

# 珠江黄埔大桥悬索桥钢箱梁焊接技术研究

张剑峰, 车 平

(中铁宝桥集团有限公司, 陕西 宝鸡 721006)

**摘要:**为了探索大跨度悬索桥钢箱梁的焊接技术,采用试验和理论研究的方法对珠江黄埔大桥南汉桥钢箱梁制造的焊接材料选择、预热温度确定、焊接工艺制定、焊接变形控制、焊缝检验进行了分析研究,并对重点部位的焊缝提出了相应的工艺措施。实践证明所采用的焊接技术措施在该桥的制造中是切实可行的,确保了该桥的生产制造。将合理的焊接技术成功应用于珠江黄埔大桥南汉桥的制造,可供同类桥梁钢结构焊接制造借鉴。

**关键词:**悬索桥;钢箱梁;焊接;工艺措施

**中图分类号:**TU391;TG457

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-2303(2009)10-0013-05

## Welding techniques of steel box girders for Pearl River Huangpu Suspension Bridge

ZHANG Jian-feng, CHE Ping

(China Railway Baoji Bridge Group Co., Ltd., Baoji 721006, China)

**Abstract:**To seek the welding techniques of steel box girder for suspension bridge with large span, tests and theoretical study are conducted to analyze the choosing of welding materials, determination of preheat temperature, establishment of welding procedure, welding deformation control and weld inspection in the fabrication of steel box girders for south part of Pearl River Huangpu Bridge, and corresponding processing measures are taken for welds at important places. The practice proves that the adopted welding techniques are feasible in the fabrication of this bridge and ensure the fabrication. The successful application of proper welding techniques in the fabrication of this bridge provide technical references for the same kind of bridges on steel structure welding.

**Key words:** suspension bridge; steel box girder; welding; processing measures

## 0 前言

珠江黄埔大桥是同三、京珠国道主干线绕广州公路东环段中连接广州市区与番禺区的一座特大型桥梁。该桥由北引桥、北汉桥、中引桥、南汉桥、南引桥组成,其中北汉桥为斜拉桥,南汉桥为悬索桥。南汉桥主桥为单跨地锚式钢箱梁悬索桥,主缆分跨为 290 m+1 108 m+350 m,中跨为悬吊结构,主缆横桥向中心间距 36.5 m,吊索顺桥向标准间距 12.8 m。主桥行车道主梁为扁平流线型全焊加劲钢箱梁,其外廓尺寸为:梁高 3.5 m(中线内廓高度),箱梁全宽 41.69 m(风嘴处),顶板宽 34.5 m,底板宽 28.3 m,桥面设有双向对称 2%的横坡,总工程量约 18 218 t。悬索桥共划分 87 个梁段,五种类型,其中标准梁段 83 个,合拢段 2 个,其余特殊梁段 2 个,标准梁段质量

约 215 t,概貌如图 1 所示。

## 1 焊接材料的选择

钢箱梁主体结构采用 Q345C 钢,是桥梁钢结构广泛使用的一种钢材,具有良好的焊接性能。设计要求焊接接头的力学性能不低于母材标准,经过工艺试验选定焊接材料为:

埋弧自动焊——H10Mn2( $\varphi$  5 mm)+SJ101q;

焊条电弧焊——E5015 ( $\varphi$  4 mm);

自动药芯焊丝气体保护焊——E70T-1( $\varphi$  1.6 mm),  
保护气体 CO<sub>2</sub>;

半自动气体保护焊——E71T-1( $\varphi$  1.2 mm), ER50-6( $\varphi$  1.2 mm), 保护气体 CO<sub>2</sub>。

H10Mn2 是 C-Mn 系低合金焊丝,广泛应用于碳钢和低合金钢的焊接,焊缝金属具有优良的力学性能。提高焊剂的碱度是获得优良焊缝金属力学性能,特别是提高焊缝金属低温冲击韧性的有效途径

收稿日期:2009-10-10

作者简介:张剑峰(1977—),男,陕西宝鸡人,工程师,学士,主要从事钢桥及大型建筑钢结构工程的技术工作。



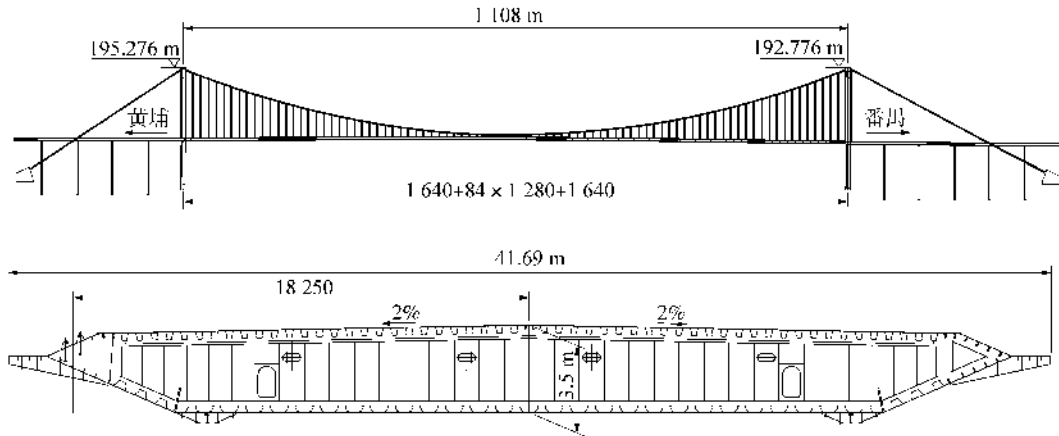


图 1 珠江黄埔大桥南汉桥主桥概貌

之一<sup>[1]</sup>。SJ101q 为中等碱度的氟碱型烧结焊剂,由于含有较多的碱性氧化物,碱度系数在 1.7 左右,有利于清除焊缝中的各种杂质,因而可提高焊缝低温冲击韧性。在制定订货技术条件时降低了 S、P 等杂质含量,并要求其熔敷金属有更高的韧性,同时限定熔敷金属强度的上限,以利于焊缝金属达到高韧性强,综合性能优良。

E70T-1、E71T-1 药芯焊丝、ER50-6 实心焊丝和 E5015 焊条在满足相关标准的同时,与供货单位又制定了高于标准的控制指标,以保证焊缝金属扩散氢的含量和低温冲击韧性。

## 2 线能量、层间温度及预热温度的选择

Q345C 钢复验化学成分计算的碳当量和质量保证书提供的碳当量结果一般为 0.39~0.42,焊接性良好。通过 Q345 钢 CCT 曲线计算  $t_{8/5}$  冷却时间,确定线能量的范围较宽,层间温度控制在 230℃ 以下。

由于锚箱承力板、耳板和支座垫板厚度较大,根据相关规范要求的预热温度较高,实际生产时无法操作。为此根据不同板厚、不同焊接方法进行斜 Y 形坡口焊接裂纹试验,确定实际焊接时的预热温度。抗裂性试验有针对性地对板厚 25 mm、30 mm、50 mm 和 80 mm 的钢材进行了斜 Y 形坡口焊接裂纹试验,试验结果为:采用 CO<sub>2</sub> 半自动焊,配 ER50-6 (φ 1.2 mm) 和 E71T-1 (φ 1.2 mm) 焊丝,焊接厚 30 mm 及以下的 Q345C 钢可以不预热,施焊厚为 40~80 mm 板时预热温度大于等于 50℃。

## 3 焊接工艺

根据大桥施工设计图选用的 Q345C 钢、焊缝接头形式、质量要求,对各种接头形式选定的坡口形

式、坡口尺寸、焊接材料和焊接工艺,按照《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041-2000)和《铁路钢桥制造规则》(TB10212-98)制订工艺评定项目,进行全面的焊接工艺评定试验。焊接工艺评定试验后由业主组织专家对其进行评审,工艺评定试验评审通过后作为编制本桥焊接工艺文件的依据。

### 3.1 板块 U 形肋焊缝焊接

U 形肋与桥面板间坡口角焊缝的熔透质量是正交异性板质量的关键,设计要求 U 形肋与桥面板间角焊缝熔透度大于等于 80%。焊接施工前对此做工艺性试验,确定坡口角度、钝边大小、焊接角度以及焊接工艺参数等。板块 U 形肋焊缝焊接工艺要点为:

- (1) 采用药芯焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护自动焊船位焊接;
- (2) 焊接材料为药芯焊丝 E70T-1 (φ 1.6 mm);
- (3) 焊接前根据板块角变形试验结果预设一定的反变形量,在反变形工装上进行焊接,焊接过程中控制焊接方向和焊接顺序,反变形工装如图 2 所示,焊接顺序如图 3 所示。

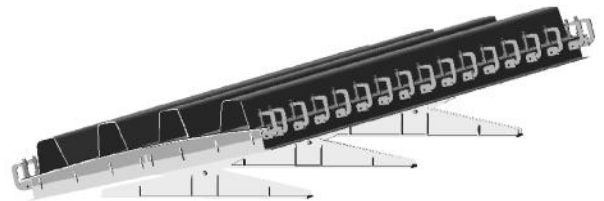


图 2 U 形肋焊接反变形工装

(4) U 形肋坡口角焊缝的熔深和成形对操作变化十分敏感,焊接过程中必须随时跟踪观察电弧状态,及时调整焊丝对正位置和焊接小车的运动,以确保焊接质量。

- (5) 为方便桥位嵌补段组装焊接,U 形肋两端预

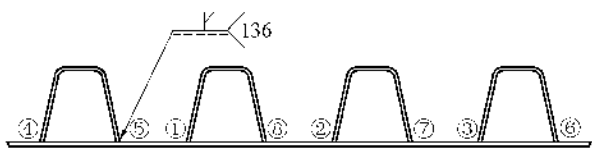


图 3 U形肋焊接顺序

留 200 mm 不焊,并将端部用砂轮修磨成 1:5 的过渡斜坡。

### 3.2 横隔板的焊接

(1)隔板由于外形尺寸大,而且板薄,焊接时容易产生变形。为了减小焊接变形,隔板加劲肋采用半自动实心焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊进行焊接,焊接材料 ER50-6( $\phi$  1.2 mm)。焊接前将隔板放置在刚性固定平台上,周边每隔 1.5 m 设置一个固定点将隔板与平台固定,然后采取对称、分散、同方向的焊接方法,先焊接加劲肋的平位角焊缝,然后焊接加劲肋之间的立位角焊缝。

(2)横隔板与顶板焊缝的焊接。由于桥面板直接承受车辆荷载的反复作用,各部位的应力影响线长度短,车辆引起的应力循环次数比一般部位要多,在横隔板与顶板、U形肋相交部位的焊缝容易出现疲劳裂纹,同时在 U形肋与横隔板角焊缝的下端也易出现疲劳裂纹<sup>[2]</sup>。为了提高焊缝的抗疲劳能力,在设计横隔板 U形肋开孔时对细部构造进行了改进,将横隔板上为顶板 U形肋开的 R25 过焊孔改为 7 mm $\times$  7 mm 的切角,焊接时在 U形肋拐角处不允许断弧,一次将 7 mm 切角焊封,对 U形肋与横隔板角焊缝的下端进行包角处理,并对成形不匀顺的地方进行修磨,提高结构的抗疲劳能力,如图 4 所示。



图 4 横隔板与 U形肋在顶板处的处理

(3)横隔板整体对接。根据受力需要避免偏心,本桥横隔板为整体隔板,由于箱梁的高度和宽度都很大,需将隔板在高度和宽度方向断开,梁段总拼制造时进行立位和横位对接,均采用半自动实心焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊背面贴陶质衬垫单面焊双面成

形工艺。为控制梁段总高对焊缝间隙进行了控制,使焊缝收缩后的高度在验收标准之内。

### 3.3 桥面板、底板对接焊缝的焊接

采用背面贴陶质衬垫单面焊双面成形工艺。打底焊缝用半自动实心焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊进行焊接,焊丝 ER50-6( $\phi$  1.2 mm);埋弧自动焊填充盖面,焊丝 H10Mn2( $\phi$  5.0 mm),焊剂 SJ101q,如图 5 所示。为了防止埋弧焊烧穿打底焊道,打底焊道焊接时厚度控制在 8 mm,用半自动实心焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊焊两道。为了控制梁段总宽,焊接前顶板每条纵向对接焊缝预留 3 mm 收缩量,底板每条焊缝预留 2 mm 收缩量,焊后横向收缩后总宽控制在验收标准范围内。在梁段总拼时由于梁段之间的间隙较小(40 mm),焊缝端部难以加装足够长度的引板,端部容易产生缺陷,当产生缺陷时超声波探伤难以检测。故该部位焊接时,前梁段焊缝焊接时端部预留 600 mm 不焊,并将端部修磨成 1:5 的斜坡,在梁段之间根据间隙大小特配引板,后焊梁段端部不停弧一次焊完先焊梁段的预留段,并搭接 50 mm 以上,焊后修磨搭接部位使其过渡匀顺,用焰割方法去除引板并对端部进行修磨,如图 6 所示。

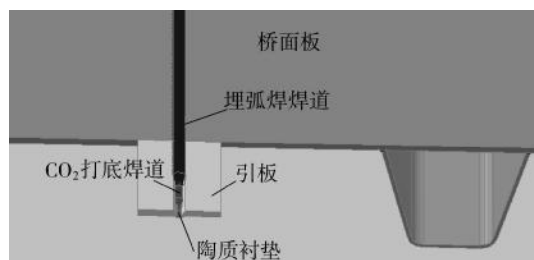


图 5 面板对接示意

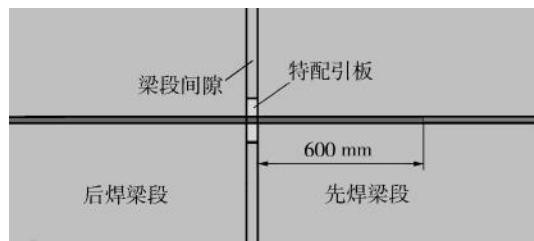


图 6 梁段间焊缝端部处理措施示意

### 3.4 锚箱焊接

锚箱是传递索力的关键部件,锚箱构造如图 7 所示。在耳板销孔补强板与耳板焊接后进行振动时效工艺,消除焊接应力峰值处理后再加工销孔。承力板和耳板之间为熔透角焊缝,焊接工艺选择多道小线能量的焊接工艺,随着药芯焊丝质量的提高,采用药芯焊丝 CO<sub>2</sub> 保护焊代替传统的焊条电弧焊

专题讨论——桥梁焊接

用于关键部位熔透焊缝的焊接,大大提高了焊接效率,焊缝质量也更为稳定。由于耳板和承力板均较厚,熔透焊缝填充量大,为了减小焊接变形,采用专用胎型定位组焊锚箱合件,锚箱合件和耳板在刚性约束条件下焊接,焊接后对焊缝端部和焊趾部位进行修磨使其匀顺过渡,并对焊缝端部进行超声波锤击,在接头焊趾处表面造成压缩应力,减少应力集中,提高了接头的疲劳强度。

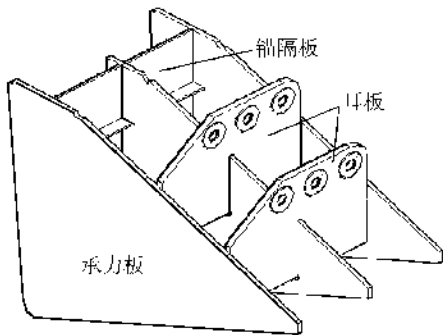


图 7 锚箱构造(未示斜顶/底板)

由于耳板伸出斜顶板,为了使熔透焊缝端部过渡匀顺不出现截面突变,将两侧边承力板与耳板焊缝在距斜顶板 50 mm 范围内设计为部分熔透焊缝过渡到承力板与斜顶板坡口角焊缝上,焊角 K12,并修磨匀顺,如图 8、图 9 所示。耳板与中承力板焊接时为了避免端部弧坑缺陷,在距焊缝端部 50~100 mm 处引弧、熄弧,待中间段焊缝焊完后再焊端部焊缝,焊接时应向端部焊接,在端部不熄弧回烧,引弧、熄弧部位错开 30~50 mm,端部包头,焊接完成后用电砂轮将端部修磨匀顺,如图 10 所示。

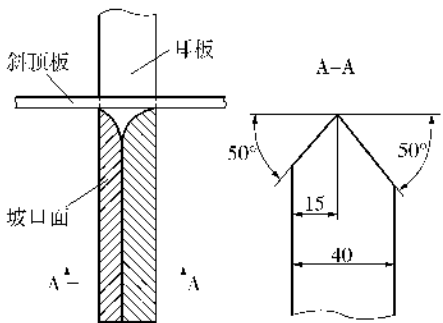


图 8 耳板坡口过渡

### 3.5 细部结构优化

锚箱承力板与斜顶板和斜底板原设计要求为熔透角焊缝,由于承力板厚而斜顶板薄,熔透焊接后变形大难以矫正,且焊后残余应力较大,对该锚箱的结构进行受力分析后,将该焊缝改为坡口

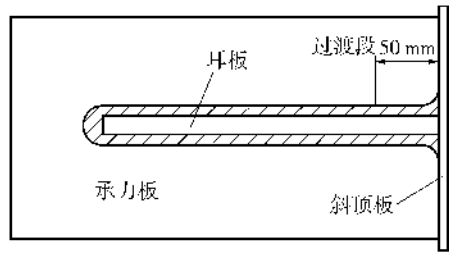


图 9 耳板与边承力板焊缝端部示意

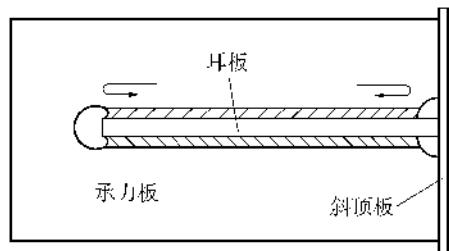


图 10 耳板与中承力板焊缝端部示意

角焊缝,在保证强度的前提下有效地控制了焊接变形。

顶板与斜顶板焊缝受箱梁截面的限制,两者之间角度较小,由于在成梁总拼时焊接位置为仰位焊接,焊缝根部焊接质量难以保证。在实际生产时对结构形式进行了优化,将顶板向外伸出的 15 mm 切除,在箱内仰位焊接填充自然坡口,在外侧气刨清根后焊接,确保了焊缝质量,如图 11 所示。

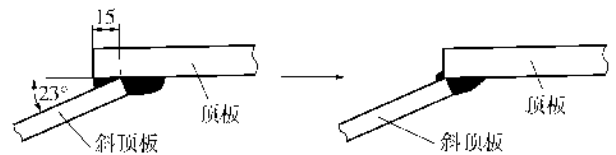


图 11 顶板与斜顶板连接

## 4 变形控制

(1)桥面板 U 形肋的焊接制作反变形工装,采用外加刚性约束的方法。

(2)对坡口角焊缝开不对称坡口交替施焊,先焊接大坡口侧至一半,再焊接完小坡口,最后大坡口填充盖面。

(3)板块对接成板单元时预设反变形,焊缝的横向收缩预留焊接收缩量。

(4)锚箱需要重要控制几何尺寸的部位加装刚性约束措施。

(5)由于桥面板很宽,对接焊缝多,为了保证箱体宽度和横向坡度,在制作时采用预留焊缝横向收缩量,增加横隔板的拱度等措施,这样在焊接完成后由于焊缝引起的收缩导致箱梁最外侧偏转,使箱

梁横向宽度和坡度均在验收指标范围内。

(6)制定合理的焊接顺序和焊接方向,焊接变形以控制为主,矫正为辅。

## 5 焊接检验

### 5.1 焊缝外观检验

待焊缝金属冷却后对所有焊缝进行外观检查。焊缝不得有裂纹、未熔合、焊瘤、夹渣、未填满、弧坑及漏焊等缺陷,其质量应符合验收标准规定。

### 5.2 焊缝无损检验

焊缝经外观检验合格在施焊 24 h 后进行无损检验。其中:对顶板、底板纵向、横向对接焊缝进行 100% 超声波+10% X 射线按 I 级焊缝检验;U 形肋与桥面板间坡口角焊缝,焊接完成后对每条焊缝两端 1 m 范围进行磁粉检验,检验等级 II 级,并在焊接过程中通过产品试板破坏性试验进行熔透度检测;锚箱部位熔透角焊缝,横隔板与斜顶板、斜底板熔透角焊缝,直腹板与顶底板间熔透焊缝,进行 100% 超声波+100% 磁粉按 I 级焊缝检验;横隔板对接焊缝、斜底板与人行道水平板熔透焊缝,进行 100% 超声波按 II 级焊缝检验;U 形肋与顶底板间角焊缝进行 100% 磁粉按 II 级焊缝检验;桥位十字对接部位进行 100% X 射线按 I 级焊缝检验。

超声波检验方法按《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级》(GB11345-1989)执行,X 射线检验方法按《钢熔化焊对接接头射线照相和质量分级》(GB3323-87)执行,磁粉检验方法按《焊缝磁粉检验方法和缺陷磁痕的分级》(JB/T 6061-92)执行。

### 5.3 焊缝破坏性检验

在焊接主要构件产品时,增设产品焊接试板。

在试板上取样进行破坏性试验,获得焊缝力学性能参数,用于监控焊缝质量的稳定性。对于桥位接口对接焊缝,每 5 个接口做一组焊接试板;顶、底板纵向对接焊缝,每 10 条焊缝做一组焊接试板。

U 形肋与桥面板的坡口角焊缝要求熔深不得小于  $0.8\delta$ ,该焊缝的熔透度受焊接参数和操作因素的影响较大,且该焊缝为桥面板主要角焊缝,承受车辆荷载的反复作用,是焊接质量控制的关键之一,每月制作一组试板进行型式检验,控制 U 形肋焊缝质量的稳定性。

### 5.4 实施效果

根据实际焊接生产情况,所选用的焊接方法合理、焊接效率高。根据现场检验资料看,焊缝外观质量成形美观,焊缝一次探伤合格率高;对接焊缝产品试板经破坏性检验,力学性能均符合验收标准;U 形肋与面板的坡口角焊缝产品试板经宏观端面酸蚀检验,熔透率均在 90% 以上,全部合格;焊接变形的控制措施效果显著,保证了钢箱梁的制造精度。

## 6 结论

将上述焊接技术措施应用在该桥钢箱梁制造中,确保了该桥的制造质量,该桥已经顺利竣工通车,由于该工程焊接质量优良,2009 年被中国工程建设焊接协会评为“全国优秀焊接工程一等奖”。进一步证明了所采取的焊接技术措施是切实可行的,可供同类大跨度悬索桥钢箱梁制造的焊接借鉴。

### 参考文献:

- [1] 张文钺.焊接冶金[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [2] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.



## 欢迎订阅 2010 年《电焊机》杂志

《电焊机》杂志是全国中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、《中文核心期刊数据库》收录期刊、“英国《科学文摘》(INSPEC)来源期刊”“俄罗斯《文摘杂志》收录期刊”“美国《剑桥科学文摘》(CSA)收录期刊”“波兰《哥白尼索引》(IC)收录期刊”等。欢迎大家踊跃订阅! 欢迎各位专家积极投稿! 各地邮局均可订阅,邮发代号:62-81,订价:10 元/月,120 元/年。

联系电话:028-83267908

联系人:黄秀艳 E-mail:bj@toweld.com