薄壁钢塔壁板单元制造工艺研究

张阔，王志鹏，徐向军
中铁山桥集团有限公司　河北秦皇岛　066205

摘要：随着钢塔设计水平的提高和结构钢产量增加，钢-砼组合结构的钢塔被设计师所青睐。根据桥梁钢塔受力需要，同时节约钢材和制造成本，有些桥梁采用薄壁结构的钢-砼组合塔。但对于薄壁钢塔壁板单元制造及拼装工艺的研究还较少，亟需解决薄壁板单元的焊接变形、对接精度等问题。根据“狮子洋大桥”钢塔的结构特点和制造工艺要求，针对其钢壳板单元的制造工艺进行了深入研究。通过采用数控激光切割下料、钢板切割外形尺寸预留变量研究、打磨吸尘推车设备、智能剪力钉焊接机器人系统等技术和装备，实现了薄壁钢塔壁板单元制造技术的突破。在研究制造工艺的过程中，通过分析薄壁型板单元制造的关键控制点，提出了一系列工艺优化措施。

关键词：薄壁；钢塔；制造工艺；控制要点；工艺优化

Study on manufacturing technology of plate element of thin-walled steel tower wall

ZHANG Kuo，WANG Zhipeng，XU Xiangjun
China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066205, Hebei, China

Abstract: With the improvement of design level of steel tower and the increase of structural steel production, steel-concrete composite structure steel towers are favored by designers. According to the force requirement of steel tower of bridge, while saving steel and manufacturing cost, some bridges use steel-concrete composite tower of thin-wall structure. However, there is still relatively little research on the manufacturing and assembly process of thin-walled steel tower wall panel units, and it is urgent to solve the problems of welding deformation and docking accuracy of thin-walled steel tower panel units. According to the structural characteristics and manufacturing process requirements of the steel tower of Shiziyang Bridge, the manufacturing process of its steel shell plate element is deeply studied in the paper. Through the use of numerical control laser cutting, research on reserved variables for external dimensions of steel plate cutting, sanding the vacuum cart equipment, intelligent shear nail welding robot system and other technologies and equipment, some breakthroughs in the manufacturing technology of thin-wall steel tower panel unit are achieved. In the process of studying the manufacturing process, a series of process optimization measures are put forward by analyzing the key control points of thin-walled panel unit manufacturing.

Keywords: thin-wall; steel tower; manufacturing process; control points; process optimization

1　序言

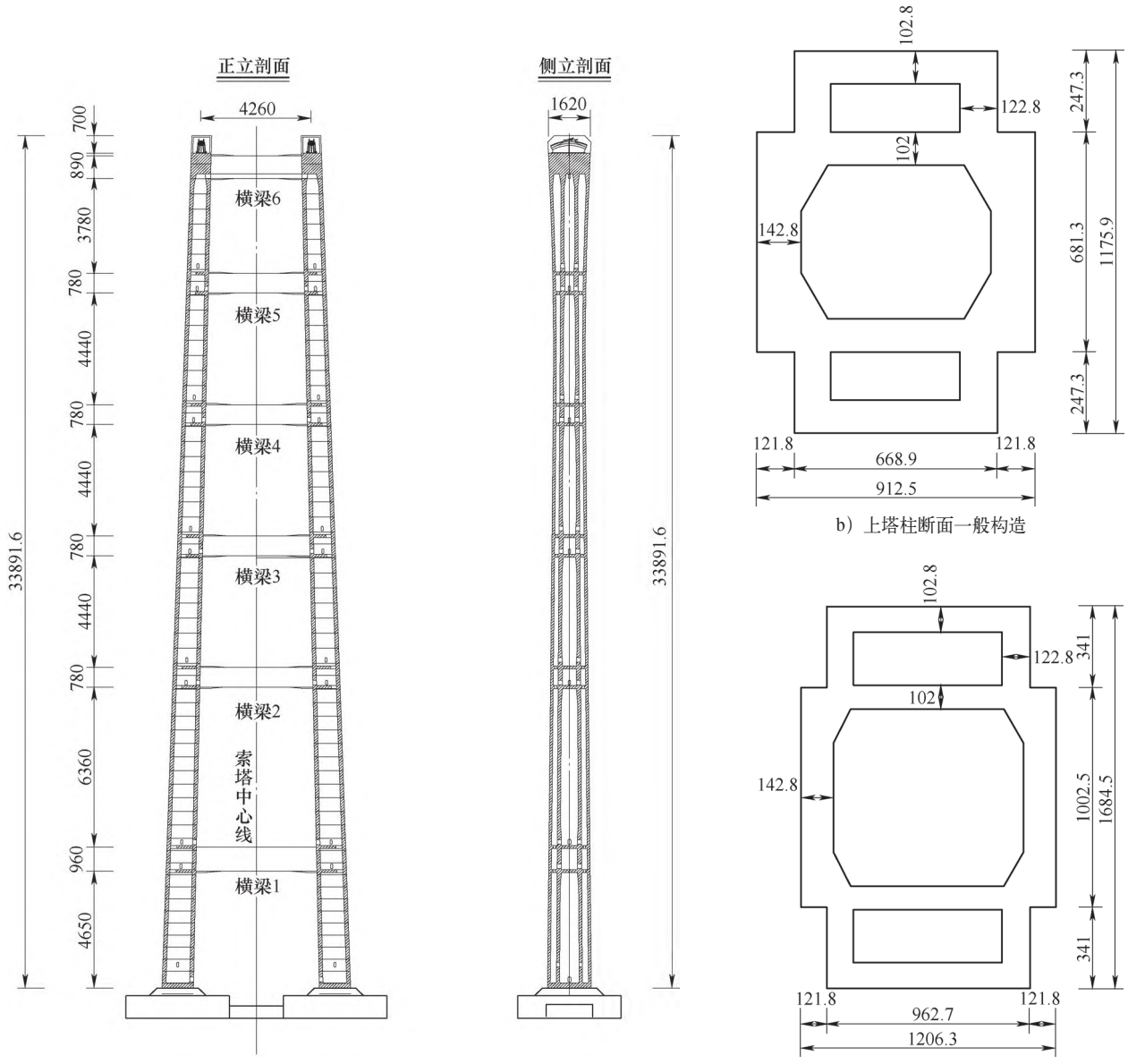
近年来，随着材料科学、计算机技术及施工工艺的不断进步，特大桥钢塔结构的形式日益丰富。东丰路立交桥钢塔外形近似双曲线，程龙[1]提出弧形壁板、隔板加劲圈与“米”字框架和钢塔节段拼装等制造工艺。椭圆形拱的朝阳钢塔两侧倾斜角为

20°，纵向呈V形结构；齐浩等[2]针对该钢塔的特殊结构提出了有效施工方案和新型工艺。港珠澳大桥的九洲桥采用塔、梁、墩固结的结构体系，主塔采用钢-混凝土结构，呈“风帆”造型；朴泷等[3]介绍了其钢塔制造工艺优化措施和创新应用。柳州市白沙大桥主塔塔柱结构似门形，塔身整体扭转；潘丽婷等[4]分析了制造工艺难点，解决了弯扭板单元的制作工艺难题；朱庆菊等[5]针对钢板厚度不同的横位对接焊缝及对接焊缝大间隙的情况，通过钢塔节段间全断面对接焊接工艺评定试验，为钢塔的制造提供技术支持和储备。这些钢塔结构不仅在力学性能上表现出色，而且造型独特，在艺术审美方面具有很高的欣赏价值。

狮子洋通道路线全长约35.1km，其主桥采用主跨2180m双层钢桁梁悬索桥，过江段为双层双向八车道。狮子洋大桥钢塔吸取以往钢塔的设计方法和施工经验，同时结合现代桥梁建设的发展趋势，提出了薄壁型钢塔结构设计的新工艺和新技术。

2　钢塔塔柱结构特点

索塔采用六横梁门式塔，塔柱构造如图1所示。索塔设置6道横梁，塔柱底面高程＋6m，塔顶高程



a）索塔一般构造　　b）上塔柱断面一般构造　　c）下塔柱断面一般构造

图1　塔柱构造（图中尺寸单位为cm）

+344.916m，索塔总高度338.916m，其中鞍罩高度7m。主塔自下而上共分为62个节段，包含下塔柱、上塔柱两大部分，如图1a所示。塔柱为钢混组合结构，其中塔柱混凝土部分采用钢板-混凝土组合，索塔用高强、高弹、高稳健、低收缩混凝土，塔柱外壳及其加劲肋、横梁及其加劲肋部分采用Q355D低合金结构钢，主结构以薄板为主，外侧钢壳壁板厚18mm，内侧钢壳壁板厚10mm，对应的加劲肋板厚分别为18mm和10mm。

上塔柱采用单箱三室结构。高程为+62.100～+337.916m，截面尺寸由11.346m×15.606m（横桥向×顺桥向）过渡到7.690m×16.200m。横向壁厚1.2m、1.4m，纵向壁厚1.0m、1.2m、1.6m，如图1b所示。塔柱均设置钢壳壁板单元，其中外侧钢壳18mm，内侧钢壳10mm。

下塔柱采用单箱三室结构。其中，下塔柱高程为+6.000～62.100m，截面尺寸由12.09m×16.89m（横桥向×顺桥向）过渡到11.346m×15.606m，下塔柱范围内横向壁厚1.2m、1.4m，纵向壁厚1.0m、1.2m、1.6m，如图1c所示。塔柱均设置钢壳壁板单元，其中外侧钢壳18mm，内侧钢壳10mm。

3　主塔钢壳壁板单元构造及制造工艺流程

主塔钢壳壁板单元制作工艺流程如图2所示。主塔钢壳壁板单元主要有内壁板及外壁板，两者均由壁板、竖向肋、横向肋、竖向钢筋、横向钢筋及剪力钉等组成，主要区别在于内壁板壁厚10mm、外壁板壁厚18mm，两者之上的横纵肋厚度因壁厚不同而稍有不同，对应的加劲肋板厚分别为18mm

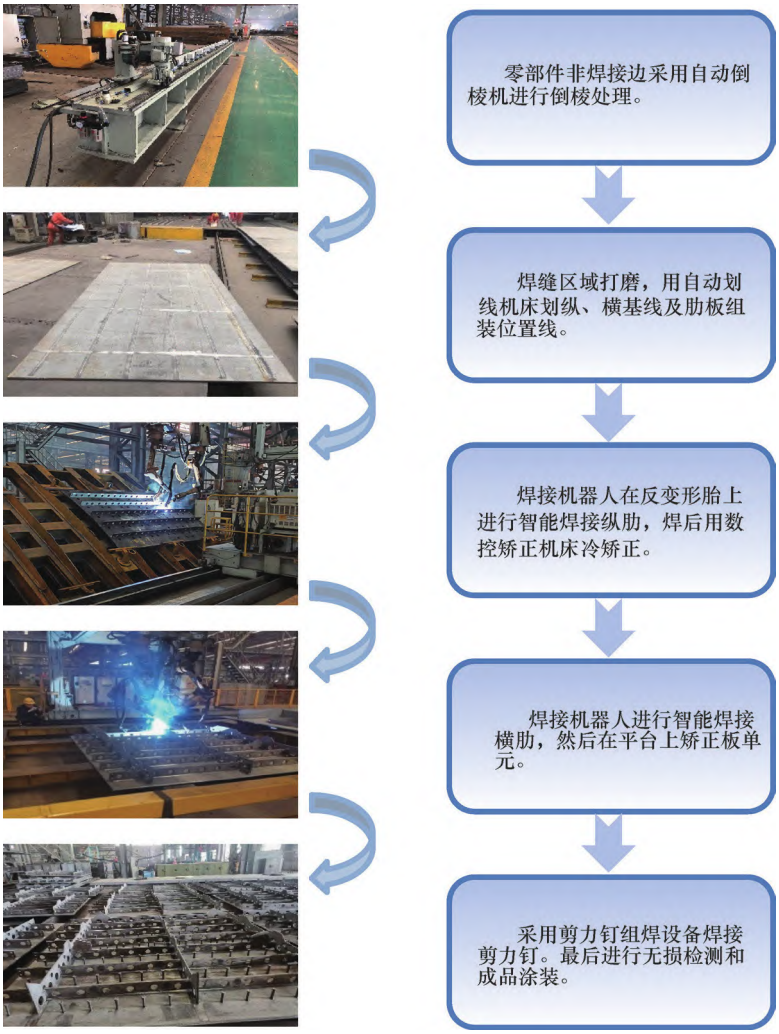


图2　主塔钢壳壁板单元制作工艺流程

和10mm，但制作工艺基本相同，包括下料、对非焊接边倒棱、待焊缝区域打磨和划组装线、纵向加劲肋组装焊接、板单元冷矫正、横向加劲肋组装焊接、剪力钉焊接、焊缝检验及涂装。

4 主塔钢壳壁板单元外形控制要点及措施

内外壁板单元是主塔钢壳结构中数量最大的板单元，也是主塔钢壳的主体组成部分，其平面成形直接影响到主塔成桥质量及主塔外观。

内外壁板单元有如下结构特点。

1）面板厚度薄，其中外壁板面板厚度18mm，内壁板面板厚10mm，厚度越薄，板单元焊接时越容易变形。

2）面板上横肋板、纵肋板密布，焊缝多，焊接变形大。

3）面板上的横肋、纵肋属于细长零部件，切割下料时就容易产生变形。尤其是横肋，外形复杂，其上既有角钢连接角点的凸起，又有钢筋过肋孔，切割时极易变形。如果横肋、纵肋变形，相当于给内外壁板增加了初始变形量，加大了壁板控制变形的难度。

为保证内外壁板成品的平面度，从3个方面加以控制：一是在壁板零部件切割前以及切割过程中降低变形量；二是在壁板组装、焊接过程中控制变形量；三是在壁板单元组焊完成后，采用先进手段矫正变形。具体措施如下。

1）用于壁板下料的钢板在预处理前赶平，严格控制钢板平面度。

2）采用先进的数控激光切割机下料，切割速度快，切割面质量好、精度高，且可以最大限度地减少变形。

3）纵肋组装时采用板肋自动组装机进行组装，严格控制板肋与面板间的组装间隙，同时板肋采用机器人自动定位焊。

4）壁板采用焊接机器人配合反变形船位焊接，通过电弧跟踪技术，减小焊接变形，焊后壁板温度冷却至室温进行松卡，保证焊接质量。

5）采用板单元冷矫机床矫正，通过图像识别、智能感知来检测板单元焊后平整度，并进行自动化机械矫正，确保矫正后板单元平面度≤1mm。

6）板单元接宽后，使用自动打磨机打磨壁板外表面对接焊缝，确保壁板平面整体匀顺。

5 主塔钢壳壁板单元制造工艺优化

5.1 数控激光切割下料

在以往的项目中采用火焰切割机和等离子切割机对钢板进行切割下料。火焰切割机使用天然气能耗高、颗粒物和熔渣产生量大，切割精度低、工件热变形大，需要后期进行钢板赶平或反复进行手工火焰矫正才可进行下工序作业，造成能源二次浪费，同时也会产生污染物；等离子切割机切割速度快、热形变量较低，但切割面较粗糙，切割过程颗粒物和熔渣产生量较大，等离子切割下料后的板材打磨工作量较高，浪费能源，同时也会产生污染物。

针对狮子洋大桥主塔钢壳壁板单元为板厚20mm以下薄钢板的特点，引进激光切割技术。

激光切割技术具有以下特点。

1）热量集中，切割缝宽度小，可减少材料浪费，降低使用成本。

2）免人工匹配参数：板厚3～20mm的多种坡口加工工艺自动匹配。

3）免示教：一次拍照定位坡口，自动切割精度可达1mm。

4）轻量化横梁：轻量化设计，可定制幅面，机床能够获得更高的加速度和速度，最大加速度1g（9.8m/s^2）；单轴最大速度80m/min。

5）减少工序：最大45°范围内不同类型、不同角度坡口一次成形。

6）实现复杂坡口零件的高效自动化切割，矩形、圆形、弧形等异形均适用。

7）切割速度快，切割线垂直度好，切割面更光滑。

8）集成抽风，更省空间，除尘效果佳。

9）切割烟尘小，更绿色环保。

5.2 钢板切割外形尺寸预留变量研究

焊接作为桥梁钢结构的主要连接方式之一，在焊接过程中，板材会因热胀冷缩产生收缩变形，造成杆件实际尺寸与设计尺寸之间的偏差，因此在壁板单元下料时，要考虑焊接和矫正造成的收缩变形量。经过多次试验，对其长度和宽度测量数据进行统计分析，焊接变形差见表1。

表1　焊接变形差　（mm）

杆件	设计数值		测量数值		偏差值		偏差均值	
	长	宽	长	宽	长	宽	长	宽
板单元	4796	2733	4794.5	2732.0	−1.5	−1.0	−0.9	−0.7
	4796	2733	4795.5	2732.5	−0.5	−0.5		
	4796	2733	4795.0	2732.5	−1.0	−0.5		
	4796	2733	4795.5	2732.0	−0.5	−1.0		
	4796	2733	4795.0	2732.5	−1.0	−0.5		
	4796	2733	4795.0	2732.0	−1.0	−1.0		
	4796	2733	4795.0	2732.5	−1.0	−0.5		
	4796	2733	4795.0	2732.5	−1.0	−0.5		
	4796	2733	4795.5	2732.5	−0.5	−0.5		
	4796	2733	4795.0	2732.5	−1.0	−0.5		
肋板	2733	278	2732.0	278.0	−1.0	0	−0.8	−0.4
	2733	278	2732.0	277.5	−1.0	−0.5		
	2733	278	2732.0	277.5	−1.0	−0.5		
	2733	278	2732.5	278.0	−0.5	0		
	2733	278	2732.5	277.5	−0.5	−0.5		
	2733	278	2732.0	277.5	−1.0	−0.5		
	2733	278	2732.5	277.5	−0.5	−0.5		
	2733	278	2732.5	277.5	−0.5	−0.5		
	2733	278	2732.0	278.0	−1.0	0		
	2733	278	2732.0	277.5	−1.0	−0.5		

由表1可知，在实际工程中，因为焊接会产生变形，所以板材尺寸或多或少也会产生相应的变化，在后续的桥梁拼装中导致焊缝宽度变大。焊接时引起的焊接变形和焊接应力，对后续焊接质量也会造成影响，因此应根据统计数据变化规律，在桥梁拼装杆件的焊接过程中预留出因焊接变形而导致的板材尺寸变化量，避免二次切割。

5.3　吸尘推车打磨板单元

为了提高壁板单元上纵向加劲肋待焊接区打磨精度、效率，改进了打磨吸尘推车（见图3）。打磨吸尘推车采用红外线激光笔作为导向机构，将激光笔安装在砂轮防护罩的中间即对应打磨轮的厚度中心位置，打磨时控制红外激光笔的“十字”处于钢板需要焊接位置的中线上，便能有效控制打磨时的直线度，从而实现对待焊接位置的有效打磨。此外，为了充分发挥离心风机的吸尘作用，进风口与千叶轮保护罩密封连接，在排风口设计制作一个集尘箱，箱内装有涤纶针刺毡除尘布袋，用于过滤灰尘。依靠风机的强劲吸力和布袋的良好过滤，能够消除打磨作业时产生的70%以上的灰尘，使用效果极佳。

图3　打磨吸尘推车

5.4　板单元冷矫正

热矫正钢材时，高温区金属膨胀，受低温区金属限制，交界处组织受压；当加热区冷却时，交界处因组织收缩而产生拉应力，若拉应力超过钢材的

屈服强度，则会产生反方向变形，从而达到矫正变形的目的[6]。另外，钢材经过高温加热，高温区组织晶粒长大，对钢材力学性能产生影响。因此，热矫正规定了最高加热温度，以避免材质性能发生变化，且在高温区避免急冷，防止淬硬组织的产生[7]。

为了不改变钢材原有的材质，在壁板单元制造过程中采用了板单元冷矫正技术，引进了板单元数控冷矫正机床设备，其具体技术特点如下。

1）通过图像识别，智能感知检测板单元焊后平整度，进行自动化机械矫正。

2）板单元具有平整度自动检测、矫正功能，改善施工环境。

3）液压自动定位、压紧，能够精确完成板单元矫正。

4）确保矫正后板单元平面度达到1mm以内。

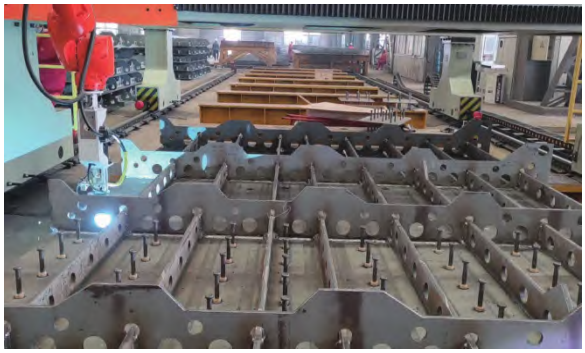
板单元数控冷矫正机床（见图4）适用于工件长度为5～18m、宽度为1700～4500mm、厚度＜60mm的板单元，其产能大于18块/班，比热矫正工艺提高生产效率3倍以上。

图4　板单元数控冷矫正机床工作实景

5.5　智能剪力钉焊接机器人系统

钢壳壁板单元上分布有大量剪力钉，内壁板上剪力钉直径为10mm，外壁板上剪力钉直径为19mm。针对壁板上剪力钉焊接研发了智能剪力钉焊接机器人系统，如图5所示。智能剪力钉焊接机器人系统设备采用数控龙门、工业机器人系统集成及工业视觉等技术，配合专用控制软件，可完全取代人工，实现焊接区自动除锈、自动定位、焊钉和瓷环自动上料并配套、自动焊接的全自动作业流程，适用于大批量焊钉的焊接施工。

（1）桥梁钢结构板单元上圆柱头焊钉高效智能



a）机器人激光除锈

b）机器人焊接剪力钉

图5　智能剪力钉焊接机器人系统实景

化焊接技术　焊钉智能化焊接机器人系统的研发和应用，填补了桥梁钢结构制造领域圆柱头焊钉智能化焊接的空白，促进桥梁钢结构领域的焊钉焊接设备升级换代，提高圆柱头焊钉的焊接质量和生产效率，可减少人工焊接操作质量不稳定问题，大大降低了焊钉补焊、返修焊的数量。

（2）钢板表面圆柱头焊钉待焊接部位高效智能化激光除锈技术　圆柱头焊钉焊接前，待焊部位一般采用砂轮手工打磨，打磨效率低，打磨质量不稳定。

桥梁钢结构板单元或板件上钢板表面上待焊接部位采用高效智能化激光除锈技术，打磨位置能精准定位，打磨面积大小可控，打磨质量从始至终一样，减少人为因素影响，便捷高效。另外，采用激光除锈，避免了机械打磨产生的噪声，改善了劳动条件。

5.6　钢塔板单元接宽制作工艺

为提高节段整体组装效率，同一平面内的壁板单元首先在胎架上“三拼一”。需要接宽的内外壁板单元，一般由中间和两侧共计3块壁板单元组成。板单元对接预先设置反变形，采用埋弧焊机或自动

化焊接机器人焊接，焊后将焊缝外表面打磨平顺。

壁板单元接宽制作工艺流程如图6所示。

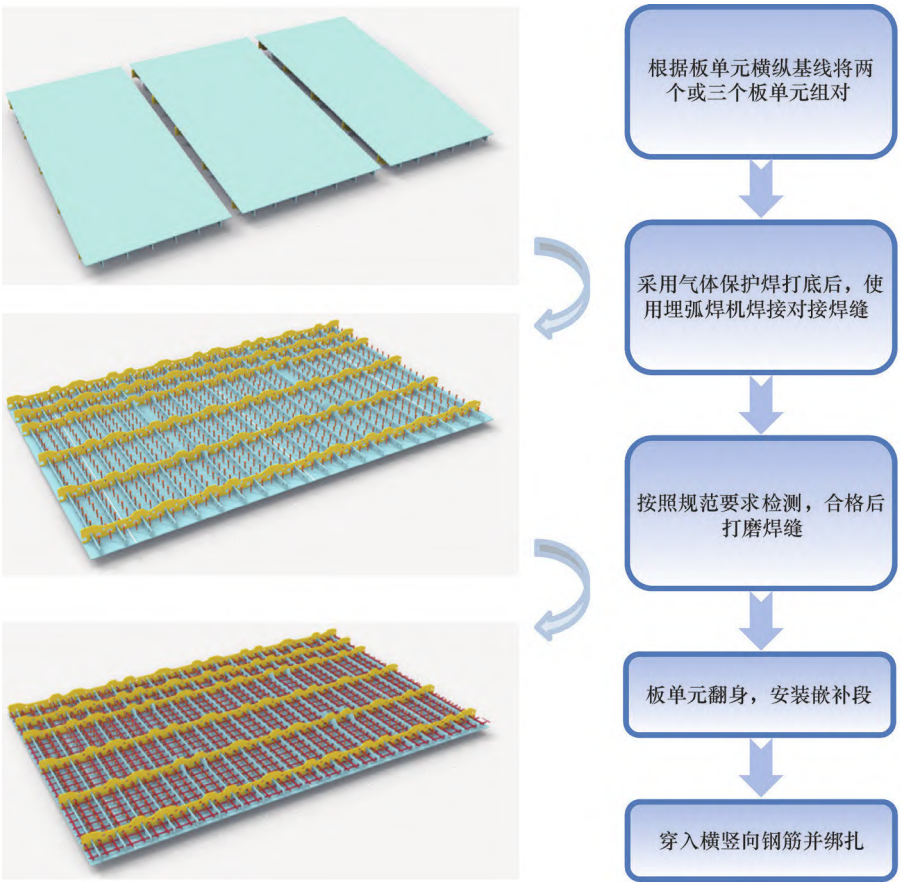


图6　壁板单元接宽制作工艺流程

6　结束语

本文通过对狮子洋大桥主塔钢壳壁板单元的制造工艺进行研究，得出如下结论。

1）针对薄壁钢塔壁板单元的制造工艺进行了研究和技术升级，阐述了薄壁型板单元制造过程中的控制要点及其工艺优化措施。

2）采用数控激光切割下料、钢板切割外形尺寸预留变量、打磨吸尘推车设备，以及智能剪力钉焊接机器人系统等新工艺和装备，取得了技术突破，提升了钢塔壁板单元的制造技术。

3）通过主塔钢壳薄壁板单元的工艺研究，各个控制要点和措施均精确有效，制造质量满足行业相关规范要求，为类似钢结构的制造积累了宝贵经验。

参考文献：

[1] 程龙. 东丰路立交桥钢塔制作工艺研究：“《工业建筑》2018年全国学术年会”论文集（下册）[C]. 北京：工业建筑，2018.

[2] 齐浩，杨永强，陈正. 朝阳钢塔制作技术[J]. 钢结构，2016，31（4）：79-81.

[3] 朴泷，周高明，张兴致，等. 港珠澳大桥九洲航道桥钢塔制作技术优化及创新[J]. 钢结构，2016，31（8）：75-80.

[4] 潘丽婷，陈珊珊. 柳州市白沙大桥钢塔制作工艺研究[J]. 钢结构，2017，32（5）：77-80.

[5] 朱庆菊，潘子剑，徐向军，等. 大型斜拉桥钢塔节段间对接焊缝试验研究：“2023年全国建筑钢结构科技创新大会”论文集[C]. 北京：施工技术（中英文），2023.

[6] 马德志，段斌，刘景凤. 钢结构焊接标准（GB 50661）应用指南[M]. 北京：化学工业出版社，2017.

[7] 白晓科，程尚华，王旭. 钢结构热矫正工艺评定试验方法研究[J]. 电焊机，2024，54（5）：148-152.

MW 20241109