

集聚式多锚头钢横梁制造工艺研究

张续彬, 徐向军

中铁山桥集团有限公司 河北秦皇岛 066205

摘要: 池州长江公路大桥主塔采用花瓶形, 塔柱间钢横梁采用集聚式多锚头箱形结构, 每个钢横梁上最多有10对锚固点(20个锚头)。通过对集聚式多锚头钢横梁的结构特点分析, 确定了合理的横梁块体组装焊接顺序; 通过焊接工艺评定试验确定了与母材匹配的焊接材料和焊接参数, 保证了焊缝质量; 通过对拼装胎架、锚箱精度控制、焊接变形控制等关键项点研究和有效技术的应用, 确保钢横梁的外形尺寸符合标准和规范要求; 先孔法栓接技术的实施, 可大幅提高桥位钢横梁拼装效率。

关键词: 集聚式; 多锚头; 钢横梁; 工艺研究; 精度控制; 先孔法

Research on manufacturing process of clustered multi-anchor steel crossbeams

ZHANG Xubin, XU Xiangjun

China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066205, Hebei, China

Abstract: The main tower of the Chizhou Yangtze River Highway Bridge adopts a vase type, and the steel crossbeams between the tower columns adopt a clustered multi anchor box structure. Each crossbeam has a maximum of 10 pairs of anchor points (20 anchor heads). By analyzing the structural characteristics of the clustered multi anchor steel crossbeam, a reasonable assembly and welding sequence of the crossbeam blocks was determined. The welding consumable and welding parameters that match the base material were determined through welding procedure qualification, ensuring the quality of the weld. By studying key points such as precision control of assembly frame, anchor box, welding deformation control, and applying effective technical measures, ensure that the external dimensions of the steel crossbeam meet the requirements of standards and specifications; The implementation of the pre-drilling hole method bolt connection technology greatly improves the efficiency of steel crossbeam assembly at bridge locations.

Keywords: agglomeration; multiple-anchor heads; steel crossbeam; process research; precision control; pre-drilling hole method

1 序言

安徽池州长江公路大桥为双塔双索面斜拉桥, 桥垮布置48m+48m+48m+96m+828m+280m+100m, 全长1448m。跨江主桥主塔采用花瓶形, 塔柱间钢横梁采用箱形结构。单个主塔上塔柱设置6道

钢横梁, 每个横梁采用灯笼状外包钢结构, 形成6个钢珠, 建成后的主塔外观如图1所示。

池州长江大桥塔柱钢横梁采用箱形结构, 斜拉索采用分组集聚方式锚固于各个横梁结构内部, 钢锚箱设置于主塔钢横梁的边腹板与中央腹板之间,

第一作者: 张续彬, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向为桥梁用钢的开发应用试验研究和桥梁钢结构焊接工艺研究,
E-mail: zhangxubin2001@126.com。

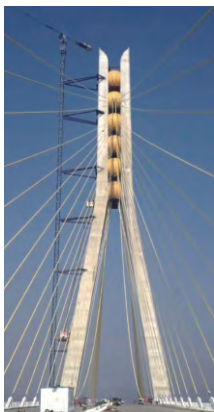


图1 池州桥主塔外观照片

通过锚固支承板沿拉索方向与钢横梁腹板熔透焊接。每个塔柱由上至下分布6个钢横梁，其中第1~4个钢横梁分别锚固10对斜拉索，第5个横梁锚固8对斜拉索，第6个横梁锚固6对斜拉索，单根塔柱锚固共计54对斜拉索，以第1个钢横梁为例，如图2所示。

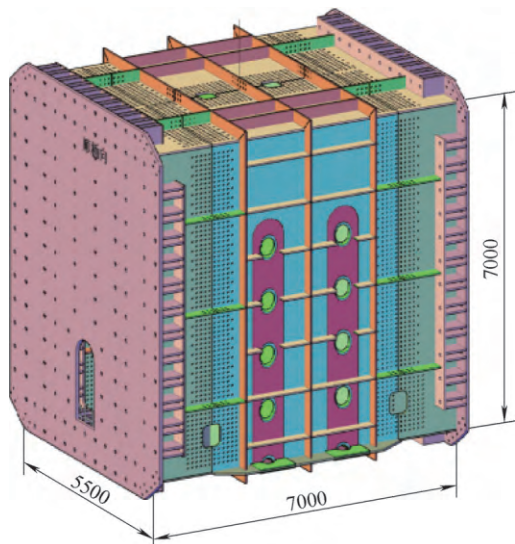


图2 钢横梁立体图

常见的斜拉桥索塔锚固结构，根据构造不同分为钢锚梁和钢锚箱两种。其中钢锚梁一般由钢牛腿和钢锚梁组成，钢牛腿通过预埋钢板首先预埋于混凝土索塔柱内，钢牛腿壁板上焊接圆柱头焊钉，通过圆柱头焊钉传递斜拉索竖向分力。钢锚梁置于两个钢牛腿之上，两者之间主要传递压力，钢锚梁与钢牛腿一般通过焊接或栓接结构性连接，每个钢锚梁之上，通常锚固1对或2对斜拉索^[1, 2]。钢锚箱整体预埋于混凝土索塔内部，两侧通过圆柱头焊钉传递斜拉索竖向分力，上下钢锚箱间通过磨光顶紧传递竖向分力。每个钢锚箱之上，通常锚固1对斜拉索，一般的钢锚箱最多锚固4对斜拉索^[3, 4]。

与以往索塔钢锚箱或钢锚梁锚固构造不同，本桥钢横梁采用一种独特的集聚式多锚头钢横梁锚固结构形式，单个钢横梁最多锚固了10对斜拉索，钢横梁由于本身重量过大，难以进行桥位整体吊装，因此将每个钢横梁分成4个块体制造，各分块间通过高强度螺栓联接，外侧钢珠结构与横梁也采用高强度螺栓联接，栓接量大，对横梁块体加工精度要求高。钢横梁结构异常复杂，焊接量大，焊接变形控制难，制造难度很大。

2 集聚式多锚头钢横梁制造技术

钢横梁采用箱形结构形式（见图2），高7m，顺桥向宽5.5m，横桥向宽7m。钢锚箱设置于主塔钢横梁的边腹板与中腹板之间，通过锚固支承板沿拉索方向与钢横梁腹板熔透焊接。为便于施工，单个钢横梁共分4块进行吊装，边箱体吊装重量约为63t，中间块体沿横竖向进行对称分开，单块最大吊重约为68t，单横梁最大总重量约为315t。钢横梁分块之间采用M30mm的高强度螺栓联接，钢横梁与钢珠间采用M20mm的高强度螺栓联接，单个钢横梁上使用高强螺栓数量12328套，全桥73968套。

将钢横梁分为4个单箱体制造，如图3所示。其中，边箱体（索塔锚固块体）2个，中箱体（横向块体）2个。每个塔柱共制作钢横梁6组，共计边箱12个、中箱12个。块体制作采用零部件钻孔、胎型定位组焊的工艺。边箱、中间箱体完成制作后进入整体试拼装工序。

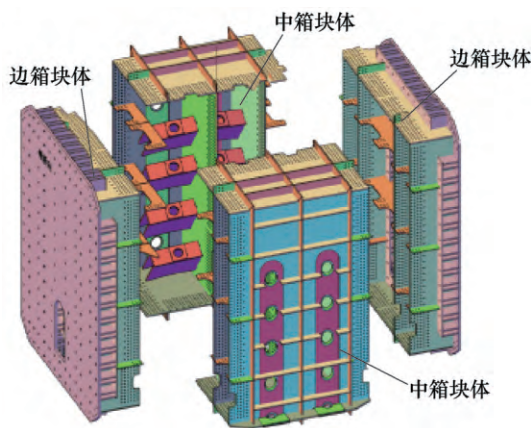


图3 集聚式钢横梁分块

2.1 中箱体制造

中箱体由顶板、底板、壁板、腹板、连接板、钢锚箱单元及肋板等零部件组成，如图4所示。

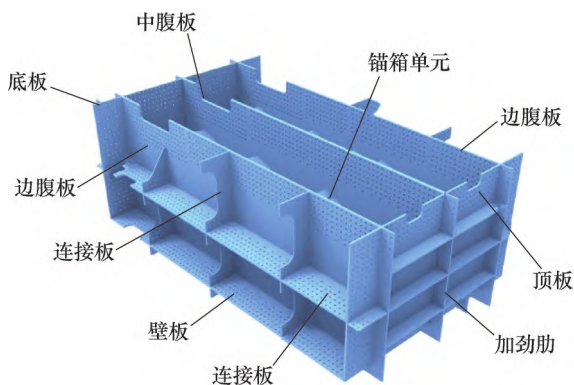
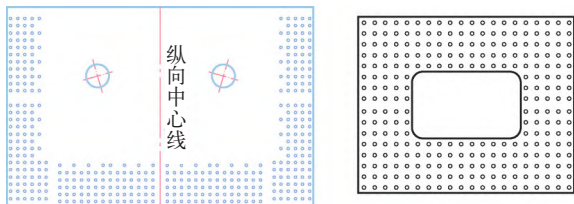


图4 中间箱体结构

中箱体采用先孔法制造，零部件生产时，对于带孔的顶底板、腹板等，采用卡样板钻孔，拼接板也是出全孔，可以提高生产效率，保证钢横梁桥址安装时拼接板的通用性，采用先孔法钻制的钢横梁顶板和拼接板如图5所示。

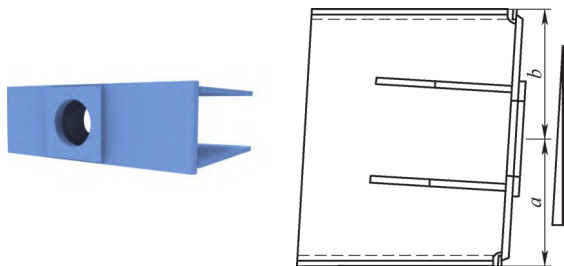


a) 钢横梁顶板

b) 拼接板

图5 先孔法钻制的钢横梁顶板和拼接板

锚箱单元（见图6）组装时要控制锚箱的倾斜角度；由于锚箱钢板厚度大，焊接量大，焊接时，采用热输入小、热量集中的 CO_2 气体保护焊，以控制焊接变形。焊接完成后的锚箱单元，划线机械加工锚箱两边、锚垫板平面及镗锚索孔，为锚箱定位提供足够高的精度。



a) 锚箱立体图

b) 锚箱角度示意

图6 锚箱单元结构

注：a、b表示锚孔中心到中腹板和边腹板间的距离。

中箱体的组焊顺序如图7所示。

1) 将中腹板置于平台，以横向中线及焊接边为基准划锚箱组装线，按线依次组装锚箱单元，形成

中腹板单元。

2) 将壁板置于平台上，组装中腹板单元和两边腹板成槽体。边腹板、中腹板与壁板横向基准线对齐，宽度以壁板孔分中组对。

3) 组装顶板、底板成箱体，组装腹板外接头板和加劲肋，加劲肋以中线及已钻制孔定位。

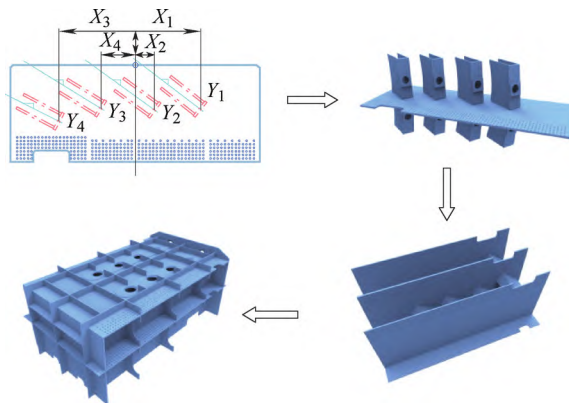


图7 中箱体组焊顺序

4) 进行中间箱体焊接。中间箱体采用热输入小、热量集中的 CO_2 气体保护焊，控制焊接变形。首先对称焊接中腹板、边腹板与顶底板间熔透角焊缝1、2；对称焊接锚箱与腹板间熔透角焊缝3、4；同向对称焊接中腹板、边腹板与壁板间熔透角焊缝5、6（见图8）。

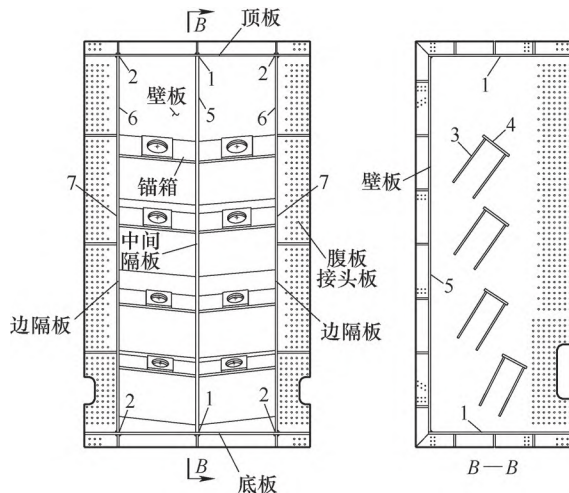


图8 中箱体焊接顺序

注：1~7为焊缝代号。

2.2 边箱体制造

边箱体由预埋板、顶板、底板、壁板、腹板、锚固板、加劲板及接头板等零件组成，如图9所示。

边箱体也采用先孔法制造，顶板、底板及腹

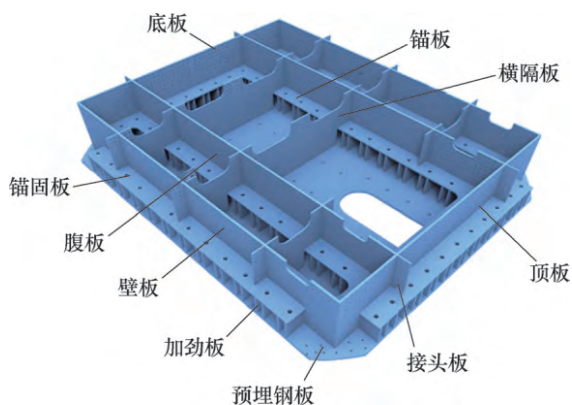


图9 边箱体结构

板等板件采用卡样板钻孔。

边箱体组的组焊顺序如图10所示。

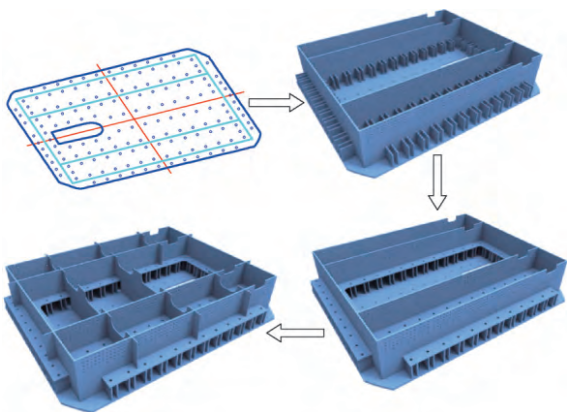


图10 边箱体组焊顺序

- 1) 将预埋钢板置于平台上，划基准线及组装位置线。
- 2) 在预埋钢上依次组装腹板、壁板、顶板、底板，依次对称焊接腹板与顶底板间角焊缝1、外壁板与顶底板间角焊缝2、腹板与预埋钢板间角焊缝3、壁板与预埋钢板间角焊缝4、顶底板与预埋钢板间角

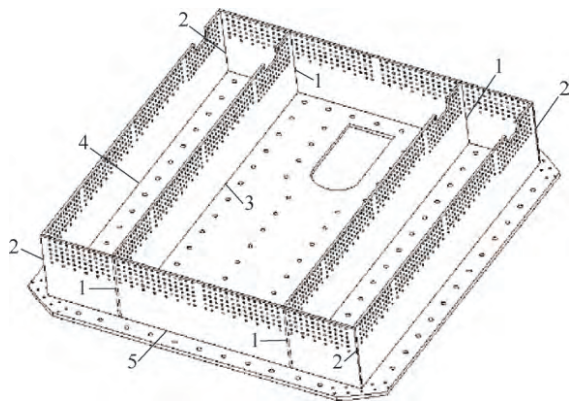


图11 腹板、顶底板与预埋钢板焊接顺序

注：1~5为焊缝代号。

焊缝⑤（见图11）；再组焊加劲板。

3) 组装锚板，组装横隔板及周边小加劲肋，加劲肋以已钻制孔定位。对称焊接锚固板与腹板、壁板间角焊缝6；焊接锚固承压板与腹板、壁板间周围角焊缝7、8；焊接锚固腹板与承压板和预埋钢板间角焊缝；焊接隔板、加劲肋角焊缝9、10（见图12）。

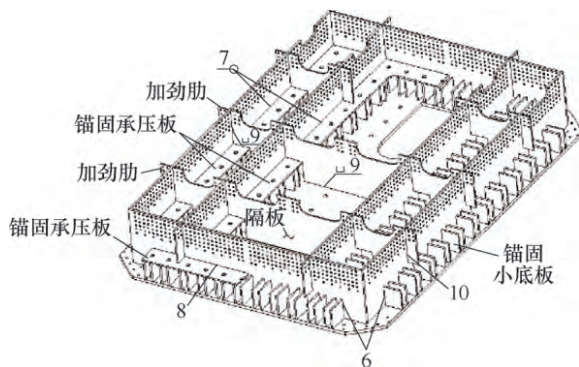


图12 锚固板、隔板等焊接顺序

注：6~10为焊缝代号。

2.3 焊接方法和参数

钢横梁主要材质为Q370qE钢板，符合GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》要求^[5]，热机械轧制状态交货，板厚为12~60mm。钢板的化学成分见表1，钢板力学性能见表2。焊接接头力学性能满足Q/CR 9211—2015《铁路钢桥制造规范》要求，即屈服强度 $\geq 370\text{MPa}$ ，抗拉强度 $\geq 510\text{MPa}$ ，断后伸长率 $\geq 20\%$ ，接头冲击性能要求达到 -40°C 冲击吸收能量 $\geq 41\text{J}$ ^[6]。

表1 Q370qE钢板化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Al
≤ 0.14	≤ 0.55	1.00~1.60	≤ 0.020	≤ 0.010	0.010~0.090	0.010~0.080	0.006~0.030	0.010~0.045

注：Ni、Cr、Cu含量均 $\leq 0.030\%$ ，CEV $\leq 0.38\%$ 。

表2 Q370qE钢板和焊接接头力学性能

拉伸试验				冲击试验		备注
屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa	断后伸长率(%)	温度/℃	冲击吸收能量/J	
板厚≤50mm	50mm<板厚≤100mm					
≥370	≥360	≥510	≥20	-40	≥120	钢板 GB/T 714—2015
≥370	≥360	≥510	≥20	-40	≥41	焊接接头 Q/CR 9211—2015

钢横梁结构复杂，全部焊缝采用灵活方便的气体保护焊半自动方法焊接，为了满足高标准焊接要求，通过焊接工艺评定试验确定了焊接材料和焊接参数。气体保护焊采用了含镍的低合金结构钢焊丝，平位采用HTW-58实心焊丝焊接，立位采用GFL-71Ni药芯焊丝焊接，焊丝直径1.2mm^[7]，焊接材料化学成分见表3，熔敷金属力学性能见表4。

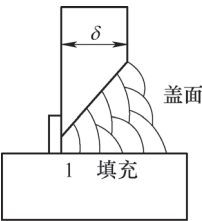
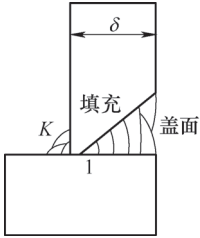
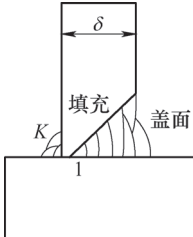
表3 焊接材料化学成分（质量分数）（%）						
元素	C	Si	Mn	P	S	Ni
HTW-58	0.07	0.81	1.51	0.015	0.011	0.80
GFL-71Ni	0.04	0.43	1.38	0.006	0.009	0.46

钢横梁受力大，锚箱角焊缝、中间腹板和边腹板与顶底板间角焊缝、边箱顶底板和边腹板与预埋钢板间角焊缝、中箱内腹板与横隔板间角焊缝均需要熔透，外腹板与顶底板间为深坡口角焊缝，这些重要焊缝的焊接参数见表5。

表4 焊接材料熔敷金属力学性能

项目	拉伸试验			冲击试验	
	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 (%)	温度 /℃	冲击吸收能量 /J
HTW-58	450	560	28.0	-40	75,62,67
GFL-71Ni	519	603	25.0	-40	92,79,90

表5 重要焊缝焊接参数

熔敷简图	焊接位置	焊接材料	焊道	焊接电流 /A	电弧电压 /V	备注
	平位	HTW-58 (φ1.2mm)	1	240±20	30±3	钢锚箱承压板与两侧钢横梁隔板间熔透角焊缝
			填充	260±20	30±3	
			盖面	260±20	30±3	
	平位	HTW-58 (φ1.2mm)	1	240±20	30±3	中间腹板与顶底板、外腹板间熔透角焊缝；边箱顶底板、外腹板与预埋钢板间熔透角焊缝等
	立位	GFL-71Ni (φ1.2mm)	填充	260±20	30±3	
			盖面	260±20	30±3	
			1	180±20	26±3	
			填充	200±20	28±3	
	平位	HTW-58 (φ1.2mm)	1	240±20	30±3	外腹板与顶底板间坡口角焊缝
			填充	260±20	30±3	
			盖面	260±20	30±3	
	立位	GFL-71Ni (φ1.2mm)	1	160±20	24±2	边段锚固加劲肋与壁板、腹板间坡口角焊缝
			填充	180±20	26±2	
			盖面	180±20	26±2	

注：CO₂保护气体流量为15~20L/min。熔透角焊缝背面焊前需碳弧气刨清根并打磨干净。

2.4 钢横梁试拼装

中箱体和边箱体制造完成后,涂装前对每个塔柱6个钢横梁分别进行试拼装,试拼装采用平卧试装方法。一组试拼装单元包括2个边箱体和2个中箱体。钢横梁单块最大吊重68t,4个横梁块体重量约315t。试装场地为混凝土硬化地面,在硬化地面上设置胎架,胎架有足够的承载能力,胎架距地面高度1m。起吊设备应能够满足拼装需要。同时制备支墩、试装工具、测量仪器、挂篮、脚手架及跳板。

一个钢横梁组拼分3步进行,首先在拼装胎架上就位上游侧边箱,然后在上游侧边箱上分别拼装两个中箱体,最后拼装下游侧边箱,试拼装顺序如图13所示。

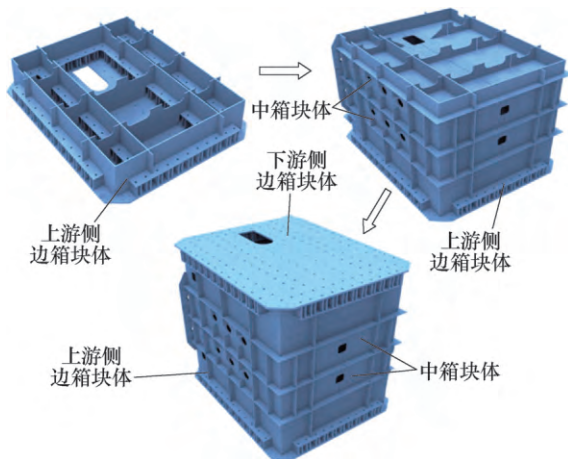


图13 钢横梁试拼装顺序

3 关键点研究

3.1 拼装胎架

横梁拼装在专用拼装胎架上完成,在拼装胎架外设置块体纵向和横向定位基线,以便随时对胎架上的定位基准及块体组装时的尺寸及线形进行检测。胎架基础有足够的承载力,确保在使用过程中不发生沉降;胎架应具有足够的刚度,避免在使用过程中变形。拼装过程中,要对胎架沉降数据进行检查和分析,确认拼装开始到拼装结束胎架各点位、各个结构部位最大沉降为2mm,胎架整体处于稳固可靠的状态下^[8]。

3.2 锚箱加工精度控制

每个钢横梁上最多有10对锚固点,共计20个锚头,锚固点的位置精度至关重要。为保证锚头安装

精度,钢锚头首先组焊成块体单元,安装钢衬垫后划线机械加工。主要加工两平行焊接边、锚垫板平面以及锚索孔。机械加工后的钢锚头外形尺寸偏差很小,符合锚头安装精度的需求;另外,钢锚头与腹板间焊接采用全熔透焊接,焊缝背侧贴钢衬垫,钢衬垫厚度采用16mm钢板。通过实践证明,16mm钢衬垫可以有效减少熔透焊缝焊接收缩量,消除采用薄钢衬垫时背侧焊后凹陷或挤压变形造成焊接收缩量不一致的问题。

3.3 焊接变形控制

索塔钢横梁受力大、结构复杂,多采用厚板焊接,最大板厚60mm,且锚箱、中间腹板与顶底板、中间腹板与外腹板、边箱顶底板和外腹板与预埋钢板间等重要焊缝多为熔透角焊缝,外腹板与顶底板间为深坡口角焊缝,焊接量大,焊接变形控制难。因此,在分块制造中,合理安排焊接顺序,对称施焊,全部采用热输入小、热量集中的CO₂气体保护焊,火焰修整与焊接作业穿插进行,焊后及时修整,通过一系列有效技术措施,对保证各分块制造尺寸起到了关键作用,为保证分块间的大量栓接精度创造了良好条件。

3.4 先孔法栓接技术

因单个钢横梁分块联接螺栓数量众多,钢横梁分块之间采用M30高强度螺栓联接,钢横梁与钢珠间采用M20高强度螺栓联接,单个钢横梁上使用高强度螺栓数量12328套,全桥共计7.5万套螺栓。采用“后孔法”的工艺措施虽然能够可靠保证高强度螺栓的通孔率,但需要逐一配置拼接板,由于拼接板位置固定,不能调换,所以制造效率很低,现场区分拼接板困难,不利于批量生产,因此我们采用了“先孔法”。“先孔法”消除了“后孔法”存在的各项问题,使“后孔法”的劣势变成了“先孔法”的优势,大大提高了桥位横梁拼装的栓接效率,保证了栓孔重合率。

4 结束语

在桥梁制造过程中,重视制造工艺研究和质量控制,不断创新和提高索塔钢锚固结构的制造技术,从而为大跨度钢桥建设提供更加可靠和高效的技术保障。

1) 根据池州长江大桥塔柱采用集聚式多锚头钢

(下转第52页)

上,采用埋弧焊接头的抗拉强度满足要求,接头热影响区冲击性能有所减小,但远高于标准要求。

表7 接头抗拉强度 (MPa)

序号	焊接方法	焊接位置	抗拉强度	验收标准
1	SAW	2G	室温: 669、666	≥585
			150℃: 563	≥540
2	GMAW	2G	室温: 684、685	≥585
			200℃: 546	≥540

表8 接头冲击性能 (J)

序号	焊接方法	焊接位置	冲击吸收能量 (-18℃)					
			母材		焊缝区		热影响区	
			实测值	平均值	实测值	平均值	实测值	平均值
1	SAW	2G	126	153	220	193	134	137
			194		158		144	
			140		200		134	
2	GMAW	2G	184	166	154	153	174	183
			162		150		176	
			152		154		198	

注:验收标准为冲击试验平均值≥54J,只允许一个<54J,但必须≥47J。

4 结束语

本文针对核电钢制安全壳埋弧横焊的需求,开展了对应的焊接工艺研发,主要得出以下结论。

1)当板材厚度为42mm时,相比于K形坡口,采用X形坡口进行打底焊接更容易避免气孔和夹渣缺陷,建议可采用气体保护焊打底+埋弧焊填充的焊接方式。

2)不同热输入对焊缝成形及内部质量有重要影响,热输入较小时容易产生未熔合缺陷。不同热输入下接头的冲击吸收能量、硬度检测均满足标准要求。

参考文献:

[1] 王刚,胡广泽,曹中云,等.钢制安全壳熔化极气体保护自动焊接工艺研究[J].焊接,2018(5):31-35.
[2] 吕永飞,李广.自动焊技术在AP1000安全壳拼装过程中的应用研究[J].焊接技术,2017,46(8):55-58.
[3] 王毅敏.LNG储罐9Ni钢埋弧自动横焊焊接工艺研究[J].金属加工(热加工),2018(5):62-65.

MW 20240115

(上接第46页)

横梁的结构特点,分别对中箱体和边箱体进行结构分析,确定了合理的组装焊接顺序,保证了结构复杂的横梁块体成功制造。

2)钢横梁块体结构复杂,采用灵活方便的气体保护半自动焊方法焊接,通过焊接工艺评定试验确定了与母材匹配的焊接材料和焊接参数,保证了钢横梁的焊接质量。

3)通过对拼装胎架、锚箱精度控制、焊接变形控制等关键点研究,应用钢锚头机械加工、小热输入焊接、火焰修整与焊接作业穿插进行等技术措施,确保钢横梁的外形尺寸符合标准和规范要求。

4)“先孔法”栓接技术的实施,大大提高了具有大量螺栓孔群的钢横梁块体间桥位拼装效率,保证了栓孔重合率。

参考文献:

[1] 李先友,石勇,王芳.四索一体式钢锚梁精确定位安装施工技术[J].中外公路,2021,41(S2):

144-147.

[2] 宁朝新.沪通长江大桥主航道桥钢锚梁施工关键技术[J].铁道建筑,2019,59(11):22-25.
[3] 陈永华.斜拉桥集中式钢锚箱施工关键技术研究与应用[J].城市道桥与防洪,2018(8):23-24,211-214.
[4] 李峰,潘丽婷.港澳大桥青州航道桥钢锚箱外形尺寸控制[J].金属加工(热加工),2016(12):58-61.
[5] 全国钢标准化技术委员会.桥梁用结构钢:GB/T 714—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
[6] 中华人民共和国铁道部分.铁路钢桥制造规范:Q/CR 9211—2015[S].北京:中国铁道出版社,2015.
[7] 徐向军.桥梁钢结构焊接材料的应用与发展[J].金属加工(热加工),2016(8):23-24.
[8] 卢玉春,陆海.公路桥钢塔制造技术研究[J].公路,2015,60(3):75-78.

MW 20240112