

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.07.018

高性能桥梁钢研究现状和母材焊材确定

张海顺^{*1}, 周冠南¹, 陈宁贤¹, 胡瑞海²

(1. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300; 2. 中国土木工程集团有限公司, 北京 100038)

摘要:针对新建澳氹第4条跨海大桥采用690 MPa级高性能桥梁结构钢应用于主桥边跨桁架上弦杆受压区的设计,对690 MPa级高性能桥梁结构钢的研究现状和应用情况进行了研究。综合比较了国内外690 MPa级高性能桥梁钢的力学特性和工艺特点,并对高性能钢在桥梁工程的适用性和优劣性等问题进行了对比,重点说明了690 MPa级桥梁钢具有较好的冶金质量、低温韧性以及断裂韧性等。结合主桥钢梁设计,对典型厚度24, 28, 44 mm的Q690qD钢板取样,按照规范要求对母材性能进行了化学成分和下屈服强度、抗拉强度等力学性能指标的试验。针对不同的焊接方法,采用了不同厂家的埋弧焊丝、实心焊丝、药芯焊丝、焊条4种常用焊材组合,进行了焊缝的熔敷金属力学性能选材试验。结果表明:母材试验所选Q690qD采用“TMCP+回火”的交货状态,在强度、延伸率、冲击韧性等各方面均具有良好的性能;焊材试验中,埋弧自动焊、实心焊丝富氩气体保护焊、药芯焊丝CO₂气体保护焊均可以应用于Q690qD钢的焊接,与母材化学成分相匹配,在保证焊缝强度的同时,仍然有着良好的低温冲击韧性。690 MPa高性能桥梁结构钢具有较高强度外兼有良好的焊接性能,试验为进一步完善我国高性能钢技术体系提供了参考。

关键词:桥梁工程;高性能桥梁钢;试验研究;母材焊材;化学成分;力学性能;屈强比;冲击功

中图分类号:U448.25

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2023)07-0142-07

Research Status of High Performance Bridge Steel and Determination of Base Metal and Welding Material

ZHANG Hai-shun^{*1}, ZHOU Guan-nan¹, CHEN Ning-xian¹, HU Rui-hai²

(1. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

2. China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: In view of the design of 690 MPa high performance bridge structural steel to be applied to the compression zone of the upper chord of the side span truss of the main bridge for the 4th Macau Taipa sea-crossing bridge, the research status and application of 690 MPa high performance bridge structural steel are studied. The mechanical properties and technological characteristics of 690 MPa high performance bridge steels at home and abroad are compared comprehensively. The applicability, advantages and disadvantages of high performance bridge steels in bridge engineering are compared. It is emphasized that 690 MPa bridge steel has good metallurgical quality, good low temperature toughness and good fracture toughness. Combining with the design of the girder of the main bridge, the Q690qD steel plate with typical thickness of 24, 28, 44 mm are sampled, the chemical composition, mechanical properties (lower yield strength, tensile strength, etc) of the base metal are tested according to the specification requirements. According to different welding methods, by using 4 commonly used welding materials (submerged arc welding wire, solid welding wire,

收稿日期:2021-07-11

基金项目:中国铁建股份有限公司科研课题项目(2020-A01, 2020-B01);天津市科技计划项目(19YDLZSF00030)

作者简介(*通讯作者):张海顺(1984-),男,天津人,博士,正高级工程师。(zhangyibiao_0216@163.com)

flux-cored welding wire, and welding rod) from different manufacturers, The material selection test of the mechanical properties of the deposited metal for the weld is carried out. The result shows that (1) the selected Q690qD for the base metal test adopts the delivery state of “TMCP + tempering”, which has good performance in strength, elongation, impact toughness and other aspects; (2) in the welding material test, automatic submerged arc welding, solid wire argon rich gas shielded welding and flux-cored wire CO₂ gas shielded welding can be applied to the welding of Q690qD steel, which is matched with the chemical composition of the base metal, and still has good low-temperature impact toughness while ensuring the weld strength. The 690 MPa high performance bridge structural steel has high strength and good weldability. The test provided a reference for further improving the technical system of high-performance steel in China.

Key words: bridge engineering; high performance bridge steel; experimental study; base material and welding material; chemical composition; mechanical property; yield ratio; impact energy

0 引言

近些年来,国内有关科研院所和设计单位会同业主方、施工方,大力发展高性能桥梁钢在我国道路交通建设事业中的应用。但是总体来说,高性能钢材在大型桥梁中的使用比例一般不会太高,普遍规律是强度等级越高,使用量相对越少,一般仅在受力较大的关键部位使用^[1-2]。如 690 MPa 级高性能钢虽然已应用于海洋装备、工程机械等领域,但在钢结构桥梁领域的应用则很少^[3]。

随着强度等级的提升,钢材会出现韧性降低、屈强比提高、板厚效应大、热稳定性差、焊接性差等^[4-5]问题。目前我国钢结构桥梁设计规范中关于 Q690 钢的焊接、疲劳和防断设计还是空白,缺乏可以参考的标准和规范^[6-8]。国内仅在汉江湾桥和香港将军澳桥有少量应用于压应力部位。因此,为给澳氹四桥工程建设提供技术支撑,保证结构设计安全可靠,需针对澳氹四桥的结构设计,开展 690 MPa 级桥梁钢相关试验等研究工作。

1 690 MPa 级国内外研究现状和应用情况

澳氹四桥在设计方案中大范围采用 Q690qD 级高性能桥梁钢,为确保后期桥梁结构有效实施,对高性能桥梁钢进行了相关调研。对于屈服强度 690 MPa 级以上的高强度桥梁钢,国外在 2000 年左右就已经有实际工程应用,并制定了相关标准条文。如美国 HPS 690 W 高性能钢在 2003 年应用于 Nebraska 桥,日本 BHS 700 W 钢在 1994 年应用于明石海峡大桥,韩国 HSB 800 W 钢在 2009 年应用于 Lee-Sunshine 桥,德国因戈尔施塔特的组合桥梁的桥墩与钢梁间的半刚性连接采用了 S690QL 钢^[9-10]。然

而目前在中国,桥梁结构钢主要以 Q500q 钢、Q420q 钢、Q370q 钢和 Q345q 钢为主,更高强度级别钢种的工程应用实例非常少,且缺乏相关的标准规定。690 MPa 级高性能桥梁钢应用情况见表 1 所示。表 1 中 TMCP 指热机械控制工艺,英文为 Thermo Mechanical Control Process,是将控制轧制和控制冷却相结合的微结构控制技术之一,旨在获得钢板的优异性能,例如高强度,优异的韧性和可焊接性。

表 1 690 MPa 级高性能桥梁钢应用情况

Tab. 1 Application of 690 MPa high performance bridge steel

标准	中国标准	美国标准	日本标准	欧洲标准
对应牌号	Q690q	A709 HPS 100 W	BHS 700 W	S690Q
交货状态	调质或 TMCP+回火	调质	TMCP+回火	调质
应用情况	汉江湾桥	仅在个别 桥上试用	仅个别中小桥 少量使用	香港将军 澳桥

中国桥梁钢标准偏于在钢材技术指标上进行设定,如屈强比、纤维断面率、碳当量、裂纹敏感性系数 P_{cm} 、冲击功等,这都是基于结构安全的考虑。但是这些指标,国外标准大都不采用。中国桥梁钢标准更严格,更注重应用性和安全性。除了日本明石海峡大桥外,国外其他使用 690 钢的桥梁规模都不是很大^[11-12]。国内外 690 MPa 级桥梁钢板特点及材料技术比较见表 2 所示。表 2 中 Q&T 指淬火回火,英文为 Quenching & Tempering,也就是调质热处理方式。

从表 2 可以看出,从屈强比来讲,中国对高性能钢材要求更高。欧美调质工艺 690 MPa 级钢板,屈强比一般在 0.93 左右。日本 TMCP 工艺生产 690 MPa 级钢板为耐候钢,屈强比可控制到 0.90 左右。中国汉江湾桥采用 TMCP 工艺的 Q690 级桥梁钢,16 mm 以

表 2 国内外 690 MPa 级桥梁钢板特点及材料技术比较

Tab. 2 Comparison of characteristics and material technologies of 690 MPa bridge steel plates at home and abroad

国家	时间	牌号	工艺	厚度/mm	下屈服强度/ MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	断后伸长率/ %	韧性要求	
									温度/℃	冲击吸收能量/J
美国	2003	HPS100W	Q&T	≤65	690	760~895	不要求	≥18	-34	48
欧洲	2000	S690Q	Q&T	3~50	690	770~940	不要求	≥14	-40	30
日本	2007	BHS700W	TMCP	6~100	700	≥780	不要求	≥16	-40	100
中国	国家项目	Q690qE	TMCP	≤50	≥690	≥770	≤0.85	≥14	-40	120
	2020 汉江湾桥	TMCP		16~50	≥630	≥770	≤0.87	≥14	-40	120

上规格屈服强度≥630 MPa，屈强比≤0.87。

对于 690 MPa 级高性能桥梁钢尚未推广的主要原因分析为板材切割热矫正困难、可焊性差、焊接工艺苛刻、焊材要求高、焊缝裂纹难控制等焊接问题^[13-15]。在国内已通车的桥梁中，Q690q 级高性能桥梁钢仅在武汉汉江湾桥作为国家课题示范工程首次应用，仅用于受压构件，并且采取了通过降低母材抗拉强度标准以优先保证焊缝安全^[16-18]。此外，香港将军澳桥也同样采用了与武汉汉江湾桥的拱桥桥型，Q690q 级高性能桥梁钢也用于受压区，而受拉区世界上无实例工程。

2 澳氹四桥工程概况和应用 Q690qD 讨论

2.1 工程概况

澳氹四桥主桥桥梁总体布置为：2×(202.5+280.0+202.5)m=1 370.0 m。主桥钢梁架设总体施

工方案为：钢梁在工厂内预拼存放，海运至桥位处安装。主桥边跨采用主体钢桁梁特制浮吊大节段吊装、悬臂翼缘梁面吊机吊装方案；中跨钢梁采用桥面架梁吊机逐节段全断面安装。总体的施工顺序是先施工边跨、后施工中跨，跨中合龙。

根据施工图设计，主桥主梁采用钢桁梁-钢箱梁组合结构。其中主桁上弦杆的选材方案，是边跨受压区域的部分上弦杆采用我国自主研发的新型 Q690qD 钢材，其余采用 Q500qD。主桥桥型图、分段方案以及 Q690qD 钢材所在区域见图 1 所示。从桥梁设计方案和钢梁分段施工方案上可以看出，既然认识到 Q690qD 钢材应用存在的困难，就提出了减少使用范围。钢梁分段方案中 Q690qD 钢材均处于 H1 梁段中，采用工厂内全部焊接完成，避免 Q690qD 钢材现场焊接接头。Q690qD 钢材分布区域为受压区，避免了受拉区需要考虑疲劳和防断等问题。

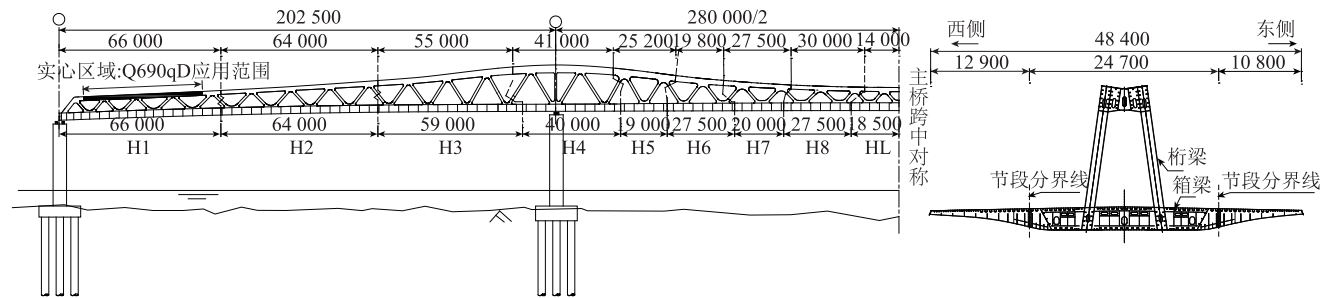


图 1 主桥桥型 (1 联 1/2 立面) (单位: mm)

Fig. 1 Type of main bridge (elevation of one and 1/2 couplets) (unit: mm)

2.2 应用 Q690qD 讨论

从 690 MPa 级桥梁钢板材料有 4 个特点：(1) 钢材的屈强比高，一般都在 0.87 以上。(2) 钢板切割变形问题突出，热矫正困难，需加热到 650℃ 以上，加热时间长。(3) 焊接预热温度较高，要求 120/150℃ 以上，需多重加热方式同时进行。(4) 焊接工艺适应性突出问题，焊缝存在裂纹敏感性，强韧性等问题。

因此，在澳氹四桥上应用 690 MPa 级桥梁钢需

要解决的技术问题有：

(1) Q690q 钢综合力学性能控制问题

首先是屈强比难以控制，调质状态 690 MPa 级的桥梁钢屈强比普遍在 0.93 以上，TMCP 状态 690 MPa 级的桥梁钢的高强度与低屈强比难平衡。其次是高强度与塑韧性矛盾，高强度及低屈强比条件下，钢板塑性和韧性会恶化。

(2) Q690q 钢残余内应力控制问题

钢板强度级别高，轧制应力大，冷却时应力分

布不均导致板形难以控制, 施工时出现钢板切割变形、焊缝裂纹倾向提高等实际工程问题, 需要优化工艺。

(3) Q690q 钢板焊接接头综合性能控制问题

钢板碳当量偏高, 抗拉强度较高, 现有埋弧焊材强度值偏低, 性能稳定性差, 富氩气实心焊丝熔池气液相表面张力大, 流动性差, 缺陷率高, 药芯焊丝强度富余量小, 低温冲击性能偏低, 扩散含量偏高, 需要进行高性能焊接材料研发及焊接工艺试验研究。

施工单位通过与建设单位、监理单位、设计单位、科研单位、钢板制造厂、钢结构加工厂和质量检测等单位的共同研究, 解决了上述问题, 确定 Q690qD 钢材可应用于主桥边跨桁架上弦杆受压区。

3 Q690qD 母材性能试验

3.1 化学成分分析

试验钢板交货状态为“TMCP+回火”。按照相关国家标准进行化学成分, 成分检验方法采用光谱分析。取样钢板厚度分别为 24, 28, 44 mm, 化学成分试验结果如表 3 所示。从化学成分上看: 试验用 Q690qD 钢为超低碳贝氏体钢, 含碳量均小于等于 0.09%, 焊接裂纹敏感指数 P_{cm} 指数均为 0.20; S, P 等有害元素的含量都控制在较低的水平, P 的含量在 0.008 4~0.011%, S 含量都在 0.002% 左右。钢中加入 Cr, Ni, Cu 等主要元素, 其成分控制都比较稳定; 同时, 添加了 Ti, Nb, V 等微合金元素, 可产生晶粒细化和沉淀强化等作用, 以改善组织性能, 提高钢的强度。

表 3 Q690qD 钢母材化学成分复验结果

Tab. 3 Re-inspection result of chemical composition of base metal of Q690qD steel

板厚/ mm	化学成分/%														CEV/ %	P _{cm} / %	数据 来源
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	Al	V				
标准	≤0.09	≤0.5	1.0~1.7	≤0.018	≤0.005	≤1.0	≤1.2	≤0.60	0.15~ 0.55	0.006~ 0.03	0.005~ 0.09	≥0.015	≤0.08	≤0.56	≤0.24		技术 条件
24	0.061	0.12	1.26	0.009	0.002	0.40	0.91	0.34	0.33	0.013	0.028	0.031	0.003	0.50	0.20		复验
28	0.064	0.11	1.27	0.011	0.002	0.40	0.85	0.33	0.33	0.012	0.027	0.029	0.003	0.50	0.20		复验
44	0.062	0.11	1.27	0.010	0.002	0.40	0.85	0.38	0.33	0.012	0.027	0.029	0.003	0.50	0.20		复验
—	0.06	0.11	1.28	0.008 4	0.001 6	0.40	0.85	0.32	0.32	0.013	0.027	0.031	0.003	0.50	0.20		质保书

该钢种采用低碳、低杂质元素含量成分设计方案, 有效控制了钢板的碳当量和冷裂纹敏感指数, 钢的冷裂纹敏感性有所减弱, 防止冷裂纹产生的工件预热温度有所降低, 极大的改善钢板焊接性。通过采用碳当量法间接评定钢材的裂纹敏感指数和钢材的可焊性, 计算得出试验用 24, 28, 44 mm 厚的 Q690qD 钢板碳当

量 CEV 、冷裂敏感指数 P_{cm} 分别为 0.50 和 0.20。

3.2 力学性能结果分析

母材力学性能验证试验按相应国家标准进行, 检测项目包含: 屈服强度 (R_{eL})、抗拉强度 (R_m)、伸长率 (A)、弯曲、-20 ℃ 低温冲击试验 KV_2 。试验结果如表 4 所示。

表 4 Q690qD 钢母材力学性能复验结果

Tab. 4 Re-inspection result of mechanical properties of base metal of Q690qD steel

板厚/ mm	常温拉伸试验					低温冲击试验		弯曲试验	断面收缩	数据来源
	取样方向	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A /%	屈强比	取样方向	-20 ℃ KV_2 /J	(180°)	率/%	
标准	横向	≥650	770~880	≥14	≤0.88	纵向	≥120	$D=3a$	单试样≤25 3 试样≤35	技术要求
24	横向	711	825	14	0.86	纵向	284, 282, 278/281	完好	—	质保书
	横向	711	803	15	0.88	纵向	293, 297, 289/293	完好	—	复验
28	横向	657	789	17	0.83	纵向	285, 299, 243/276	完好	—	质保书
	横向	666	798	17.5	0.83	纵向	301, 301, 303/302	完好	56, 55, 67/59	复验
44	横向	679	803	15	0.84	纵向	286, 265, 271/274	完好	—	质保书
	横向	702	794	18.5	0.88	纵向	301, 301, 303/302	完好	67, 69, 69/68	复验

从母材拉伸试验结果可见, 试验钢板屈服强度在 657~711 MPa 之间, 抗拉强度在 789~825 MPa 之

间, 延伸率在 14%~18.5%之间; 不同板厚之间力学存在差异, 说明不同厚度钢板的力学性能有一定的影响。24, 28, 44 mm 钢板的屈强比分别为 0.88, 0.83 和 0.88 满足技术条件要求, 钢材发生屈服后, 有明显的变形才会断裂; 同时, 钢板弯曲试验结果良好, 说明钢板具有良好抗塑性变形能力。

4 熔敷金属选材试验

4.1 试验方法

针对钢材的特点, 针对不同的焊接方法, 采用

不同厂家的焊材组合, 进行焊缝的熔敷金属(埋弧焊丝、实心焊丝、药芯焊丝、焊条)力学性能试验, 试验方法按照相关标准进行。

根据前期大量选材试验的结果, 最终选取了以下 13 组与 Q690qD 匹配的焊接材料, 并对焊接材料力学性能进行确认。焊接材料熔敷金属试验项目中道间温度为 $(150\pm150)^{\circ}\text{C}$, 其余参数见表 5。

4.2 试验结果分析

熔敷金属力学性能试验结果中各种焊接方法抗拉强度、低温冲击性能对比见图 2~3。

表 5 熔敷金属试验参数

Tab. 5 Parameters of deposited metal test

焊接方法	序号	焊材组合	电流/A	电压/V	焊速/(mm·min ⁻¹)	气流量/(L·min ⁻¹)
埋弧焊	1	XY-H80Q(4.0)+XY-AF85QNH	580±20	29±1	420±30	—
	2	JQ. MH80SD(4.0)+JQ. SJ80Q				
	3	CHW-S80(4.0)+CHF606				
实心焊丝	4	XY-ER80Q(1.2)+20%CO ₂ +80%Ar	260±20	28±2	300±30	22~25
富氩气体	5	THQ80-1(1.2)+20%CO ₂ +80%Ar				
保护焊	6	SM-110N(1.2)+20%CO ₂ +80%Ar				
药芯焊丝	7	JQ. YJ761N4M21(1.2)+CO ₂	280±20	30±2	300±30	25
	8	GFR-110K3(1.2)+CO ₂				
	9	XY-YJ80Q(1.2)+CO ₂				
气体保护焊	10	CHT111K3Q(1.2)+CO ₂	170±20	—	150±10	—
	11	CHE807RHB(4.0)				
焊条	12	XY-J80QNH(4.0)				
	13	JQ. J807Q(4.0)				

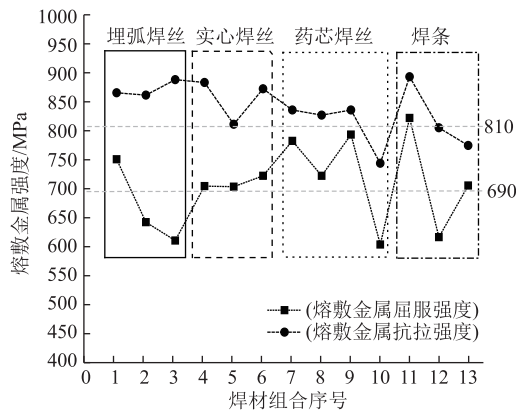


图 2 各类焊材熔敷金属抗拉强度和屈服强度折线图

Fig. 2 Line chart of tensile strength and yield strength of metal of different welding materials

熔敷金属试验结果表明, 埋弧自动焊、实心焊丝富氩气体保护焊、药芯焊丝 CO₂ 气体保护焊均可以应用于 Q690qD 钢的焊接; 从焊丝化学成分上看, 所选焊材碳含量低, S, P 含量控制得较好, 焊接材

料中加入的 Ni 含量高, 并添加 Cu, Cr, Mo 等微合金化元素, 与母材化学成分相匹配, 保证焊缝强度的同时, 仍然有着良好的低温冲击韧性。具体分析如下:

(1) 埋弧自动焊时, 分别选取 3 组“焊丝+焊剂”组合进行熔敷试验。金桥 JQ. MH80SD 配焊剂 JQ. SJ80Q 延伸率性能较好, 但是屈服强度不满足要求; 大西洋 CHW-S80 配焊剂 CHF606 的屈服强度和延伸率未达到要求。西冶的 XY-S80Q 配焊剂 XY-AF85QNH 的力学性能都能满足要求, 而且拉伸性能有一定的富裕量, 可以用于 Q690qD 钢板焊接。

(2) 实心焊丝混合气体保护焊时, 考虑到 Q690qD 相匹配的实心焊丝中合金元素添加较多, 采用 CO₂ 保护时熔池氧化氛围加强, 合金元素烧损严重, 导致强度有所下降、冲击韧性严重下降, 因此, 实心焊接时采用 20%CO₂+80%Ar 保护。实心焊丝西冶 XY-ER80Q、大桥 THQ80-1、现代 SM-110N 采

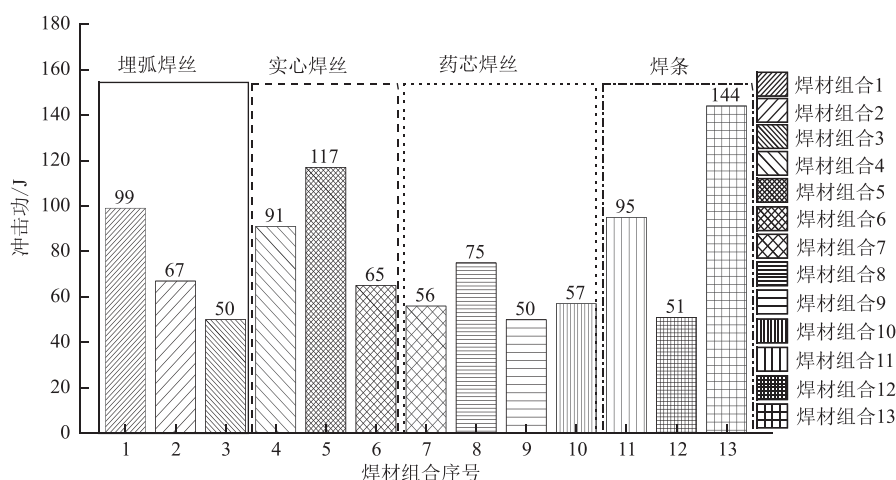


图3 各钟焊材板熔敷低温冲击柱状图

Fig. 3 histogram of deposited low temperature impact of different welding sheets

用 20% CO₂ + 80% Ar 保护时, 熔敷金属强度值与 Q690qD 钢相匹配, 其中, 现代 SM-110N 屈服强度较好, 有较大的富裕量, 推荐 SM-110N 富氩气体保护焊用于 Q690qD 钢的焊接。从焊接工艺性看, 实心焊丝选用 20% CO₂ + 80% Ar 保护时, 熔池由于气液相之间表面张力较大、流淌性不好, 容易产生气孔夹渣等焊接缺陷, 对焊工的操作技能要求较高。

(3) 药芯焊丝 CO₂ 气体保护焊时, 分别选用药芯焊丝 JQ. YJ761N4M2-1, GFR-110K3, XY-YJ80Q 和 CHT111K3Q 进行熔敷试验。金桥 JQ. YJ761N4M2-1 和京群 GFR-110K3, 两种焊丝抗拉强度都能满足要求, 但京群 GFR-110K3 延伸率富裕量较低, 因此, 推荐综合力学性能表现较好的金桥 JQ. YJ761N4M2-1 用于 Q690qD 钢的焊接。

(4) 采用手工电弧焊接时, 采用 CHE807RHB, XY-J80QNH 和 JQ. J807Q, 大西洋 CHE807RHB 和金桥 JQ. J807Q 化学成分未满足要求, 西冶 XY-J80QNH 的力学性能不满足要求。因此, 不推荐焊条用于 Q690qD 高强钢的焊接。

5 结论

通过国内外 690 MPa 级高性能桥梁钢的调研工作, 并经过 Q690qD 母材性能复验、焊材熔敷金属试验并对各试件进行化学成分分析和各项力学性能试验, 通过对试验结果的分析, 可以得出如下结论:

(1) Q690qD 钢为超低碳、低硫磷、高纯净度、微合金化高强度结构钢, 钢板碳当量控制较好, 展示了良好的焊接性。钢板交货状态为“TMCP+回火”, 在强度、延伸率、冲击韧性等各方面均具有良

好的性能, 各项参数指标均高于技术条件规定的规定值。

(2) 结合澳氹四桥实桥 Q690qD 钢板的板厚组合, 确定澳氹四桥的焊接材料选择为: 埋弧焊丝和焊剂选用四川某厂生产的 XY-S80Q+XY-AF85QNH (国标型号 S78A4UFB-SUN5M3) 组合; 实心焊丝选用昆山某厂生产的 SM-110N (国标型号 ER76-G) ($\phi 1.2$); 药芯焊丝采用天津某厂生产的 JQ. YJ761N4M2-1 (国标型号 T764T1-1C1A-N4M2) ($\phi 1.2$); 对于焊条手工电弧焊, 由于所选焊材的化学成分、力学性能不能满足技术条件要求。

参考文献:

References:

- [1] 王婷, 付学义, 张凤明. 30 mm 厚 Q690D 焊接性能及工艺研究 [J]. 包钢科技, 2019, 45 (3): 25-29.
WANG Ting, FU Xue-yi, ZHANG Feng-ming. Study on Welding Performance and Technology of 30 mm Thick Q690D Steel Plate [J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2019, 45 (3): 25-29.
- [2] 孙飞飞, 孙密, 李国强, 等. Q690 高强钢端板连接梁柱节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (4): 116-124.
SUN Fei-fei, SUN Mi, LI Guo-qiang, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of High-strength Steel Beam-to-column End-plate Connections [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (4): 116-124.
- [3] 王伟, 孙昕辉, 孙诗怡, 等. 双八千大型起重机臂架用 Q690D 高强钢焊接工艺研究 [J]. 中国造船, 2012, 53 (增2): 389-396.
WANG Wei, SUN Xin-hui, SUN Shi-yi, et al. Q690D

- High-strength Steel Welding Process Technology for Double Eight Thousand Tons of Large-scale Crane Booms [J]. Shipbuilding of China, 2012, 53 (S2): 389-396.
- [4] 魏言磊, 郭咏华, 孙清, 等. Q690 高强钢管轴心受压局部稳定性研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46 (5): 1-12.
WEI Yan-lei, GUO Yong-hua, SUN Qing, et al. Study on Local Stability of Q690 High-strength Steel Tube under Axial Compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (5): 1-12.
- [5] 郭小农, 刘晓, 罗永峰, 等. Q690 高强钢焊缝连接承载力试验研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46 (7): 52-56, 21.
GUO Xiao-nong, LIU Xiao, LUO Yong-feng, et al. Experimental Studies on the Bearing Capacity of Weld Connection of High Strength Steel Q690 [J]. Industrial Construction, 2016, 46 (7): 52-56, 21.
- [6] GB/T 714—2015, 桥梁用结构钢 [S].
GB/T 714—2015, Structural Steel for Bridge [S].
- [7] GB/T 1591—2018, 低合金高强度结构钢 [S].
GB/T 1591—2018, High Strength Low Alloy Structural Steels [S].
- [8] GB/T 3077—2015, 合金结构钢 [S].
GB/T 3077—2015, Alloy Structural Steels [S].
- [9] 邓凯, 张春永, 何镜明, 等. S690QL 钢材焊接工艺及应用 [J]. 广东造船, 2017, 36 (6): 45-46, 48.
DENG Kai, ZHANG Chun-yong, HE Jing-ming, et al. Welding Technology of High-tensile Steel S690QL [J]. Guangdong Shipbuilding, 2017, 36 (6): 45-46, 48.
- [10] 崔嵬. 高强度钢材钢构件的研究现状和应用简介 [J]. 建筑结构, 2011, 41 (增 1): 958-963.
CUI Wei. Recent Research Advances and Application of High Strength Steel Structures [J]. Building Structure, 2011, 41 (S1): 958-963.
- [11] 傅彦青, 周成, 刘菲, 等. 建筑高性能结构钢 Q690GJC 手工电弧焊焊接工艺研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46 (7): 57-60.
FU Yan-qing, ZHOU Cheng, LIU Fei, et al. Study on Manual Arc Welding Technology of High-performance Structural Steel Q690GJC for Buildings [J]. Industrial Construction, 2016, 46 (7): 57-60.
- [12] 任启蒙, 陈林. 屈服强度 690 MPa 级高韧性高强度钢板的研究与开发 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2017, 36 (1): 19-21.
REN Qi-meng, CHEN Lin. Research and Development of 690 MPa Grade High Strength Steel with High Toughness [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2017, 36 (1): 19-21.
- [13] 王爱华, 彭云, 肖红军, 等. 690 MPa 级低合金高强钢熔敷金属冲击断裂行为研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48 (2): 73-80.
WANG Ai-hua, PENG Yun, XIAO Hong-jun, et al. Impact Fracture Behavior of Deposited Metal of 690 MPa Level High Strength Low Alloy Steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (2): 73-80.
- [14] 王晓刚. 690 MPa 级大厚度调质高强钢板组织性能研究 [J]. 河北冶金, 2012 (11): 25-27, 73.
WANG Xiao-gang. Research about Structure and Performance of Large-thickness High-strength Quenching and Tempering Steel Plate of 690 MPa Level [J]. Hebei Metallurgy, 2012 (11): 25-27, 73.
- [15] 程鼎, 夏勐, 吴保桥, 等. 国内外桥梁结构用钢的现状 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2016, 26 (3): 1-4.
CHENG Ding, XIA Meng, WU Bao-qiao, et al. Production and Application Status of Structure Steel for Bridge at Home and Abroad [J]. Journal of Anhui Vocational College of Metallurgy and Technology, 2016, 26 (3): 1-4.
- [16] 姜学宜, 徐咏雷, 施刚, 等. 高强钢材焊接工字形截面受压构件有限元分析 [J]. 钢结构, 2014, 29 (3): 7-11.
JIANG Xue-yi, XU Yong-lei, SHI Gang, et al. Finite Element Analysis of High Strength Steel I-section Columns under Compression [J]. Steel Construction, 2014, 29 (3): 7-11.
- [17] 王爱华. 层间温度、固溶强化对高强钢熔敷金属屈强比的影响 [J]. 电焊机, 2015, 45 (8): 86-89.
WANG Ai-hua. Effect of Interpass Temperature and Solid Solution Strengthening on Yield Ratio of Deposited Metal of High Strength Steel [J]. Electric Welding Machine, 2015, 45 (8): 86-89.
- [18] 静超, 张文明. 海上钻井平台桩腿焊接工艺评定与分析 [J]. 电焊机, 2016, 46 (8): 48-51.
JING Chao, ZHANG Wen-ming. Welding Procedure Qualification and Analysis of Offshore Drilling Platform Leg [J]. Electric Welding Machine, 2016, 46 (8): 48-51.