

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.04.039

超大复杂多曲面桥塔横梁制造技术研究

田正兰,朱继成

[中铁山桥(南通)有限公司,江苏如皋 226500]

摘要:为进行南京仙新路过江通道工程主塔超大复杂多曲面桥塔横梁制造,通过开展不同分段方案对比、板单元制造精度控制技术、节段整体拼装工艺、过程测量技术、吊装存放方案设计等一系列关键流程技术研究,重点采用先进的计算机辅助设计软件进行细化设计模拟、反变形船位焊接机器人系统进行高质量焊接、三维激光高精度过程监测,最终实现复杂多曲面薄板的桥塔横梁制造,不但为异形桥梁钢结构制造积累了一定的经验,同时也向未来的异形桥梁制造技术的发展和创新的思路和创新提供了新的思路和方向。

关键词:桥塔横梁;多曲面;桥梁钢结构;桥梁美学;钢结构制造

中图分类号:U445.47

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)04-0162-04

0 引言

随着桥梁建造技术的提升,现代桥梁在满足跨越通行功能需求的同时,作为长久的公共建筑,其美学设计也越发重要,优秀的桥梁设计还应该与其所建造的周边环境协调一致,能够反映出不同地域文化,进而最终成为独特的具有文化属性的桥梁景观^[1]。

相较传统的建筑材料,钢结构具有灵活性和可塑性更强的优势。通过独特的设计和创新,可以创造出各种形态各异的桥梁,钢构加工的艺术与技术相结合,使桥梁更具艺术性和个性化。但也为制造厂带来了新的挑战,需要针对不同项目展开制造工艺探索研究^[2]。

1 工程概况

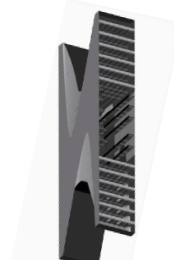
南京仙新路长江大桥全长约13.17 km,是目前“中国第二、世界第四大”悬索桥,主桥采用主跨1760 m钢箱梁悬索桥,主塔高263.8 m。

仙新路主塔上横梁采用钢外包N字形装饰,隐喻所在地南京,N字形钢结构总高60 m,其中混凝土横梁顶面以上20.5 m,混凝土横梁以下22.5 m,外包钢结构宽度为11 m,在横梁中部采用光滑曲面内凹,最大内凹深度为1.0 m,桥塔正面及背面均成N型,钢结构N字造型将整个主塔混凝土上横梁包裹在内。外包钢结构面板采用8 mm厚钢板,面板上

设置140 mm×10 mm竖向加劲肋,加劲肋横向间距为460 mm。N型钢内部设置横隔板,横隔板竖向基本间距为3.2 m,厚度为12 mm,横隔板上开设1800 mm×800 mm的检查人孔^[3]。



(a)仙新路长江大桥 N 字形装饰全景图



(b)N 字形装饰段效果图

图1 仙新路长江大桥 N 字形装饰段效果图

主要难点在于以下3个方面:

- (1)该项目桥塔横梁为不规则复杂多曲面,因此曲面制造工艺有别于常见的桥塔装饰结构。
- (2)常见桥塔横梁所用结构钢板多为厚板,该项目桥塔结构钢板均为薄板(钢板厚度8 mm到12 mm之间),因此其焊接变形控制、尺寸精度控制难度更大;
- (3)桥塔在结构超大(钢结构长60 m,宽22 m,高10 m),且存在复杂多曲面、结构钢板均为薄板的情况下,控制焊接变形,保证制造精度。

2 制造技术研究

2.1 分段方案

如图2所示,N字形装饰钢结构在高度上从上下圆弧处断开,将N字形装饰分为A/B/C三个部分,A部分长度方向上在中间分开,在圆弧位置对接,宽度

收稿日期:2023-11-02

作者简介:田正兰(1992—),女,本科,工程师,从事桥梁钢结构制造工作。

方向上从中间分开;B部分长度方向上从圆弧位置断开,宽度方向线不进行划分;C部分长度方向上斜着进行划分,宽度方向上从中间短开。

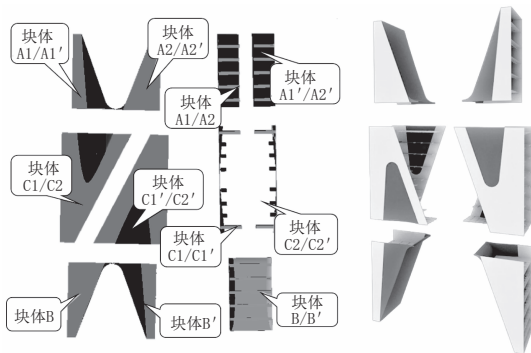


图2 N字形装饰分段示意图

整个N字形装饰钢结构划分为A1/A1'、A2/A2'、B/B'、C1/C2、C1'/C2'共10个块体,块体之间采用对接焊接连接。

2.2 板单元制作

如图3所示,利用建模软件对N字形装饰进行三维建模,导出曲面的展开形状,下料完成后根据建模数据压弯面板,然后以数控下料的异形板肋为内胎,组装焊接曲面面板与板肋,完成后根据建模得出的空间坐标对曲面单元的空间尺寸进行修整。

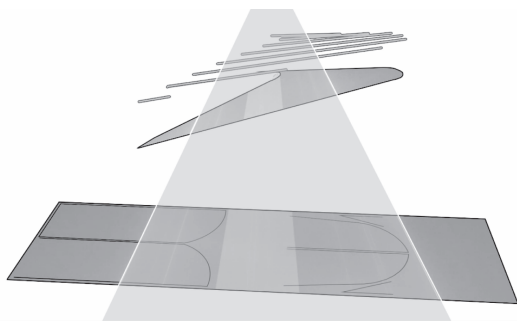


图3 曲面板展开示意图

变形控制采用以下措施。

(1)预设反变形:为实现板单元的平面度要求,板单元制造在专用的板单元焊接反变形胎进行焊接,通过预设反变形,减少焊接后矫正量。反变形设置示意图如图4所示。

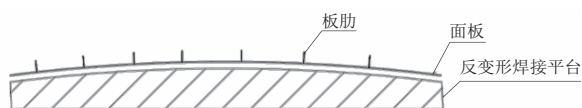


图4 反变形设置示意图

(2)板单元“二拼一”:N字形装饰整体拼装前,板单元在反变形平台先进行“二拼一”,减少在拼装时的对接焊缝数量,“二拼一”完成后进行修整、打磨,再进行面板的铺装。

(3)控制焊接参数,采用合理的焊接顺序:焊接采用热输入量较小的CO₂气体保护焊,焊接时严格控制焊接参数(电流、电压、焊速),减少热输入量,减小焊接变形。N字形装饰CO₂气体保护焊焊接规范参数见表1;焊接时采用合理的焊接顺序。拼装时先焊接面板、侧板纵向对接焊缝,焊接时预设反变形;再焊隔板与面板的周圈贴角焊缝;最后焊接面板与侧板的角焊缝。同类焊缝从中间向两侧对称施焊,所有焊缝同向施焊。

表1 焊接参数建议值

焊接方法	焊接材料	焊接位置	电流 /A	电压 /V	焊速 / (m·h ⁻¹)	CO ₂ 气流量 / (L·min ⁻¹)
实心焊丝	ER50-6(φ1.2)	平位	240±20	30±2	22±2	15~25
药芯焊丝	E501T-6(φ1.2)	立位	160±20	26±2	18±1	15~25
		仰位	180±20	28±2	22±2	15~25

为了控制横向焊接变形,使用船位焊反变形翻转胎架焊接纵肋。如图5所示,船形焊反变形胎在纵肋组装定位完成后,预设横向焊接反变形,并采用液压自动夹紧翻转。反变形采用参数化编程方式实现,且焊接胎翻转角度可调,针对不同的板厚和焊缝类型,调整姿态使板单元纵肋焊缝处于船位焊接位置。设置的横向反变形量建立在丰富的工艺试验结果上,并在多个重大项目的板单元焊接中得到验证,焊后解除夹紧工装,可保证板单元尽可能恢复到平面状态。采用反变形船位焊接技术,减少了板单元焊接后矫正量,提高了工效,避免了板单元的残余应力的进一步增大,使焊接变形得到最大程度的控制。

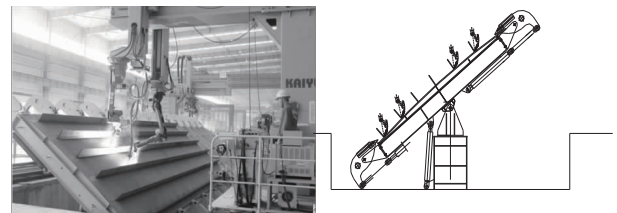


图5 反变形船位焊接机器人系统

2.3 板单元矫正

完成纵肋焊接后,对于板单元存在的微小纵向变形和面板局部变形,采用自主研发的数控矫正机床对板单元进行自动化机械冷矫正。自动化机械冷矫机床满足不同板厚、不同尺寸的板单元需求,应用图像识别技术,智能感知板单元焊后平整度,并进行机械压紧和矫正。机械冷矫正兼顾了母材对于温度的敏感性,同时确保板单元平面度达到1mm以内。

板单元组装焊接横肋后,由于其结构刚度已成型,因此以局部变形位置,边缘部位出现的横向变形

采用线状加热矫正,横纵肋局部变形采用点状加热矫正(见图6、图7)。



图6 板单元数控矫正机床

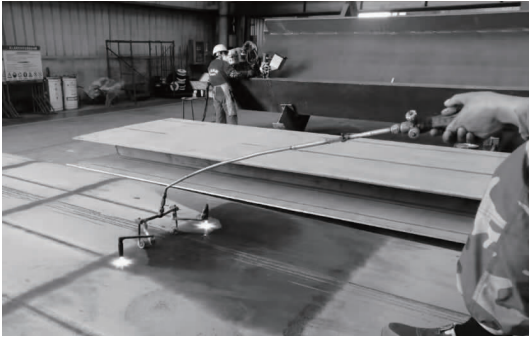


图7 板单元线状加热矫正

3 节段制造及检测技术

3.1 总体工艺流程

整体N字形节段拼装在拼装厂内生产的特制胎架进行。如图8所示,采取“卧式”组合方式,即N字形装饰面板冲下,与N字形装饰6个块体整体匹配后进行拼装的方法。安装后块体间通过码板临时衔接,在完工后再解体进行涂装过程。拼装胎架线形设计和N字形节段拼装都以事先设计好的测量网为依据,以保证拼装过程线形设计和接口准确性。

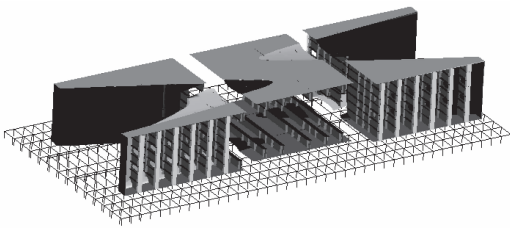


图8 整体分段示意图

3.2 节段拼装工艺

(1) 定位下面板单元

如图9所示,依次把面板单元放在胎架上,以标志塔上的定位线为基础,精确对准横向、纵基线。

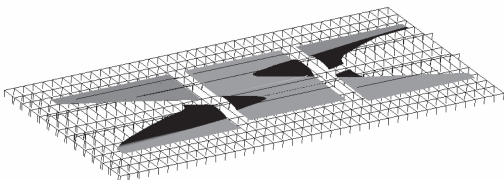


图9 定位下面板单元

(2) 组焊横隔板和侧板单元

如图10所示,以面板的横、纵基线为基准,依次组装横隔板和侧板单元。

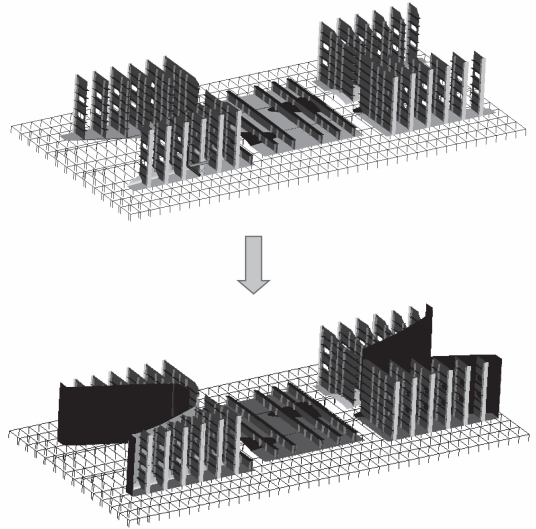


图10 横隔板和侧板单元组焊

组装定位横隔板时重点控制横隔板间距和垂直度;各部件组装定位经检验合格后完成各部位的焊缝焊接,先焊接各横隔板与下面板的焊缝,再焊接各处立位焊缝,焊接侧板与底板的焊缝,最后焊接侧板与横隔板间焊缝。

(3) 组装上面板单元

通过标志塔上的定位线,组装上面板单元,重点控制各项板单元横基线的纵向位置使其位于一条直线上,采用水准仪监控结构高度。经检验合格后完成各部位的焊缝焊接。

3.3 测量方案

如图11所示,采用激光跟踪仪测量曲面各控制点三维坐标,根据测量的点在软件上生成空间曲面,与建模的曲面进行比对,分析板单元曲面线形。



图11 三维检测示意图

3.4 加固方案

如图12所示,节段吊装采用四点起吊形式,根据模型计算N字形装饰节段重心,沿节段对称中心两侧,将吊装吊耳布置在横隔板与纵向加劲肋交叉整体刚度较大的位置,并在箱体内部加设临时加固型钢,在吊点的背面设置吊点加强加劲。

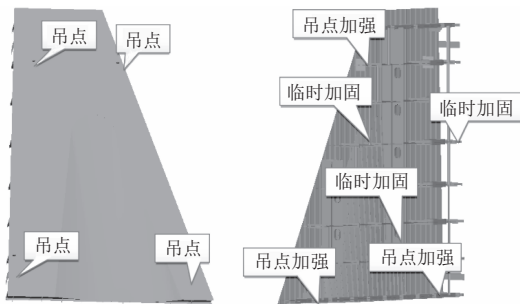


图 12 吊耳布置示意

3.5 吊装存放方案

3.5.1 合理布置吊装吊耳、增加临时加固

节段吊装采用四点起吊形式,根据模型计算 N 字形装饰节段重心,沿节段对称中心两侧。

3.5.2 存放变形控制措施

针对钢塔块体和节段的结构形式和受力状态,采用多支点支撑的存放方案,所有支撑点均布置在横纵肋交叉处刚性较大的位置,均经过应力计算,刚度不足时进行必要的局部加强,避免钢塔整节段在存放过程中由于局部结构刚度不足而发生变形破坏。

(1) N 字形装饰节段块体采用多支点支撑的存放方案,支点设置于横隔板位置,同时为防止转运时相互刮蹭,相邻块体间距离最小为 4 m。

(2) 节段采用立式存放,在抄垫钢板顶面设置橡胶垫或 MGE 板,避免刚性接触导致局部变形。在节段下放过程中,为保证各支墩接触面密贴,在钢支墩顶设置调平钢板,并利用模块车二次升降调节,确保节段与支墩接触面密贴,以保证钢塔节段的重力均衡传递至钢支墩。

(3) 存放位置距江岸保持安全距离,地面平整,通风条件好,确保地基具备足够承载力,同时排水系统通畅。

3.5.3 节段运输变形控制措施

对钢塔节段的吊点位置、重心情况、船运支撑位置、局部承载能力和稳定性、施工可行性进行了综合研究,确定局部支撑、限位装置的布置对船上的支承刚度、形状和局部稳定性等主要构造参数产生的影响,使得钢梁拼装结构和支承、限位构造受力均达到了可控状态。

运输防护措施:(1)用横跨港池起重设备将钢塔节段平稳吊起并放在运输船指定位置,搁置于运输船托架上(托架上方为 200 mm × 200 mm 方木并垫

以 5 mm 橡胶板);按预先排定的位置摆放节段块体,长度方向与船身长度方向平行,节段块体间留 ≥ 800 mm 间距,便于构件绑扎、防止行驶过程或桥位卸船时构件相碰;(2)防滑移支撑设置在外壁板单元两侧,节段长宽方向每隔 4 m 设置一块防滑支撑,防滑移支撑与壁板间留空 100 mm 用垫木抄实,实现节段与船体的位置相对固定,设置在横纵肋相交位置处,控制运输过程中因船舶的摇摆而发生横纵向的变形及扭曲。

4 使用情况

目前“N”字形钢结构已经通过了验收并开始桥址吊装,总体结构安全可靠,造型美观,仙新路大桥“N”字形钢结构架设完成照片如图 13 所示。



图 13 仙新路大桥“N”字形钢结构架设完成图

5 结语

当前,国内外钢结构桥梁的发展日益多元化,钢结构桥梁在满足结构设计要求的同时,也更加注重景观性的设计。例如:南京仙新路过江通道工程项目采用了超大复杂多曲面桥塔横梁结构,这种结构在满足结构性能和景观性要求方面存在一定的空间扭曲。因此,通过采用本文研究的这种制造工艺,可以为后续类似项目积累宝贵的制造经验。

参考文献:

- [1] 王毅娟,郭燕萍.现代桥梁美学与景观设计研究[J].北京建筑工程学院学报,2004(3):47-50.
- [2] 曹菲.城市景观桥梁创新设计研究[D].南京:东南大学,2016.
- [3] 赵茜茜.南京仙新路长江大桥夜景照明方案设计[J].城市道桥与防洪,2023(4):261-264.
- [4] Q/CR 9211—2015,铁路钢桥制造规范[S].
- [5] GB 50017—2003,钢结构设计规范[S].
- [6] GB 50205—2002,钢结构工程施工质量验收规范[S].
- [7] 袁硕,李峰,蔡明.空间扭曲结构钢桥制造工艺研究[J/OL].钢结构(中英文):1-9[2023-11-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1609.TF.20230828.1137.002.html>.