郑州黄河公铁两用大桥钢桥面板低温焊接技术

中铁宝桥集团有限公司 （陕西宝鸡 721006） 车 平 张剑峰

【摘要】 郑州黄河公铁两用大桥采用铁路钢桥新型桥面结构，所用钢材为新一代桥梁钢 Q370qE 钢，桥面板整体焊接在郑州桥位进行，为了确保钢桥面板在低温环境下的焊接质量，组织完成了桥面板低温焊接试验。本文主要介绍了试验温度的确定、试验焊材的选择、试验过程的控制，并对试验结果进行了分析，最后制定了桥位低温焊接工艺措施，取得了很好的实践效果。

1. 概述

郑州黄河公铁两用大桥铁路桥主桥长 1684m，是京广铁路客运专线及河南省规划的中原黄河公路大桥跨越黄河的共用通道。我公司承制的第二联采用 120m + 3 × 120m + 120m 连续钢桁梁结构，用钢量约 1.4 万 t。根据工期安排现场安装跨冬季施工，关于低温环境焊接对焊缝综合质量的影响已经在奥运场馆等建筑钢结构工程中有所研究，但冬季（低温环境下）焊接对桥梁钢结构焊缝综合质量的影响还研究不多。另外在低温环境下焊接也可为施工单位赢得宝贵的工期，因此研究该课题具有非常重要的现实意义。

低温环境下焊接的直接影响是导致焊缝冷却速度的加快，主要会出现以下问题：①冷却速度增大，主要使焊缝的 $t_{8/5}$ 时间缩短，冷裂敏感性增大，在焊缝及热影响区产生淬硬组织。②在拘束很大的情况下，冷却速度的增加，导致焊缝的一次结晶出现局域偏析，在较大的拉应力下产生结晶裂纹。③在冷却过程中，氢的溶解度降低，随着冷却速度变快，氢逸出的时间变短，残留在焊缝中的氢增大，亦使冷裂倾向增大。④当构件的工作温度低于材料脆性转变温度时，在拉应力和焊接残余应力作用下，结构的静载强度大大降低，极可能在低于 R_{eL} 的情况下发生脆断。⑤预热效果变差，保持层温难度加大。⑥焊接设备的可靠性受到影响。⑦焊工对严寒气候的耐受力直接影响到焊缝的焊接质量。本文主要针对 Q370qE 铁路钢桥面板低温焊接技术进行研究。

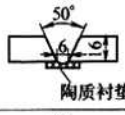
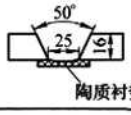
2. 低温环境温度确定

关于低温焊接环境温度，国内外标准中均有要求。《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ81—2002 中规定焊接环境温度低于 0℃时，应根据钢材及焊材制定相应措施；日本建筑学会《钢结构工程》JASS6 中规定最低施焊温度为 -5℃；美国 AWS D1.1 标准规定 0℃以下焊接时工件必须加热到 20℃以上；英国 BS 5135 中规定 0℃以下必须对构件接头 100mm 范围内加热；《铁路钢桥制造规范》TB10212—1998 中规定焊接低合金钢的环境温度不应低于 5℃。郑州现场及桥位的焊接作业全在室外进行，根据郑州气象统计资料平均最低温度为 -5℃左右，结合试验地（宝鸡）冬季的温度，确定试验环境温度为 -10 ~ -5℃。

3. 低温焊接试验研究

（1）低温试验项目确定 冬季低温焊接对焊缝金属危害的直接表征就是出现裂纹和在交变荷载工作状态下发生脆断，控制不好就会导致焊接质量下降甚至造成不安全隐患。郑州现场焊接作业主要为桥面板对接，桥面板对接采用 V 形坡口留 6 ~ 8mm 间隙，背面贴陶质衬垫，采用药芯焊丝 CO_2 气体保护焊打底、埋弧焊填充盖面工艺。试验采用刚性码板固定，模拟桥面板实桥的约束状态，在 -10 ~ -5℃环境温度下，具体试验项目及施焊工艺措施见表 1。

表1 低温焊接试验项目

序号	接头名称	接头形式	工艺措施
1	δ16mm + δ16mm 对接		1. 预热温度 20℃ 2. 层温≤120℃
2	δ16mm + δ16mm 大间隙对接		1. 预热温度≥20℃ 2. 层温 80～100℃

（2）低温试验用钢板及焊接材料 试验钢板材质为Q370qE，板厚为16mm；焊材采用药芯焊丝Supercored71H（φ1.2mm）打底，H08Mn2E（φ5mm）焊丝配SJ101q焊剂填充盖面。药芯焊丝选用Supercored71H（φ1.2mm），该焊丝为韩国现代综合金属株式会社生产，根据工程实际使用情况，其工艺性和焊缝力学性能优良，特别是低温冲击性能优于E501T—1焊丝；埋弧焊工艺使用H08Mn2E（φ5mm）+SJ101q组合，H08Mn2E焊丝是在H10Mn2的基础上降低C、S、P含量，增加Ni含量，并控制其他杂质含量，使焊缝金属净化，在烧结型焊剂SJ101q配合下，使焊缝金属更进一步得到了净化，从而达到提高焊缝低温韧度的效果。试板与焊材的化学成分见表2，常规力学性能见表3，经复验均合格。

表2 钢板及焊丝化学成分（质量分数） （%）

钢板及焊丝型号	C	Si	Mn	P
Q370qE	0.15	0.35	1.36	0.008
Supercored71H	0.03	0.48	1.34	0.010
H08Mn2E	0.09	0.04	1.77	0.009

钢板及焊丝型号	S	Ni	数据来源
Q370qE	0.003	—	复验
Supercored71H	0.008	0.31	复验
H08Mn2E	0.006	0.31	复验

表3 Q370qE钢板及焊丝力学性能

钢板及焊丝型号	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	A（%）
Q370qE	415	550	30
Supercored71H	575	635	26
H08Mn2E	460	565	27

钢板及焊丝型号	弯曲	冲击吸收功 A_{KV}/J（-40℃）	数据来源
Q370qE	完好	238，212，215	复验
Supercored71H	完好	152，136，100	复验
H08Mn2E	完好	145，136，120	质保书

（3）低温试验过程 试验选择温度较低的凌晨进行，焊接时环境温度均在-10℃～-5℃。每块试板在按照给定间隙组装完成后采用刚性码板固定，并安装相应的陶质衬垫。预热采用火焰加热，在焊缝两侧各100mm范围，采用点温计进行测温。焊接分3层焊接，第1、2层打底焊道采用药芯焊丝CO_2气体保护焊，打底焊接时第1层均采用摆动焊接，第2层焊接采用窄焊道多道焊接，打底层厚度≥8mm，第3层采用埋弧焊多道进行填充盖面。第1、2层焊接参数采用大电流、薄焊道及多层多道的焊接技术，避免产生淬硬组织；焊道之间的层温控制按照表1执行。具体焊接参数见表4。

表4 焊接参数

焊层	焊接材料	电流/A	电压/V	焊接速度/m·h^{-1}	气体流量/L·min^{-1}
1	Supercored71H φ1.2mm	240±20	26±2	7（3）	15～20
2	Supercored71H φ1.2mm	280±20	31±2	25	15～20
3	H08Mn2E + SJ101q	650±30	30±2	25	—

注：括号内为大间隙时的参数。

（4）试验结果分析 力学性能试样按GB 2649—2655—1989标准制备，接头力学性能试验结果见表5，接头硬度试验结果见表6，1#、2#试件的微观金相组织分析见图1～图4。

表5 接头力学性能

试板编号	接头拉伸		焊缝拉伸		
	R_m/MPa	断裂位置	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	A（%）
1	540	焊缝	420	545	34.5
2	540	焊缝	375	565	29.5
合格标准	≥530	—	≥370	≥530	≥21

试板编号	侧弯	冲击吸收功 A_{KV}/J（-40℃）	
		焊缝	HAZ
1	完好	132，125，162/140	190，105，92/129
2	完好	76，107，74/85	200，195，189/195
合格标准	—	≥41	

表6 接头硬度HV_{10}

试件编号	焊缝金属	HAZ	母材	最高硬度
1	183～198	194～213	167～174	213
2	191～203	191～210	173～180	210

图1 1#试件的焊缝微观组织

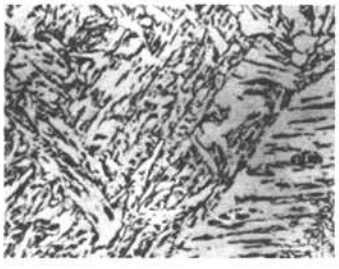


图2 1#试件的HAZ微观组织

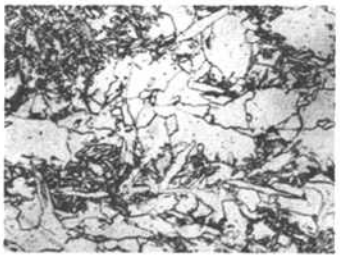


图3 2#试件的焊缝微观组织

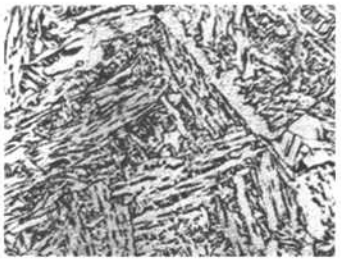


图4 2#试件的HAZ微观组织

从表5、表6可以看出1#、2#试件的焊缝屈服强度（R_{eL}）、焊缝抗拉强度（R_m）均高于母材标准值，可以满足标准要求；接头侧向弯曲180°后，受拉面均完好未裂，接头焊缝金属的伸长率均满足母材标准要求，表明焊接接头的塑性良好；冲击吸收功A_{KV}（-40℃）平均值均大于标准值，且储备很大，表明焊接接头的低温韧度良好；接头各区最高硬度为213HV_{10}，表明硬度较低未产生淬硬组织。

从图1~图4可以看出：经过对1#、2#试件的焊接接头微观金相分析，焊缝主要为块状先共析铁素体沿晶界分布，晶内为针状铁素体，过热区主要为粒状贝氏体，在焊接过程中未产生脆硬组织。

综上所述，Q370qE钢桥面板在低温环境下，针对常规间隙及大间隙情况，在采取合理的工艺措施的情况下，焊接试件接头的力学性能、硬度及微观组织均满足标准要求。

4. 低温环境焊接技术措施

在钢桥冬季焊接过程中，通过合理的施工组织安排，能选择一天当中气温相对较高的时间段进行焊接作业，避免低温环境下施工。但是，对于冬季长时间施工，焊接工作量大、工期紧等情况，选择高温时间段施工显得不现实，在焊接施工中采用适当的工艺措施来避免低温环境焊接对焊接质量的影响才是现实可行的方法。

（1）施焊时根据天气情况应有防风、防雨、防潮措施，特别是低温焊接时要求制作可移动保暖防护棚，以保证焊接区域局部空间的环境温度。

（2）定位焊的焊接电流要求增加20%左右，并减慢焊接速度，保证定位焊缝的有效厚度，预热温度比正常焊接时提高20~50℃。

（3）当环境相对湿度>80%时焊接前应用火焰烘烤，焊接前对接头进行加热烘干处理，以除去焊接区钢板表面的水分，确认无影响焊接质量的因素后方可焊接。

（4）焊前应对焊接区域进行预热，接头部位的温度不低于规定预热温度方可施焊。为提高预热效果，宜将预热范围确定为焊缝两侧150mm以上，预热采用远红外电加热技术和火焰烘烤法相结合，火焰预热速度一定要缓慢以保证预热在板厚方向上热透，测温点距焊缝30~50mm，达到规定预热温度后方可焊接。

（5）每条焊缝应一次焊接完成，如因意外原因中断，应及时采取后热、缓冷等措施。重新施焊的焊缝应按规定重新预热。

（6）焊前需对焊工进行低温焊接技术培训及交底，使焊工掌握低温焊接工艺；并对焊工进行低温环境施焊

（下转第33页）

上压制凸（凹）筋，以减少纯平面刚度差造成的变形。如后装压缩车箱体侧板、顶板采用大圆弧结构，既增大结构刚性又减小焊接变形。

大面积薄板应避免中间开大孔或开很多小孔，同时当结构刚性较小时应采用刚性骨架来支撑和固定罩板。

在平板局部位置增加折弯，可提高结构的刚性及稳定性，并减少焊接量及变形，折弯角度尽量设计成＜90°以增强加强效果。例如用压形瓦楞板来代替丁字形筋板和平板焊接起来的结构，焊接量大大减少，并省去焊后的矫正工作。门边应采用U形边，避免采用L形边，可提高结构刚性，减小门边波浪变形（见图6）。

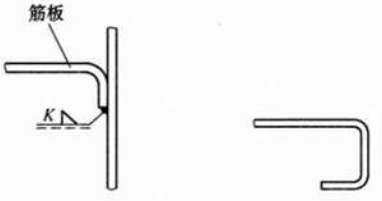


图5 筋板形状及焊接方式　　图6 薄板门边结构形式

（3）合理地安排焊缝的位置　在设计时，安排焊缝尽可能对称于截面中心轴，或者使焊缝接近中性轴。焊缝对称于中性轴，有可能使焊缝所引起的挠曲变形互相抵消。而焊缝接近中心轴，可以减小焊缝所引起的挠曲。

3. 工艺措施

（1）下料控制　下料方式应尽量避免采用火焰切割，采用等离子等其他方式切割时应在满足质量要求的前提下选择尽量快的切割速度。薄板件切割完毕后、成形前必须进行矫平，提前释放内应力，以防止后道工序中应力累加或释放而产生变形。

压形操作时应注意折弯模具的选择和调整，以减少由于下模和上刀对不直而产生的波浪变形。

（2）对接、焊接控制　选择热输入较低的焊接方法，可以有效地防止焊接变形。焊脚为3mm时，焊接参数如下表所示。

焊丝直径 /mm	电弧电压 /V	焊接电流 /A	气体流量 /L·min^{-1}	焊接速度 /cm·min^{-1}
1.0	21～23	100～120	8～12	20～30

根据需要将增提结构分解成若干个部件，分别加以装配焊接，使焊缝提前自由收缩后，再拼接为整体。这样不但有利于控制焊接变形，而且分解了生产流程，缩短了生产周期。焊缝焊接顺序应遵循先焊短焊缝后焊长焊缝，采取分段退焊，由内向外依次进行。将骨架焊接牢固，矫正好后再对接蒙皮类薄板件，并将两板之间的拼接焊缝拼接到骨架上。薄板在与骨架对接时要贴平、展平，对接顺序要求从一边开始，顺序展平点固。长焊缝背面加工艺拉筋，提高结构刚性，减小焊接变形。例如扫地车外罩板与底架之间的焊缝，两板均为3mm厚，且要求满焊，在焊接前在焊缝背面点固8号槽钢（见图7），然后再进行焊接，焊后去除拉筋，焊缝处变形量很小，省去大量矫正工作。

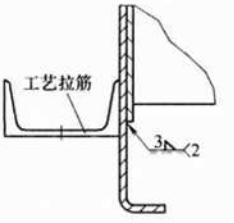


图7 工艺拉筋

4. 结语

通过良好的结构设计和下料、对接、焊接等工艺过程控制，可以有效地预防和控制焊接变形，以保证产品快速、高效的产出。**MW**

（20100620）

（上接第31页）

的适应性训练，保证焊工的个人防护、身体状况等满足要求，提高焊工在寒冷环境下的耐受力。

（7）为保证焊接设备的正常运转，将焊机及气瓶尽可能放置在防护棚。

5. 结语

（1）低温环境下进行焊接施工，只要采取合理、有效的措施，是可以保证焊接质量的。

（2）通过对Q370qE钢桥面板常规间隙接头和大间隙接头焊接试验结果分析，焊缝强度（R_{eL}、R_m）及接头低温冲击吸收功（A_{KV}）等力学性能均满足评定标准。

（3）根据试验情况，确定了郑州黄河公铁两用桥（GL—2标段）的现场桥面板低温环境焊接技术措施，确保了我公司承制的郑州黄河公铁两用桥（GL—2标段）在冬季的现场焊接施工不中断，为该工程的竣工赢得了工期。**MW**

（20100804）