大溪河特大桥索梁锚固构造焊接工艺研究

朱庆菊，汪涛，于建泽，范军旗
中铁山桥集团有限公司　河北秦皇岛　066200

摘要：大溪河特大桥采用钢-混组合梁斜拉桥，其外置式钢锚管锚固系统是斜拉索锚固构造的重大设计创新。作为锚固系统的锚固腹板是重要的传力构件，其四周均采用熔透角焊缝连接。因此，大溪河特大桥索梁锚固构造的焊接生产是本桥钢结构成功制造的关键，从焊接方法、焊接材料、坡口形式、焊前预热、焊接顺序、焊接参数、无损检测要求及焊缝编号规定等角度进行焊接工艺研究与总结，以便为今后索梁锚固构造焊接工艺的优化和焊接装备的智能化改进提供参考。

关键词：索梁锚固；外置式钢锚管结构；调质钢；四周熔透角焊缝

Research on welding technology of cable anchorage structure of Daxi River Bridge

ZHU Qingju, WANG Tao, YU Jianze, FAN Junqi
China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066200, Hebei, China

Abstract: Daxi River Bridge adopts steel-concrete composite beam cable-stayed bridge, whose external steel anchor pipe anchorage system is an important design innovation of the whole steel bridge structure. The anchoring web is an important force transfer member, which is connected around by the welding of full penetration. Therefore, the welding production of cable beam anchorage structure of Daxi River bridge is the key to the successful manufacture of the steel bridge structure. The welding process is summarized from the welding method, the welding consumables, groove form of the joint, welding preheating, welding sequence, specification parameters, nondestructive testing requirements, welding number requirements, so as to provide reference for the optimization of cable beam anchorage structure welding process and the intelligent improvement of welding equipment in the future.

Keywords: anchoring for cable and beam; structure of external anchor pipe; hardened and tempered steel; full penetration around the plate

1　序言

大溪河特大桥主桥采用跨径布置为92m＋168m＋650m＋168m＋92m五跨双塔双索面工字梁钢混组合梁斜拉桥，斜拉索扇形布置，主桥全长1170m，桥型布置如图1所示；主要材质为Q370qD钢、Q420qD钢，总重1.63万余t。索塔为钢筋混凝土结构，钻石型造型，主塔高分别为312.4m（奉节岸）和296.4m（巫山岸）。斜拉索在塔端采用钢锚梁锚固方式[1]，钢锚梁采用钢牛腿支承结构，主要材质为Q355C钢，总重约1030t。

钢主梁采用双边工形钢-混组合梁的整体断面，

第一作者：朱庆菊，高级工程师，主要研究方向为桥梁钢结构制造焊接试验、焊接工艺等，E-mail：1009839000@qq.com。

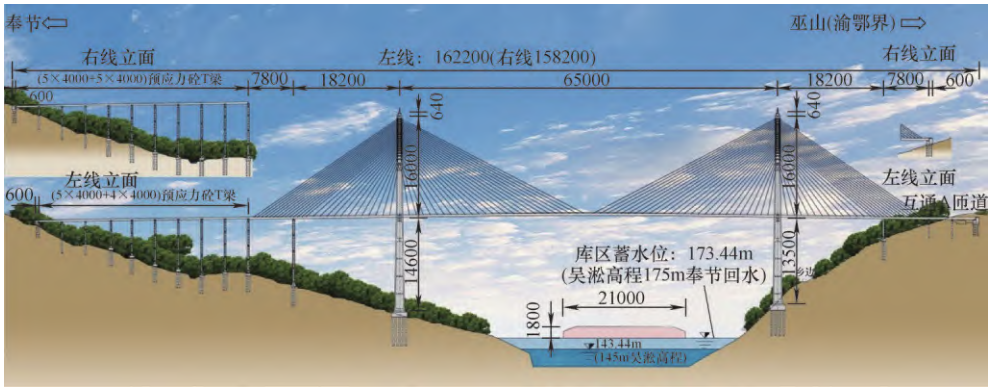


图1　桥型布置

两侧边主梁横向中心距26.6m，桥梁全宽27.6m，中心线梁高3.23m，钢主梁标准节段如图2所示；钢主梁由工形边主梁、工形横梁、工形小纵梁通过摩擦型高强度螺栓联接而成，架设预制桥面板，现浇混凝土湿接缝，通过焊接于钢主梁顶面的抗剪圆柱头焊钉（规格为ϕ22mm×180mm，材质为ML15Al）组成组合梁体系。

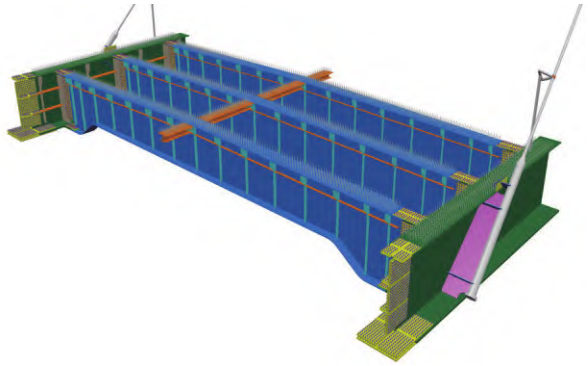


图2　主梁标准节段示意

2　锚固构造设计要求及制造难点

2.1　本桥锚固构造的设计特点

一段时间以来，在我国的大型斜拉桥建设中，斜拉索在梁端的索力锚固系统主要有锚箱式和拉板式两种形式，两者各有优点。而大溪河特大桥采用外置式钢锚管锚固系统，其是在锚箱式和拉板式（内置式锚管）的基础上演化而来的，综合了两者的优点，结构简单、传力明确，是斜拉索锚固构造的重大创新。外置式钢锚管锚固构造特点是索力先通过承压板传递给钢锚管，再传递给锚固腹板，最后传递至主梁腹板，索力均以剪力的形式传递。而锚固腹板是重要的传力构件，其四周与钢锚管、边主梁的腹板、顶板及底板等均采用熔透角焊缝连接，钢板厚度大，受力复杂多变。外置式锚管像钢锚箱一样安装在主梁腹板外侧，所有钢构件和主梁节段一起在工厂内制作完成，无需在现场进行二次焊接，保证施工质量，加快施工进度，同时解决了施焊空间狭小、结构受力形式不合理等问题。

外置式钢锚管锚固构造主要由钢锚管、锚固腹板、承压板、上稳定板、下稳定板、加劲板、桥面支承板及圆柱头焊钉组成，如图3所示。

锚固腹板厚度为30mm、32mm、34mm、36mm、40mm、44mm和48mm，采用Q420qD钢，其余部位采用Q370qD钢，要符合GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》的相关要求；钢锚管壁厚度根据不同的拉索型号分为28mm、30mm、34mm、36mm、40mm和45mm，采用Q420D钢，必须同时满足GB/T 8162—2018《结构用无缝钢管》和GB/T 5313—2023《厚度方向性能钢板》Z35级别性能要求。

2.2　锚固构造的制造难点

本桥制造及安装执行JTG/T 3651—2022《公路钢结构桥梁制造和安装规范》和Q/CR 9211—2015《铁路钢桥制造规范》，其制造难点主要包括以下方面。

1）锚固腹板采用Q420qD钢，规格为壁厚（30～48mm）×L_1（911.9～1207.8m）×L_2（6759.6～2879.9m），为异形件，其四周与钢锚管、边主梁的腹板、顶板及底板采用熔透角焊缝连接，钢板厚度大，受力复杂多变。

2）锚管采用Q420D钢，为调质态交货，规格为壁厚（28～45mm）×外直径（325～480mm）×长度L（3494～8483.4m），CEV最大为0.48%，涉及

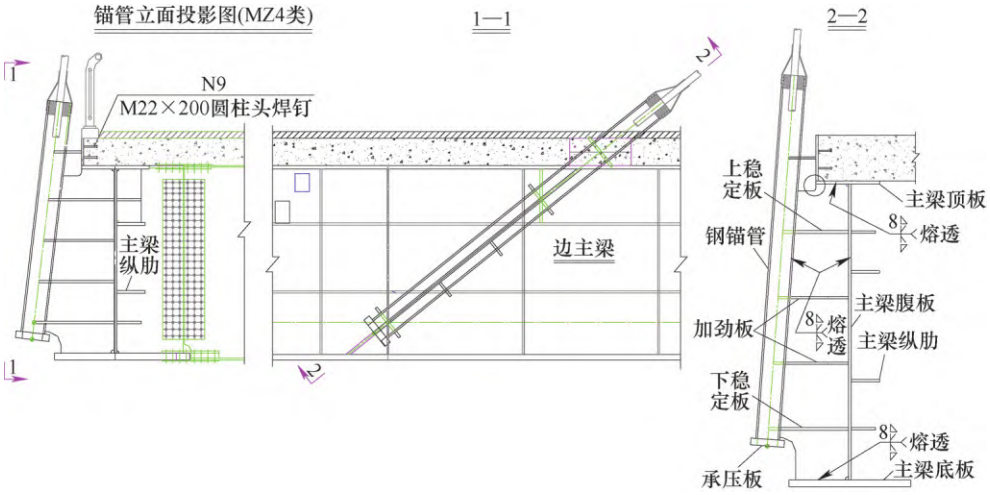


图3　锚固构造示意

管与板异形异种材质焊接，焊后拘束应力大，易开裂。

2.3　主要技术措施

本桥制造过程中采取的主要技术措施包括以下方面。

1）进行大溪河大桥斜拉索锚固结构模型试验（设计单位主持），采用1∶2缩尺模型设计和制造，然后进行疲劳试验，并对锚固结构进行优化调整。

2）在焊接技术准备阶段，进行全面的焊接工艺评定试验和焊接性试验，对试验结果进行分析与评定[2]。

3）在焊接过程中，应注意检查焊接变形，随时调整焊接顺序，必要时配合火焰修整。

4）当钢板厚度或钢管壁厚≥40mm时，焊后48h进行无损检测。

5）无损检测要求严格，锚固腹板与钢锚管间熔透角焊缝，以及锚固腹板与主梁腹板间熔透角焊缝除了采用超声波检测外，还增加了磁粉检测。

6）对于锚固腹板四周的所有熔透角焊缝及其端部除了进行砂轮打磨匀顺外，还需要超声波锤击处理。

3　锚固构造焊接工艺

3.1　焊前准备

1）锚固构造的焊接方法及焊接材料见表1。

2）锚固构造熔透角焊缝坡口形式和尺寸见表2～表4。

3）锚固构造焊接过程中的预热和层间温度见表5。

3.2　焊接顺序

（1）锚固系统的焊接　主要焊接顺序要求如下。

1）焊接锚管N8与锚垫板N7间坡口角焊缝。

2）焊接锚管与锚固腹板间熔透角焊缝，平位焊接（见图4）。

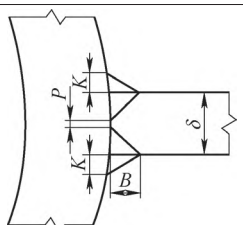
（2）边主梁与锚固系统间的焊接　主要焊接顺序要求如下。

表1　焊接方法及焊接材料[3]

适用范围	钢板材质	焊接位置	焊接方法	焊接材料及规格/mm
锚固腹板与锚管间熔透角焊缝	Q420qD＋Q420D	平位	CO_2气体保护焊	ER55-G（ϕ1.2）
锚固腹板与主梁腹板间熔透角焊缝	Q420qD＋Q370qD	平角位	CO_2气体保护焊	G49A3C1S6（ϕ1.2）
锚固腹板与主梁顶、底板间熔透角焊缝	Q420qD＋Q370qD	立位	CO_2气体保护焊	T494T1-1C1A（ϕ1.2）

注：CO_2气体保护焊采用KR500、KRⅡ500等电源，直流反极性接法。

表2 锚固腹板与锚管间熔透角焊缝坡口形式和尺寸 (mm)

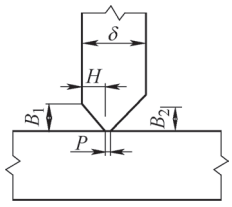
坡口形式	板厚 δ	$B^{+1.0}_{-0.5}$	$P^{+0.5}_{-1.0}$	K
	30	13	2	8
	32	14	2	8
	34	15	2	8
	36	16	2	8
	40	18	2	8
	44	20	2	8
	48	22	2	8

注：1.开对称坡口，便于组装和焊接。

2.熔透角焊缝，背面焊前清根。

3.坡口焊满后匀顺焊接K8角焊缝。

表3 锚固腹板与主梁腹板间熔透角焊缝坡口形式和尺寸 (mm)

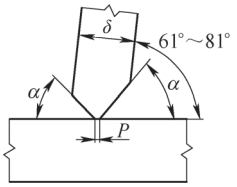
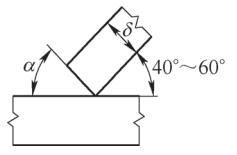
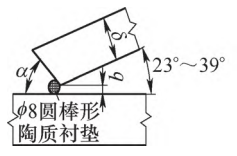
坡口形式	板厚δ	H	$B_{1}^{+1.0}_{-0.5}$	$B_{2}^{+1.0}_{-0.5}$	$P^{+1.0}_{-1.0}$
	30	12	12	16	2
	32	12	12	18	2
	34	13	13	19	2
	36	14	14	20	2
	40	15	15	23	2
	44	16	16	26	2
	48	17	17	28	2

注：1.开不对称坡口，先焊接大坡口一侧，然后小坡口侧清根。

2.熔透角焊缝，背面焊前清根。

3.坡口焊满匀顺焊接K8角焊缝。

表4 锚固腹板与主梁顶、底板间熔透角焊缝坡口形式和尺寸 (mm)

坡口形式	板厚δ	α^{+3}_{-3}	$P^{+1.0}_{-1.0}$	$b^{+1.0}_{-1.0}$
	30	45	2	—
	32			
	34			
	36			
	40			
	44			
	48			
	30	利用板边自然坡口		
	32			
	34			
	36			
	40			
	44			
	48			
	30	45	—	5
	32			
	34			
	36			
	40			
	44			
	48			

注：1.根据锚腹板的倾斜角度确定坡口形式。

2.熔透角焊缝，背面焊前清根或者贴陶质衬垫。

3.坡口焊满后匀顺过渡到母材。

表5　预热和层间温度

材质	板厚/mm	预热温度/℃	预热范围/mm	层间温度/℃
		焊条电弧焊、CO_2气体保护焊（定位焊），埋弧焊		
Q370qD Q420qD Q420D	≤28	≥5	—	5～200
	＞28～60	80～120	≥100	80～200

注：1. 上述预热板厚以板厚组合中厚板为准。

2. 预热方法为火焰预热或电加热。

3. 加热范围为焊缝及两侧80～100mm内，测温点距离焊缝50～80mm[4]。

1）在工形边主梁腹板内侧，组装锚管块体，焊接锚固腹板N_1与主梁腹板的熔透角焊缝，平位角焊接，从中间向两端对称焊接。

2）焊接锚固腹板N_1与边主梁顶、底板间的熔透角焊缝，立位焊接，两侧同向对称焊接（见图5）。

3）组装锚管加劲肋，从中间向两端对称焊接锚管加劲肋角焊缝。

4）组装焊接其他角焊缝。

（3）其他注意事项　主要包括以下几方面。

1）在焊接过程中，应注意检查焊接变形，必要时配合火焰修整。

2）由于此处钢板厚度大，熔透角焊缝集中，并且焊缝质量要求高，因此应细心操作，减少焊接缺陷，降低返修焊的比例。

3）对于锚固腹板四周的4条熔透角焊缝端部进行打磨或火焰切割后打磨匀顺，然后按照《焊缝超声波锤击工艺规程》（GY/ZKDXHQ-04）的规定进行锤击处理。

3.3　焊接参数及焊接现场

锚固构造的焊接参数见表6～表8。

锚固系统焊接修整完成后，在已经焊接修整完成的边主梁上组装锚固系统，焊接生产过程中的照片如图6～图9所示。

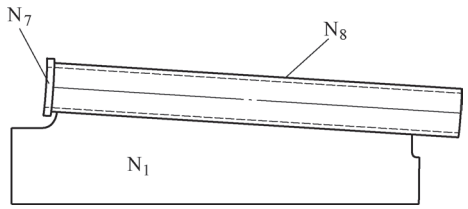


图4　锚固系统的焊接

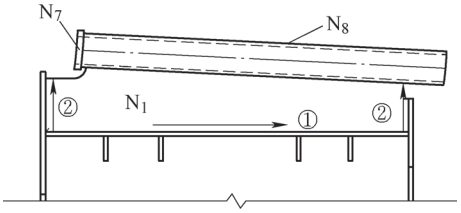
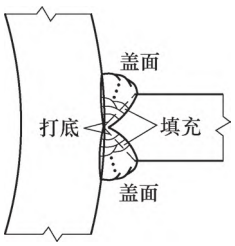


图5　边主梁与锚固系统间的焊接

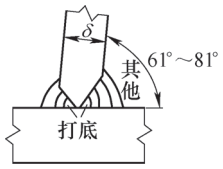
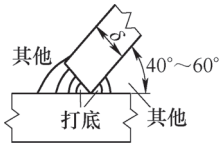
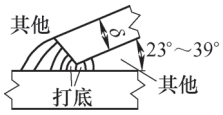
注：①、②为焊接顺序。

表6　锚固腹板与锚管间熔透角焊缝（Q420qD＋Q420D）焊接参数[5]

熔敷简图	焊接位置	焊接材料及规格/mm	焊道	焊接电流/A	电弧电压/V	CO_2流量/（L/min）
	平位	ER55-G（ϕ1.2）	打底	220±20	28±2	15～20
			填充	260±20	30±2	15～20
			盖面	260±20	30±2	15～20

注：熔透角焊缝，背面焊前清根。

表7　锚固腹板与主梁顶、底板间熔透角焊缝（Q420qD+Q370qD）焊接参数

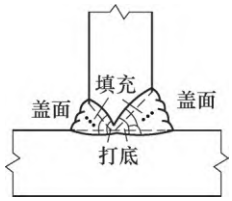
熔敷简图	焊接位置	焊接材料及规格/mm	焊道	焊接电流/A	电弧电压/V	CO_2流量/（L/min）
	立位	T494T1-1C1A（ϕ1.2）	打底	160±20	24±2	15～20
			其他	180±20	26±2	15～20
	立位	T494T1-1C1A（ϕ1.2）	打底	160±20	24±2	15～20
			其他	180±20	26±2	15～20
	立位	T494T1-1C1A（ϕ1.2）	打底	160±20	24±2	15～20
			其他	180±20	26±2	15～20

注：1. 正面小夹角（23°～39°）熔透角焊缝背面衬ϕ8mm圆棒形陶制衬垫；其他角度的熔透角焊缝，采用双面开坡口或者自然单侧坡口，背面焊前采用碳弧气刨清根。

2. 焊接单侧坡口熔透角焊缝时，先焊接不开坡口侧，焊接至少*K*12角焊缝，保证坡口一侧采用碳弧气刨清根时不漏。

3. 坡口侧角焊缝焊满后匀顺过渡。

表8　锚固腹板与主梁腹板间熔透角焊缝（Q420qD＋Q370qD）焊接参数

熔敷简图	焊接位置	焊接材料及规格/mm	焊道	焊接电流/A	电弧电压/V	CO_2流量/（L/min）
	平位	G49A3C1S6（ϕ1.2）	打底	220±20	28±2	15～20
			填充	260±20	30±2	15～20
			盖面	260±20	30±2	15～20

注：熔透角焊缝，背面焊前清根。

图6　锚固腹板与锚管间熔透角焊缝的焊接

图7　锚管块体与边主梁之间的组装

图8　锚管块体与边主梁之间的焊接

图9　边主梁节段焊接完成

4　焊缝无损检测

（1）焊缝无损检测要求　经外观检查合格后，方能对焊缝进行无损检测，焊缝无损检测在焊缝焊完24h后进行；当钢板厚度≥40mm时，焊后48h进行无损检测。焊缝无损检测要求见表9。

表9　焊缝无损检测要求

焊缝部位	杆件号	焊缝编号	检测方法	检测比例（%）	检测范围	执行标准	检测等级	验收等级
锚固腹板与钢锚管间熔透角焊缝	××	MGR1	超声波	100	焊缝全长	GB/T 11345—2013 GB/T 29712—2013	B级	2级
			磁粉	100	焊缝全长	GB/T 26951—2011 GB/T 26952—2011	—	2X
锚固腹板与主梁腹板间熔透角焊缝	××	MFR1	超声波	100	焊缝全长	GB/T 11345—2013 GB/T 29712—2013	B级	2级
			磁粉	100	焊缝全长	GB/T 26951—2011 GB/T 26952—2011	—	2X
锚固腹板与主梁顶板、底板间熔透角焊缝	××	MDR1/2	超声波	100	焊缝全长	GB/T 11345—2013 GB/T 29712—2013	B级	2级

注：检测比例指检测接头数量与该类型焊缝全部接头数量之比。

（2）焊缝编号规则　焊缝编号基本上由杆件号＋焊缝编号＋焊缝排序号3部分组成。焊缝编号排序原则为以杆件打号位置为基准，按照从近到远、由下至上、从左到右、顺时针方向依次编号。

焊缝编号示例如下：

1）锚固腹板与钢锚管间熔透角焊缝编号：XX（杆件号）-MGR1。

2）锚固腹板与主梁腹板间熔透角焊缝编号：XX（杆件号）-MFR1。

3）锚固腹板与主梁顶板、底板间熔透角焊缝编号：XX（杆件号）-MDR1/2。

5　结束语

1）本文焊接工艺成功指导了大溪河特大桥索梁锚固构造的焊接生产，熔透角焊缝外观质量和无损检测质量均合格，满足相关标准要求。

2）对于钢板厚度较大的熔透角焊缝全部采用CO_2气体保护焊（半自动）、手工碳弧气刨清根及人工砂轮打磨等，尽管无损检测合格率很高，但也应该看到，索梁锚固构造的焊接生产效率不高，自动化程度还有待于进一步提高，焊接机器人的应用还是一片空白，熔透角焊缝的焊接工艺还需要进一步优化。

3）大溪河特大桥采用外置式拉索锚固构造，综合了锚箱式和拉板式（内置式锚管）的优点，是斜拉索锚固构造的重大创新，在理论上结构简单、传力明确，每一个边主梁节段的生产制造周期短，将会在斜拉桥建设中得到越来越多的应用，也将会得到更多的改进和提升。

参考文献：

[1] 马春江，刘于志，初东欣. 后穿式钢锚箱制造安装精度控制[J]. 金属加工（热加工），2022（10）：51-53.

[2] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范：JTG/T 3651—2022[S]. 北京：人民交通出版社，2022.

[3] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

[4] 中国铁路总公司建设管理部. 铁路钢桥制造规范：Q/CR 9211—2015[S]. 北京：中国铁道出版社，2015.

[5] 范军旗，徐向军. 港珠澳大桥青州航道桥索塔钢锚箱焊接技术[J]. 金属加工（热加工），2015（20）：49-51.

（收稿日期：20241022）