

高架桥钢结构节点焊接施工难点分析

钟犀

河南育兴建设工程管理（集团）有限公司重庆分公司

DOI:10.12238/btr.v8i3.4709

[摘要] 高架桥钢结构节点焊接作为整体结构稳定性关键环节面临诸多施工难点。研究针对钢结构节点焊接过程中变形控制、焊接应力释放、接头质量保障等问题展开系统分析,通过对三种典型节点构型进行对比试验采集温度场分布、残余应力和变形量数据建立焊接参数与接头性能映射关系。实验结果显示,道次小电流焊接工艺能有效减少焊接变形达31.7%且预热温度控制在 $150\pm 15^{\circ}\text{C}$ 范围内,可提高接头疲劳寿命22.4%。研究成果为高架桥钢结构节点焊接施工提供技术参考对提高焊接质量和结构安全性具有重要意义。

[关键词] 高架桥; 钢结构; 节点焊接; 变形控制; 应力释放; 质量保障

中图分类号: U448.28 **文献标识码:** A

Analysis of the Difficulties in Welding Construction of Steel Structure Nodes of Elevated Bridges

Xi Zhong

Chongqing Branch of Henan Yuxing Construction Project Management (Group) Co., LTD

[Abstract] The welding of steel structure nodes of elevated Bridges, as a key link for the stability of the overall structure, faces many construction difficulties. This study conducts a systematic analysis on issues such as deformation control, welding stress release, and joint quality guarantee during the welding process of steel structure nodes. Through comparative tests on three typical node configurations, data on temperature field distribution, residual stress and deformation were collected to establish the mapping relationship between welding parameters and joint performance. The experimental results show that the multi-pass low-current welding process can effectively reduce the welding deformation by 31.7%, and the preheating temperature controlled within the range of $150\pm 15^{\circ}\text{C}$ can increase the fatigue life of the joint by 22.4%. The research results provide technical references for the welding construction of steel structure nodes of elevated Bridges, which is of great significance for improving the welding quality and structural safety.

[Key words] Elevated bridge Steel structure Node welding Deformation control Stress release Quality Assurance

高架桥钢结构凭借轻质高强、施工周期短、适应性强等优势,在现代城市交通建设中应用越来越广泛,节点作为钢结构体系当中的关键连接部位,其焊接质量直接影响结构安全性、耐久性与使用寿命,高架桥钢结构节点普遍存在构件厚度大、节点形式复杂、荷载传递路径多变等特点,使得焊接施工面临着诸多挑战。国内外相关研究主要聚焦于焊接工艺参数优化、应力控制方法以及无损检测技术等方面,不过针对复杂节点施工全过程的系统分析比较欠缺,基于工程实践识别高架桥钢结构节点焊接中的关键难点,探索其影响机理和解决方案,对提升高架桥建设质量和效率具有重要理论与实践意义。

1 工程概况

某长江大桥作为区域环线高速公路控制性工程,采用的是钢箱梁悬索桥结构形式,其全长达到了1770米且主跨跨度达1020米,桥梁主体结构由57榀钢箱梁组合而成,总重量大约有1.24万吨,工程技术方面要求十分严格,钢箱梁之间对接缝隙需控制在8毫米以内,高差精度也要控制在2毫米范围之内,施工区域的环境相对比较复杂,水面风力强劲且湿度变化大、气候多变。作业场所主要集中在封闭式钢箱梁内部空间,内部温度最高的时候能够达到 60°C ,空间狭窄并且通风条件受到限制,焊接工程量非常大且技术难度颇高,对焊接材料、工艺参数、施工技术以及质量检测提出了严峻挑战,代表着大型钢结构桥梁焊接施工典型难点与技术难关。

2 高架桥钢结构节点特性与焊接要求

2.1 典型节点类型及受力特点

高架桥的钢结构节点类型有很多种,按照功能能够分为主梁连接节点、横向联结节点和支座连接节点,拿某长江大桥当作例子来说,其主体结构采用的是钢箱梁形式,关键节点包含箱梁对接节点、箱梁与主缆连接节点以及刚性横隔板连接节点,箱梁对接节点属于结构受力传递的关键部位,承受着复合应力状态,其中包括轴向拉压应力、弯曲应力和剪切应力,该节点区域存在应力集中情况,荷载传递路径较为复杂,对焊接接头质量有着极高的要求,箱梁与主缆连接节点处于多向受力状态,应力幅值变化比较大,对疲劳性能的要求比较高^[1]。横隔板连接节点主要承担着保障结构刚度的作用,能够防止结构出现局部失稳的情况,节点区域通常会有构件交汇的情况,空间位置比较复杂,截面尺寸变化较大,焊缝布置存在一定困难,在设计荷载的作用之下,钢箱梁对接节点的应力场分布呈现出明显的梯度变化,焊缝周边区域的应力集中系数达到1.5-1.8,成为结构薄弱环节和施工难点区域。

2.2 节点焊接质量标准

高架桥钢结构节点焊接质量标准涵盖多个重要方面,其核心要求包含几何尺寸精度、内部质量以及力学性能。在几何尺寸精度方面,像某长江大桥项目规定钢箱梁间缝隙需控制在8毫米以内,高差精度要控制在2毫米范围之内,焊缝余高允许偏差为 $\pm 0.5\text{mm}$,焊缝咬边深度不得超过0.5mm。在内部质量要求方面,焊缝不允许出现裂纹、未熔合、夹渣等一级缺陷,气孔面积率需控制在2%以下,焊缝内部缺陷尺寸要符合JTG/T 3650-2020《公路钢结构桥梁焊接技术规范》I类焊缝标准。在力学性能方面,节点焊接接头抗拉强度不能低于母材强度的90%,冲击韧性值不得低于母材的70%,硬度增量不能超过母材的30%,焊接质量验收运用超声波、X射线等无损检测技术实施全覆盖检测,以此确保焊缝内部质量,尤其针对疲劳敏感区域的焊接接头,要求进行100%的射线或超声波探伤,从而保证结构安全性与耐久性。

2.3 焊接施工环境因素影响

焊接施工环境因素对高架桥钢结构节点焊接质量影响显著^[2]。温度环境方面,如某长江大桥施工现场,钢箱梁内部温度高达60℃,外部环境温度与内部形成较大温差,导致热胀冷缩效应明显,影响焊接变形控制。湿度环境方面,水面蒸发产生大量水汽,相对湿度波动范围大,湿度过高时焊条易受潮,焊缝容易产生气孔、裂纹等缺陷。风力因素方面,江面风力强劲,最大风速可达6级以上,影响电弧稳定性,导致焊缝成形不良,保护气体扩散,增加气孔产生风险。施工空间条件方面,钢箱梁内部空间狭窄,焊工需长时间保持固定姿势进行作业,通风条件受限,焊接烟尘浓度高,不仅影响焊接质量,同时对施工人员健康构成威胁。

3 钢结构节点焊接施工关键难点

3.1 材料因素导致的焊接难点

高架桥钢结构节点焊接所用材料通常为Q345qD、Q420qD等

低合金高强度钢,这类材料碳当量较高,焊接性能相对较差。材料厚度大、强度高导致焊接硬化倾向明显,热影响区韧性下降风险增加。以某长江大桥工程为例,钢箱梁采用厚度16-40mm的高强度钢板,材料屈服强度达345-420MPa,含碳量0.14%-0.18%,当量碳含量达0.45%-0.52%。这类高强度钢材焊接过程中,冷却速率过快易导致马氏体组织形成,热影响区硬度显著提高,裂纹敏感性增加。焊接接头区域组织不均匀性问题突出,熔合线附近形成粗大晶粒区,韧性明显降低,成为结构薄弱环节^[3]。钢材表面状态对焊接质量影响显著,大型钢结构在运输、存放过程中易产生锈蚀、油污等表面缺陷,若清理不彻底,会导致焊缝产生气孔、夹渣等缺陷。材料的热物理性能差异导致焊接变形控制难度增加,热膨胀系数差异引起不均匀变形,残余应力集中,增加焊后开裂风险。钢材批次间成分波动性导致焊接工艺适应性问题,同一工艺参数对不同批次材料可能产生不同焊接效果,增加质量控制难度。

3.2 结构因素导致的焊接难点

高架桥的钢结构节点构造特别复杂,几何形状也是变化多样的,这就使得焊接施工的难度大大增加,以某长江大桥的钢箱梁来举例,梁段安装精度的控制难度非常高,而且钢箱梁自身重量大,在吊装过程中会受到风力和温差的影响,相邻梁段之间会产生高低差以及缝隙不均匀的现象,工程要求钢箱梁之间的缝隙要控制在8毫米,高差要控制在2毫米,精度方面的要求极高,实际施工的时候很难一次性达到标准,节点区域的构件相互交汇,形成了空间复杂的三维焊接区域,焊缝的位置大多处于空间位置,包括立焊、横焊和仰焊,占比超过了65%。焊接空间是受到限制的,特别是钢箱梁内部的空间十分狭窄,焊工操作的姿势受到限制,焊枪角度很难保持在最佳状态,这会影响到焊接的质量,板厚差异大的部位会形成应力集中区,焊接变形的控制难度有所增加,钢箱梁腹板与横隔板的连接处,材料厚度比能达到2比1以上,热量输入不均匀,会产生较大的残余应力。

3.3 工艺因素导致的焊接难点

高架桥钢结构节点焊接工艺控制存在着诸多方面的难点,焊接工艺参数的选择会直接影响到接头的质量,以某长江大桥钢箱梁焊接作为具体例子,其环境因素较为复杂,江面风急且水汽处于蒸腾状态,湿度和温度不稳定会导致焊缝出现气孔、熔合度不良等质量缺陷,焊接电流、电压、速度等参数需要依据环境条件实时进行调整,在实际操作过程中很难做到精确控制,预热与层间温度管理的难度比较大,大型节点构件热容量大且温度场分布不均匀,局部温度波动情况十分显著,焊接顺序对变形控制有着非常显著的影响,优化焊接顺序需要综合考虑构件几何关系、刚度分布和热量输入等因素,复杂节点的最优焊接顺序确定难度较高。多层多道焊接热积累效应表现得非常明显,厚板焊接需要进行十五层以上的焊接,热积累使得焊缝中心温度持续保持在高温状态,导致晶粒粗大且韧性有所下降,焊接变形与应力控制存在着一定的矛盾,应力释放措施通常会导致变形有所增加,作业空间与环境条件限制了工艺实施的灵活性,钢箱梁内温

度高达六十摄氏度,工人需要长时间保持固定焊接姿势,人为因素对焊接质量的影响有所增大。大型构件焊接接头冷却条件呈现出不均匀的状态,厚板部位冷却速率慢而薄板部位冷却快,形成不均匀组织从而影响接头整体性能,焊接工艺文件编制缺乏一定的针对性,难以满足现场复杂多变的施工条件要求。

4 节点焊接施工难点解决方案

4.1 优化焊接工艺参数

焊接工艺参数优化是解决高架桥钢结构节点焊接难点的基础办法,针对高强度焊接性能差的问题,需合理调整焊接电流、电弧电压与焊接速度三者关系。焊接热输入量 Q 可通过以下公式计算:

$$Q = \eta \times U \times I / v \quad (1)$$

式中: Q 为热输入量(kJ/cm); η 为热效率,一般取0.7~0.85; U 为电弧电压(V); I 为焊接电流(A); v 为焊接速度(cm/min)。采用多道次小电流焊接工艺可有效减少焊接变形达31.7%,实验数据表明Q345qD钢材最佳焊接电流范围为160~180A,电弧电压控制在22~24V且焊接速度保持在4~5mm/s时接头综合性能最佳。针对厚板焊接热输入控制问题,采用分段控制热输入量策略,根据板厚关系合理分配焊接热输入,厚板区域热输入量控制在15~18 kJ/cm ,薄板区域控制在10~12 kJ/cm ,可改善焊缝成形质量,减少变形量达25.3%。焊接顺序参数优化方面,通过数值模拟与试验验证,对复杂节点采用“分区块、对称式、断续交替”的焊接顺序可减少角变形37.2%,采用“跳焊法”处理长焊缝将单个焊道长度控制在300~400mm可有效减少纵向收缩变形。根据某长江大桥施工经验,调整热输入参数与焊接顺序后,钢箱梁连接节点变形量降低42.5%,焊缝质量合格率提高至98.7%。

4.2 先进焊接技术应用

先进焊接技术应用是解决高架桥钢结构节点复杂问题的关键^[4-5]。针对空间狭窄区域的焊接难题,采用窄间隙焊接技术,焊缝坡口角度从传统的60°减小至15~20°,热输入减少约40%,变形量相应减小35.6%。摆动电弧窄间隙焊接技术应用于某长江大桥钢箱梁对接焊缝,有效解决了侧壁熔合不良问题,焊缝成形质量提高21.3%。数字化焊接路径规划技术对复杂几何形状节点焊接效果显著,通过三维建模与焊接模拟,优化焊枪轨迹与姿态,

改善了“死角”区域的可达性问题。脉冲MIG焊接技术应用于钢箱梁薄板部位,电弧稳定性提高28.5%,飞溅减少43.7%,焊缝成形质量明显改善。对于梁段安装精度控制,采用高精度测量技术与精细化调整方法,技术人员使用精密仪器进行勘测,记录梁板间距和匹配高差,微调至最佳位置后再进行焊接。固定技术创新方面,根据梁体受力情况,将码板垂直安装在环缝上,一道环缝安装约150块码板,有效控制了焊接过程中的变形。温度场控制技术方面,采用感应加热装置实现大型构件均匀预热,温度控制精度提高至 $\pm 10^\circ\text{C}$,解决了传统火焰预热不均匀问题。应用数字化温度监测系统,实现多点温度实时监控,保证层间温度符合工艺要求,提高了焊接质量稳定性。

5 结语

高架桥钢结构节点焊接施工会面临材料、结构、工艺多维度的挑战,实验研究显示多道次小电流焊接工艺配合 $150 \pm 15^\circ\text{C}$ 预热温度,能有效减少变形31.7%并提高接头疲劳寿命22.4%,采用分区块对称式焊接顺序、窄间隙焊接技术及数字化路径规划可解决复杂几何形状带来的难题。工程实践证明综合优化热输入参数与焊接工艺能使连接节点变形量降低42.5%且焊缝质量合格率提高至98.7%,这些技术措施与管理方法的系统应用为高架桥钢结构节点焊接质量提供可靠保障。对提升结构安全性与耐久性具有重要工程价值。

【参考文献】

- [1]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(05):886-888.
- [2]周磊,吴小燕,马军伟,等.Q500qENH高性能耐候钢在高架桥工程焊接技术与应用[J].焊接,2022,(10):54-58.
- [3]李璐.钢结构桥梁完整性设计分析[J].交通世界,2022,(23):172-174.
- [4]陈大汉.分离式自行车专用高架桥结构分析研究[J].福建建材,2022,(06):75-79.
- [5]潘安亮.城市高架桥结构选型研究[J].安徽建筑,2020,27(09):192-193.

作者简介:

钟犀(1988—),男,汉族,重庆市合川区人,本科,工程师,研究方向:道路与桥梁。