

巢马铁路大桥不锈钢复合板 焊接工艺研究

戴伟

南通振华重型装备制造有限公司 江苏南通 226000

摘要：马鞍山公铁长江大桥铁路桥面采用不锈钢复合钢板，材质为Q420qE+316L、Q370qE+316L，板厚为复层3mm+基层16mm。为提升焊接的整体质量水平，需要针对两类不锈钢复合钢板实施焊接工艺评定试验。结合不锈钢复合钢板中的力学性能、化学成分等因素，以此明确复层焊接材料、过渡层焊接材料、基层焊接材料等。以图样和Q/CR 9211—2015《铁路钢桥制造规范》为标准，采用实心和药芯焊丝气体保护焊，设计与工艺指标更为科学的对接坡口形式，从中选取典型板厚进行焊接工艺试验。结果表明：与规范标准匹配，如焊接接头拉伸、侧弯、低温冲击、晶间腐蚀及硬度等指标。通过试验的方式，能对不锈钢复合钢板焊接工艺的策划和焊接施工产生指引效果。

关键词：不锈钢；复合板；焊接工艺

Research on welding process of stainless steel composite plate for Chao Ma Railway Bridge

DAI Wei

Nantong Zhenhua Heavy Equipment Manufacturing Co., Ltd., Nantong 226000, Jiangsu, China

Abstract: The railway deck of Chao Ma Railway Bridge was made of stainless steel composite plates, which were Q420qE+316L and Q370qE+316L, with a thickness of 3mm for the clad layer and 16mm for the base layer. To improve welding quality, it was necessary to conduct welding process testing and evaluation tests for 2 kinds stainless steel composite steel plates. Based on the mechanical properties, chemical composition, and other factors of stainless steel composite steel plates, these were to clarify the welding materials for cladding, transition layer, and base layer. Based on the drawings and the Q/CR 9211—2015《Railway Steel Bridge Manufacturing Specification》, GMAW and FCAW were used to weld test plate. Typical plate thicknesses and grooves were selected for welding process tests, and the results showed that they matched the standard specifications, such as welding joint tension, side bending, low-temperature impact, intergranular corrosion, hardness, and other indicators. By conducting experiments, it could provide guidance for the planning and construction of welding processes for stainless steel composite steel plates.

Keywords: stainless steel; composite plate; welding process

1 序言

马鞍山公铁两用长江大桥是新建马鞍山城际

铁路控制性工程，包括江心洲引桥、副汉航道桥及当涂侧引桥等。主汉航道桥合计长度3248m。在主

梁部分的上层公路桥面以板桁方式组合，其下层铁路桥面采用箱桁组合下的整体钢桁梁三主桁结构，桁间距15.5m，边桁、中桁桁高分别为15.5m、15.737m，标准节间长度14m，主桁采用N形桁架进行组合，其内部涉及232个节段。

马鞍山公铁两用长江大桥的铁路桥面采用Q370qE+316L、Q420qE+316L轧制不锈钢复合板。不锈钢复合板焊接时易出现过渡层侵入碳素钢层较多，导致焊缝冲击性能不合格。为了保证Q370qE+316L、Q420qE+316L不锈钢复合板的焊接质量，基于设计图样和Q/CR 9211—2015《铁路钢桥制造规范》的相关要求，进行焊接工艺评定试验。从中选取匹配度较好的气体保护焊焊丝，完善

工艺参数、焊接接头力学性能等要素，以此掌握更科学的焊接工艺，为该项目不锈钢复合板的焊接提供技术保证。

2 试验用钢板及试验方法

2.1 试验用钢板

试验用Q370qE+316L、Q420qE+316L轧制不锈钢复合板，基层为Q370qE、Q420qE，厚度16mm，复层为316L，厚度为3mm。两种不锈钢复合板的化学成分见表1，力学性能见表2。不锈钢基层超声波检测和界面结合率级别^[1]（界面结合率指复合钢板复、基层间呈冶金焊合状态的面积占总界面面积的百分率，I级为最高级，适用于不允许有未

表1 Q370qE+316L和Q420qE+316L不锈钢复合板母材化学成分

板厚/mm	化学成分（质量分数，%）									CE (%)	P _{cm} (%)	数据来源
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu			
Q370qE 基层：16	≤0.14	≤0.55	1.0~1.6	≤0.030	≤0.010	≤0.30	≤0.30	—	≤0.30	≤0.38	≤0.20	标准
	0.07	0.35	1.45	0.010	0.001	0.12	0.003	—	0.10	0.34	0.16	实测
316L 覆层：3	≤0.03	≤0.75	≤2.00	≤0.045	≤0.030	16.00~18.00	10.00~14.00	2.00~3.00	—	—	—	标准
	0.02	0.31	1.07	0.026	0.005	16.70	10.16	2.09	—	—	—	实测
Q420qE 基层：16	≤0.11	≤0.55	1.0~1.7	≤0.020	≤0.010	≤0.50	≤0.3	≤0.20	—	—	—	标准
	0.05	0.25	1.51	0.010	0.002	0.17	0.11	0	0.021	0.354	0.15	实测
316L 覆层：3	≤0.03	≤0.75	≤2.00	≤0.045	≤0.030	16.00~18.00	10.00~14.00	2.00~3.00	—	—	—	标准
	0.03	0.36	1.04	0.029	0.002	16.76	10.07	2.07	—	—	—	实测

表2 Q370qE+316L和Q420qE+316L不锈钢复合板母材力学性能

板厚/mm	R _{el} /MPa	R _m /MPa	A（%）	屈强比	弯曲180°（d=2a）		抗剪强度/MPa	KV/J	数据来源
Q370qE基层：16 316L覆层：3	≥370	≥510	≥20	≤0.85	内弯OK	外弯OK	≥300	-40℃，≥120	标准
	495	597	25.5	0.83	内弯OK	外弯OK	533	269、288、253/270	实测
Q420qE基层：16 316L覆层：3	≥420	≥540	≥19	≤0.85	内弯OK	外弯OK	≥300	-40℃，≥120	标准
	472	594	24	0.79	内弯OK	外弯OK	535	279、288、233/267	复验

结合区存在的、加工时要求严格的结构件上）均满足相关要求。

2.2 试验方法

Q370qE+316L、Q420qE+316L不锈钢复合板均采用气体保护熔化极电弧焊（GMAW）打底焊接基层，药芯焊丝CO₂气体保护焊（FCAW）焊接过渡层和覆层。坡口形式如图1所示。

3 焊接材料选择

3.1 基层材料

按照等强匹配原则，不锈钢复合钢板基层焊接过程中，Q370qE钢采用华通HTW-56（型号：G49A3C1S6，直径1.2mm）实心焊丝，Q420qE钢采用伯乐T-Union GM-Ni1（型号：G55A-6 M21-ZSN2，直径1.2mm）实心焊丝。

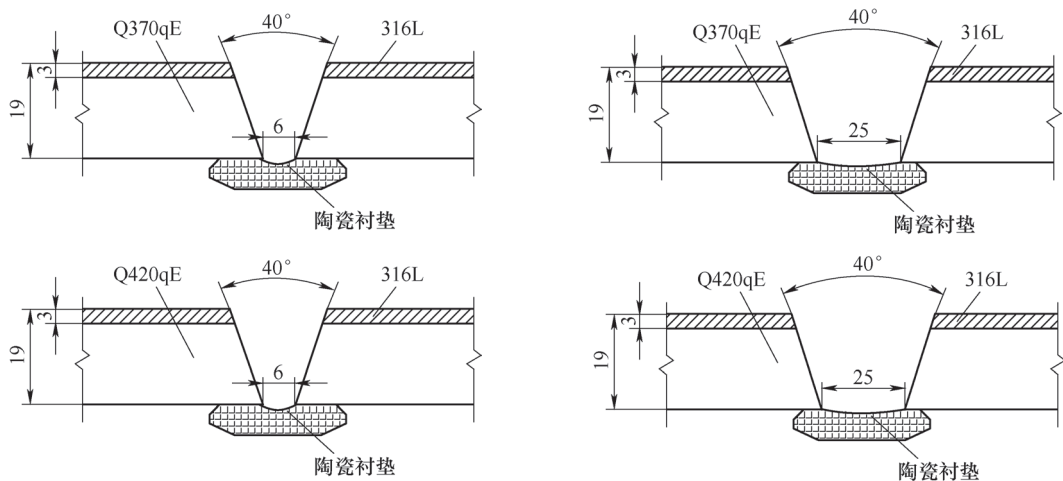


图1 不锈钢复合板坡口形式

3.2 过渡层焊接材料

过渡层焊接材料在选择中尤为关键，基层焊缝金属在填充至复合钢板覆层1~2mm的位置，直接调整为不锈钢焊丝过渡，Q370qE + 316L、Q420qE + 316L不锈钢复合板过渡层焊接材料选用SQA309L (φ1.2mm) 焊接材料，在焊丝选择上，309L焊接材料适合于异种钢接头^[2]——不锈钢和低合金钢、碳素钢等材料，因此选择SQA309L焊接过渡层。

3.3 覆层焊接材料

按照等化学成分的原则，不锈钢复合钢板覆层焊接时，直接使用药芯焊丝三英SQA316L (型号：TS316L-FC11、φ1.2mm)，并选其作为核心焊接材

料，生成与不锈钢复合板相对应抗腐蚀性能的焊接接头盖面层，见表3。

4 焊接工艺试验过程

根据《巢马铁路马鞍山公铁长江大桥施工图》，桥面Q370qE + 316L和Q420qE + 316L不锈钢复合板焊接接头主要为对接接头熔透焊缝，两种材质普通间隙 (6mm) 各1组，同时增加大间隙 (25mm) 接头各1组以备桥梁存在大间隙，试板共计4组。

4.1 预热温度

Q370qE + 316L和Q420qE + 316L不锈钢复合板温度控制见表4。

表3 焊接材料熔敷金属的化学成分和力学性能

品名	型号	化学成分 (质量分数, %)							力学性能				数据来源
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	R _{el} /MPa	R _m /MPa	A (%)	KV/J	
实心焊丝 HTW-56	G49A3C1S6	0.06	0.8	1.40	≤0.025	≤0.025	—	—	≥390	490~670	≥18	≥27 (-40℃)	标准
		~	~	~									
		0.15	1.15	1.85									
实心焊丝 T-Union GM-Ni1	G55A-6 M21-ZSN2	0.08	0.65	1.62	0.011	0.004	—	—	544	618	27	93	复验
		≤0.15	≤0.80	0.5~1.75	≤0.030	≤0.030	—	—	≥530	620~820	≥15	≥27 (-40℃)	标准
		0.050	0.280	1.680	0.010	0.008	—	—	627	671	22	126	复验
药芯焊丝 SQA309L	TS309L- FC11	≤0.04	≤1.0	0.5~2.5	≤0.040	≤0.030	22~25	12~14	—	≥520	≥25	—	标准
		0.029	0.48	1.42	0.028	0.008	22.3	12.2	—	571	35.5	—	
药芯焊丝 SQA316L	TS316L- FC11	≤0.04	≤1.0	0.5~2.5	≤0.040	≤0.030	17~20	11~14	—	≥485	≥25	—	标准
		0.029	0.52	1.39	0.030	0.009	18.49	11.69	—	560	40.5	—	

表4 不锈钢复合板焊接温度控制

材质	板厚/mm	除湿温度 /℃	除湿范围/mm	道间温度/℃
		气体保护焊		
Q370qE + 316L 不锈钢复合板	≤30	≥5	每侧 ≥100mm	≤100
Q420qE + 316L 不锈钢复合板	≤30	≥5	每侧 ≥100mm	≤100

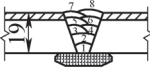
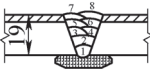
注：1.除湿方法：火焰预热。

2.除湿范围为焊缝及两侧 ≥100mm 内。

4.2 焊接参数

(1) 焊前准备 装配时需要提升坡口洁净性，在坡口及两侧位置，注意做好油污、杂质、水分等
(2) 焊接参数 Q370qE + 316L和Q420qE + 316L不锈钢复合板焊接参数见表5。

表5 Q370qE + 316L和Q420qE + 316L不锈钢复合板焊接参数

序号	编号	板厚组合/mm	焊接位置	焊接方法	焊接材料	代表焊缝/mm	熔覆简图	焊道	道间温度/℃	焊接电流/A	电弧电压/A	焊接速度/(cm/min)
1	CMF-7	19 + 19 (Q370qE + 316L)	平位	GMAW	HTW-56	铁路桥面系纵、横向对接焊缝 铁路灌浆封孔对接 $14.25 \leq t \leq 28.5$		基层	8	220	26	30
				GMAW	HTW-56			基层	26	260	30	33
				FCAW	SQA309L			过渡层	32	200	30	33
				FCAW	SQA316L			覆层	56	220	30	30
2	CMF-9	19 + 19 (Q370qE + 316L)	平位	GMAW	HTW-56	铁路桥面系大间隙纵、横向对接焊缝 $14.25 \leq t \leq 28.5$		基层	8	220	26	30
				GMAW	HTW-56			基层	26	260	30	33
				FCAW	SQA309L			过渡层	37	200	30	33
				FCAW	SQA316L			覆层	50	220	30	30
3	CMF-8	19 + 19 (Q420qE + 316L)	平位	GMAW	GM Ni1	铁路桥面系纵、横向对接焊缝 铁路灌浆封孔对接 $14.25 \leq t \leq 28.5$		基层	8	220	26	30
				GMAW	GM Ni1			基层	26	260	30	33
				FCAW	SQA309L			过渡层	38	200	30	33
				FCAW	SQA316L			覆层	52	220	30	30
4	CMF-10	19 + 19 (Q420qE + 316L)	平位	GMAW	GM Ni1	铁路桥面系大间隙纵、横向对接焊缝 $14.25 \leq t \leq 28.5$		基层	8	220	26	30
				GMAW	GM Ni1			基层	26	260	30	33
				FCAW	SQA309L			过渡层	39	200	30	33
				FCAW	SQA316L			覆层	56	220	30	30

4.3 焊接过程控制

(1) 基层焊接 Q370qE + 316L基层使用HTW-56实心焊丝，Q420qE + 316L基层使用GM Ni1实心焊丝，等强度匹配保证焊缝根部抗裂性能。焊接过程中控制碳素钢层焊缝厚度，碳素钢层焊缝顶面与分界面间距控制在1~2mm。碳素钢与不锈钢的过渡层焊接，一定要采用小电流焊接，以减少焊缝熔深，保证基层焊缝具有良好的冲击韧度。

(2) 过渡层焊接 过渡层属于覆层和连接基层的核心位置，因此在设计中应避免太厚，否则会导致侵入碳素钢层偏多，导致接头冲击性能下降。过渡层要求控制焊接层厚2~3mm。Q370qE + 316L和Q420qE + 316L过渡层则选择SQA309L材料。低碳含量会进一步减少焊缝热影响区析出的碳化物。因此，SQA309L与低合金钢的异种钢接头匹配度更高。在焊接过渡层过程中，应实施小参数焊接，以此控制基层在过渡层焊接中的稀释影响，降低过渡层焊缝熔深偏大的问题，避免基层焊缝力学性能显著减小。

多方面有害物质的清理工作。

(3) 覆层焊接 不锈钢覆层是保证桥面耐腐蚀性能的关键，结合等化学成分原则，在其覆层中选用药芯焊丝SQA316L盖面，盖面焊道则通过小参数进行焊接。

4.4 注意事项

过渡层和覆层清理焊渣只能采用不锈钢钢丝刷和不锈钢打磨片，禁止使用普通碳素钢丝刷或者打磨碳素钢的磨片打磨不锈钢覆层。不锈钢盖面层对接焊缝余高要求≤1.5mm，与不锈钢复合层表面保持平整、过渡匀顺。

除此之外，不锈钢复合板焊接前期并不需要预热，在过渡层和覆层中，温度需要控制在100℃以下，进而控制焊缝在敏化温度区停留问题，并提升不锈钢覆层抗晶间腐蚀效果，焊接过程中最高道间温度<100℃。

5 接头力学性能试样制取及试验

根据Q/CR 9211—2015标准，对两种不锈钢复合板试板焊接接头进行取样，取样的数量和类型见表6。

表6 试板取样要求

试验形式	试验项目	试样数量	备注
对接焊缝	接头拉伸试验	1	1. 侧弯试验：角度 $\alpha=180^\circ$ 板厚 $\leq 16\text{mm}$ ， $d=2a$ 板厚 $> 16\text{mm}$ ， $d=3a$ 2. 冲击试验缺口开在焊缝中心、热影响区（熔合线外1mm）处各3个 3. 晶间腐蚀仅针对两侧均为复合板对接焊缝
	焊缝金属拉伸试验	1	
	接头侧弯试验	1	
	低温冲击试验	6	
	接头硬度试验	1	
	晶间腐蚀	1	

6 试验结果

在完成取样后，则需要实施全焊缝金属拉伸试验、焊接接头拉伸试验、接头硬度检测和晶间腐蚀试验等，结果见表7。由表7可得出如下结论。

(1) 强度 从4组Q370qE + 316L和Q420qE + 316L不锈钢复合板焊缝金属拉伸试验可看出，焊缝金属的屈服强度和抗拉强度均高于覆层基材标准值；接头拉伸试验表明，3个拉伸试样断口在焊缝，

表7 Q370qE + 316L和Q420qE + 316L不锈钢复合板力学性能试验

序号	编号	材质	板厚/mm	焊缝金属拉伸			接头拉伸		弯曲180°	接头硬度HV10				冲击吸收能量/J		结果
				R_{eL} /MPa	R_m /MPa	$A(\%)$	R_m /MPa	断口位置		焊缝金属	热影响区	母材	最高硬度	焊缝中心	熔合线+1mm	
标准	—	—	—	≥ 370	≥ 510	≥ 20	≥ 510	—	$d=3a$	≤ 380	≤ 380	≤ 380	≤ 380	$\geq 41J$ (-40°C)		合格
1	CMF-7	Q370qE + 316L	19+19	471	639	26.5	583	母材	OK	209	246	212	246	84、86、95	170、136、152	合格
2	CMF-9			449	610	26.0	536	焊缝	OK	203	225	225	225	51、63、72	110、126、133	合格
标准	—	—	—	≥ 420	≥ 540	≥ 19	≥ 540	—	$d=3a$	≤ 380	≤ 380	≤ 380	≤ 380	-40°C ， $\geq 47J$		标准
3	CMF-8	Q420qE + 316L	19+19	506	582	26.0	600	焊缝	OK	206	250	233	250	76、78、86	92、103、112	合格
4	CMF-10			478	575	26.3	546	焊缝	OK	209	226	217	226	66、71、60	88、91、102	合格

1个试样断口在母材，焊接接头抗拉强度均高于覆层基材标准值。接头拉伸试验符合标准要求。

(2) 塑性 Q370qE + 316L试板焊缝金属的伸长率分别为26.5%、26%，均高于母材标准值20%。Q420qE + 316L试板焊缝金属的伸长率分别为26.3%、26%，均高于母材标准值19%。侧弯试验试样弯曲后，弯曲面、熔合线、热影响区等均未呈现裂纹、夹渣等问题，同时也没有角部裂纹。焊缝金属伸长率、侧弯试验结果显示，焊接焊头的塑性合格。

(3) 韧性 在低温冲击试验中，Q370qE + 316L试板焊缝金属和热影响区冲击吸收能量均高于41J，Q420qE + 316L试板焊缝金属和热影响区冲击吸收能量均高于47J，由此判断，焊接接口的韧性合格。

(4) 硬度 Q370qE + 316L和Q420qE + 316L不锈钢复合板试板接头硬度最大值在热影响区，其最高值为250HV10，接头硬度满足 $\leq 380\text{HV10}$ 的标准要求。

(5) 晶间腐蚀试验 Q370qE + 316L和Q420qE + 316L分别进行晶间腐蚀试验^[3]，试验时采用GB/T 4334—2020《金属和合金的腐蚀奥氏体及铁素体-奥氏体(双相)不锈钢晶间腐蚀试验方法》作为标准，在铜-硫酸铜-16%硫酸溶液中进行煮沸，然后通过弯曲法分析材料的晶间腐蚀倾向。在完成溶液腐蚀处理后，不锈钢覆层焊接接头将以180°弯曲的方式进行

试验，对其完成测试后，此时表面未发现裂纹，可见测试结果符合预期，具有较强的抗腐蚀效果。

7 结束语

1) Q370qE + 316L和Q420qE + 316L不锈钢复合板焊接工艺试验结果表明，不锈钢复合板的基层、过渡层、覆层中，选择更合理的焊接材料，使用合理的焊接参数，安排合适的分层，则焊接接头则呈现较强的力学性能、抗晶间腐蚀性能等，基本与实际的使用要求匹配。

2) 焊接试验中所用焊接方法、焊接材料、坡口形式、焊层布置及焊接参数，可作为编制巢马铁路马鞍山公铁长江大桥Q370qE + 316L和Q420qE + 316L不锈钢复合钢板焊接工艺的依据。

参考文献：

- [1] 曾周燊，李东晖，王青峰. 铁路桥梁用轧制不锈钢复合板的应用性研究[J]. 现代冶金，2019，47(1)：11-16.
- [2] 王伟，黄绍泉. 铁路钢桥用不锈钢复合钢板焊接技术[J]. 钢结构，2015，30(7)：76-78.
- [3] 黄彦博，刘智慧. Q235B + TP316L 不锈钢复合板焊接工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2020(9)：19-21.

MW 20240409