

第一章 工程概况

芜湖长江大桥位于芜湖市广福矶头下游约 650m、朱家桥外贸码头上游约 500m 处，对岸为无为县唐家湾。桥址处河道属长江下游芜裕河段中段，河道顺直，两岸地势平坦。长江在桥位处自南向北流，芜湖市位于东岸，无为县位于西岸。芜湖市为沿江发展带状城市，老城区位于桥位上游，是商业与行政中心，桥位下游为四褐山工业区，桥位与四褐山之间为芜湖市经济开发区。在芜湖岸江边桥位处东偏南约 4.4km 处为芜湖机场。

芜湖长江大桥铁路桥全长 10521.0m，公路桥全长 5681.3m，其中正桥钢梁总长 2193.7m。正桥分上、下层，下层为铁路 I 级双线，上层为公路 4 车道，行车道宽 18m，两侧各设 1.5m 宽人行道。这是一座主跨 312m 的钢斜拉桥，为目前我国最大跨度的公铁两用桥。

芜湖长江大桥正桥钢梁共 5 联 14 孔，自西向东排列如下：

第一联 $120+2\times 144$ m 连续钢桁梁，计 3 孔；

第二联、第三联 $2-(3\times 144)$ m 连续钢桁梁，计 6 孔；

第四联（主跨） $180+312+180$ m 钢桁梁低塔斜拉桥，计 3 孔；

第五联 (2×120) m 连续钢桁梁，计 2 孔。

正桥钢梁总布置图见图 1.1。

无为岸公路引桥总长 1449.3m，芜湖岸公路引桥总长 2038.3m。公路引桥上部结构为 20m 和 40m 预应力钢筋混凝土简支 T 梁。无为岸铁路引桥总长 6098.8m，芜湖岸铁路引桥总长 2228.5m。铁路引桥上部结构主要为 32m 预应力钢筋混凝土简支 T 梁和 40m 预应力钢筋混凝土简支箱梁。跨江堤和城市道路均为预应力钢筋混凝土连续箱梁或刚构。正桥共 15 个桥墩，其中 13 个在水中，9~12 号墩位于主航道，采用双壁钢围堰钻孔基础，1~8 号墩采用大直径钻孔桩、吊箱围堰高桩承台基础，13 号墩采用双壁钢围堰钻孔高桩承台基础，0、14 号墩采用钻孔桩明挖基础，铁路引桥芜湖岸采用钻孔桩和明挖基础，无为岸采用钻孔桩、打入桩及沉井基础三种形式。两岸公路引桥桥墩全部采用钻孔桩基础。

芜湖长江大桥气势宏伟，工程规模超过南京、九江长江大桥。该桥对完善华东铁路第二通道，沟通大江南北的公路交通，推动地区经济腾飞起着巨大作用。芜湖长江大桥采用了 14MnNbq 钢焊接整体节点及大规模的钢筋混凝土板桁结合梁等十多项新技术，创造了我国建桥技术多项第一，被誉为继武汉、南京、九江长江大桥之后我国桥梁建设的第四座里程碑。

第二章 正桥钢梁设计

第一节 概述

根据芜湖长江大桥桥址处地形、地质、水文等桥渡条件和通航要求，正桥需要修建较大跨度的梁跨。铁道部在中铁大桥勘测设计院上报的初步设计文件批复中，决定采用正桥边跨为连续钢桁梁，主跨为大跨钢斜拉桥的方案，边跨钢梁和斜拉桥钢梁采用 14MnNbq 钢整体节点新技术。

该桥最大跨度为 312m，钢梁弦杆最大截面为 3092cm^2 ，杆件的最大轴力达 50000kN 以上。如此庞大杆件组成的钢桁梁，设计成整体节点，其特点、难点如下：

(1) 带肋的箱形弦杆 杆件刚度大 拘束度也大 约束了焊后的变形 产生较大的拘束应力 另加焊接残余应力 如果焊件的塑、韧性差 应力重分配能力弱 细节处理不当 极易产生裂缝。

(2) 厚板，增加了焊接难度，焊接变形极难调平，如何保证栓接面的平整度是一大难题；构件相互连接处公差配合要求精度高，又是一大难题。

(3) 焊接整体节点：节点板与带肋的箱形弦杆焊连，节点处的所有附连件也都与节点板焊连，构成刚性极大的封闭体，焊缝密集，纵横交叉，拘束应力、焊接残余应力以及不连续焊接造成的应力集中，应力状况非常复杂。为了提高焊缝的应力重分配能力，设计者曾提出焊缝的屈服强度与抗拉强度的匹配问题，即屈服比限值问题，并且强调了“大弧、缓坡、打磨、锤击”的技术措施。

这种厚板，带肋的全封闭焊接整体节点的设计，主要的焊接细部构造，都是通过疲劳试验确定的，当达不到设计要求时，补做试验在时间上又不许可时，只有改变设计，改焊接为栓接。这是在边设计、边试验、边修改的相互交叉情况下，才完成了设计任务的。

我国铁路（公铁两用）钢桁梁经历了从铆接到栓焊钢梁发展的过程，凝结了几代技术人员的心血和不断追求。结构型式由源于铆接钢梁的节点栓接到焊接整体节点；栓焊比例由初期的“少焊多栓”发展到全焊接整体节点；跨度由双线桥 80m 发展到 312m；钢材由 16Mnq 钢发展到最新研制的 14MnNbq 钢，钢板厚度由 24mm 发展到 56mm。

1990 年冶金部与铁道部联合批准开发 14MnNbq 钢。早在 1986 年 武汉钢铁公司、铁道部大桥工程局、铁道部山海关桥梁工厂，三家联合开展了 14MnNbq 钢的研制（当时名为 16Mn 微合金化）。进入 20 世纪 90 年代，我国炼钢技术有了很大进步，炉外精炼等先进技术已开始应用，钢的纯净度提高了，尤其是硫的含量降低了，再加上 Nb 等微量元素的合金化，碳元素降低了，综合性能提高了，成功地开发了高韧性、可焊性良好的 14MnNbq 钢，从而为栓焊梁的发展打下了物质基础。1994 年建设的京九铁路京杭运河桥（一孔 $L=64\text{m}$ 双线铁路桥）作为 14MnNbq 钢试验桥已运营多年。1994~1997 年为满足新（乡）荷（泽）铁路长东黄河二桥建设的需要 武汉钢铁（集团）公司对 14MnNbq 钢材进行了优化。此后 由中铁大桥工程局支持 铁道部科学研究院、武汉钢铁（集团）公司、哈尔滨焊接研究所、山海关桥梁厂、宝鸡桥梁厂参加，针对优化了的 14MnNbq 钢进行了焊接材料选择和

焊接工艺的试验，取得初步成果。有了九江桥厚板焊接的经验，有了孙口黄河桥等焊接整体节点的经验，又成功地开发了性能良好的 14MnNbq 钢，为芜湖长江大桥栓焊钢梁跃上新台阶创造了条件。

芜湖长江大桥首次采用了钢筋混凝土板桁结合梁，公路桥面板与钢桁梁上弦杆及公路纵横梁通过剪力钉结合成整体共同受力。采用结合梁有效地降低了桁梁高度。

上述特点代表了我国桥梁技术向高强、轻型、整体、大跨度、新结构发展的方向。

第二节 主要技术标准

一、规范

(1) 设计规范。

- 1) 铁路桥涵设计规范 (TBJ2-96)。
- 2) 铁路结合梁设计规范 (TBJ24-89)。
- 3) 公路桥涵设计规范 (JTJ025-86)。

(2) 补充设计规范。

- 1) 芜湖长江大桥正桥钢梁疲劳验算规定。
 - 2) 芜湖长江大桥钢筋混凝土板与钢桁结合梁设计条文。
- 当补充设计规范与设计规范不符时，以补充设计规范为准。

二、设计荷载

(1) 设计活载。

铁路 按双线中—活载。

公路 按四车道汽—超 20 设计 挂—120 检算。

人群 总体加载 3kPa 局部加载 3.5MPa。

(2) 检算荷载。

主桁：1.4 倍铁路中—活载 + 1.2 倍汽—超 20。

铁路桥面系：1.5 倍铁路中—活载。

竖向刚度(挠跨比)：双线铁路活载为边跨 1/800 中跨 1/650 公铁加载为边跨 1/700，中跨 1/550。

横向刚度(宽跨比)：边跨 1/20 中跨 1/25。

(3) 其他荷载。

风力：桥上有车时 515Pa 桥上无车时 1436Pa 钢梁架设时 800Pa。

地震烈度 基本烈度为 6 度 按 7 度设防。

(4) 温度变化的影响。

最高 +45℃ 最低 -15℃。

三、材料

(1) 主要材料。

主结构：14MnNbq 板厚 10~50mm。

填板等 :16Mn 板厚 <10mm。

辅助结构 :Q235B。

支座 铸件 ZG25II,锻件 35 号钢。

高强度螺栓 :M24、M30 材质均为 35VB。

(2) 材料标准。

14MnNbq 材质标准按《芜湖长江大桥 14MnNbq 桥梁用钢板供货技术条件》(附录 B 中附录 A) 办理。

(3) 基本容许应力。

14MnNbq 钢的容许应力：轴向应力 $[\sigma]=200\text{MPa}$ 弯曲应力 $[\sigma_w]=210\text{MPa}$ 剪切应力 $[\tau]=120\text{MPa}$ 端部承压应力 磨光顶紧 300MPa。

第三节 正桥钢梁设计

一、钢桁梁钢材选用

我国桥梁用钢在 20 世纪 50 年代是进口前苏联低碳钢 用于武汉长江大桥 在 60 年代开发了 16Mnq 钢，用于南京长江大桥70 年代开发了 15MnVNq 钢 用于九江长江大桥。为了解决桥梁用厚钢板屈服强度降低的问题 为大跨度桥梁提供强度合适、焊接性好、韧性及抗断裂性好的材料，武汉钢铁（集团）公司和中铁大桥工程局共同开发了新一代 14MnNbq，在应用研究得到肯定结论后，决定将其应用于芜湖长江大桥。

14MnNbq 钢属于低碳中强度结构钢系列，具有较好的综合性能和焊接性能，尤其是低温冲击韧性有大幅度提高，能满足本桥的设计需要。

该钢种的化学成分见表 2.1 力学性能见表 2.2。

表 2.1 14MnNbq 钢的化学成分（%）

化学成分	C	Si	Mn	S	P	Nb
标准值	0.11~0.17	≤0.50	1.20~1.6	≤0.010	≤0.020	0.015~0.035
实物统计平均值	0.145	0.259	1.450	0.0068	0.0154	0.0261

表 2.2 14MnNbq 钢的力学性能

名称	板厚 (mm)	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	伸长率 (%)	纵向冲击韧性 -40℃ A_{kv} (J)	10%纵向时效 A_{kvt} (J)	冷弯
标准值	6~16	530~685	≥ 370	≥ 20	≥ 40	≥ 40	$d=2a$
	17~25	510~665	≥ 355	≥ 19			$d=3a$
	26~36	500~645	≥ 350				
	37~60	490~625	≥ 340				
实物 统计平均值	6~16	551	415	29.9	192	185	完好
	17~25	528	386	30.7	214	194	
	26~36	539	404	30.2	219	200	
	37~60	535	382	30.8	192	197	

二、钢梁主要结构设计概况

钢梁主要结构图见图 2.1。

第一、二、三及第五联连续钢桁梁 桁式为无竖杆三角形桁架 桁高 14.02m 节间长度为 12m ,主桁弦杆和部分斜杆采用箱形截面 ,其余斜杆采用 H 形截面。主桁杆件内宽 800mm 上弦杆内高 1080mm 下弦杆内高 1260mm ,箱形杆件两竖板上各设一根纵向加劲肋。第四联低塔钢斜拉桥,主桁桁式为 N 形桁架 桁高 13.5m 节间长度为 12m 主塔两侧各设 8 对斜拉索,两索面间距 23.4m ,索梁锚点处副桁与主桁连接。主桁弦杆和部分斜杆采用箱形截面 ,其余斜杆及副桁杆件采用 H 形截面 ,最外索与水平面夹角 15 度 单根索恒载索力 6950kN 活载索力 1750kN 最大索力 8700kN。主桁杆件内宽 1100mm 上弦杆件内高 1428mm 下弦杆件内高 1610mm 箱形斜杆外高 1140mm 组成箱形杆件的四块板各设一根纵向加劲肋。主桁节点为封闭的焊接整体节点 ,一根弦杆与整体节点对接焊连接 工地杆件间连接为节点外拼接。连续梁、斜拉桥钢梁主桁杆件截面见表 2.3 和表 2.4。最大整体节点板高度达 3.04m ,节点板厚度大于或等于与其对接焊连接的弦杆竖板厚度。

部分弦杆布置了两处对接焊 ,这样既节省材料 ,又可以减少安装时拼装工作量。节点设计示意图见图 2.2。

连续梁及斜拉桥公路、铁路桥面系采用纵横梁体系 ,构件为焊接 I 型杆件。考虑到桥面板的共同作用 ,仅在节点处设置强劲的桥门架 ,桥门架采用桁架式结构。

上拱度的设置 ,采用伸长或缩短上弦节间长度而下弦节间保持不变的方法 ,伸长或缩短的数值在上弦拼接板的拼缝中变化 ,弦杆和斜杆仍交会于节点中心 ,以此满足预设拱度的要求。

钢梁涂装按铁道部工务局工桥函[1998]17 号《关于芜湖长江大桥钢梁涂装意见》的要求 ,钢梁外露各部件的涂装按铁道部部颁标准《铁路钢桥保护涂装》(TB/T1527-95)中第 IV 涂装体系办理。纵梁上盖板采用电弧喷铝 200 μ m 其上涂装棕黄聚氨酯底漆 2 道、银灰聚氨酯面漆 4 道。箱形杆件端隔板以内的防腐采用封闭式措施 ,端隔板的所有缝隙、空洞用 HM106 密封胶密封 ,封堵严实。

钢筋混凝土板桁结合梁剪力钉采用 $\phi 22$ 圆头焊钉 (GB10433-89) ,剪力钉在节点范围内集中布置 ,节间内均匀布置 ,剪力钉大部分是在工厂焊接于主桁上弦杆件顶面或公路纵横梁上翼缘板上。

正桥钢梁主要工程数量见表 2.5。

三、结构特点与制造要求

芜湖长江大桥钢桁梁栓焊结构集中体现了新结构、新技术、新工艺 ,具有较高的科技含量。其中 14MnNbq 钢整体节点是封闭结构 ,所有零部件极大限度地在工厂焊接成整体 ,以尽量减少工地组拼和栓接 ,节点部位构造和受力都非常复杂 ,且因杆力大 ,主桁杆件所用的钢板厚度为 32~50mm ,焊接难度大 拘束度大 ,一旦发生焊接变形 极难调整 几何尺寸、公差配合都将发生困难。有些焊缝为隐蔽工程 ,应特别重视隔板焊缝、垂直受力方向的焊缝、十字形交叉焊缝、受拉的熔透角焊缝、附连件焊在主件上的焊缝等等。所有这些

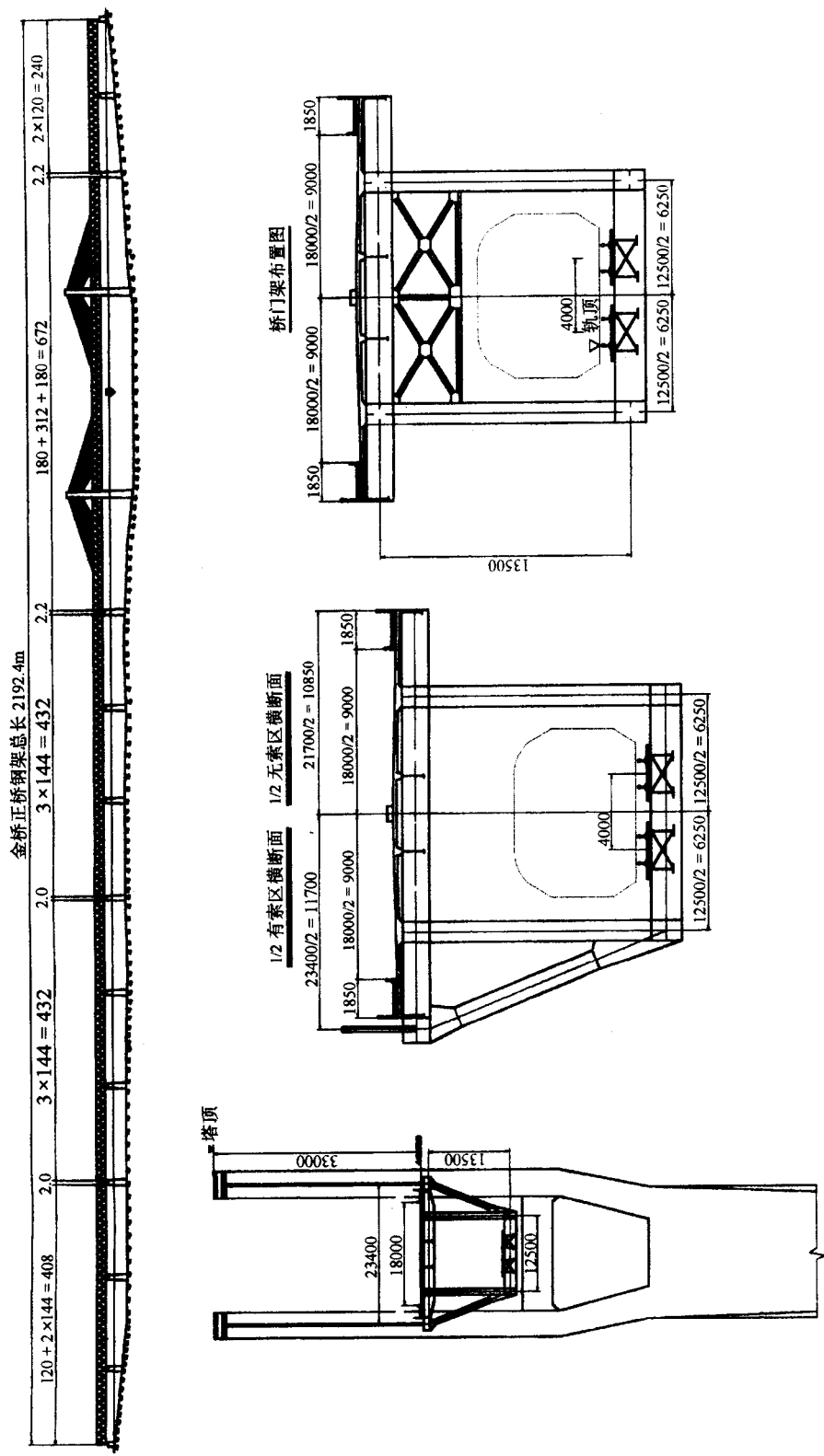


图 2.1 正桥钢梁主要结构图

表 2.3 (3×144)m 连续钢桁梁主桁杆件截面表

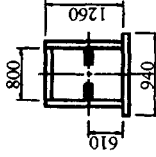
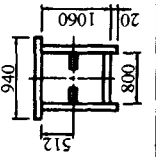
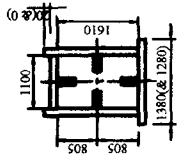
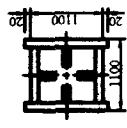
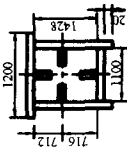
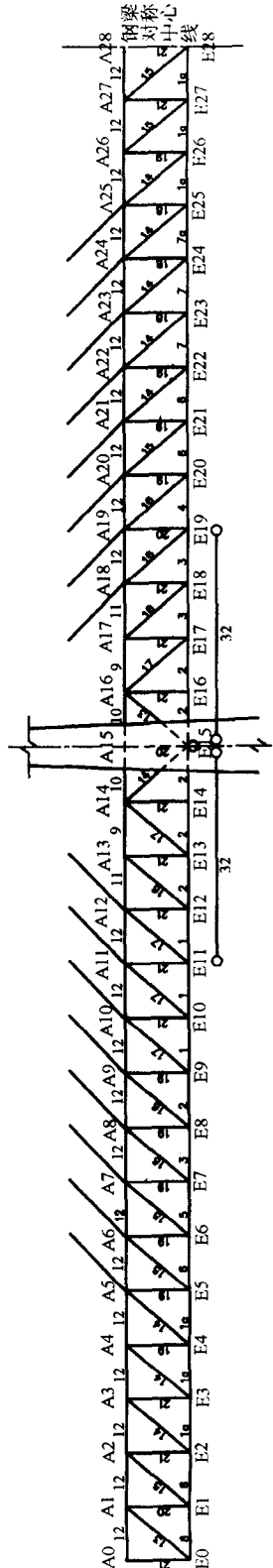
弦杆截面			腹杆截面				
类型	编号	弦杆形式	组	成	编号		
下弦杆	1		2-1260×44	1-940×40	1-800×36	2-250×36	14
	2		2-1260×44	1-940×36	1-800×36	2-250×36	15
	3		2-1260×40	1-940×36	1-800×36	2-250×32	16
	4		2-1260×40	1-940×32	1-800×32	2-250×32	17
	5		2-1260×36	1-940×32	1-800×32	2-250×24	18
	6		2-1260×36	1-940×28	1-800×28	2-250×24	19
	7		2-1260×28	1-940×20	1-800×20	2-250×24	
上弦杆	8		2-1080×44	1-940×36	1-800×36	2-250×32	20
	9		2-1080×40	1-940×32	1-800×32	2-250×24	21
	10		2-1080×32	1-940×28	1-800×28	2-250×24	22
	11		2-1080×28	1-940×28	1-800×28	2-250×24	
	12		2-1080×24	1-940×28	1-800×28	2-250×24	
	13		2-1080×20	1-940×20	1-800×20	2-250×24	
						2-760×36	1-728×28
						2-700×32	1-736×26
						2-760×36	1-728×26
						2-840×50	2-700×40
						2-940×44	2-712×36
						2-840×40	2-720×36
						2-840×40	2-720×28
						2-840×32	2-736×26
						2-740×26	2-748×26
						2-760×36	1-728×28
						2-700×32	1-736×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26
						2-760×36	1-728×26

表 2.4 (180+312+180)m 斜拉桥主桁杆件截面表

杆件类型	截面型式 (mm)	截面组成 (mm)	杆件类型	截面型式 (mm)	截面组成 (mm)
下弦杆		1a 2-1674×44 1-1380×44 1-1100×44 4-300×44	腹杆		13 2-1140×24 2-1052×24 2-240×24 2-240×24
		1 2-1654×44 1-1380×44 1-1100×44 4-300×44			14 2-1140×20 2-1080×20 2-240×20 2-240×20
		2 2-1650×44 1-1280×36 1-1100×40 4-300×44			15 2-900×36 1-1028×28
		3 2-1646×44 1-1280×32 1-1100×36 4-300×36			16 2-900×32 1-1036×26
		4 2-1646×40 1-1280×32 1-1100×36 4-300×28			17 2-700×24 1-1052×26
		5 2-1642×40 1-1280×28 1-1100×32 4-300×28			18 2-920×44 1-1012×40
		6 2-1642×36 1-1280×28 1-1100×32 4-300×28			19 2-920×44 1-1012×32
		7a 2-1658×32 1-1280×24 1-1100×28 4-300×28			20 2-900×36 1-1028×28
		7 2-1638×32 1-1280×24 1-1100×28 4-300×28			21 2-900×32 1-1036×26
		8 2-1634×28 1-1280×20 1-1100×24 4-300×20	副桁		22 2-700×26 1-516×26
		9 2-1488×44 1-1280×32 1-1100×40 4-300×36			23 2-700×20 1-528×16
上弦杆		10 2-1476×32 1-1280×32 1-1100×28 4-300×32	桁		24 2-700×28 1-1734×28 2-300×24
		11 2-1476×28 1-1280×28 1-1100×28 4-300×24			25 2-800×32 1-1734×32 2-300×24
		12 2-1472×24 1-1280×28 1-1100×24 4-300×24			26 2-700×24 1-1686×24 2-300×20
					27 2-700×26 1-1682×24 2-300×24

(表中所示一桁截面)



主桁杆件截面编号

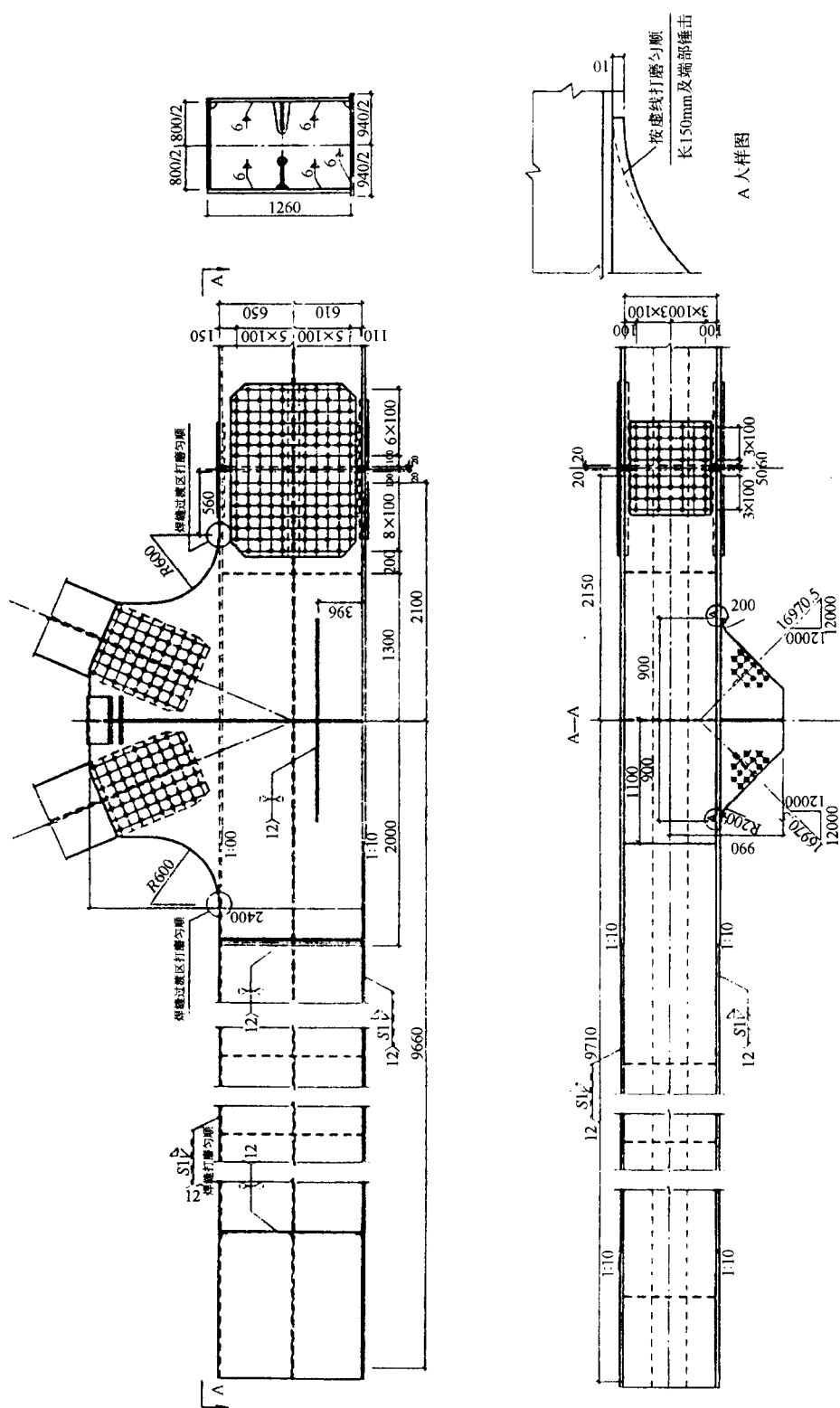


表 2.5 正桥钢梁主要工程数量

部 位	材 质	全桥数量(t)	合 计 (t)
主体结构	14MnNbq	35835.7	38965.8
	16Mn	764.6	
辅助结构	Q235	2358.7	
	其它	6.8	

难点，均在试验研究基础上制订严格的制造规则予以解决。设计与制造中始终贯穿了四点保证措施，即严格执行钢材标准、焊缝细节处理、焊接标准、制造质量标准，以确保结构安全，钢梁制造质量优良。

针对 14MnNbq 钢厚板焊接特点，在设计细节中根据试验研究成果，贯彻大弧、缓坡、打磨、锤击等防裂、防断措施。

所谓大弧，即板件的应力集中处（或截面突变处）采用半径尽可能大的圆弧，尤其是焊在主件上的附连件应有圆弧过渡。

所谓缓坡，即厚薄板对接及不同熔深的焊缝均要求 1 : 10 的过渡区段。

所谓打磨，即圆弧过渡区打磨匀顺，对接焊缝的加强高要打磨，弧坑务必打磨除尽。

所谓锤击，即必要时沿焊趾进行锤击，消除焊接残余应力，提高疲劳强度。

箱形杆件是芜湖桥的主要构件，在焊接整体节点细节中包含了箱形杆件的棱角焊缝，平联节点板、箱形隔板焊接 T 形对接熔透及不熔透焊，节点板处不同厚度的板件对接并与纵肋角焊缝交叉，厚板焊接效应，主桁与副桁连接及栓钉在上弦杆的焊接等。

箱形杆件的棱角焊缝根据受力有深坡口、浅坡口，存在着对箱形杆件整体受力的影响，以及需要提高疲劳性能等实际问题。在设计过程中根据实际科研成果的比较，调整设计结构细节。由于本桥焊接整体节点的特点，在结构中必然有熔深深浅不同而需要过渡的情况发生，在过渡中有起弧、落弧，随之焊接缺陷出现的机会就会较大。在这种结构中，还要结合工厂的工艺需要，制订合理的焊缝过渡细节。另外，在桁梁结构中不可避免地会出现杆件板材的对接，相应地残余应力的分布情况更加复杂。

箱形弦杆与平联节点板的连接细节要精细处理，一块节点板焊在箱形杆件的竖板上，另一块节点板与箱形杆件下盖板相连。对于带有焊接节点板的箱形构件的疲劳强度，将会由于节点板的设置部位、纵向角焊缝长度及相应的板厚、节点板两端几何形状、焊缝终端加工状态等因素产生影响，同时节点端部箱形杆件截面形状突然变化，也将是引起疲劳强度降低的重要原因之一。以往对这类细节的加工是先按要求尺寸加工节点板，后焊接，然后处理。根据科研单位的试验结果，如果采取先施焊节点板，后加工切割弧线的工艺，可以释放一部分残余应力，同时还可切除磨修焊缝两端的缺陷。另外，焊件加工后经过锤击，可释放焊接残余应力，大大提高抗疲劳性能。因此，几经修改，设计图最后的结果如图 2.1 所示，按虚线打磨匀顺长 150mm 及端部锤击。由于采取了锤击工艺，大大改善了该细节的疲劳性能，因此在设计中，竖板上焊接平联节点板的疲劳强度由开始的 $\sigma = 60.6\text{MPa}$ 提高到 $\sigma = 72.94\text{MPa}$ 。

箱形杆件的内隔板及端头封隔板处的横向连接角焊缝，板梁腹板与竖向加劲肋的连

接焊缝也是疲劳强度降低的部位，破坏点在横向角焊缝的焊趾。影响该处疲劳强度的因素有焊缝外形以及横隔板的厚度与杆件主板的厚度。

根据试验结果得知，该处的焊缝对工厂的制造工艺要求甚高，必须采用成型好的手工电焊、 CO_2 气体保护焊或半自动焊施焊，焊趾处不允许有咬肉，对于起、熄弧处要进行磨修，严格保证质量。在隔板焊缝的处理中，综合考虑各方面因素，多次修改该处的细节构造，在保证满足构造要求的焊缝数量的前提下，隔板与杆件的焊缝设计见图 2.2。同时要求所有隔板端部焊缝必须顺受力方向打磨匀顺。

箱形杆件端隔板的设置，除构造需要外，还有一个重要的作用是作为箱形杆件内部防腐，因而需要与空气隔绝的密封板。按传统做法端隔板用焊缝封头，故焊接残余应力问题较普通隔板严重，尤其芜湖桥的钢板厚、节点大，这一问题更为突出。

在这里一改过去用焊缝满焊四边以达到杆件内部密封的习惯作法，而改用 HM106 密封胶进行杆件内部封闭处理，这样可以尽量避免由于焊缝缺陷引起疲劳强度的降低，见图 2.3。

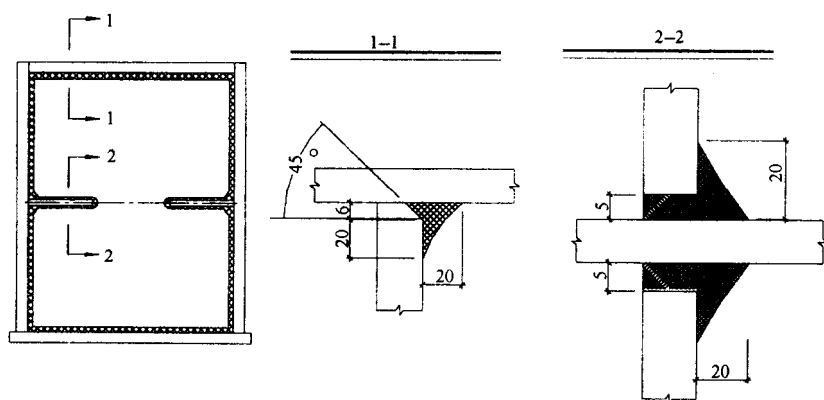


图 2.3 端隔板密封结构示意图（单位：mm）

为了检验设计合理性及制造工艺，设计要求连续钢桁梁试制一个主桁节点，斜拉桥钢梁试制一个锚箱节点，尺寸按 1:1。同时要求钢梁进行厂内试拼装。

尽管钢-混凝土结合梁广泛应用于桥梁结构已有较长历史，但对芜湖长江大桥这种大荷载、大跨度、桁梁与混凝土板组合的这种型式和规模是没有先例的。混凝土桥面板参与主桁共同作用可减小主桁上弦杆截面，降低梁高，增大主梁刚度，结合梁不但较大限度地发挥出钢与混凝土各自的特性来满足结构的功能要求，而且有较好的技术经济效益。

本桥的桥面板通过布置在钢桁梁主桁上弦杆及公路纵横梁上翼板之上的剪力钉与钢梁结合。钢-混凝土结合梁中，桥面板受力主要由钢梁节点传入，所以剪力钉根据每节点受力不同在节点范围集中布置，钉距纵向为 120mm 横向为 90mm 节间处均匀布置 钉距纵向为 250mm 横向为 90mm 及 180mm。

由于本桥的桥面板是预制的，预制板上开设了与钢梁上设置的剪力钉位置相匹配的孔洞，为保证剪力钉与预制板钢筋的匹配，同时为了保证安装预制板时能顺利地让剪力钉在预制板的孔洞中就位，要求剪力钉的平面位置误差在 $\pm 3\text{mm}$ 以内。

板桁的连接部位是组合结构的关键环节，在设计中必须要考虑结合梁受拉翼缘栓钉

焊趾前母材或栓钉焊缝横截面（总应力）的疲劳抗力情况。根据有关试验结果，要求栓钉的焊趾不得有咬肉、裂纹，成形应良好，该处的 $\sigma=71.9\text{MPa}$ 。

四、钢桁梁架设

芜湖长江大桥钢梁由于其跨度大，采用了大截面整体节点和结合梁新技术，在安装中采用了许多新工艺。连续钢桁梁利用 50t 架梁吊机伸臂架设完成后，再结合钢筋混凝土桥面板。无为岸、芜湖岸连续钢桁梁均为岸边向江中单向架设。无为岸第 1 孔 120m 钢梁在膺架上安装，其余各孔 144m 梁跨均借助吊索架伸臂架设。伸臂第 2 孔时，在第 1 孔 0 号墩顶加预应力索锚固加压，代替实物和水箱压重。芜湖岸 $2\times 120\text{m}$ 连续钢桁梁第 1 孔为膺架架设，第 2 孔为全伸臂架设，因此在第 1 孔加压预制桥面板以保持稳定。连续钢桁梁架设完成后，起顶中间支点，安装预制桥面板并浇梁缝，然后落梁，使桥面板与钢桁梁结合。钢桁梁斜拉桥安装在国内尚属首次，特别是目前国内最大跨度的斜拉桥钢桁梁中间合龙更具创新性。钢桁梁刚度大，合龙点多，位移调整困难，所采用的斜拉钢桁梁跨中合龙技术，采取了合理的位移调整措施，布置了行之有效的合龙设备，使斜拉桥中跨跨中准确合龙。这标志着我国公铁两用大跨度桥梁技术已达到国际先进水平。主跨 $(180+312+180)\text{m}$ 斜拉桥钢桁梁安装从主塔边开始，双向对称伸臂架设，边架设钢梁边结合桥面板。先分别在 10 号、11 号斜拉桥主塔墩两侧拼装 24m 墩旁托架，利用塔上附着吊机拼装 3 个节间钢梁和桥面板，在桥面板上拼装架梁吊机，利用架梁吊机逐节间双向对称伸臂架设钢梁及桥面板，安装相应斜拉索，现浇混凝土接缝，养生待接缝混凝土强度达到设计强度的 85% 后按设计给定索力对称张拉外索。进入下一个循环，直至 10 号墩双向各伸臂 156m，边孔到达 9 号墩托架上，11 号墩中孔伸臂 144m，边孔伸臂 156m 到达 12 号墩托架。分别继续伸臂两边孔至 9 号、12 号墩，梁处于合龙前标准状态。中孔一个节间为合龙段，通过调整斜索、弹性索索力，架梁吊机、运料车前后移动，控制合龙点纵向、竖向坐标，通过合龙段上平面或下平面对拉控制横向坐标，在合龙段节点上设长圆孔和圆孔及相应销钉，先合龙长圆孔，再借用合龙结构上的强力施压装置准确使圆孔对位，穿入圆销，实现公铁两用钢桁梁的准确合龙。圆孔和销钉的高精度配合，保证了斜拉桥中跨合拢按设计要求的状态快速、顺利实施。

箱形弦杆对拼接头，因板厚及制造公差可能造成拼接板与被拼接板间出现间隙，对拼接板长期使用的疲劳强度影响极大，因此要求在预拼场对杆件事先逐根检查，记载并对号入座处理，当间隙大于 1mm 时应采取相应措施。

竖杆、斜杆与整体节点间为插入式拼装，在工地预拼场应对整体节点板被插入部分的间距及杆件两端插入部位的高度逐个登记造册，同类型杆件与节点板进行优化匹配，以保证拼接质量。

第四节 关键技术研究

芜湖长江大桥钢梁的厚板焊接整体节点，在国内是全新的结构构造，其关键的技术问题是防裂防断，从设计到制造始终贯彻着防裂防断的主题展开工作。不裂就不断（脆断），防裂是关键。为解决这一技术关键，铁道部科教司在 96G35“芜湖桥关键技术研究”项目

下安排了：钢梁焊接整体节点疲劳试验研究、14MnNbq 钢焊接构件防脆断试验研究、14MnNbq 钢材焊接材料及焊接工艺研究等课题。

钢梁焊接整体节点疲劳试验研究项目目的是为防止出现疲劳裂纹，以保证运营安全、延长使用期限，根据芜湖长江大桥 14MnNbq 钢整体节点钢梁的结构特点，重点安排 18 组试件疲劳试验如下：

- 1) 钢梁弦杆棱角焊缝(5 组)。
- 2) 主桁、副桁连接(3 组)。
- 3) 弦杆与平联节点板焊接(3 组)。
- 4) 箱形杆件与横隔板交叉焊缝(1 组)。
- 5) 厚度对疲劳寿命的影响(1.5 组)。
- 6) 精密焰切工艺对钢材疲劳的影响(3.5 组)。
- 7) 主桁焊接栓钉连接杆的疲劳强度(1 组)。

此外，还进行了桁梁节段模型疲劳试验，对各构造细节予以全面综合考核，制订了芜湖长江大桥 12 个特殊构造细节的疲劳试验曲线方程，并结合该桥具体情况制定了芜湖长江大桥栓焊钢梁疲劳验算规定作为设计图纸的依据，且列入《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB10002.2-99)中。以上试验研究由铁道部铁道科学研究院、大桥局桥梁科学研究院完成，试件由宝鸡桥梁厂制造。

14MnNbq 钢焊接构件防脆断试验研究，是在我国将断裂力学引入桥梁焊接钢结构的九江长江大桥之后针对芜湖长江大桥设计而进行的。

自从焊接技术引入桥梁钢结构后，脆性破坏事故时有发生，世界各国将防断设计引入设计规范的，只有英国规范 BS5400 和美国规范 AASHTO(公路)及 AREA(铁路)，日本“国铁建造物设计标准解说”中有所规定但不系统。本项目所进行的 14MnNbq 钢用于焊接桥梁防断选用规则试验研究由洛阳 725 研究所完成，他们进行了母材及焊缝的深缺口的宽板拉伸试验、落锤试验、夏比冲击韧性试验、四点弯曲等试验。

- (1) 结构基材及其焊缝的断裂力抗力通过深缺口宽板拉伸试验制定断裂韧性

$$K_c = f(T, t, T_k)$$

- (2) 又将结构基材及其焊缝通过 V 型缺口试验测定的冲击韧性值，建立

$${}_vE_r = f(T, {}_vT_{rE})$$

(3) 通过宽板试验的 K_c 和冲击试验的 ${}_vE_r$ 建立特征温度的关系式从而把宽板试验的 K_c 值表示为温度 T 、材料冶金因素 ${}_vT_{rE}$ 、加载速率 ϵ 、板厚 t 和裂纹尖锐度修正系数 F 等影响因素在内的结构材料抗断能力函数

$$K_c = F \cdot f(T, {}_vT_{rE}, \epsilon, t)$$

(4) 通过杆件内应力 σ 、临界裂纹尺寸 a_c 、结构几何因素 Y ，则可建立结构断裂驱动力表达式

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a_c}$$

根据断裂力学判据，得出 14MnNbq 钢板使用厚度与设计温度、焊缝韧性要求的关系，验证了确定芜湖长江大桥使用板厚 50mm，这从防止脆断角度讲是安全的。

14MnNbq 钢材焊接材料及焊接工艺研究，是在前期阶段研究成果基础上，哈尔滨焊

接研究所、宝鸡桥梁厂、山海关桥梁厂、铁道部科学研究院又对 14MnNbq 钢配套的焊接材料及焊接工艺进一步优化。其间中铁大桥工程局及时提出了芜湖长江大桥 14MnNbq 钢焊接技术标准，各试验单位按照自选或规定焊接材料进行了各类焊接接头的力学性能试验，提出了各自研究报告；通过专家评审，确定了芜湖长江大桥钢梁对接焊、棱角焊、角焊缝的焊接材料及焊接工艺要点，并由宝鸡桥梁厂和山海关桥梁厂进行焊接工艺评定试验，将所取得成果作为编制《芜湖长江大桥钢梁制造规则》的依据，解决了厚板熔透角焊缝及深坡口熔透棱角焊缝等技术难点，使各类焊接构件韧性好，母材与焊缝强度匹配好，焊接变形小。

另外，还根据长沙铁道学院完成的预应力混凝土桥面系与钢桁结合梁的试验研究(96G35-N)提出了《芜湖长江大桥桁梁结合梁栓钉及焊接质量检验标准》。

第三章 钢梁制造招标与合同

第一节 钢梁制造招标

一、招标方式

鉴于芜湖长江大桥钢梁采用了新钢种(14MnNbq)、厚板焊接、整体节点、板桁结合等多项新技术,为实现质量、工期、投资三控制,芜湖长江大桥有限责任公司对钢梁制造进行了单独招标。招标工作按照铁道部铁建[1996]81号“关于发布《铁路工程建设施工招标投标管理办法》的通知”要求进行,采用邀请招标方式,由公司向具备承担该项工程能力的宝鸡桥梁厂、山海关桥梁厂、中铁大桥局船舶公司发招标邀请书。

二、招标经过

根据大桥的总体施工安排,正桥无为岸第一联钢梁需在1998年四季度开始架设,为此正桥钢梁制造招标工作在1998年初开始进行。共分四个合同段:第一合同段为主航道钢桁梁(180+312+180)m,重量约为15840t;第二合同段为无为岸副航道第一联钢桁梁(120+2×144)m,重量约6470t;第三合同段为第二、三联钢桁梁2-(3×144)m,重量约为14830t;第四合同段为芜湖岸副航道钢桁梁(2×120)m,重量约3800t。正桥全部钢梁总(招标重量不包括支座、附属设备、高强度螺栓)为40940t。同年2月根据各家报送的投标文件的内容,由专家组成的评标委员会进行评定,最后第一、二、三合同段为宝鸡桥梁厂中标,第四合同段为山海关桥梁厂中标。

第二节 钢梁制造合同

钢梁制造合同包括工程项目、工程范围、工程内容、钢梁制造的依据、钢材的供应、设计图纸,钢材供应和钢梁交付日期、运输方式及到站,甲乙双方的责任和义务,工程验收,工程监理,钢梁费用、付款办法、合同的组成、违约责任、合同未尽事宜的解决、合同的签定等16项内容。其中甲乙双方的责任和义务具体内容如下:

(1)甲方的责任和义务。

- 1)向乙方供应该合同段设计图一式6份。
- 2)按乙方申请通知甲方委托的代理单位供货,并负责协调有关钢材供应、检验事宜。
- 3)联系设计单位进行技术交底。
- 4)根据验工计价支付钢梁制造费和运杂费。
- 5)协助解决乙方在钢梁制造及运输过程中发生的困难。
- 6)派驻工程监理进行质量、进度、投资三控制。

(2)乙方的责任和义务。

1)负责编制《芜湖长江大桥钢梁制造规则》(简称《规则》)经主管部门批准后严格执行。

2)负责审查设计图纸和制作专用工装。

3)按《规则》向甲方提供有关文件资料 包括产品竣工图、施工图各 8 份 发送杆件表、试拼记录、产品合格证书等。

4)检查钢材质量，发现问题及时反映给甲方及甲方委托的代理单位。对钢梁制造质量实行三包，应符合铁建技 1997)65 号文的要求 确保全桥质量达部、省优 争创国优。

5)负责按设计图纸提出料单交供货方（各种损耗已考虑在钢板总量中），乙方按此承包使用，因制造失误造成钢板不足时由乙方自行解决。

6)乙方应积极与钢梁架设单位联系，就钢梁配套供应达成一致，避免造成钢梁积压或影响架设工期。

7)乙方应派员参加钢梁安装、架设的全过程 并提供服务。

8)乙方对钢梁所用的原材料包括钢板、焊条等，都必须经检验合格后方可用在钢梁上，乙方增补的钢板必须在驻厂监理工程师监督下经符合规范的试验，其各项化学成分和物理力学指标达到《芜湖长江大桥 14MnNbq 钢板的供货技术条件》方可使用。

9)在工地验收中，发现不合格的构件由乙方自行处理。安装过程中若发现不合格构件，因制造原因造成的一切损失由乙方承担；对非制造和运输原因出现的问题，乙方应协助处理。

第四章 焊接试验

第一节 14MnNbq 钢前期焊接试验研究简介

14MnNbq 钢是武汉钢铁(集团)公司和中铁大桥工程局共同研究开发的新型桥梁钢。早在 1992 年 山海关桥梁厂曾对 14MnNbq 钢进行了焊接试验研究,并于 1994 年制造了一孔试验梁——京杭运河大桥 64m 低高度下承栓焊桁梁。1996 年受中铁大桥工程局委托,哈尔滨焊接研究所、铁道部科学研究院金化所、山海关桥梁厂和宝鸡桥梁厂承担了“14MnNbq 钢焊接材料、焊接工艺的试验与复验及优化研究”工作,主要进行了 14MnNbq 钢母材复验、焊接性试验和焊接接头力学性能试验,为 14MnNbq 钢选择合适的焊接材料、优化焊接工艺和为芜湖长江大桥的钢梁焊接作好技术准备。

一、母材复验

对 50、44、40、36、32、24 和 16(mm)七种厚度的 14MnNbq 试验钢板进行了化学成分、力学性能的复验,对 50、44 和 40(mm)三种厚度的钢板进行了超声波探伤,对 50、40(mm)两种厚度的钢板进行了 Z 向拉伸试验。复验结果均满足技术条件,但也发现部分钢板 Nb 含量超过上限,44、50(mm)钢板探伤发现有夹层,50(mm)钢板 Z 向拉伸性能离散性大等问题。这些问题提出后,引起了武汉钢铁公司的重视。

二、焊接性试验

按照《焊接热影响区最高硬度试验方法》(GB4675.5-84)分别用 J507(ϕ 4mm)焊条手弧焊和 H08Mn2SiA(ϕ 1.2mm)焊丝 CO₂ 气体保护焊对 20、32、50mm 三种厚度的钢板进行了环境温度为 5℃、60℃、100℃ 三个温度的热影响区最高硬度试验,最高硬度均小于 HV350,这说明 14MnNbq 钢的淬硬倾向较小。

斜 Y 坡口焊接裂纹试验的目的是评价钢材的冷裂倾向和确定预热温度。按照《斜 Y 坡口焊接裂纹试验方法》(GB4675.1-84)分别用手弧焊和 CO₂ 气体保护焊对 32、50mm 两种厚度的钢板进行了小铁研试验,选择的焊材有 J507、BHJ506Fe、BHJ507B、J507L、MKJ507B、J507Q 和 H08Mn2SiA。参照日本国有铁路标准分别采用埋弧自动焊焊接材料 H10Mn2(ϕ 5)+SJ101 和 H08MnA+SJ101,在室温下用较小的规范(线能量 34.7kJ/cm)对 50、32mm 两种厚度的钢板进行了斜 Y 坡口大铁研试验(试板长 500mm 宽 380mm 拘束焊缝长 2×150mm 中间试验焊缝长 180mm)。结果表明,在环境温度不低于 5℃条件下,32mm 厚试件除了 J507Q 需要预热外,其它焊条手工焊或 CO₂ 气体保护焊不会产生裂纹;50mm 厚试件除了 J507 和 CO₂ 气体保护焊需要预热 60℃,BHJ506Fe 需要预热 130℃外,用其它焊条在温度不低于 5℃条件下焊接不会产生裂纹;两种厚度的试件在不预热的条件下采用 H10Mn2(ϕ 5)+SJ101 和 H08MnA(ϕ 5)+SJ101 进行埋弧自动焊不会产生裂纹。