

大跨度桥梁索塔钢壳焊接工艺研究

范军旗¹, 张颖雯², 吴天峰¹, 徐向军¹

1. 中铁山桥集团有限公司 河北秦皇岛 066205

2. 广东湾区交通建设投资有限公司 广东广州 511400

摘要: 根据狮子洋大桥索塔钢壳构件尺寸大、板厚薄、焊缝密集、作业空间小的结构特点, 通过焊接工艺试验制定了大量采用机器人自动焊接的工艺方案, 研究制定了板单元焊接、节段拼装焊接和桥位焊接的机器人焊接工艺, 采取措施控制焊接变形, 提高焊接效率, 保证焊接质量, 为项目焊接生产奠定技术基础。

关键词: 钢塔; 焊接; 机器人; 板单元; 节段

Research on welding process of steel shell for cable towers of long-span steel bridges

FAN Junqi¹, ZHANG Yingwen², WU Tianfeng¹, XU Xiangjun¹

1.Chinarailway Shanhaiguanbridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066205, Hebei, China

2.Guangdong Bay Area Transportation Construction Investment Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China

Abstract: Introduce the overview of the steel shell tower project of the Shiziyang Bridge. Based on the structural characteristics of the Shiziyang steel shell tower, such as large component size, thin plate thickness, dense welding seams, and narrow working space, a welding process experiment was conducted to develop a large-scale robot welding process solution. The robot welding process for plate unit welding, segment assembly welding, and bridge position welding was studied and developed. Measures were taken to control welding deformation, improve welding efficiency, ensure welding quality, and lay a technical foundation for the formal welding production of the project.

Keywords: steel tower; welding; robot; plate element; segment

1 序言

狮子洋通道位于珠江三角洲核心地带, 路线全长约 35.1km, 主桥狮子洋大桥采用主跨 2180m 双层钢桁梁悬索桥, 过江段为双层双向八车道高速公路标准。狮子洋通道主桥索塔采用钢板-混凝土组合结构, 高度 338.916m。索塔高程为 +6.000 ~ +337.916m, 截面尺寸由 12.09m × 16.89m (横桥向 × 顺桥向) 过渡到 7.690m × 16.200m, 横向壁厚 1.4 ~ 1.2m, 纵向壁厚 1.0m。

索塔钢壳为单箱三室断面, 主要由内壁板、外壁板、竖向加劲肋、横向加劲肋、竖向桁架、水平角钢和水平缀板等组成, 索塔钢壳节段结构如图 1 所示。内外壁钢厚度分别为 10mm、18mm, 横向加劲肋厚度为 10mm、12mm, 竖向加劲肋厚度为 12mm、18mm。内外壁板之间由竖向桁架和水平角钢连接。壁板上设置横竖向钢筋劲穿过加劲肋, 内外壁板之间设置拉筋。钢壳主要材质为 Q355MD 钢。钢壳内部灌注高强、高弹、高稳健、低收缩混

凝土。钢壳和钢筋混凝土通过剪力钉组合成为整体,优化了两种材料的受力分布,具有强度高、刚度大、延性好等特点^[1]。

钢壳截面尺寸大,钢板厚度小,壁板上焊接了大量加劲肋、圆柱头焊钉,容易出现较大焊接变形,需要考虑采用变形小的焊接工艺,制定合理的组装焊接顺序,并采取控制变形的技术措施。钢壳内部角钢、钢筋、肋板密布,节段拼装作业很多工作需要在钢壳内部进行,空间狭小、操作困难^[2]。传统的手工焊接工艺在一定程度上能够满足生产需求,但存在效率低下、质量难以保证及劳动强度大等问题^[3]。为了促进索塔钢壳制造技术创新,提升制造品质,钢壳焊接大量采用了自动化、智能化的焊接设备,针对此类设备焊接进行工艺验证,制定相应的焊接工艺和技术措施。

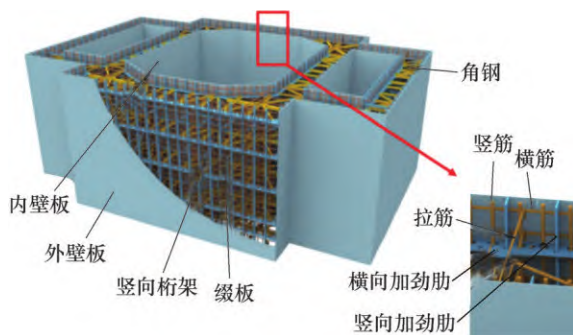


图1 索塔钢壳结构示意图

2 焊接工艺评定试验

按照JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》的相关规定进行了焊接工艺评定试验,典型接头的板厚组合、坡口形式、焊接位置、焊接方法、焊接材料、代表焊缝及力学性能试验结果见表1。

试验大量采用机器人或专机自动焊接,其中壁板单元“二拼一”或“三拼一”对接焊缝采用气体保护焊打底、填充,埋弧焊盖面;节段间横位对接焊缝采用小型轨道式焊接机器人焊接;壁板上竖向加劲肋角焊缝采用板单元机器人船位焊接;节段拼装立位对接焊缝采用轨道式自动焊接小车焊接;壁板上横向加劲肋焊缝采用横隔板单元机器人焊接。

焊接工艺评定用钢板的化学成分和力学性能符合GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》的规定,热机械轧制(TMCP)状态交货。气体保护实心焊丝符合GB/T 8110—2020《熔化极气体保护电弧

焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》要求;气体保护药芯焊丝符合GB/T 10045—2018《非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝》要求;埋弧焊丝和焊剂采用了非标准焊接材料,其化学成分和力学性能见表2。

焊接完成后对焊缝表面质量进行外观检查,外观质量符合JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》的要求,焊接24h后对序号1~4试件进行超声波检测,内部质量符合GB/T 29712—2013《焊缝无损检测超声检测验收等级》的要求(其中对接焊缝质量等级2级合格,角焊缝质量等级3级合格);对序号5、序号6试件进行磁粉检测,内部质量符合GB/T 26952—2011《焊缝无损检测焊缝磁粉检测验收等级》的2X级要求。

对对接试件进行了拉伸、弯曲、低温冲击、断面酸蚀和接头硬度试验,对角接试件进行了拉伸、断面酸蚀和接头硬度试验。结果表明,屈服强度、抗拉强度和伸长率均不低于母材标准,焊接接头硬度均不超过350HV10。

3 板单元焊接

壁板单元主要由壁板、横向加劲肋、竖向加劲肋及剪力钉组成,加劲密集、焊缝数量多。为更好地应用自动化焊接设备,提高焊接质量,减小焊接变形,采用分步组装焊接的方案。

纵向加劲肋采用板肋自动组装机床组装,组装后将板单元夹固在反变形胎上,预置反变形后胎型倾斜约38°,采用板单元焊接机器人船位焊接(见图2)。通过反变形船位焊接,减小板单元横向焊接变形,提高焊缝外观质量。机器人具备电弧跟踪功能,可以很好地保证焊缝顺直度。焊接时从板单元宽度方向中间向两侧对称施焊,所有焊缝同向焊接,一侧焊缝焊完后将胎架翻转,按照同样顺序焊接另一侧角焊缝。



图2 壁板单元纵向加劲肋焊接

表1 典型接头试验项目及力学性能试验结果

序号	板厚组合 (材质) /mm	坡口形式	焊接位置	焊接方法及 焊接材料	代表焊缝	焊缝金属拉伸试验 结果			-20℃冲击 试验结果 (平均) /J	
						R_{eH} /MPa	R_m /MPa	A (%)	焊缝	热影响区
1	16+16 (Q355MD)		平位	CO ₂ 气体保护焊 +埋弧焊 G49A3C1S6 (φ1.2mm) H08Mn2E (φ5mm) + SJ101q	板单元 纵向对接 焊缝等	456	584	26	79	195
2	16+16 (Q355MD)		横位	CO ₂ 气体保护焊T492T1- 1C1A (φ1.2mm) (小型轨道式机器人焊接)	节段间 壁板横位 对接焊缝 等	529	627	25	54	212
3	16+16 (Q355MD)		立位	CO ₂ 气体保护焊 (轨道式自动焊接专机焊 接) T492T1-1C1A (φ1.2mm)	节段整 拼壁板间 坡口角焊 缝	584	646	27	—	—
4	18+18 (Q355MD)		船位	CO ₂ 气体保护焊 (板单元机器人焊接) T492T1-0C1A (φ1.4mm)	板单元 加劲肋坡 口角焊缝 等	552	635	23	—	—
5	12+24 (Q355MD)		船位	CO ₂ 气体保护焊 (板单元机器人焊接) T492T1-0C1A (φ1.4mm)	壁板上 竖向加劲 肋角焊缝 等	540	614	27	—	—
6	16+24 (Q355MD)		平位	CO ₂ 气体保护焊 (板单元机器人焊接) T492T1-0C1A (φ1.4mm)	壁板上 横向加劲 肋角焊缝 等	557	623	26	—	—

表2 埋弧焊丝、焊剂化学成分和组合力学性能

焊接材料	化学成分 (质量分数, %)						组合力学性能			
	C	Si	Mn	P	S	Ni	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A (%)	-40℃KV ₂ /J
H08Mn2E	0.08	<0.07	1.61	0.011	0.007	0.35	529	618	27.0	平均95
SJ101q	—	—	—	0.029	0.014	—				

注：以上数据均为复验值。

纵向加劲肋焊完后组装横向加劲肋，在横隔板机器人平台上焊接横向加劲肋与壁板间角焊缝以及横纵向加劲肋间之间角焊缝，从板单元中间向两侧对称施焊。横隔板焊接机器人配置两个机械手，可以同时对称施焊，减小板肋角变形（见图3）。



图3 壁板单元横向加劲肋焊接

4 节段拼装焊接

(1) 板单元块体焊接 节段整体拼装前,先在专用胎架上将2块(或3块)板单元拼焊成一个拼装板块,焊接板单元间对接焊缝和加劲肋嵌补段焊缝。通过板块预拼,减少节段整拼的工作量,降低焊接作业难度,改善焊接条件,提高总体作业效率。

板单元间对接焊缝在无加劲肋的一侧施焊。组装时预置反变形,先采用CO₂气体保护焊打底、填充,然后埋弧焊盖面,提高作业效率。对于板厚较薄的内壁板则全部采用气体保护焊,减小热输入,采用轨道式自动焊小车焊接,提高焊缝外观质量。

对接焊缝焊完并经无损检测合格后焊接板单元间加劲肋嵌补段,先焊接一侧对接焊缝,再焊接另一侧对接焊缝,最后焊接嵌补段角焊缝。

(2) 整体拼装焊接 节段立体拼装焊缝主要包括内外壁板之间立位角焊缝、横肋对接焊缝和水平撑杆焊缝等,各部位焊缝均不可避免地会存在变形,最终影响成桥结构的应力状态^[4]。节段就位后采取临时定位措施,测量节段箱口尺寸正确无误后按内壁板间角焊缝→外壁板间角焊缝→横肋对接焊缝和角焊缝→水平撑杆焊缝的顺序依次施焊,内壁板和外壁板立位焊缝分别同时对称施焊,焊接顺序如图4所示。

节段拼装立位焊缝采用轨道式自动焊接专机焊接,如图5所示。通过工艺试验确定专机移动速度、摆动幅度和频率等。壁板间角焊缝从外侧开坡口,内外壁板均从无加劲肋的箱形外侧焊接,便于自动焊接设备运行。采用热输入相对较小的CO₂气体保护焊,控制焊接变形。

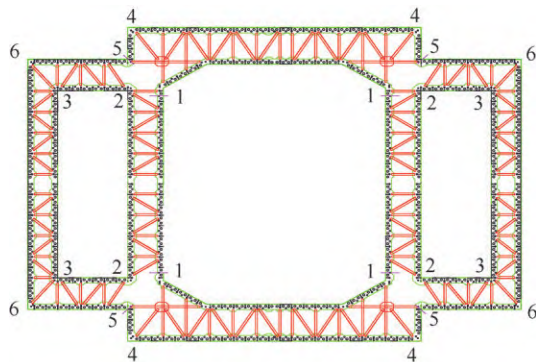


图4 节段整拼焊接顺序示意

注: 1~6代表焊接顺序。

内外壁板之间的水平撑杆按从下到上的顺序依次焊接,中间箱体四角的撑杆暂不组装,待桥位环缝完成后再焊接,便于桥位作业时操作人员进入节段间环口位置进行其他作业。

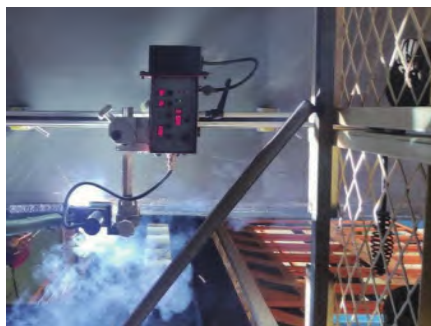


图5 轨道式自动焊接小车

5 桥位焊接

桥位焊接之前先利用吊车和定位连接件调整节段的横向、纵向位置,调整钢塔外侧和内侧钢壳,使相邻板面高低差 $\leq 1.0\text{mm}$,最后调整好节段的标高,用马板固定。节段之间焊缝采用背面贴陶瓷衬垫单面坡口双面成形方式焊接,接头最佳间隙为4~8mm。

节段之间的环焊缝焊接顺序为:先焊接外壁板间对接焊缝,后焊接内壁板对接焊缝,焊接时应按“从中间向两边,纵桥向和横桥向焊缝分别对称焊接施焊”的原则施焊,如图6所示。

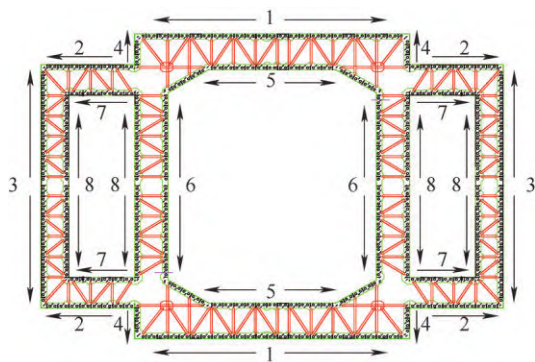


图6 节段间环焊缝焊接顺序示意

注: 1~8代表焊接顺序。

由于现场高空作业安全风险大、部分焊缝操作空间狭小、焊缝复杂等原因,导致桥位焊接采用自动化设备较困难,普及程度较低^[4]。此次钢塔节段间环焊缝研究采用小型轨道式机器人焊接,如图7所示。机器人配置可调节的连接式轨道,能快速

连接和拆卸,可以满足现场长焊缝的连续焊接。设备具有位置传感功能,能够自动检测焊缝的具体位置、钢板厚度、根部间隙及坡口角度等信息^[5]。焊接数据库存储有各种焊接位置和坡口形式的工艺数据,能够根据板厚、坡口形式和焊接位置自动匹配焊接参数,包括焊接电流、电弧电压、焊接速度、摆动幅度、摆动频率、焊缝层数及焊道排布等。焊接过程中通过电弧跟踪及时修正局部焊接轨迹的偏移。机器人总体智能化程度高,操作界面友好,便于操作,能有效减少工人的劳动强度,提高焊缝质量。



图7 桥位环焊缝机器人焊接

试验过程中也发现节段间环缝采用机器人焊接存在的问题。当背面贴陶瓷衬垫的横位对接焊缝打底焊道焊接时,由于陶瓷衬垫不导电,衬垫与液态金属不浸润,横位焊接时熔池在重力作用下向下流动,电弧控制难度很大,机器人无法在焊接过程中根据熔池情况自动调整动作,很容易出现断弧情况,因此无法直接采用机器人焊接,需要人工进行打底焊,后续填充、盖面焊道采用机器人焊接。另外,由于内外壁板间空间狭小,且密集分布着加劲肋、圆柱头焊钉和钢筋,不具备在内侧进行马板定位的条件,焊接在钢壳外侧的马板阻碍机器人连续施焊,因此也需要先人工进行打底焊。人工打底时

要注意焊缝外观,应使焊缝表面平顺,焊缝厚度均匀一致,否则应进行打磨,以免影响对机器人的自动检测和焊接稳定性。

6 结束语

1) 索塔钢壳焊接工艺评定试验采用的自动化焊接设备和工艺,焊接的接头力学性能满足标准要求。

2) 通过采取板单元机器人反变形船位焊接、合理安排焊接顺序、采用先进的小型机器人焊接设备、制定合适的焊接参数等措施,能有效提高钢壳塔的焊接质量。

3) 受钢壳塔复杂工况的限制,部分焊缝在尽量采用机器人焊接的同时辅以人工焊接,可以取得更好的效果。

参考文献:

- [1] 席刚. 斜拉桥钢壳混凝土索塔的质量控制[J]. 福建建材, 2017 (5): 67-69, 87.
- [2] 张永江, 徐向军, 张续彬, 等. 曲线形双层索塔钢壳焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2023, 52 (5): 61-64.
- [3] 瓦强林, 姜红, 罗永贵, 等. 机器人焊接技术在钢桥制造中的运用[J]. 今日制造与升级, 2023 (12): 67-70.
- [4] 戴为志, 俞海涛, 王继文, 等. 钢结构焊接机器人的现状及发展方向[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (12): 7-12.
- [5] 马晓健, 范军旗. 小型焊接机器人在港珠澳大桥制造中的应用[J]. 金属加工 (热加工), 2015 (22): 33-34.

MW 20240815

(上接第83页)

参考文献:

- [1] 曾乐. 现代焊接技术手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993.
- [2] 戴为志, 刘景凤. 建筑钢结构焊接技术“鸟巢”焊接工程实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [3] 戴为志, 孔建平. 国家体育场(鸟巢)钢结构安装

工程焊接质量控制的有效途径[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构焊接规范: GB 50661—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

MW 20240608