钢桥箱梁节段制造新技术研究

邢扬，杨翠屏，徐向军
中铁山桥集团有限公司　河北秦皇岛　066205

摘要：钢箱梁节段整体拼装是钢桥制造过程中一项极为复杂且系统的工序，其中所涉及的工艺要点较多。为提升国内钢结构桥梁制造业的整体智能制造水平，以深中通道钢箱梁节段拼装为工程背景，对钢箱梁拼装技术进行研究，通过对钢箱梁节段总拼装智能化焊接技术、无马组装技术等方面的分析研究，从而实现钢箱梁制造技术进步。从深中通道钢箱梁架设的完成效果来看，所提出的钢箱梁拼装技术科学、合理，可为今后类似桥梁的制造提供参考。

关键词：桥梁；钢箱梁；智能化焊接技术；无马组装

Research on new manufacturing techniques for steel box girder segments

XING Yang, YANG Cuiping, XU Xiangjun
China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066205, Hebei, China

Abstract: The overall assembly of steel box girder segments is an extremely complex and systematic process in the manufacturing of steel bridges, which involves many key technical points. To enhance the whole level of intelligent manufacturing in the domestic steel bridge manufacturing industry, based on the assembly of the Shenzhen-Zhongshan Link, the assembly techniques for steel box girders are researched. Through the analysis of the intelligent welding techniques and uncensored assembly techniques for steel box girders, the progress of manufacturing techniques for steel box girders is achieved. Judging from the effects of the Shenzhen-Zhongshan Link erection, the intelligent assembly techniques for steel box girders expounded in this paper are scientific and effective, which provide important reference for similar engineering construction in the future.

Keywords: bridge; steel box girder; intelligent welding techniques; uncensored assembly

1　序言

钢箱梁节段整体拼装是钢桥制造过程中一项极为复杂且系统的工序，其中所涉及的工艺要点较多，且各个工艺环节之间紧密关联，某个单一工艺环节出现问题就会对钢箱梁的整体质量造成影响。以往钢箱梁总拼组装采用人工结合简单工装设备，配合经纬仪、水准仪、全站仪进行，自动化程度较低。在钢箱梁节段焊接中，顶板、底板间的纵向、横向平位对接焊缝的打底焊和填充焊采用气体保护半自动焊接方法，盖面焊采用埋弧焊接方法；腹板、横隔板等横位、立位对接焊采用气体保护半自动焊接方法；普通贴角焊，采用气体保护半自动焊接方法。监控和数据采集主要采用激光经纬仪、水准仪和数字式全站仪等装备相互配合来进行监控，

基金项目：广东省重点领域研发计划项目（2019B111106002）。
第一作者：邢扬，硕士，高级工程师，主要研究方向为桥梁钢结构制造技术，E-mail：crsbgxy@126.com。

监控与采集时要进行坐标系转换，需要人为进行干预，转换过程中容易出现偏差和错漏。本文结合深圳至中山跨江通道钢箱梁总拼装的工程实例，对钢箱梁拼装技术进行系统研究。

2 工程概况

深圳至中山跨江通道工程位于珠江三角洲核心区域，北距虎门大桥约30km，南距港珠澳大桥约38km，直接连接深圳经济特区、广州南沙新区及中山市。深中通道项目是国家“十三五”重大工程和国务院批复的《珠江三角洲地区改革发展规划纲要（2008—2020年）》中确定实施的重大基础设施项目，是国家高速公路网深圳至广西岑溪联络线（G2518）跨珠江口的关键性控制工程。项目采用“东隧西桥”方案，具体路线起于深圳市宝安区广深沿江高速公路机场互通立交，终于横门互通，路线全长约24km，跨海长度22.4km，是集“桥、岛、隧道、地下互通”为一体的系统集群工程[1]。

钢结构桥梁包括伶仃洋大桥东泄洪区110m×24m钢梁、主跨1666m伶仃洋大桥主桥、伶仃洋大桥西泄洪区110m×22m钢梁、主跨580m中山大桥主桥、110m×9m引桥以及浅滩区60m×（18+5）m非通航孔桥及万顷沙互通立交匝道桥，钢结构桥梁合计27.99万t。

3 钢箱梁节段智能化焊接技术

钢箱梁节段现场组装，主要是由板单元组成板单元合件及由若干个板单元组成梁段的过程；钢箱梁大节段组装，是指由两个及两个以上设计小节段组拼成长度≥50m的钢箱梁。

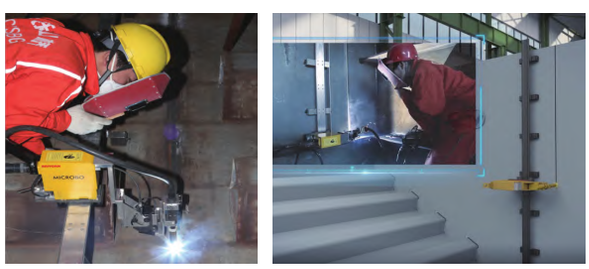
钢箱梁小节段组装的主要部件分为顶板、底板、斜底板、边腹板、中腹板及横隔板单元等6大部分。小节段总拼过程中的焊接工作主要包括顶板、斜底板、平底板及横隔板的直缝焊接，横隔板与底板的齿形板焊接，横隔板、横肋板与腹板的直缝焊接，腹板与顶板、底板的直缝焊接。大节段总拼过程中的焊接工作主要包括顶板、底板、斜底板、腹板组成的环焊缝焊接，以及嵌补段焊接[2]。

深中通道节段总拼智能化焊接技术主要体现在以下几个方面。

（1）横隔板与底板齿形板单元智能焊接技术　齿形板单元的横隔板与U肋间角焊缝较为复杂，包括平位角焊缝、立位角焊缝、立位坡口角焊缝及焊缝端部包角焊，采用可移动参数化智能焊接机器人来实现智能化焊接，从而有效确保焊接质量[3]。

（2）板单元对接焊接技术　顶板、底板单元平位对接焊接采用背面贴陶质衬垫单面焊双面成形的焊接工艺，采用气体保护焊打底和填充，埋弧焊盖面；横隔板直缝对接焊接采用气体保护焊焊接[4]。斜底板、横隔板直缝对接的气体保护焊焊接采用小型便携式轨道焊接机器人进行焊接作业，如图1所示。

（3）钢箱梁角焊缝焊接技术　横隔板、横肋板与腹板的角焊缝焊接，腹板与顶板、底板的角焊缝焊接采用气体保护焊焊接，采用小型便携式自动化焊接装备（轨道搭载式或机械跟踪式焊接装置）进行焊接作业[5]。



a）斜底板对接　　b）横隔板对接

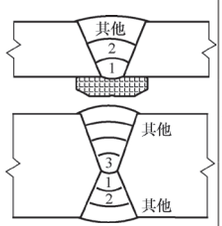
图1　便携式轨道焊接机器人

钢箱梁节段制造智能化焊接主要设备配置详见表1。以横隔板立位对接焊缝、梁段间腹板立位对接焊缝和底板对接焊缝采用小型器人焊接为例进行介绍，母材Q345qD钢板采用ER50-6实心焊丝焊接，母材Q420qD钢板采用ER55-G实心焊丝焊接，焊丝直径1.2mm，采用富氩气体（80%Ar+20%CO_2）保护，焊接参数见表2、表3。

表1　钢箱梁节段制造智能化焊接主要设备配置

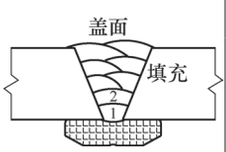
序号	设备名称	设备类型	用途
1	可移动参数化智能焊接机器人系统	焊接设备	齿形板与U肋及面板角焊缝智能化焊接（全位置）
2	便携式轨道智能焊接机器人	焊接设备	斜底板、腹板、隔板等对接焊缝智能化焊接（立位/斜立位）
3	便携式全位置自动焊小车	焊接设备	全位置角焊缝焊接自动化焊接
4	埋弧焊机	焊接设备	顶板、底板、斜底板对接焊自动化焊接（平位）
5	智能焊接管理系统	焊接管理系统	焊接数据管理

表2　钢箱梁横隔板、梁段间腹板立位对接焊缝小型机器人焊接参数

熔敷简图	焊接位置	焊道	焊接电流/A	电弧电压/V	CO_2流量/（L/min）
	立位	1	160±16	20±2	15～20
		2、3	180±18	20±2	15～20
		其他	180±18	20±2	15～20

注：背面衬垫为TG-2.0Z型陶质衬垫（单面坡口）或TG-1.30S衬垫（双面坡口）。

表3　钢箱梁斜底板对接焊缝小型机器人焊接参数

熔敷简图	焊接位置	焊道	焊接电流/A	电弧电压/V	CO_2流量/（L/min）
	平位	1	220±20	30±3	15～20
		填充	260±20	32±3	15～20
		盖面	260±20	32±3	15～20

注：背面衬垫为TG-2.0Z型陶质衬垫，不等厚对接背面贴TG-1.11J型陶质衬垫。

4　无马组装技术

4.1　无马技术的应用原则

无马工装，通常分为磁性无马工装和非磁性无马工装两种类型[6]。磁性无马工装，即通过设置磁铁或电磁铁固定，磁铁上端设置调节杆，连接杆下方设置丝杠压码，通过调节活动手柄、旋转丝杠的方式来实现调节和固定等功能。非磁性无马工装，即通过采用夹具、螺栓等固定方式，中部通过简易压板连接，压板下设置楔形块，通过机械挤压方式来实现调节、固定等功能，从而避免焊接固定，取消了焊接、打磨等有可能对钢箱梁造成损伤的工艺环节。

与传统的定位马板相比，无马技术的应用具有以下优点。

1）采用磁铁固定或机械固定等非焊接形式，避免临时焊缝的产生。

2）通用性强，工装重量轻，可循环使用，节约材料。

3）易于操作，运输简便，组装迅速，从而有利于在总拼车间广泛应用。

4）组装定位、调节期间不对钢材表面产生损伤，无需进行切割、打磨等后续工作。

4.2　采用火焰矫正代替马板技术

板单元在下料、焊接、运输及存储等阶段都容易产生波浪变形，板边的波浪变形将影响总拼组装精度。对板单元总拼出现波浪变形的位置，往往采用马板配合楔块或千斤顶进行调整，虽然精度较高，但会产生临时焊缝和内应力，此时可采用火焰修整代替马板调整。

（1）火焰矫正工艺要点　主要包括一下3方面。

1）热矫正应控制加热温度，加热不得超过800℃，严禁过热。火焰矫正加热温度的控制，对于低碳钢来说，由于加热温度跨度较大，可粗略地通过观察钢材的加热颜色来判断加热温度，钢材表面加热颜色及其相应温度见表4。

表4　钢材表面加热颜色及其相应温度

颜色	薄褐色	赤褐色	暗赤色	暗樱红	樱红色	单樱红	橘黄微红
温度/℃	500	600	650	700	750	800	850

2）加热完成后应使钢板缓慢冷却至常温，温度降至室温前，不得锤击钢材和用水急冷。

3）火焰矫正关键在于确定加热位置，所选择的加热位置必须使其产生的变形方向与焊接残余变形的方向相反，从而达到抵消焊接残余变形的目的[7]。

（2）火焰矫正方法　板边波浪变形多为焊接角变形，采用线状加热的方法。在凸面用线状加热时，火焰沿直线移动，薄板常为多条加热；而对于厚板、刚性较大的杆件，在直线移动的同时增加横向摆动，形成一定宽度的加热带。对接焊缝板边波浪变形火焰矫正加热位置如图2所示。

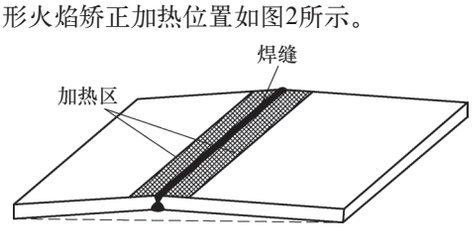


图2　对接焊缝板边波浪变形火焰矫正加热位置示意

4.3　采用磁力马板

传统的顶板组屏马板使用如图3所示，将对接板调平后，定位马板采用焊接方法连接到两块对接板

上，连接焊缝对板单元会产生损伤。为了能够实现无损伤装配，在板单元拼接中采用磁力马板（见图4），在对接板偏低侧设置磁铁，通过磁力使磁铁与板面紧密贴合；在对接板较高侧利用楔形块或液压千斤顶，通过调整使对接缝两侧板面高低差符合规范要求，利用磁性无马工装实现两块对接钢板的无损伤组装。但受结构尺寸、工装重量、磁力大小等限制，磁力马板只适用于钢板比较薄、需要辅助外力不大的情况。

图3　顶板组拼马板使用

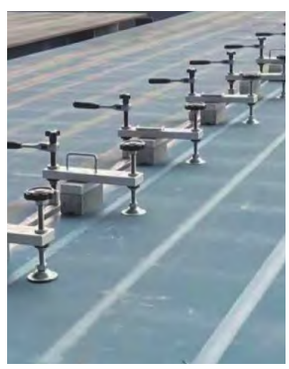
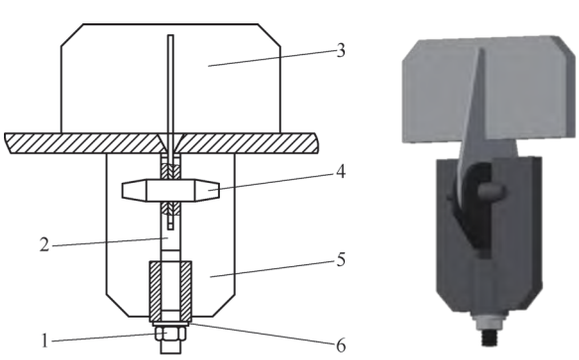


图4　磁力马板组装顶板单元

4.4　组合压马工装

组合压马工装，主要适用于对接缝为直缝，且两侧板单元接近水平的区域。压码工装主要由上固定板、下固定板、冲钉、垫片、螺母及拉杆组成，如图5所示。

工作时，上固定板插入两相邻桥面板的间隙中，之后通过冲钉与拉杆相连。之后将拉杆插入下固定板的套筒中去，通过添加垫片和施拧螺母，使上下固定板紧贴相邻桥面板，进而实现桥面板的调平工作，如图6所示。钢板调平后，在距离工装两侧500～800mm的位置即可进行定位焊。



a）截面图　　b）立体图

图5　组合压马工装

1—螺母　2—拉杆
3—上固定板　4—冲钉　5—下固定板　6—垫片

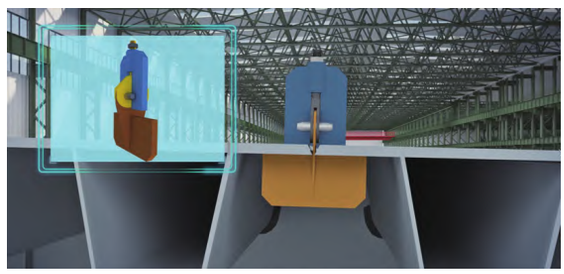


图6　组合压马工装使用示意

5　结束语

1）在深中通道钢箱梁节段拼装中，以提升典型焊缝自动化焊接水平为突破口，进行了小型便携式自动化及智能化焊接技术研究，满足了焊接位置多样化等要求，改善了现阶段自动化焊接程度较低的状况，实现了钢箱梁节段的智能化焊接。

2）在深中通道钢箱梁节段拼装中，为了根除焊接定位马板对母材的损伤，采取了火焰修整、磁力马板、组合压马工装等，满足了钢箱梁节段结构尺寸、组装精度等要求，提高了钢箱梁节段拼装质量。

3）从深中通道钢箱梁架设的完成效果来看，本文所阐述的钢箱梁拼装技术科学、合理，可为今后类似工程的钢箱梁制造提供重要参考。

参考文献：

[1] 姚志安. 深中通道伶仃洋大桥筑岛围堰施工关键技术[J]. 世界桥梁，2020，48（2）：15-19.

[2] 陈钊庭，王荣辉. 港珠澳大桥深水区非通航孔桥大节段钢箱梁施工全过程控制[J]. 桥梁建设，2015，45（5）：112-116.

[3] 陈善本，吕娜. 焊接智能化与智能化焊接机器人技术研究进展[J]. 电焊机，2013，43（5）：28-36.

[4] 庞升阳. 城市立交大跨度钢箱梁架设技术[J]. 科技资讯，2010（31）：46-48.

[5] 贺俊洳，董涛，张哲源，等. 单面焊双面成型技术在大型箱型梁安装中的应用[J]. 机械化施工，2023（4）：46-48.

[6] 何开平，梁俊民，梁剑明，等. 无码装配工装在分段组立阶段的应用[J]. 广东造船，2020，39（4）：60-63.

[7] 王世达，程尚华，贾晓燕. 焊接残余变形的火焰矫正工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2020（2）：38-40.

MW 20240509