层多道焊、圆管相贯 6G 焊、高空焊接开展理论 + 实操双重考核，由总包、监理共同见证，考核合格方可上岗^[3]；定岗追溯机制：每条焊缝标注焊工编号，建立焊工质量档案，统计探伤一次合格率，连续出现不合格焊缝人员暂停上岗重新培训考核；技术交底全覆盖：技术负责人向班组长交底，班组长向每位焊工交底，明确母材、焊材、预热温度、层间温度、焊接参数、焊缝等级、探伤要求，留存交底签字记录。

5.2 原材料质量控制

母材质量管控：钢构件进场必须附带钢厂质量证明书，核对材质、板厚、规格；按规范对 Q355B、Q390B 钢材进行力学、化学成分复验；构件坡口、外观进场验收，存在夹层、锈蚀、变形构件禁止使用，坡口毛刺、氧化皮提前打磨清理；焊接材料管控：Q355B、Q390B 统一采用 ER50-6 实芯焊丝，不同材质异种接头按低强度母材匹配焊材。焊材设立专用库房，分区存放并标识型号。CO₂ 气体纯度不低于 99.9%；

栓钉配套材料：Φ19 栓钉 SWRCH15A 配套专用瓷环，受潮必须重新烘焙，进场核查质保文件，外观开裂瓷环报废处理；焊接设备与计量器具管控：主体焊接采用 NBC-500 型 CO₂ 焊机，手工焊机用于定位、返修；每日班前检查焊机电流、电压稳定性，气路有无漏气、堵塞。红外线测温仪、焊缝量规、超声波探伤仪定期送检校验，出具校准证书，超期器具禁止使用；碳弧气刨、预热烘枪完好备用。设备专人管理，建立设备检修、维护记录，故障焊机停机维修后方可投入焊接作业^[4]；焊接工艺评定管控：所有现场焊接工况提前完成全套焊接工艺评定，覆盖 Q355B/Q390B、板厚 6~50mm、

横/立/6G/6GR、栓钉全部接头形式，焊评报告、力学检测、超声波报告齐全；现场所有焊接操作严格按照焊评指导书执行，严禁私自更改电流、电压、预热、层间温度等工艺参数，工艺变更需重新评定；作业环境前置管控：室外、高空焊接提前搭设封闭式防火防风防雨棚，确保 CO₂ 焊区域风速 ≤ 2m/s；提前掌握气象预报，湿度 > 90%、雨雪、低温-10℃以下提前停止焊接安排；高空操作平台、接火盆、防火毯提前搭设到位，消除环境质量隐患。

6 焊接施工过程动态质量控制

6.1 焊前工序质量检查

坡口清理验收：坡口及两侧 30mm 范围内彻底打磨，去除铁锈、油污、水分、氧化皮，无毛刺夹层，验收合格后方可施焊。引、熄弧板管控：所有主焊缝两端设置同材质、同坡口引弧板、引出板，气体保护焊引出长度 ≥ 25mm，禁止母材直接引弧。预热温度管控：依据板厚、材质确定预热区间，加热范围为坡口两侧 ≥ 1.5 倍板厚且不小于 100mm，多点均匀加热，红外线测温，低温工况预热提升 15~25℃，测温记录留存，未达到预热温度禁止起焊。环境复核：实时记录风速、温湿度，不满足焊接条件禁止开工。

6.2 焊接工艺管控

多层多道焊接强制实施：板厚 > 25mm 全部采用多层多道焊，单道焊道厚度 ≤ 5mm，每层焊接接头错开 50mm 以上；每层完成后彻底打磨清渣，检查无未熔合、夹渣后再进行下一层焊接，控制热输入，细化晶粒、降低裂纹与变形风险。

分节点标准化焊接顺序

箱型柱：两名焊工对称等速同步焊接，减少单侧收缩；大直径圆管柱（0.9~1.2m）双焊工，1.2~1.4m 三焊工同步施焊；梁柱节点：柱垂直度偏差 < 5mm 两侧钢梁对称焊接，单根梁先下翼后上翼，两端不同时焊接；圆管相贯桁架分段退步焊接，降低节点应力集中。

焊接参数标准化执行：横焊、立焊、6G 相贯严格执行焊评给定电流、电压、气体流量，禁止随意加大电流造成过热、晶粒粗大。

层间温度管控：层间温度维持在预热温度 ~ 200℃ 之间，超温冷却、低温重新加热，实时测温并记录。

6.3 焊后消氢

板厚 ≥ 20mm 高强钢焊后立即进行消氢热处理，200~250℃ 保温，每 10mm 板厚保温 0.5h，最短不低于 0.5h，最长不超过 2h。

6.4 过程巡检制度

质量员全程旁站关键厚板、圆管一级焊缝，每道焊层进行中间检查，形成焊接施工记录，记录焊工、时间、温湿度、预热/层间温度、焊接参数，所有工序留存书面验收资料。

7 焊后检验与缺陷返修质量控制

7.1 外观质量控制

所有焊缝 100% 进行目视外观检查，对照一、二、三级焊缝标准：一级焊缝不允许咬边、未焊满、气孔、夹渣、裂纹、电弧擦伤；二级焊缝缺陷尺寸严格限定，焊缝余高、焊脚尺寸满足设计要求；飞溅全部清理，焊缝与母材平滑过渡，外观不合格焊缝禁止进入无损检测工序^[5]。

7.2 无损检测质量管控

探伤时机：焊后静置 24h 方可开展超声波检测，避免延迟裂纹漏检；检测比例：一级焊缝 100% UT 检测，二级焊缝抽检 20%，由具备资质持证检测人员操作；探伤缺陷标记：检测报告出具不合格焊缝精准定位，标注缺陷类型、长度、深度，作为返修依据。

7.3 焊缝缺陷返修管控

返修工艺：缺陷采用碳弧气刨彻底清除，裂纹缺陷向两端各延伸 50mm 刨除；返修预热温度比原工艺提高 20℃，焊后同步消氢处理；返修次数限制：同一部位返修不得超过 2 次，第三次返修必须编制专项返修方案，监理、设计审批后方可施工；返修后复检：返修完成冷却 24h 再次探伤，直至合格，返修全过程记录存档。

8 特殊工况专项质量控制措施

8.1 冬季焊接质量控制

选用低氢高韧性焊丝，CO₂ 气瓶做好防冻，防止瓶口结冰堵塞；焊前彻底清除坡口冰雪，预热温度提升 20~30℃；单条焊缝连续施焊，减少中途停顿，搭设保温防风棚，维持作业区域温度。

8.2 雨季高湿环境质量控制

作业区域全封闭防雨棚，雨水不得接触高温焊缝；雨后构件充分干燥，坡口加热除水，空气湿度 > 90% 停止焊接；焊材加强保温，杜绝潮气进入熔池产生气孔。

8.3 高空钢连廊、桁架焊接质量控制

高空全封闭防风设施，风速超标停工；厚桁架相贯节点分段退步焊，减小整体扭曲变形；增加测温频次，层间温度不足立即停焊补热；下方设置防火接火盆，防止火灾同时避免雨水、气流干扰焊缝成型。

9 典型焊接缺陷预防质量控制措施

9.1 冷裂纹控制

诱因：焊材受潮、坡口含水、预热不足、冷却过快、接头拘束大；控制措施：焊材规范烘焙保温；坡口彻底干燥；严格执行预热 + 焊后消氢；多层多道焊降低拘束；冬季高空增设保温棚，减缓冷却速度。

9.2 气孔缺陷控制

诱因：风速超标、气路泄漏、坡口油污铁锈、气体纯度不足；控制：高空封闭防风棚，风速控制在 2m/s 以内；定期检查 CO₂ 管路；焊前坡口打磨除锈除油；采用纯度 ≥ 99.9% 保护气体。

9.3 未熔合、夹渣控制

诱因：层间清渣不到、焊接速度过快、电流偏小、坡口角度不足；控制：每层焊道打磨清理；严格执行焊评工艺参数；坡口按图纸加工，保证熔合空间。

结束语

钢结构焊接质量控制必须建立事前预控-过程动态管控-焊后检验返修-特殊工况专项保障闭环体系，围绕人、机、料、法、环五大要素落实分级管控，焊接工艺评定是所有现场施工质量底线，严禁无评施焊；Q355B、Q390 高强厚板工程质量核心控制点为焊前预热、多层多道焊接、焊后消氢热处理，可有效抑制冷裂纹这一重大结构缺陷；上海多雨低温的气候条件下，冬、雨季、高空需增设专项防护与工艺提升措施，通过封闭作业棚、提高预热温度、连续施焊等手段消除环境对焊缝质量的干扰；三级检验制度、全过程可追溯资料是质量管控落地保障，通过焊工持证追溯、工序停止点验收、缺陷闭环返修，能够显著提升焊缝一次探伤合格率，降低返工成本与工期损失。

本文适用于高层钢框架、多层科研综合体、高空钢连廊、大跨度圆管桁架复合型钢项目，可为同类工程焊接质量管理提供参考。

参考文献

- [1] GB 50661-2011，钢结构焊接规范 [S].
- [2] GB 50205-2020，钢结构工程施工质量验收标准 [S].
- [3] CECS226-2007，栓钉焊接技术规程 [S].
- [4] 郭彦林. 高层钢结构厚板焊接质量控制关键技术 [J]. 施工技术.
- [5] 李国强. 低合金高强钢焊接裂纹成因与防控措施 [J]. 建筑钢结构进展.
- [6] 建筑钢结构焊接缺陷防治手册 [M]. 中国建筑工业出版社.