

双丝埋弧焊免坡口免清根熔透工艺在工字梁生产中的应用

郭捷菲¹, 李未龙², 邵志超³, 夏天⁴, 张华², 王简²

1. 江西省交通建设工程质量安全保障中心 江西南昌 330009

2. 武船重型工程股份有限公司 湖北武汉 430415

3. 江西省交通投资集团有限责任公司 江西南昌 330009

4. 江西交投嘉特信招标咨询有限公司 江西南昌 330009

摘要: 随着钢桥建设的快速发展, 对于钢桥高效化制造工艺需求越来越迫切, 在钢桥工字梁制造中, 常规单丝埋弧焊工艺存在施工工序多、焊接材料消耗量大, 生产效率低等问题, 因此对单丝埋弧焊工艺的改进和优化非常必要。通过焊接工艺试验, 验证了腹板20mm厚T形接头双丝埋弧焊免坡口免清根熔透工艺的可行性, 且焊接接头各项性能满足相关规范要求。双丝埋弧焊免坡口免清根工艺在生产中得到成功应用, 工字梁焊接效率明显提升, 达到了减少工序, 节约焊接材料, 降低制造成本的目的。

关键词: 钢混组合梁; 工字梁; 双丝埋弧焊; 免清根; 免坡口; 全熔透

Application of double-wire submerged arc welding with groove-free and back-gouging-free penetration process in the production of I-shaped steel beams

GUO Jiefei¹, LI Weilong², SHAO Zhichao³, XIA Tian⁴, ZHANG Hua², WANG Jian²

1. Jiangxi Provincial Traffic Construction Engineering Quality and Safety Guarantee Center, Nanchang 330009, Jiangxi, China

2. Wuchuan Heavy Engineering Co., Ltd., Wuhan 430415, Hubei, China

3. Jiangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330009, Jiangxi, China

4. Jiangxi Communications Investment Jiatexin Tendering Consulting Co., Ltd., Nanchang 330009, Jiangxi, China

Abstract: With the rapid development of steel bridge construction, the demand for efficient manufacturing processes for steel bridges is becoming increasingly urgent. In the manufacturing of steel bridge I-beams, the conventional single-wire submerged arc welding (SAW) process has problems such as multiple construction processes, high consumption of welding materials, low production efficiency. Therefore, it is necessary to improve and optimize the single-wire SAW process. Through welding process experiments, the feasibility of the double-wire SAW process without groove and root cleaning for 20mm thick T-joints has been verified, the performance of the welded joints meets the relevant specifications. The double-wire SAW process without groove and root cleaning has been successfully applied in production, significantly improving the welding efficiency of I-shaped steel beam and achieving the desired results.

Keywords: steel-concrete composite beam; I-shaped steel beam; double-wire submerged arc welding; back-gouging-free; groove-free; full penetration

1 序言

工字形钢混组合梁桥（以下简称“工字梁”）截面简单、用钢量少、造价低、制造方便，且安装速度快，已大量应用于山区高速公路桥梁、城市高架桥、上跨现有道路桥梁等的建造。为保证焊接工字梁整体受力，一般要求工字梁T形主角焊缝全熔透，常规的单丝埋弧焊工艺需要腹板开制双面坡口，正面CO₂气体保护焊打底，埋弧焊填充盖面，反面碳弧气刨清根，埋弧焊填充盖面，最终达到设计焊接要求。常规工艺焊接量大，工序多，焊接材料消耗量大，生产效率低，并且碳弧气刨的粉尘多、噪声大，工作条件差，严重影响焊工身心健康。

随着焊接技术的发展，单丝免清根埋弧焊^[1]和单电双丝埋弧焊工艺^[2]，可以实现高效化和自动化焊接；据资料介绍，双丝埋弧焊熔覆率超过单丝埋弧焊一倍，焊接接头具有良好的性能^[3]；工字梁制造时开制K形坡口采用双丝埋弧焊焊接，也取得了较好效

果^[4]。上述研究均限于板厚16mm的钢板免坡口熔透焊接或开坡口部分熔透焊缝要求的焊接，鲜见关于板厚20mm以上T形接头免坡口免清根熔透焊接在工程中的研究与应用的报道。

2 项目背景

德州至上饶高速公路赣皖界至婺源段新建工程钢梁由主纵梁、横梁组合而成，其中主纵梁由上翼板、下翼板腹板及加劲肋组成，钢板材质为Q420D低合金高强度结构钢（以下简称“Q420D钢”）。主纵梁翼板厚度20~50mm，腹板厚度20mm，翼板与腹板角焊缝的焊接要求为全熔透。钢混组合梁如图1所示。

本项目共1868根工字梁，需要大批量生产。因此，开发工序简单、效率高、质量好的高效焊接工艺，对实现工字梁高效生产、保证工程合同工期、降本增效有着重要意义。

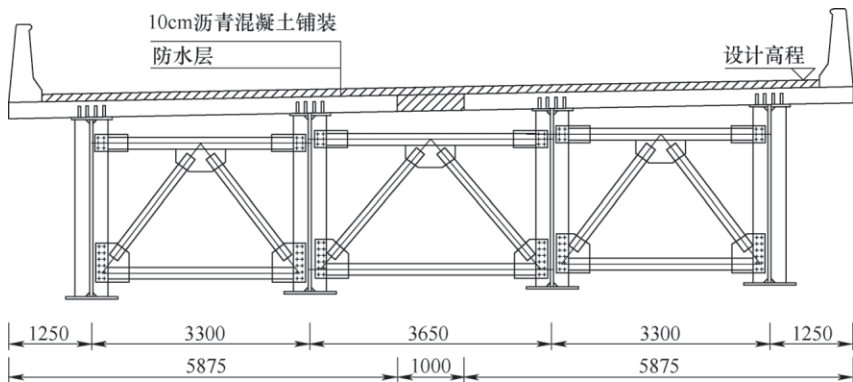


图1 钢混组合梁示意

3 焊接工艺试验

选取具有代表性的翼板、腹板，厚度均为20mm的T形接头进行试验。

3.1 试验材料

焊接试验所用试板材质为Q420D钢，板厚20mm，碳当量CEV<0.40%，焊接性较好，但是考虑到板厚、焊接拘束度及以往的制作经验，焊前坡口两侧100~200mm内均匀进行60~80℃的预热。钢板力学性能见表1，钢板化学成分见表2。

埋弧焊机为悬臂式，焊接电源为林肯IDEALARC DC-1000和IDEALARC AC-1200，如图2所示。前丝直流DC+后丝交流AC同时焊接，前后

表1 Q420D钢板力学性能

数据来源	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断面伸长率 (%)	-20℃冲击吸收能量/J
标准	≥400	520~680	≥19.0	≥40
质保书	499	598	23	267
复验	496	592	23.5	299

表2 Q420D钢板化学成分（质量分数） (%)

数据来源	C	Si	Mn	P	S	CEV	P _{cm}
标准	≤0.16	≤0.50	≤1.70	≤0.030	≤0.025	≤0.45	≤0.20
质保书	0.10	0.17	1.53	0.011	0.002	0.38	0.19
复验	0.09	0.17	1.48	0.008	0.004	0.36	0.18

焊丝距离23~28mm。埋弧焊丝牌号H10Mn2Ni、直径4.0mm，焊剂牌号SJ101q，埋弧焊焊接材料熔覆金属力学性能见表3。



图2 悬臂式埋弧焊机

表3 埋弧焊焊接材料熔覆金属力学性能

数据来源	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断面伸长率 (%)	-20℃冲击吸收能量/J
标准	≥420	540~670	≥18	≥47
质保书	493	576	28.6	107
复验	473	558	27.5	163

3.2 试验方法

对T形接头进行倾角为65°的亚船形埋弧焊焊接，腹板不开坡口，腹板与翼板间0~1mm的装配间隙，焊丝垂直于水平面，两侧采用双丝埋弧各焊一道，背面不清根；焊后进行外观检查、超声波检测等，最后做宏观断面酸蚀分析，观察焊缝熔合情况，焊接接头装配如图3所示。工艺试验的焊接参数见表4。

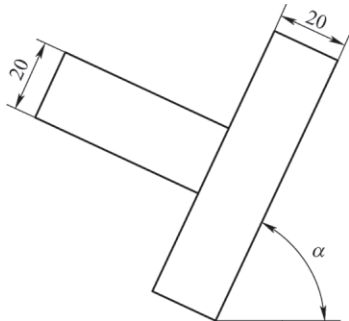


图3 焊接接头装配示意

表4 工艺试验的焊接参数

焊道	焊接电流 /A	电弧电压 /V	极性	焊接速度 / (m/min)
第一面	前丝：720~880	前丝：32~38	DC反接	620~740
	后丝：630~770	后丝：33~39	AC	
第二面	前丝：860~1040	前丝：33~39	DC反接	610~740
	后丝：630~770	后丝：33~39	AC	

3.3 检测项目及结果

根据JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》^[5]，焊接接头的性能要求：焊缝屈服强度、抗拉强度、断面伸长率、-20℃低温冲击性能均不低于母材的标准值，接头硬度≤380HV。

(1) 焊缝外观检查及无损检测 焊后试板冷却至环境温度进行外观质量检测，焊缝边缘熔合良好，焊缝表面及焊接热影响区未出现气孔、夹渣、裂纹及咬边等缺陷。24h后对焊缝进行100%超声波检测，B级检测，焊缝质量等级为I级。

(2) 力学性能试验 图4所示为试样焊缝断面宏观形貌。由图4可知，宏观金相显示焊缝无气孔、裂纹、夹渣、未熔合及未焊透等缺陷，内部质量好，且焊脚尺寸适中。

对试样分别进行了焊缝金属拉伸、低温冲击、断面酸蚀及接头硬度等力学性能试验，均满足相关要求，接头力学性能试验结果见表5。



图4 试样焊缝断面宏观形貌

表5 接头力学性能试验结果

数据来源	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断面伸长率 (%)	-20℃冲击吸收能量/J	接头硬度HV10
标准	≥400	≥520	≥19.0	≥47	≤380
试验结果	562	632	25.5	焊缝：143、74、108 热影响区：267、253、201	母材：194、191、196 热影响区：201、199、198 焊缝：205、210、206 热影响区：212、219、203 母材：188、192、191

3.4 结果分析

由于双丝埋弧焊每面只焊一道，单侧熔深需达到腹板板厚的1/2以上才能保证全熔透。

根据焊接温度场的相关研究，T形接头翼板与腹板相同板厚时，翼板散热较快；距焊缝相同距离测点，翼板测点峰值温度更低^[6, 7]；因此焊接受热区域更靠近腹板，翼板板厚大于腹板时，偏移更加明显。焊接电弧稳定燃烧时，焊接熔深最大处位于焊丝的延长线上^[8]。

船形焊时，其他焊接参数固定，调整焊接T形接头角度可以影响焊缝熔深。腹板与地面夹角越小，焊缝熔深越深，但夹角越小，咬边、焊脚不均匀越严重。经过多次试验，腹板与水平面夹角为65°（见图5），可以保证焊缝成形匀顺饱满。

腹板与地面夹角固定时，通过调整焊丝位置也可以使焊缝根部熔合区向腹板侧移动。由于焊接受热区域同样向腹板偏移，埋弧焊前丝只需向腹板侧移动3mm左右，即可使腹板中心位于熔合区内。

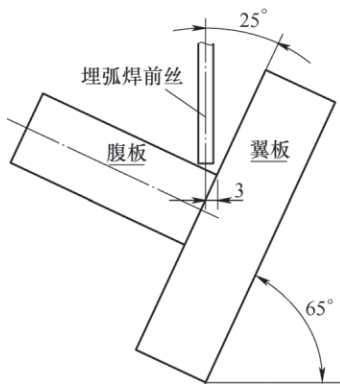


图5 焊丝对位

焊接时前丝采用直流电源，焊接电流较大，从而获得较大的熔深；后丝采用交流电源，相对较大的电弧电压，使焊丝熔化填充焊缝至设计尺寸，最终保证焊缝具有良好的焊缝形状。

T形角焊缝如果采用单丝埋弧焊工艺焊接，由于火焰开制焊接坡口的角度和大小精度比较低，为了保证埋弧焊焊接时不会出现烧穿，需要CO₂气体保护焊先进行一道打底。而双丝埋弧焊免坡口免清根工艺，取消了开坡口工序，数控下料切割精度高，更容易保证装配精度，无坡口使装配间隙在1mm以内也不容易出现焊穿，降低了焊工的操作难度。

4 焊接工艺应用

4.1 控制要点

焊接过程中保证不开坡口T形接头焊缝达到全熔透，且有良好的焊缝外观成形与内部质量，有几点关键控制要点。

1) 工字梁腹板下料切割平齐，装配间隙严格控制在1mm以内。焊接工位与水平面呈25°，偏小会影响焊缝外观成形，偏大会影响焊缝熔深。

2) 焊丝对位。前丝对位沿焊缝中心线靠腹板侧2.5~3.5mm距离对位焊接，前后丝纵向距离为23~28mm。

3) 免开坡口双丝埋弧焊工艺对操作人员的操作水平和焊接水平要求较高，为保证焊缝的一次合格率，必须对操作工人进行相应的交底培训，合格后才能上岗。施工过程中，要严格执行经评定审批的焊接工艺评定报告，对焊接参数、预热温度严格控制。

4) 背面透红。背面透红情况是反映焊接熔透的一个重要指标，需要焊工在焊接过程中不断观察，焊接参数差别不大但发现背面透红不够亮时，就需要对焊丝的位置做相应调整，同时由于不同区域装配间隙不同，焊工还需要根据间隙进行及时调整焊接参数。焊缝背面透红状况如图6所示。



图6 焊缝背面透红

4.2 工程应用与效益分析

双丝埋弧焊免坡口免清根工艺在德州至上饶高速公路赣皖界至婺源段新建工程钢混组合梁生产中进行应用，焊接质量稳定，焊缝各项性能和质量满足相关规范要求。

按照传统单丝埋弧焊工艺，需对腹板开制坡口，坡口角度45°、钝边2mm。以板厚20mm为例，开制单面坡口（45°×2mm），约需要1min/m；腹板两面焊缝各需要焊接2层2道，平均焊接速度约

8min/m; 碳弧气刨速度约6min/m; 药芯焊丝消耗量约0.42kg/m; 埋弧焊焊丝消耗量约1.46kg/m; 埋弧焊焊剂消耗量约1.75kg/m; 碳弧气刨消耗量约3根/m。

双丝埋弧焊免坡口免清根工艺, 腹板不需要开坡口, 提高生产效率、节省成本, 同时不存在坡口切割精度问题, 更容易保证装配质量。在焊接方面, 采用双面埋弧焊, 两面均为1层1道焊接成形, 平均焊接速度约3min/m; 埋弧焊焊丝消耗量约0.95kg/m; 埋弧焊焊剂消耗量约1.14kg/m; 焊缝不需要碳弧气刨清根, 因此可减小车间噪声、粉尘污染, 有利于操作人员身体健康。

本项目共1868根工字梁, 焊缝外观光顺饱满, 超声波无损检测显示焊缝合格率99.5%, 焊接质量稳定。开坡口、碳弧气刨、焊接总时间减少5360h; 工字梁产量由8件/班提升至10件/班, 生产效率提高25%; 在金属填充量上, 免开坡口双丝埋弧焊工艺比单丝埋弧焊工艺减少49.5%, 节约焊接材料29.9t。

5 结束语

1) 双丝埋弧焊在较大的焊接参数、合适的焊接接头角度、焊丝对位尺寸等工艺下, 可以实现免坡口免清根, 使腹板厚度20mm的焊接接头达到全熔透。焊接接头的熔深、内部缺陷、力学性能检测结果均满足相关要求。

2) 双丝埋弧焊免坡口免清根工艺在德州至上饶

高速公路赣皖界至婺源段新建工程钢梁中的成功应用, 改善焊工劳动条件, 减少施工工序, 节约焊接材料, 降低生产成本, 实现工字梁高效化、自动化生产, 对降本增效起到了良好的效果, 可为同类项目提供借鉴。

参考文献:

- [1] 张华. 钢桥工字梁的高效焊接工艺[J]. 机械工人(热加工), 2008(1-2): 49-50.
- [2] 张华, 范泽平, 王磊, 等. 单电双细丝埋弧焊在钢桁梁杆件制造中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2015(20): 52-55.
- [3] 黄智强, 朱正亮, 邵军, 等. 双丝埋弧焊技术在钢板组合梁上的应用[J]. 焊接技术, 2019(10): 66-69.
- [4] 于绍兴, 宋光涛, 贾江涛, 等. 海洋工程厚板双丝埋弧焊焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2023(2): 60-63.
- [5] 中交第一公路工程局有限公司. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T 3650—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [6] 毕艳霞. T型接头焊接温度场与应力场的数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [7] 许凯. 中厚板非对称角根焊温度场建模及熔透形态视觉检测[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [8] 张建平, 滕骝, 阙子雄. H型钢双丝埋弧焊不清根全熔透焊接工艺[J]. 电焊机, 2018, 48(5): 9-14.

(收稿日期: 20250209)

(上接第88页)

生产应用中, 位于B柱或内板滑道等小变形区域, 此参数区间内可以达到稳定的质量状态。

2) 在实际生产测试环节, 在局部区域会出现测试参数范围内焊后背部开裂的情况, 尽管未熔穿, 但裂纹依然存在, 其原因在于预变形引起的应力也是拉应力, 导致母材的抗拉强度在薄弱区域不足, 进而在母材最高应力集中处产生裂纹。因此, 严格控制热输入, 同时保证背部衬垫的贴合, 使焊接熔深小于母材厚度的一半时, 可以有效避免热裂纹的产生。

3) 对于激光角焊缝背部熔透缺陷的探测, 通过灰度图像识别的方式可以实现快速测量报警, 并具有很高的探测度; 而对于背部裂纹的探测, 无法通

过相同方式实现, 需后续通过OCT等方式, 通过匙孔深度对裂纹生成进行预测。

参考文献:

- [1] 吴雁, 李朝阳, 郭立新, 等. 焊接工艺参数对铝/铝激光焊缝形貌及力学性能的影响[J]. 焊接, 2021, 32(11): 27-30.
- [2] 岳考捷. 超高强铝合金激光焊接工艺与裂纹抑制方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [3] 刘恩泽. 薄板激光搭接焊非熔透侧焊后变形研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [4] 李召阳, 李中梁, 南楠, 等. 基于偏振OCT的激光焊接匙孔深度测量方法[J]. 中国激光, 2023, 50(20): 1-7.

(收稿日期: 20250214)