

Construction Technology of Ultra-thin Hyperbolic Fully Cast Steel Tower Structure

Yunchao Tian

Beijing E-town Services Group Co.,Ltd., Beijing 100000, China

Abstract: When constructing iconic buildings in urban squares or open spaces, there is a type of ultra-thin double curved fully cast steel tower structure that is recognized and widely promoted for its beautiful architectural design, reliable structural safety, and other advantages. Due to its limited application in the field of architecture, researching and summarizing the construction technology of this structure has progressive significance.

Keywords: Cast steel; Cast steel structure; Tower structure; Ultra-thin double curved surface; Multi curved surface steel structure; Construction technology

超薄双曲面全铸钢塔结构施工技术

田运超

北京亦庄城市服务集团股份有限公司, 中国 · 北京 100000

摘要: 在城市的广场或空旷地带修建标志性建筑时, 有一种超薄双曲面的全铸钢塔结构以其优美的建筑造型、可靠的结构安全性等优点而被认可和广泛推广, 由于此种结构在建筑领域应用较少, 所以对此种结构的施工工艺进行研究总结, 具有进步意义。

关键词: 铸钢; 铸钢结构; 塔结构; 超薄双曲面; 多曲面钢结构; 施工技术

1 前言

随着中国国内城市化建设发展, 为彰显城市文化、体现城市特色, 在城市广场或者空旷地带修建标志性建筑成为潮流, 有一种超薄双曲面的全铸钢塔结构以其优美的建筑造型、可靠的结构安全性在天津市文化中心建设方案中脱颖而出, 由于此种结构在建筑领域应用较少, 所以对此种结构的施工工艺进行研究总结, 具有进步意义^[1]。

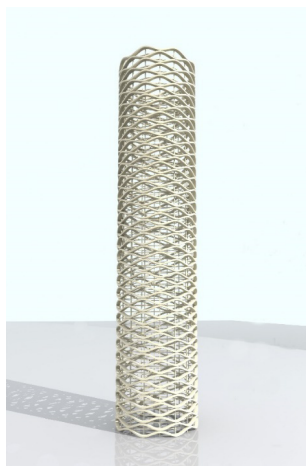


图1 双曲面铸钢结构效果图

本文以天津市文化中心迎宾塔工程为例, 参照图1, 塔体为超薄双曲面全铸钢塔结构, 通体直径12米, 高度61.66米, 由640个铸钢节点组成, 结构外形如图。因工程对结构质量和其观赏性要求极高, 所以如何组织此种新型结构的施工, 完善的施工工艺至关重要。

2 工程难点

- 1) 超薄双曲面铸钢件变形较高, 铸件精度难以满足工程安装要求, 铸钢件表面粗糙不美观。
- 2) 双曲面形状拼装难度大, 由于构件尺寸误差, 难以确定基准尺寸面。
- 3) 工期紧张, 高空作业面小, 高空散装方法不适用。

3 工程特点

- 1) 通过反复矫正与热处理工序, 克服超薄双曲面铸钢件变形的缺点。
- 2) 通过对机加工工艺的引用, 即可保证铸钢外表面的美观, 又能保证其尺寸精度。
- 3) 利用设计的拼装平台, 以机加工平面为基准面将铸钢件精确定位。
- 4) 地面组装, 单元整体吊装, 高空就位微调。

4 工艺原理

铸钢构件铸造完成以后,通过矫正与热处理工序,使铸钢构件在保持其初始应力状态的同时,构件几何尺寸能够达到规范要求^[2]。

利用三维数控铣床对铸钢构件外表面进行机加工处理,克服铸钢构件表面粗糙不平的不足,使外表面美观平整,同时利用数控铣床机加工工序保证构件外表面轮廓弧度与尺寸的精度。

在施工现场设计搭设吊装单元的拼装平台,以铸钢构件外表面为基准面,利用线锥将铸钢构件外表面投影到拼装平台上以控制构件水平面方向位置,用水平尺控制构件的垂直方向位置,然后利用拼装平台的定位微调装置将构件进行微调与定位,定位完成后进行吊装单元内节点的焊接。

单元整体吊装,利用限位斜铁对单元进行辅助对接,单元就位以后再对单元圆度、及轴线尺寸进行微调。

5 施工方法

5.1 施工工艺流程

图纸深化—铸钢节点三维建模—铸钢构件铸造—铸钢构件尺寸矫正与热处理—构件外表面机加工—酸洗与热镀锌—铸钢节点拼装定位—铸钢节点焊接—吊装单元防腐—吊装单元起吊与微调就位—单元焊缝焊接—支撑体系及附属构件安装—面层涂饰—沉降观测。

5.2 关键工序施工要点

5.2.1 铸钢构件尺寸矫正与热处理

①铸钢节点尺寸矫正

每个铸钢节点在铸造的过程中,构件内部应力从不同方向释放,由于构件自身双曲、壁薄且尺寸长等特点,就会造成构件有不同程度的变形^[3]。出厂铸钢构件的精确度,直接影响着其表面的机加工及拼装、安装质量,所以铸钢构件精确矫正是非常重要的环节。构件在浇筑完成后,必须严格按照图纸的尺寸、弯曲度进行检测,符合要求的构件可进行下一道工序,不符合要求的铸钢件做好标记,进行矫正。

根据铸钢件自身的特点专门设计、制作了铸钢件矫正胎具。矫正胎具由液压千斤顶和钢结构支撑架构成,主要工作原理就是将铸钢件用吊起,放至安装好的矫正平台上,矫正平台支撑钢柱根据铸钢节点图纸模型而成弧线布置,所以理论上铸钢件放置矫正平台上时,若是合格的,就应该彼此吻合,否则就要用液压千斤顶进行施压使其相符。(如图2)。



图2 铸钢构件现场矫正照片

②热处理

由于矫正的过程是用外力强行使铸钢构件产生变形的过程,此过程改变了铸钢节点的初始应力状态,所以在构件矫正以后需对其进行热处理,目的是消除铸态组织、细化晶粒、消除铸造应力、回复初始应力状态,保证铸件的力学性能。经热处理后,对G20Mn5材质的随炉试样的力学性能应达到如下表(1)的要求。

表1 力学性能标准

热处理 状态	屈服强度	抗拉强度 $\sigma_b(N/mm^2)$	伸长率 $\delta_5(\%)$	冲击功 $A_{kv}(J)$		
				室温	-30℃	-40℃
正火 N	≥ 300	480~620	≥ 20	50	27	

热处理的原理是将铸钢构件加热至630—700℃的高温以后,再缓慢冷却至常温的过程,在加热过程中,铸钢构件由于其双曲面超薄壁的特点,可能会产生变形,在经过热处理以后,依然需要对铸钢构件的尺寸进行校验,对变形较大的构件进行矫正,一般铸钢构件的矫正与热处理需循环2至3次,才能达到理想的效果。

5.2.2 构件外表面机加工

铸钢构件铸造完成后,为保证铸钢构件外表面的平整美观,解决铸钢构件表面粗糙、凹凸不平的问题,同时为了保证外表面弧度的精准度,为拼装、安装创造良好条件,可以引入机加工的加工工艺,利用三维数控铣床进行机加工处理,确保美观及尺寸精度,参见图3。



图3 铸钢构件表面机加工照片

5.2.3 铸钢节点拼装定位

①工作台设计

钢平台制作完成后,安装定位钢立柱,定位钢立柱的作用是支撑铸钢节点,固定铸钢节点并定位铸钢节点,钢立柱及微调装置如图。

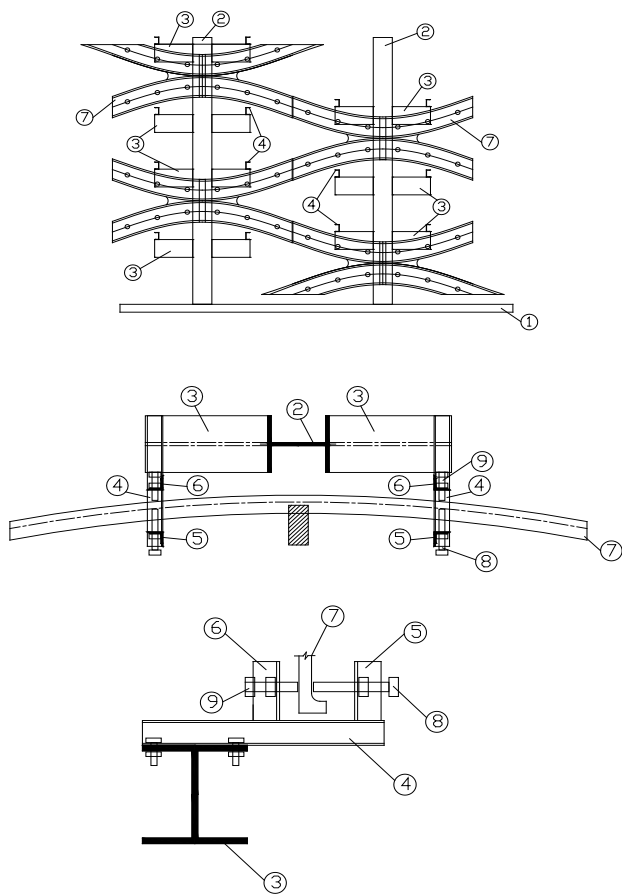


图4 工作台结构示意图

图中:1—钢平台;2—钢立柱;3—横向钢梁;4—水平支撑;5—内调整支座;6—外调整支座;7—铸钢节点;8—内侧调整顶丝;9—外侧调整顶丝。

工作台的设计思路意在固定铸钢构件,并在每一个固定点安装调整顶丝,以实现构件轴向、环向、标高三个方向空间位置的调节^[4]。

②铸钢节点拼装定位施工

在工作台上标定结构中心,同时在工作台上测绘结构水平面投影图、轴线、标高,构件安装过程中利用机加工的外轮廓为构件基准,通过定位钢柱上的限位调节顶丝,前后、上下调节,利用激光准直仪将其铸钢构件平面投影与工作台投影图案重合,同时控制构件的标高,即达到完全空间定位。

每个吊装单元共有32个铸钢节点,分为4层,每层为8个,拼装时采取逐个逐层向上的拼装方式,即先将首层的8个节点逐个上胎定位固定,再将第二层

的8个节点逐个上胎定位固定,直至将32个节点全部上胎定位固定完成。

其中首层8个节点的定位最为重要,首层8个节点为基准层,轴线必须定位准确,底平面必须水平。因钢平台已经找平,底平面找平较容易,只要保证节点下部两个分肢距平台的高度一致,即保证了水平。轴线定位使用传统的吊线坠方法在此不适用,因铸钢节点不规则,线坠无法找到中线,可使用激光标线仪,将激光标线仪放置在平台的圆心处(轴线交点),将激光对准轴线放射至节点上,使节点的中线与激光线重合,即保证了轴线的准确,如图5。



图5 首层铸钢构件装配照片

轴线与标高定位准确后,定位节点的外轮廓线,即可通过定位钢柱上的限位调节顶丝,前后调节,将节点外表皮调整至与平台上的外轮廓线重合,即达到理论的空间位置,节点已被完全空间定位。

二层及以上三层节点的轴线定位方法同首层节点的轴线定位方法,使用激光标线仪。标高的定位方法则不同,因为首层节点的标高已经调整到位,后三层只需在首层的基础上拼装即可,为快速施工,制作简易的托架,即在首层已定位的节点上的上两肢的下口焊接角钢,角钢一半与节点焊接,另一半则悬空,在上层的节点落位时,直接落位于角钢上,即直接调整了标高,也完成了对口的工作,如图6。



图6 第二层铸钢构件装配照片

5.2.4 单元吊装与就位

① 吊装单元受力分析

由于起重吊装过程中的受力与结构自身受力性能不同,单元吊装前必须进行吊装工况的模拟分析,来确定一个适合的吊装方法^[5]。选取荷载最大单元进行受力分析,段单元构件可采用梁单元,吊索采用索单元,单元整体吊装宜采用平衡梁,减少吊索对吊装单元的受力影响。

受力分析结果应满足单元结构强度、刚度、稳定性要求,同时吊装方案应争得设计单位同意。

② 吊装单元就位

单元用塔式起重机缓慢起吊至安装平台上方后,即开始就位工作,每个吊装单元下端有16个分肢,要与平台上前个单元的16个分肢对接安装,单元因直径大较软,直径不均匀,对接难度很大,若单纯依靠起重机将单元完美对接,偶然性太大,成功率低,必须要使用工装辅助对接,在本工程中,使用了限位斜铁,限位斜铁与单元外表皮呈锐角,限位斜铁在就位之前先与下部结构点焊牢固,在16个分肢上全部焊接限位斜铁;吊装单元落位时,仅需落位在限位斜铁的范围,通过构件的自重,顺着斜铁的锐角往下滑,直至完全落位。通过限位斜铁的使用,大大简化了就位施工,可操作性好,安全性高且精度高,起到了决定性的作用。

单元就位后,还需进行调整,达到设计位置,调整的内容主要是单元的直径圆度、层水平度及轴线,保证了这三项内容就能保证整体的垂直度及总高度。

吊装单元直径圆度调整措施:首先从8个轴线方向用钢盘尺测量直径,若直径存在偏差,将直径偏大处设临时轮辐,用倒链调节直径,全部调节完成后,立即安装轮辐,即可将直径圆度进行固定,达到最终形态。

每一层单元的安装面必须保证水平,否则后安装的单元易产生倾斜,层数越多,倾斜偏差越大,导致不可挽回,所以安装面的水平调整势在必行;有条件可采用电子仪器测量,简易可采用水平管进行测量,以最底点为基准面,其它点则通过切割等调低标高,达到水平的目的。

轴线的测量调整尤其重要,塔本身是观赏性建筑,镂空及钢柱必须要保证在同一条垂直线上,以保证整

体的美观,在地面拼装时,已用激光标线仪将胎架上的8组轴线反射于单元上,并留下标识,在高空安装时,只要保证上下两个单元的8组轴线竖向重合即达到轴线的统一,轴线测量使用水平尺或铅垂仪。

5.3 质量控制要点

工程质量的重点控制环节:

- 1、深化设计和详图设计的设计质量;
- 2、原材料的质量控制;
- 3、铸钢件的尺寸精度;
- 4、铸钢件的表面光洁度;
- 5、铸钢件的防腐镀锌质量;
- 6、铸钢件的变形控制;
- 7、胎具上的拼装精度;
- 8、胎具上的焊接质量与变形控制;
- 9、吊装过程对单元结构刚度的控制;
- 10、高空组装拼装精度及焊接质量的控制;

6 结束语

超薄双曲面铸钢塔结构施工工艺是一项复杂而精细的工程技术,通过本文对其深入研究与分析,我们系统地阐述了从铸钢材料选择、构件制造到现场安装的全过程关键技术要点。在实际施工过程中,严格把控每一个环节,遵循相关规范与标准,才能确保铸钢塔结构的施工质量、安全性与稳定性,满足工程设计要求并保障其长期可靠运行。随着科技的不断进步与工程实践经验的积累,此施工工艺将持续优化与创新,为未来更高、更复杂的异形结构建设提供有力支撑,推动建筑钢结构领域向更高水平发展。

参考文献

- [1] 曾树佳,韩靖,黄志超.空间双曲面钢结构安装施工技术[J].科学技术创新,2023,(22):150-153.
- [2] GB 50205-2020,钢结构工程施工质量验收标准[S].
- [3] 辛建鑫,贾利刚,吴俊华,等.八面渐变超高层钢结构高精度测量技术[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2023年全国土木工程施工技术交流会论文集(中册).中建八局第一建设有限公司,2023:4.
- [4] 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(05):148-152.
- [5] 钟超信.浅谈数控机床加工钢结构之椭圆曲线的方法[J].中国金属通报,2018,(02):100.