



港珠澳大桥钢箱梁节段拼装 自动化焊接技术

张华 范泽平 张志伟

【摘要】以港珠澳大桥为工程背景，分析了钢箱梁节段拼装实现自动化焊接的技术需求与难点，采用模拟试件焊接、无损检测、理化试验分析等手段进行了相关试验研究，对钢箱梁节段拼装自动化焊接技术的实际应用具有借鉴意义。

大跨度公路桥梁构造多为焊接结构的钢箱梁，城市高架桥也越来越多地采用质量轻、施工周期短的钢箱梁结构。钢箱梁制造总体上分为三个阶段：板单元制造、小节段拼装、大节段拼装。

近几年我国主要钢桥制厂建设了钢箱梁板单元自动化生产线，借助板单元自动装配机、门式多头焊机、焊接机器人等自动化装备，已基本实现了板单元的机械化、自动化制造。而在钢箱梁节段拼装自动化焊接水平仍较低，大部分比例采用手工焊接操作，生产效率低，质量水平不稳定。因此为全面提升钢箱梁制造过程的自动化焊接水平，需进行节段拼装的自动化焊接技术相关研究。完工的港珠澳大桥钢箱梁节段如图1所示。



图 1

1. 技术需求与难点

相对于板单元制造，小节段与大节段拼装制造由于其结构特点的不同，实现自动化焊接需要有截然不同的方式，由此带来了新的技术问题，两者主要区别归纳为以下几个方面。

第一，由平面作业方式转换为立体空间作业方式，节段拼装时整体结构难以翻身，焊接位置更加多样化，自动化焊接需要适应全位置焊接需求。

第二，箱梁节段结构尺寸更加庞大，板单元的横向尺寸为3~4m，而箱梁节段的横向尺寸可达30~50m，采用门式焊接操作机方式实现自动化焊接变得不切实际。

第三，板单元焊接多为角接头形式，焊接位置为平角焊位，焊枪直线行走即可满足焊道成形要求，而箱梁节段制造焊接接头形式更加复杂多样，含对接、全熔透角接、部分熔透角接等接头形式，常采用多层多道工艺，要求自动化焊接设备对焊

枪摆幅与每层焊缝厚度能进行有效控制，适应不同板厚与熔宽的需求。

第四，对于板单元结构，其加劲肋要求顶紧装配，装配精度相对容易保证，而箱梁节段制造由于受板单元的制造及定位精度的影响，所以装配精度不易控制，焊接坡口尺寸的一致性难以得到保证，要求自动化焊接设备对其有更强的适应能力。

鉴于上述特点，钢箱梁节段拼装自动化焊接研究项目将面临新的技术挑战，提出将板单元自动化焊接中“以大制小”转换为“以小制大”的制造模式，因此全位置自动焊接小车将成为实现节段拼装自动化焊接的主要装备与手段。

2. 试验条件与试验方案

(1) 试验设备与材料 设备选用KOWELD全位置自动焊接小车一台，配合CO₂气体保护焊焊接电源，主要特点有：①可以实施平位、立位对接焊缝的焊接。②模拟人工操作，焊枪具有

左右摆动功能，实现不同要求的焊接。③焊接速度、摆动速度、各部位停留时间、摆幅大小、摆动中心线和操作角度等均可根据实际焊接需要进行调整。④实现焊接所需要的基本摆动方式。⑤小车附带永磁铁吸附在工件表面，通过轨道控制行走方向，移动、拆卸较方便。

母材采用钢珠澳大桥钢板材质Q345qD，化学成分及力学性能如表1所示。试件尺寸20 mm×600mm×2 000mm，主要焊接接头形式如图2所示，对接接头的坡口角度为50°，部分熔透的角接头坡口为45°。

药芯焊丝型号E501T—1（牌号TWE—711）、 ϕ 1.2mm，化学成分与力学性能如表2所示。实芯焊丝型号ER50—6（牌号RM—52）、 ϕ 1.2mm，化学成分与力学性能如表3所示，陶质衬垫牌号为TG—1.0。

(2) 试验方案 在节段拼装中，由于节段不便翻身，对于板单元间的对接焊缝，采用陶质衬垫单面焊双面成形工艺，焊接坡口需留有一定的间隙，试验时打底、填充、盖面均采用自动焊。对于板单元间的角接头，由于焊缝根部操作空间小，打底焊操作难度大，所以采用手工焊；盖面焊道采用自动焊工艺。

模拟人工操作时对熔池形态的控制与处理方式，试验在自动化焊接条件下不同的焊接工位、不同焊层时采用的焊接工艺，包括焊接参数、焊枪摆动方式、摆幅、摆速及停留时间等，保证焊缝内部熔合质量，改善焊缝外观成形。同时通过宏观断面分析、

无损检测以及力学性能分析等手段考察焊缝性能，以全面满足相关规范对焊缝性能的要求。

3. 试验结果与分析

(1) 自动焊接小车焊枪运行参数与焊缝尺寸的关系 自动焊接小车控制面板界面如图3所示。面对一条待焊的焊缝坡口，首要的任务是合理选择焊接参数以达到所要求的焊缝成形，其中最主要的控制要素是焊缝的厚

度，我们试图通过数学模型方式找出小车焊接参数与焊缝尺寸间的关系，便于指导实际操作时焊接参数的选择。以“锯齿形”摆动轨迹为例经过推导得出，当焊接电流、电弧电压一定时，焊层高度随着焊枪摆动速度、两侧停留时间的增大而增大，随着摆动幅度、小车运行速度的增加而减小。

(2) 焊缝外观成形与焊接

表1 钢板的化学成分与力学性能

化学成分（质量分数，%）							力学性能			
C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A (%)	冲击吸收能量 (-20℃) /J
0.114	1.45	0.230	0.015	0.007	0.037	0.023	395	515	33.0	263, 262, 267

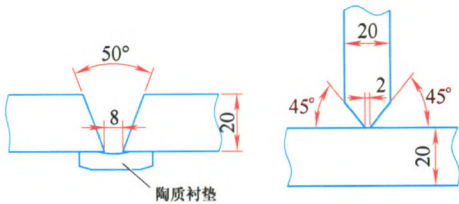


图2 焊接接头形式

表2 药芯焊丝化学成分与力学性能

化学成分（质量分数，%）							力学性能			
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A (%)	冲击吸收能量 (-20℃) /J
0.035	1.431	0.483	0.012	0.015	0.031	0.010	510	585	22.0	130, 107, 113

表3 实芯焊丝化学成分与力学性能

化学成分（质量分数，%）							力学性能			
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A (%)	冲击吸收能量 (-20℃) /J
0.08	1.52	0.88	0.015	0.020	0.020	0.021	430	550	30	102, 95, 98



图3 自动焊接小车控制面板界面

参数 采用全位置自动焊小车焊接钢箱梁节段拼装立位对接焊缝。典型焊接接头的焊接参数如表4所示。

在试验中发现，爬坡焊及立焊位陶质衬垫焊打底时，需要焊枪采用“月牙形”摆动方式，而非采用“锯齿形”摆动方式，这样可以避免因焊丝行进过快而与陶质衬垫直接碰撞。在其余位置，均采用“锯齿形”摆动方式，这样可以避免焊层厚度过大。

对接接头坡口焊中的盖面焊道，平焊位预留的坡口深度约2mm为宜，立焊位预留的坡口深度以3mm为宜，有利于焊缝余高的控制。

焊枪在焊缝两侧的停留时间对焊缝成形有显著影响，盖面焊道两侧停留时间需短一些（0.1~0.2s），其他焊道两侧停留时间较长些（0.3~0.5s），停留时间稍长，可形成凹形焊道，但同时会增加焊缝厚度，可根据实际需要，焊缝两侧选择不同的停留时间。

焊枪摆动速度对焊缝外观成形有较明显的影响，如图4所示，左侧摆动速度为“12”，右侧摆动速度为“18”，可见摆动速度较快者，焊缝外观纹路较细密。

（3）焊缝无损检测 对于节段拼装焊接试件进行超声波探伤，对接接头焊缝，B级检测，I级合格，部分熔透角接接头焊缝，B级检测，II级合格，执行标准为TB10212—2009。探伤结果显示，在合适的焊接参数条件下，自动焊焊缝内部质量良好，

表4 典型焊接接头的焊接参数

接头编号	焊接位置	焊接材料	自动焊接小车参数				焊枪焊接参数	
			摆动两侧 停止时间/s	摆动 幅度	摆动 速度	小车运行速度 /mm·min ⁻¹	焊接电流 /A	电弧电压 /V
D1	平焊	药芯焊丝	盖面0.2 其余0.3~0.5	35~85	25~35	200~350	200~260	28~33
D2	立焊	药芯焊丝	盖面0.2 其余0.3~0.5	40~80	10~20	80~150	160~200	23~26
D5	平焊	实芯焊丝	盖面0.2 其余0.3~0.5	40~80	20~30	120~200	180~240	28~33
J1	立焊	药芯焊丝	0.3	40~45	16~20	110~130	200~220	28~30

注：摆动幅度、摆动速度值为焊接小车控制箱上的显示值，没有对应具体量纲。



图4 焊枪摆动速度对焊缝外观成形的影响

无超标焊接缺陷。

（4）焊缝力学性能 焊接试板经过超声波探伤后，选取有代表性的接头进行力学性能试验，试验结果如表5所示。

从表5中可以看出，采用自动焊接小车焊接的焊缝力学性能满足相关规范要求，且具有一定的富余量。

4. 结语

（1）分析了钢箱梁节段拼装实现自动化焊接的技术需求与难点，通过全位置自动焊接小车，采用CO₂气体保护焊，可实

现节段拼装各部位焊接接头的自动化焊接要求。

（2）建立了自动焊接小车焊枪运行参数与焊缝成形间的数学关系，为自动焊焊缝成形的控制提供理论依据，有助于指导操作焊工根据焊接坡口尺寸对焊接参数实施有效调节。

（3）试验研究了在自动化焊接条件下焊接参数对焊缝成形的影响，优化了相关工艺参数，相比半自动焊CO₂气体保护焊，焊缝外观成形质量大幅度提高，力学性能满足相关规范要求。

表5 焊接接头力学性能

编号	板厚/mm	焊缝金属拉伸			冲击吸收能量/J (-20℃)		接头侧弯 D=2a, θ=180°
		R _{elt} /MPa ≥345	R _m /MPa ≥470	A (%) ≥22	焊缝中心 ≥47	热影响区 ≥47	
D1	20	500	575	23.8	78, 68, 62	166, 62, 143	完好
D2	20	500	585	25.6	62, 58, 63	57, 117, 138	完好
D5	20	380	495	31.0	78, 57, 67	152, 59, 88	完好
J1	20	550	620	25.0	—	—	—

作者简介：张华、范泽平、张志伟，武船重型工程股份有限公司。

MW 20151018