

大跨度斜拉桥锚固构造焊接技术研究

曹庆国, 张剑峰, 王少刚

中铁宝桥集团有限公司 陕西宝鸡 721006

摘要: 新市金沙江大桥主塔上采用钢锚梁和钢牛腿结构锚固斜拉索, 钢梁上采用钢锚箱结构焊接在上弦杆上, 由于受力大, 锚固构造部位多为厚板焊接, 熔透焊缝多, 焊接填充量大, 局部操作空间狭小, 施工操作、焊接变形控制难度较大。通过对钢锚梁、钢牛腿及钢桁梁锚箱构造组装施焊顺序及焊接变形控制进行分析研究, 采取相应的控制措施, 制定合理的焊接工艺, 保证新市金沙江大桥锚固构造的焊接质量和制造精度。

关键词: 钢桥; 锚固构造; 变形控制; 焊接质量

Research on welding technology of anchorage structure of long-span cable-stayed bridge

CAO Qingguo, ZHANG Jianfeng, WANG Shaogang

China Railway Baoji Bridge Group Co., Ltd., Baoji 721006, Shaanxi, China

Abstract: The main tower of the Xinshi Jinsha River Bridge use the cable-stayed structure of steel anchor beams and steel corbels. The steel anchor box structure is welded onto upper chord of the steel beam. Due to the large number of thick plate welding, fusion welding and filling in a narrow space, huge stress is caused. As a result, construction operations, welding deformation control and welding quality control are difficult. By analysing the relationship between the welding sequence and welding deformation of steel anchor beams, steel corbels and steel anchor boxes, corresponding control measures were taken, and finally a reasonable welding process was developed. The welding quality and manufacturing precision of the anchorage structure of the Xinshi Jinsha River Bridge are guaranteed.

Keywords: steel bridge; anchorage structure; deformation control; welding quality

1 工程概况

新市金沙江特大桥是G4216沿江高速新市至金阳段绥江支线跨越金沙江的一座特大桥, 大桥起点岸为四川屏山新市镇, 止点岸为云南绥江南岸镇, 是沿江高速的关键性控制工程, 全长1867m, 主桥采用双塔三跨钢桁梁组合斜拉桥, 加劲梁为钢桁梁, 桥面为现浇钢筋混凝土, 全桥钢结构总工程量约为2.2万t。大桥整体效果如图1所示。

2 锚固构造重难点及焊接方案确定

斜拉桥索塔锚固结构是斜拉桥中非常重要的部



图1 新市金沙江大桥整体效果

位, 其结构可靠与否关系到整个大桥的安全^[1]。钢锚梁是斜拉桥重要受力构件, 桥面荷载通过斜拉索传递到钢锚梁后再作用到主塔, 其受力复杂, 焊接要求高^[2]。另外, 主塔钢锚梁及索导管安装定位难

度大、精度要求高，因此在制造过程中应提高制造精度，较小误差的积累，保证桥位安装质量^[3]。

但是在实际制造过程中，结合项目特点，存在以下问题，严重制约了锚固构造的制造质量和精度。

1) 钢锚梁部位焊缝密集，单位焊接量大，锚箱部位空间狭窄，焊接操作难度大。

2) 锚固构造部位熔透焊缝数量多，焊接质量要求高，容易引起难以调整的焊接变形。

3) 桥位焊接条件差，气候恶劣，很难保证安装和焊接后的精度，而且难以进行返修和焊后处理。

综合以上实际情况，考虑锚固构造部位操作空间狭窄，熔透焊缝多且焊缝密集，变形不易控制等特点，确定以下注意事项，优化焊接方案。

1) 选用热输入小、热量集中的CO₂气体保护焊进行锚固构造的焊接。

2) 优化工艺设计，减少非主要受力焊缝熔透设计，减小焊缝热输入量，确保关键部位焊缝受力要求。

3) 细化制作方案，合理设计组装施焊顺序，满足可操作性。

4) 制定合理的反变形控制及焊接质量保证措施，降低锚固构造焊接变形，加强焊缝质量控制。

3 焊接材料

钢锚梁、钢牛腿及上弦钢锚箱构造均采用Q420qD钢，符合GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》要求，是桥梁钢结构广泛使用的一种钢材，具有优良的焊接性能。通过焊接工艺评定试验选定焊接材料，药芯焊丝CO₂气体保护焊采用T494T1-1C1AUH5焊丝，规格为φ1.2mm；实心焊丝CO₂气体保护焊采用G55A4UC1ZSN2焊丝，规格为φ1.2mm。

焊接材料在满足相关国家标准的同时，制定专项供货技术条件，要求熔覆金属扩散氢含量≤5mL/100g，以保证焊缝金属具有较低的扩散氢含量和较高的低温冲击韧度。

4 焊接工艺评定

根据相关质量要求，对各类焊接接头选定的坡口形式、焊接材料和焊接工艺，依据Q/CR 9211—2015《铁路钢桥制造规范》^[4]制定工艺评定试验方案，进行相关的焊接工艺评定试验，共计进行了28组评定试验项目，涵盖了所有接头形式，工艺评定试验通过后作为编制焊接工艺文件的依据。典型焊接接头力学性能及低温冲击性能试验结果分别见表1、表2。由表1、表2可知，接头各项指标均符合Q/CR 9211—2015及设计要求。

表1 典型焊接接头力学性能试验结果

接头形式	母材材质	接头拉伸		焊缝金属拉伸			接头 硬度 HV10
		R_m /MPa	断裂 位置	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A (%)	
对接	Q420qD	611~652	母材	532~552	616~658	23.0~25.0	218~223
熔透角接	Q420qD	—	—	526~551	643~650	23.5~24.0	218~224
坡口角接	Q420qD	—	—	525~550	606~653	23.0~25.5	211~220
Q/CR 9211—2015		≥540	—	≥420	≥540	≥19	≤380

表2 典型焊接接头低温冲击性能试验结果

接头形式	试验温度/℃	冲击吸收能量/J	
		焊缝金属	热影响区
对接	-20	90~121	106~141
熔透角接	-20	91~127	113~147
Q/CR 9211—2015		≥47	≥47

5 钢锚梁焊接

索塔钢锚梁构造如图2所示。由图2可知，钢锚梁由顶板、底板、腹板、隔板、锚垫板、承力板、

承压板、水平板及加劲板组成。

为保证钢锚梁制作精度，采取以下工艺措施控制焊接变形。

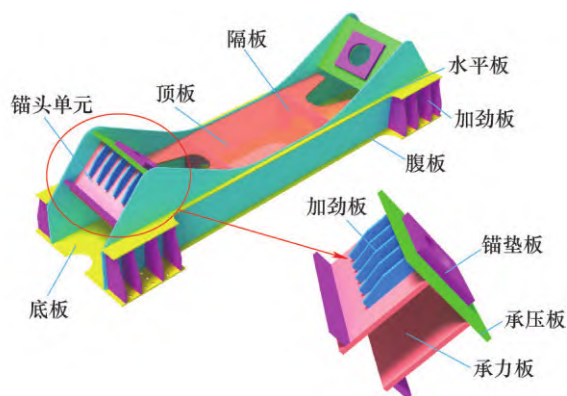


图2 索塔钢锚梁构造

1) 对焊缝设计进行优化。为确保主要受力部位焊接质量,钢锚梁腹板仅在与牛腿接触区域与锚梁底板采用熔透角焊缝,中间部位则采用坡口角焊缝焊接;承力板与锚梁腹板、钢锚梁端部竖向加劲与底板采用熔透角焊缝;竖向加劲与锚梁腹板、水平加劲板与锚梁腹板采用坡口角焊缝;其他部位均为普通角焊缝连接。尽量减少非主要受力部位的焊接金属填充,以减小焊接变形。

2) 设计合理的组装焊接顺序。锚头部位承力板、承压板、锚垫板及加劲板制作为锚头单元,锚头单元焊接完成后进行火调校正,然后再与钢锚梁顶板、底板、腹板、隔板进行总拼焊接,依次完成承力板与锚梁腹板、隔板与锚梁顶底腹板焊缝、钢锚梁顶底板腹板间主焊缝,以及各加劲板的焊接。

3) 承力板、锚垫板与承压板由于承受压应力,需磨光顶紧后采用贴角焊缝焊接。为防止锚头单元焊接时产生较大焊接变形,承力板自由端设临时角钢进行刚性固定,焊完待焊缝冷却后进行拆除。

4) 受操作空间限制,承力板与锚梁腹板熔透角焊缝采用单面焊双面成形工艺,承力板与锚梁腹板焊缝如图3所示。组装时留6~8mm间隙,背面贴陶质衬垫,采用药芯焊丝 CO_2 气体保护焊焊接,打底焊采用较小的焊接电流、电弧电压等焊接参数,以获得良好的背面成形,焊接时注意焊道排列及道间打磨清理,防止产生夹渣等焊接缺陷。锚梁顶板与腹板、腹板与底板主焊缝由锚梁中心向两侧对称施焊,减小锚梁扭曲变形。牛腿区域锚梁腹板与底板熔透焊缝采用不对称K形坡口,因内侧空间小、清根困难,所以将深坡口侧朝向腹板内侧,焊接时先焊接内侧坡口,外侧气刨清根后再焊接,以达到熔

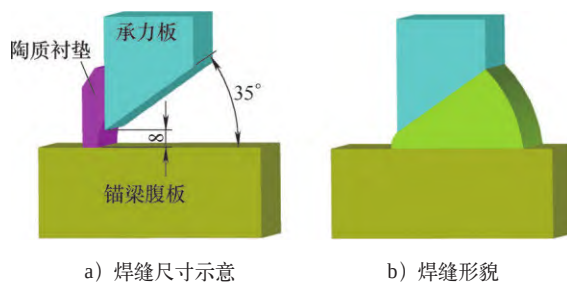


图3 承力板与锚梁腹板焊缝示意

透要求。承力板与锚梁腹板熔透焊缝焊后进行超声波锤击处理,所有角焊缝端部连续绕焊包角处理,焊后修磨匀顺,以减少焊接残余应力。

6 钢牛腿构造焊接

索塔钢牛腿构造如图4所示。由图4可知,钢牛腿是钢锚梁的支撑结构,由上承板、托架板、塔壁预埋钢板,以及与劲性骨架相连的连接钢板等组成。钢牛腿顶板设置横桥向挡块,以确保空间索在横桥向水平分力由受拉锚梁传至牛腿的挡块,最后传至主塔。

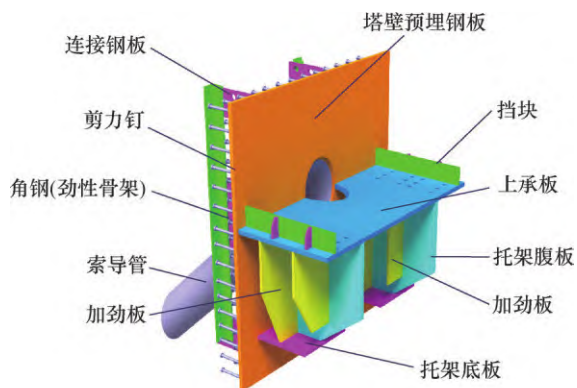


图4 钢牛腿构造

为保证牛腿部位焊接质量,满足操作要求,采取以下措施。

1) 根据钢牛腿结构特点,保证主要部位焊缝受力。上承板、托架腹板、托架底板与塔壁预埋钢板采用熔透角焊缝;托架腹板与上承板、托架底板,加劲板与托架腹板、底板及上承板,劲性骨架角钢与连接钢板,以及连接钢板、索导管与塔壁预埋钢板等均采用普通角焊缝连接。

2) 钢牛腿组装焊接顺序为先组装托架腹板、上承板及塔壁预埋钢板,依次完成托架腹板与上承板、预埋钢板,上承板与预埋钢板焊缝;再组装焊接竖向加劲板及托架底板;最后完成其余挡块、劲

性骨架、连接钢板及索导管等的组装焊接。

3) 托架腹板、加劲板与上承板磨光顶紧后焊接。上承板、托架腹板、托架底板与塔壁预埋钢板焊接均设计为K形不对称坡口，深坡口朝向内侧，先焊接内侧坡口，外侧气刨清根后焊接，采用药芯焊丝CO₂气体保护焊焊接，焊接时注意焊道排列及道间打磨清理，防止产生夹渣等缺陷。托架腹板与塔壁预埋钢板焊接时采取同向对称施焊。加劲板等角焊缝采用实心焊丝CO₂气体保护焊焊接，角焊缝端部连续绕焊包角处理，焊后修磨匀顺。

7 梁上钢锚箱焊接

梁上钢锚箱构造如图5所示。由图5可知，钢锚箱为斜拉索主要传力和受力杆件。钢锚箱由承压板、锚拉板、承力板、加劲板及锚垫板等构成。承压板与锚拉板、锚拉板与上弦杆顶板间均为熔透角焊缝设计，钢锚箱由于组成零件多，焊缝密集，熔透焊缝多，因此结构尺寸及焊接变形控制是重点。

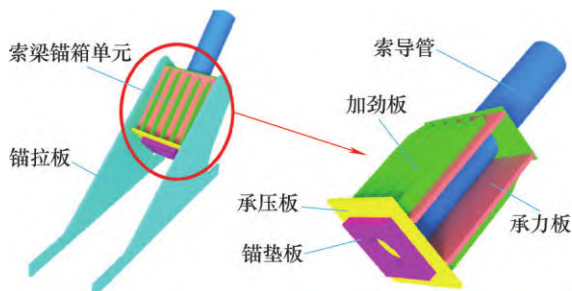


图5 钢锚箱构造

为了控制钢锚箱的焊接变形，保证焊接质量，采取以下工艺措施。

1) 优化焊缝设计，在满足焊缝受力的前提下，尽量减少焊缝填充量，避免过度焊接造成构件产生较大变形。锚箱承压板与锚拉板，加劲板靠近承压板区域与承力板采用熔透角焊缝；其余部位与承力板采用坡口角焊缝；索导管、承力板、锚垫板与承压板需磨光顶紧后焊接角焊缝。

2) 采用合理的组装施焊顺序，索导管、锚腹板、承压板与加劲板组装锚箱单元后采用CO₂气体保护焊依次焊接索导管与承压板、锚腹板与承压板、加劲板与承压板、加劲板与锚腹板焊缝。锚腹板、加劲板与承压板需磨光顶紧后方可焊接。焊缝端部连续绕焊包角处理，焊后修磨匀顺。最后组装锚箱单元与锚拉板，完成承压板与锚拉板的焊接。

3) 由于操作空间受限，承力板与锚拉板熔透焊缝采用单面焊双面成形工艺，焊接前背面粘贴陶质衬垫，采用CO₂气体保护焊平位焊接。为避免单面坡口焊接形成的焊接变形，造成钢锚箱扭曲变形，焊前需采取刚性固定措施，如焊接接头局部临时码板固定、承力板间用角钢固定连接。焊接时遵循同方向对称施焊，以减小焊接变形。

8 钢锚箱与主桁上弦杆桥上焊接

斜拉索梁端锚固采用双拉板整体式锚箱，两块竖向的拉板与主桁架上弦顶板熔透焊接，在拉板之间焊接承压板形成封闭的箱式结构，斜拉索穿过箱内锚管，锚固在锚垫板上，钢锚箱与上弦杆结构如图6所示。

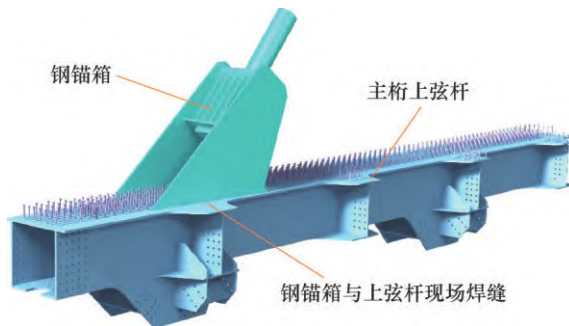


图6 钢锚箱与上弦杆结构

因受到运输高度的限制，根据钢桁梁总体制造工艺要求，上弦杆和索梁钢锚箱在加工厂分别制作，运输到桥位后进行拼装焊接作业。按定位线组装钢锚箱，确保钢锚箱竖基线与上弦杆竖基线位于同一位置，钢锚箱纵基线与上弦杆纵基线平行，钢锚箱两侧纵基线位于同一水平面，保证组装精度。

钢锚箱组装完成后，在焊接区域设置防风棚罩，减少风雨等不利因素对焊接的影响。为避免圆柱头焊钉影响焊接，钢锚箱与上弦焊接区域圆柱头焊钉预留不焊，待主要焊缝焊接、无损检测等工作完成后进行补焊。

钢锚箱与上弦杆熔透角焊缝如图7所示。熔透角焊缝采用K形非对称坡口设计，深坡口朝向内侧，焊前对待焊区域油锈打磨清除至露出金属光泽。由于锚拉板较厚，因此焊前采用MYD-40KW便携式电磁感应加热设备对待焊区域进行预热处理，待焊区温度达到80℃以上时再开始焊接。采用药芯焊丝CO₂气体保护焊，先焊接内侧深坡口，再焊接反面

浅坡口，反面焊前需进行气刨清根，保证熔透^[5]。

焊接时注意焊道排列及道间打磨清理，防止产生夹渣等焊接缺陷。无损检测合格后对圆弧部位切割打磨匀顺，进行超声波锤击处理，消除焊接内应力。最后进行修整打磨及焊缝部位的补涂装处理。

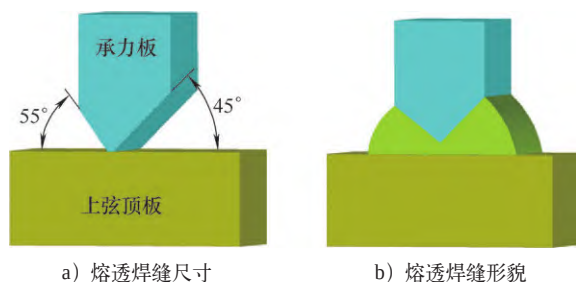


图7 钢锚箱与上弦杆顶板熔透焊缝示意

9 结束语

1) 通过对新市金沙江大桥钢锚梁、钢牛腿及上弦杆钢锚箱构造焊缝受力情况进行分析研究，优化焊缝设计，减少非主要受力部位熔透焊缝，降低熔敷金属填充量，尽可能避免因过多的热输入而造成构件产生较大焊接变形。结合施焊空间影响，设计

合理的组装施焊顺序，保证了所有焊缝满足可操作性。

2) 将上述焊接技术研究成果应用于新市金沙江大桥制造、安装中，焊缝外观及力学性能符合验收标准，主要受力焊缝质量得到保证，确保了该桥钢结构整体制造质量，同时通过采用合理的焊接工艺措施，有效控制了构件的焊接变形，保证了钢梁安装精度，可为同类结构制造施工提供借鉴。

参考文献：

- [1] 彭琼. 九江长江公路大桥钢锚梁索塔锚固区受力研究[J]. 南昌：南昌大学，2012.
- [2] 朱东明，黄旭光. 沪通长江大桥钢锚梁制造关键技术[J]. 中国新技术新产品，2020（16）：60-62.
- [3] 杨辉. 大跨斜拉桥钢锚梁施工关键技术[J]. 公路，2016，61（5）：64-67.
- [4] 中国铁路总公司. 铁路钢桥制造规范：Q/CR 9211—2015[S]. 北京：中国铁道出版社，2015.
- [5] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

MW 20240605

（上接第46页）

格。水压试验过程前后，钢管整体沿水流方向无明显变形，但钢管周长变化明显。钢管进口端（靠近加劲环）管口周长减小9mm，出口端（远离加劲环）管口周长增加11mm；卸压切割后，进口端周长仍减小9mm，较充压状态下未发生变化，出口端周长还原至最初状态。水压试验数据记录见表7。

表7 水压试验数据记录 (mm)

测量位置	水压试验前	充压到预定压力 (3.95MPa)	卸压后	切除两侧 封头后
水流进口端	18461	18455	18440	18452
水流出口端	18459	18470	18454	18459

通过水压试验结果可判定，钢材焊接性能良好，制作及焊接工艺可行，结构受力安全可靠。

8 结束语

1) 试验结果表明，焊条电弧焊、气体保护焊及埋弧焊3种焊接方法的焊接工艺评定试验结果均合格，对比力学性能差异不大。实际施工中，可根据施工便捷性采取其中一种或者多种组合的方式进行

焊接。

2) 在15~35kJ/cm焊接热输入条件下，焊接接头的力学性能均能满足要求，说明P460Q钢热输入适应性较强。

3) 结合碳当量和冷裂纹敏感系数，P460Q钢在常温下可不预热进行焊接。但由于焊接预热温度还受板厚、施工环境、焊接热输入大小及焊接金属氢含量等一系列因素的影响，因此建议焊接施工中应根据情况适当预热。

4) 通过返修及冷卷回圆试验，可确定焊缝返修工艺、冷卷回圆工艺对该材料性能无明显影响。

5) 通过水压试验，可确定P460Q钢焊接性能较好，产品质量可靠可控。

参考文献：

- [1] 孙景荣. 焊接名词术语释义大全[M]. 北京：化学工业出版社，2015.
- [2] 曹良裕，魏战江. 钢的碳当量公式及其在焊接中的应用[J]. 材料开发与应用，1999（1）：41-45.

MW 20240609