

## 武重高速沙洋枢纽互通高跨高快速施工关键技术研究

王丹<sup>1,2</sup> 王楠<sup>2</sup> 金辉<sup>1</sup> 王纯昊<sup>1</sup>

1. 中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学 武汉 430068

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18430

**[摘要]** 本文聚焦武荆宜高速公路荆门段跨线桥梁施工关键技术展开深入探究。工程涉及小江湖特大桥、沙洋枢纽互通A、C匝道桥跨越S53枣石高速施工,详述工程概况与技术标准。钢梁制造环节,精准划分节段,依托计算机放样、精密数控下料、单元件反变形焊接等工艺保障质量,焊钉连接桥面板与钢梁。运输上,综合考量选大平板挂车并优化捆扎。安全保通涵盖多媒介信息发布与枣石高速5阶段保通。钢梁安装涵盖地基处理、支座安装、钢梁精确吊装与定位调整,严格遵循焊接工艺,严控焊缝质量,针对不同焊缝缺陷明确修补法。本研究成果为同类高速公路桥梁施工提供了极具价值的参考范例,助力推动桥梁建设技术发展。

**[关键词]** 跨线桥梁施工; 钢梁制造; 钢梁运输; 安全保通; 钢梁安装

## 1 工程概况

武荆宜高速公路荆门段起于荆门天门交界的吕家潭村附近对接武汉至重庆高速公路天门段,于沙洋城区以北闸口村跨汉江,穿小江湖蓄洪民院,在S53枣石高速沙洋互通以

南与S53枣石高速交叉,向西于潘集国家湿地公园以北跨S342省道和沙洋疏港铁路(规划)、曾集以南下穿浩吉铁路、五里铺以南跨S53枣石高速,终点在五里铺镇南侧郝台村附近设置互通接207国道。

表1 跨线施工工程一览表

序号	桥梁名称	被跨 S53 枣石高速公路桩号	涉路桥墩	结构形式	施工部位	工程量 (t)	跨径及主要材料材质
1	小江湖特大桥	K198+930	36#墩~37#墩	钢混组合梁	小江湖特大桥第十二联	1007.9	1×60m Q345qD、Q420qD
2	A 匝道 2 号桥	K198+780	1#墩~2#墩	连续钢箱梁	A 匝道 2 号桥	834.4	40+60+40m Q345qD
3	C 匝道桥	K199+170	3#墩~4#墩	连续钢箱梁	C 匝道桥第二联	834.3	40+60+40m Q345qD

表2 被跨 S53 枣石高速道路采用的技术标准 (新建高速相同)

道路等级	桥涵结构设计基准期	设计荷载	路面铺装	环境类别	防撞护栏等级	路面宽度	被交处行车速度
双向四车道高速公路, 设计时速 100km/h	100 年	公路-I 级	沥青路面	I 类	SB 级 (波形钢护栏)	20.5m	限速≥100km/h

## 2 钢梁制造

## 2.1 钢梁节段划分

沙洋互通小江湖特大桥将简支钢梁节段划分为: 8片×4节=32节段, A匝道连续钢梁节段划分为: 8跨×4节=32节段, C匝道连续钢梁节段划分为: 8跨×4节=32节段。

于钢结构加工厂加工制造成节段后运输至现场, 厂内检查合格后运输至现场, 桥位现场根据设计图纸进行节段拼装安装。

## 2.2 零件放样

基于三维建模与数字制造技术, 运用计算机辅助设计与放样软件对钢梁各构件进行高精度实体建模与展开。通过获

取精确理论尺寸, 结合焊接接头加工工艺要求与焊接收缩变形规律, 确定下料工艺尺寸, 其计算公式为: 工艺尺寸=理论尺寸+焊收缩补偿量+机械加工余量。此方法确保了构件加工前的数字化预拼装准确性, 为后续数控切割与精密制造奠定了基础。<sup>[1]</sup>

## 2.3 精密数控下料

下料作业前, 需对钢板材质、规格及表面质量进行复核。下料时, 钢板轧制边缘部分 (约 10mm) 应予切除, 以保证材料性能均匀性。

根据板厚与切割质量要求, 选用数控等离子或火焰切割设备。

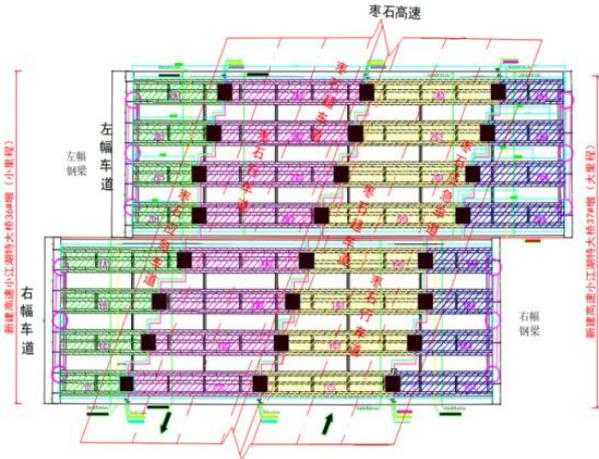


图 1 主线桥（小江湖特大桥）钢梁节段划分总平面布置图

(2) 针对本项目焊接量大、焊接收缩显著的特点，在下料时需根据板厚与切割方式（见表 3）预设相应的切割缝宽度补偿值，以抵消后续焊接变形影响。<sup>[2]</sup>

表 3 切割宽度及补偿

切割方式	板厚	切割补偿
自动等离子/火焰切割	4~10mm	1~3mm
	10~24mm	3~4mm
	30~40mm	4~4mm
	40~40mm	4~7mm

### 2.4 单元件制造

将单元件置于反变形焊接胎架上焊接，按指定的焊接规范参数施焊，以减少焊接变形。

本项目混凝土桥面板与钢梁之间通过布置于钢梁顶板的焊钉连接，焊钉规格  $\phi 19 \times 120\text{mm}$ 、 $\phi 22 \times 200\text{mm}$ 。钢梁端部 750mm 范围内的剪力钉采用中  $\phi 19 \times 120\text{mm}$  圆柱头焊钉，其余剪力钉采用中  $\phi 22 \times 200\text{mm}$  圆柱头焊钉，沿道路中心线径向布置。

### 3 钢梁运输

从减少现场安装焊接工作量，且减少安装期间对交通影响方面考虑，本项目钢梁在运输允许的条件下应尽可能减少分段，采用大节段。从运输经济性方面考虑，则应在满足现场要求的基础上尽量选择常规，且经济的运输方式。经实地考察，沿线桥涵限重、限高无障碍，满足构件的运输条件，道路通畅，综合考虑下采用性价比较高的运输方式：大平板挂车运输，采用长为 17.5m 长平板挂车进行箱梁运输。

为确保大尺度钢梁节段（最大长度 17.5m）在复杂路网中的运输安全与经济性，经综合比选，确定采用大吨位平板挂车进行公路运输。

### 4 安全保通

#### 4.1 信息发布

为最大限度降低施工对既有高速公路通行的影响，建立了多维度的交通信息发布与诱导系统。施工期间，通过湖北省交通广播网络（如楚天交通广播 FM92.7、湖北之声等）实时发布路况信息，在发生拥堵时提前引导驾驶员择路绕行。同时，综合利用地方交通主管部门网站、政务新媒体公众号、道路沿线可变情报板以及高德、百度等主流导航平台，发布施工预警与绕行提示，将施工影响路段信息嵌入导航系统，实现主动交通分流。<sup>[3]</sup>

#### 4.2 枣石高速保通措施

施工分为 5 个阶段。

第一阶段，中央隔离带开口，主线临时支架施工封闭枣石高速 K198+400~K199+460，双向超车道。

第二阶段，主线、A 匝道、C 匝道左幅钢箱梁吊装及附属设施施工，主线左幅临时支架安装并拆除，A、C 匝道临时支架安装封闭枣石高速往钟祥方向 K198+400~K199+460，车辆通过往沙洋城区南方向半幅单幅双向通行。

第三阶段，主线、A 匝道、C 匝道右幅钢箱梁吊装及附属设施施工，主线右幅临时支架安装并拆除，A、C 匝道临时支架安装封闭枣石高速往沙洋城区南方向 K198+400~K199+460，封闭枣石高速往钟祥方向 K198+400~K199+460 段超车道 2.5m。车辆通过往钟祥方向半幅单幅双向通行

第四阶段，A、C 匝道高速外部分吊装，完成后 A、C 匝道临时支架拆除封闭枣石高速往沙洋城区南方向 K198+400~K199+460 段应急车道，封闭枣石高速往钟祥方向 K198+400~K199+460 段超车道。

第五阶段，中央分隔带恢复，主线临时支架拆除封闭枣石高速 K198+400~K199+460，双向超车道。

#### 4.3 外围提示牌

在枣石高速与沪蓉高速、沪渝高速互通处，旧口收费站，沙洋收费站，沙洋南收费站、浩口收费站设置施工提示标志，请车辆减速慢行谨慎驾驶。

### 5 钢梁安装

#### 5.1 临时支架结构计算

钢梁分段现场临时支撑体系主要布置在桥梁下地基和高速公路路基上，位于高速路面上辅助墩支架可设置一层油毛毡后直接浇筑  $3.2 \times 3.2 \times 0.6\text{m}$  的 C25 混凝土条形基础，搭设钢管支架。

地面上每个支架处地基需硬化处理，浇筑混凝土面积为  $3.2\text{m} \times 3.2\text{m}$ ，片体支架需整体浇筑混凝土，采用 C30 混凝土，混凝土厚度不小于 30cm。根据钢梁对支架最大载荷约 70t，钢管支架的最大反力为  $F = 70 \times 9.8 / 1000 = 686 \text{ (KN)}$ ，混凝土扩大基础浇筑面积为  $A = 3.2\text{m} \times 3.2\text{m} = 10.24 \text{ m}^2$ ，基础底部应力为  $\sigma = 686 / 10.24 \times 2.98$  约等于 200 (k pa)（约 3 倍安全

系数)。故混凝土扩大基础底部承载力不小于 200kpa 即可。

基于有限元软件模拟计算, 通过偏载以及中载变形最大值  $0.746\text{mm} < H/150 = 2000/150 = 13.3\text{mm}$ , 所以支架安全满足施工要求。

### 5.2 支座安装

各主墩墩身顶部均设置竖向支座, 所有支座均采用 SX-4000、DX-4000、GD-4000 球形支座。支座采用套筒和锚固螺栓与主梁及桥墩连接, 墩顶的支座垫石预留锚栓孔。

其核心安装流程为: 垫石复测处理→支座初步就位→钢梁节段安装焊接→支座精确对位与固定→灌注高强灌浆料→钢梁体系转换(卸载)→支座底板与钢梁最终连接。<sup>[4]</sup>

**桥墩垫石复测:** 根据图纸设计要求并结合测量放点进行垫石复测。垫石复测是首要环节: 依据设计图纸与测量控制网, 精确放样出支座纵横中心线并复核垫石顶面标高。重点检查垫石表面是否平整、是否预留足够的灌浆层厚度(本工程要求约 30mm), 并核对预埋锚栓孔的孔径、孔深及间距是否符合设计与规范要求。预留孔尺寸必须大于支座套筒或底柱的相应尺寸, 一般要求直径与深度均大于 60mm。

**支座对中:** 墩台支座设计中心线与支座预埋钢板中心线对。

**支座安装调整:** 注意纵横方向的水平, 四角高差不得大于 2mm。在距离支座垫石 1 米位置处停止下钩。对位完成后, 下锚固螺栓将支座与下预埋钢板连成一个整体后, 浮吊缓慢下钩, 将纵梁放置在临时支墩顶部。

**支座就位后在锚杆与安装预埋孔内采用:** 无收缩环氧树脂砂浆或支座专用灌浆

灌浆作业是保证支座均匀受力的关键: 支座初步对中并调整至水平(四角高差  $\leq 2\text{mm}$ ) 后, 采用无收缩环氧树脂砂浆或专用灌浆材料进行灌注。灌注时需确保灌浆料从支座底板中心向四周自然流动, 灌注厚度控制在 30mm 左右, 以此排除空气, 保证灌浆层饱满密实, 避免支座底板脱空。

为减少主桥施工过程中的荷载对支座的影响, 主桥钢结构安装前, 支座安装完成后, 在支座旁设置钢支墩, 钢支墩采用  $\phi 219 \times 8\text{mm}$  钢管制作, 顶底部采用钢板焊接封闭, 单个支座处设置 2 个临时支墩。施工过程中主要依靠临时支墩承受上部荷载, 对主桥支座起到保护作用, 在主桥支架卸载后将临时支墩拆除, 并及时解除支座约束。

根据钢梁结构体系转换, 主桥节段钢梁安装焊接完成后, 对支座垫石预埋孔进行灌浆, 将主桥支座固定, 待灌浆料强度满足要求后, 拆除临时支墩, 完成体系转换。

### 5.3 钢梁安装

钢梁安装根据节段划分图纸整体从小里程左幅→小里程右幅→大里程左幅→大里程右幅的顺序安装。

钢梁吊装节段的定位流程详见下图:

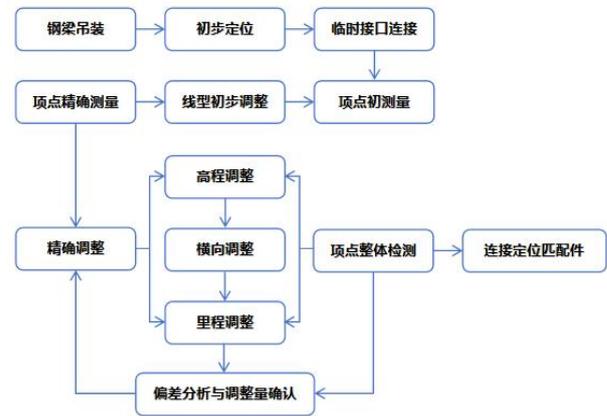


图2 钢梁安装定位流程图

钢梁吊装就位后, 常与设计坐标存在微小偏差, 需进行三维微调。调整遵循“先平面后高程”的原则, 具体方法如下:

(1) 桥向(前后)调整: 通过在已安梁段与待调梁段腹板内侧焊接临时耳板作为受力点, 安装 10t 螺旋式调节套筒(俗称“平三套”)进行推拉调节。前点调节则利用箱室内底板与 H 型钢上的焊接反力点, 同样采用平三套实施。

(2) 横桥向(左右)调整: 在承载钢梁的分配梁(H 型钢)上焊接反力座, 安装 20t 液压千斤顶, 通过顶推实现横向位移调整。<sup>[11]</sup>

钢梁底板与钢质分配梁间的静摩擦系数取 0.2 进行验算。本工程最大吊装分段重 51t, 计算所得最大启动力约 10.2t, 现场配置的调节设备(2 个 10t 平三套或 2 个 20t 千斤顶)安全储备充足。若调整过程中摩擦力过大, 可在接触面间加设聚四氟乙烯滑板以减小摩擦阻力。

(3) 水平调整力验算分析如下

钢梁底板与 H 型钢接触, 经过对材料之间的摩擦系数表查证得知: 钢板与钢板之间的起动摩擦系数为 0.15~0.2, 考虑施工中各方面不确定因素的影响, 摩擦系数取 0.2。本项目中, 现场吊装钢梁最大分段重量为 51T, 故最大起动摩擦力为 10.2T, 则每侧通过 2 个 10T 平三套或 2 个 20T 的千斤顶能够满足要求。<sup>[6]</sup>

**竖向(高程)调整:** 水平位置调整完毕后, 使用 4 台 20t 千斤顶进行标高精调。千斤顶置于临时支墩正上方, 其活塞杆与梁底之间需垫设钢板(规格  $200 \times 200 \times 20\text{mm}$ ) 以分散压力。通过精密水准测量控制, 调整到位后立即塞入钢垫片与楔形钢板固定, 并确保每个主要受力腹板下方均有可靠支撑。

根据桥面测量数据用三向千斤顶精确调整梁段平面位置及标高。

钢梁精确调整并临时固定后, 需在梁体两侧及端部的操作平台上焊接限位挡板, 形成可靠的横向约束, 防止在后续焊接或荷载作用下发生位移。<sup>[6]</sup>

梁段工地纵缝焊接顺序：焊接腹板与横隔板的角焊→焊接面、底板之间的对接焊缝

梁段工地环缝焊接顺序：焊接腹板间对接焊缝→焊接面板对接焊缝→焊接底板对接焊缝→焊接纵肋嵌补段焊缝。

(4) 钢梁焊接注意事项<sup>[7]</sup>

本工程焊接作业严格遵循“先评定、后施焊”的原则。开工前，针对主要接头形式完成了焊接工艺评定试验。

(5) 焊接前后检查

焊前清理是保证焊接质量的前提。所有待焊坡口及其附近区域（包括车间底漆、氧化皮、铁锈、水分、油漆等）必须彻底清除并打磨至露出金属光泽。对于埋弧焊，焊剂可能接触的钢板表面的浮锈也必须清除干净，以防混入焊剂影响焊接冶金过程。<sup>[5]</sup>

所有埋弧焊的被焊钢材表面，除了按上条要求清理外，对于在焊接过程中，凡焊剂可能接触部位的浮锈，均一律清除干净，以防浮锈夹入焊剂内。

为了提高热影响区和焊缝金属的冲击韧性，焊接过程中必须按焊接规范执行，采用多层多道焊，不允许摆宽道。

焊接施工作业时，及时填写焊接施工管理卡，对施焊构件的名称、编号、焊工、焊接日期，预热温度做原始记录（包括修补记录）、主要焊缝要填写焊接记录均提交质检部门归档备查。

焊后需对焊缝外观进行彻底清理，去除焊渣、飞溅物，并检查是否存在焊瘤、咬边、表面气孔、未熔合、裂纹等表面缺陷。

(6) 焊缝缺陷修补

表 4 焊缝缺陷修补

缺陷种类	修补方法
切除临时连接板时留下的缺陷	深度在 0.1~1mm 的采用砂轮打磨平顺；深度超过 1mm 的需进行手工焊补，然后修磨。
咬边	深度小于 0.5mm 用砂轮磨顺，深度大于 0.5mm 用手工补焊后砂轮修整。

续表 5 焊缝缺陷修补

缺陷种类	修补方法
焊缝裂纹或热影响区裂纹	焊缝或热影响区裂纹，须先用碳弧气刨彻底清除，分析原因并制定预防措施后，预热至 100~150℃，采用原焊接方法进行返修（短焊缝可用手工焊）。
气孔、夹渣、未熔透、凹坑等缺陷	用碳弧气刨清除缺陷，用手工焊返修，预热 50~100℃，焊后磨顺。
自动焊、半自动焊起弧或落弧的凹坑	自动、半自动起弧或落弧的凹坑，如要继续施焊或补焊时，必须将原弧坑部分或被清除部位的两端，刨成不陡于 1: 5 的斜坡，再继续焊接。

6 结语

身为参与武荆宜高速公路荆门段桥梁建设的工程技术人员，回首工程全程，诸多艰辛与成就历历在目。在前期筹备时，面对复杂的地形、交通状况，我们反复勘测、研讨，敲定最优方案。钢梁制造阶段，集合各方智慧，从精细的节点规划，借助计算机精准放样，到数控下料严格控质，各环节紧密相扣，为高品质钢梁诞生赋能。

运输途中，综合考虑构件特性、道路条件，定制安全高效策略，护航构件就位。安全保通层面，通过广播、网络、显示屏等多元渠道实时发布信息，结合枣石高速巧妙分阶段施工，平衡建设与通行需求。钢梁安装时，地基处理因地制宜，支座安装精准无误，吊装定位毫米必争，焊接严守工艺规范，缺陷修补精细入微。此工程不仅是一座实体桥梁的落成，更为行业沉淀下可复制的技术与管理财富，期待后续项目以此为基石，攀越更高峰。

[参考文献]

[1] 王敏. 跨文化遗产河流超大钢箱梁桥施工技术. 《广东土木与建筑》, 2024-04-15

[2] 张成凯. 大跨径波形钢腹板 PC 梁桥钢腹板加工技术研究——以昭君黄河特大桥项目为例. 《工程技术研究》, 2021-10-10

[3] 马召军, 邵友栋. 互通式立交主线桥及匝道桥跨沿海施工交通疏散方案探讨. 《技术与市场》, 2011-11-15

[4] 刘建辉, 单明. 城市钢箱梁高架桥球形支座安装施工工艺. 《工业建筑》, 2012-06-29

[5] 徐光政, 罗鸿. 达连坝大桥顶推跨越既有公路技术应用. 《公路交通科技 (应用技术版)》, 2016-07-15

[6] 王培革. 浅析大跨径钢箱梁采用浮吊船进行悬臂拼装的施工方法. 《中国设备工程》, 2021-04-10

[7] 李建, 刘洋. 樟木箐安宁河钢桁梁支架架法施工工艺研讨. 《四川水力发电》, 2019-11-15