

钢结构管状互联节点制造技术

胡海国

(江苏沪宁钢机股份有限公司,江苏 宜兴 214231)

[摘要] 结合树根互联全国总部大厦项目,对管状互联节点柱结构进行了分析,详细介绍了展示级管状互联节点结构特征和加工制作变形的控制难点,并经过工厂的生产实践,总结出一种技术实践性较强、精度控制高的加工制作变形控制新工艺,确保了项目节点顺利实施。

[关键词] 钢结构;管状互联节点;铸钢模具;设计;加工;变形;热压成型

[中图分类号] TU974

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0136-08

Manufacturing Technology of Tubular Interconnection Node in Steel Structure

HU Haiguo

(Jiangsu Huning Steel Machinery Co., Ltd., Yixing, Jiangsu 214231, China)

Abstract: Combined with Root Interconnection National Headquarters Building project, the structure of tubular interconnection node column is analyzed. The structural characteristics of display-level tubular interconnection node and the control difficulties of processing and manufacturing deformation are introduced in detail. Through the production practice of the factory, a new process of processing and manufacturing deformation control with strong technical practicality and high precision control is summarized, which ensures the smooth implementation of the project node.

Keywords: steel structures; tubular interconnection nodes; cast steel mould; design; processing; deformation; hot press processing

1 工程概况

“双子星”项目(三一集团华南总部、三一华南总部项目)位于广州市海珠区琶洲西区,项目北侧为琶洲北大街,南侧为琶洲大街西,西侧为磨碟沙路,东侧为海洲路。本项目包含2栋对称布置的办公与公寓混用塔楼及连接塔楼3~5层的商用裙楼,项目以规划的北纵四路为界划分为西侧的AH040125地块和东侧的AH040126地块,其中125地块面积为5 872m²,为三一华南总部项目;126地块面积为5 084m²(含裙楼),为三一集团华南总部项目。

2座塔楼建筑平面均为带有切角的正方形(见图1)。塔楼第10层及以下每层楼板均与周边框架柱连接。楼板平面尺寸从第10层至第5层递减,从第5层至地面递增,以在第5层形成收腰的美感。

因布置有六边形框架系统,塔楼第10层以上由2组5层楼模块交替组成。每一模块均由最上层的节点楼层及节点楼层下方建筑平面递减的4层中间楼层组成。4层中间楼层由吊柱从上方节点楼层吊起,节点楼层周边布置有景观花台。



图1 建筑整体效果

Fig. 1 Overall effect of the buildings

2 结构简介

本项目包括2座塔楼和连接2座塔楼的裙楼结构。塔楼地下共4层,为混凝土框架结构。2座塔

楼结构相似,均采用由混凝土核心筒及周边六边形网格框架结构组成的双重抗侧力系统。周边六边形网格框架结构由钢管混凝土柱、节点楼层的 H 形抗弯框架梁、延性连接节点构成,框架梁的典型跨度有 3.2,12.8m 2 种(见图 2)。

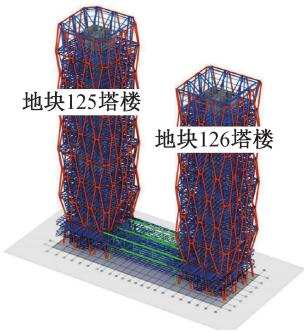


图 2 塔楼整体结构
Fig. 2 Overall structure of the towers

角部外框钢骨柱出 F1 层后分叉成 2 根 $\phi 1\ 200\times 30$ 钢管柱,中部外框钢骨柱出 B1 层后即分叉成 2 根 $\phi 1\ 200\times 30$ 钢管柱,共分叉出 24 根斜交钢管柱,钢管柱规格由下往上依次为 $\phi 1\ 200\times 30$, $\phi 1\ 100\times 30$, $\phi 1\ 100\times 20$, $\phi 1\ 100\times 18$,材质为 Q390C 钢。斜柱立面与竖直线夹角为 12.04° ,斜柱交汇处采用斜立面脉动曲线节点设计(共 108 个),标准层节点间高差 22.5m,首个节点层高度 29.4m(见图 3)。

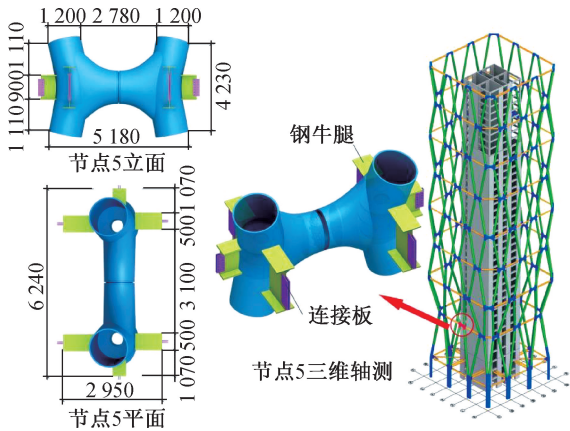


图 3 管状互联节点位置效果

Fig. 3 Position effect of tubular interconnection node

3 管状互联节点柱结构分析

分析了本项目结构特性,管状互联节点是本项目中最主要的竖向承载及横向传力结构,是本项目施工的重难点;管状互联节点加工制造品质的优劣,将直接关系到工程安装和整体项目的品质效果(见图 4)。

由拆分节点结构可知,节点处采用管状双曲蝶形连接转换节点,本节点由多向扭曲型曲面构成;

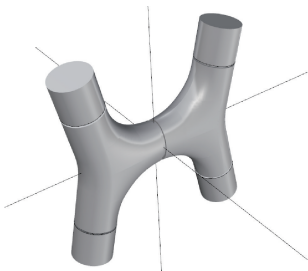


图 4 管状互联节点结构
Fig. 4 Structure of tubular interconnection node

同时,本节点的加工外观质量要求达到建造外漏结构钢 AESS4 的标准,相比于一般节点的要求更高。所以采取何种加工技术提高钢柱节点构件的加工制造质量精度,是达到工程设计和安装需求的关键点;本节点的加工精度、焊接质量和整体外观质量,是本项目加工控制的重中之重(见图 5)。

为了响应国家号召,提倡绿色建筑、减少碳排放量,大胆创新,将铸钢件节点优化改制为钢结构节点。此方法既大大减少了钢材用量,又提升了制造效率,使工期明显缩短。由于本节点的特殊性,再结合以往类似管状节点的加工制作经验,先将此节点沿中轴线划分为左、右 2 个对称节点(见图 6)。

在充分考虑到节点受力和加工制造的合理性前提下,同时尽量减少纵、横向焊缝数量,综合分析此节点采用马鞍形划分法;将此节点划分为 1 个弧形弯管和 1 个管状互联节点(见图 7)。

考虑到管状互联节点复杂可塑性,故而将划分的管状半蝶形节点利用 Rhino 软件进行实体建模,并沿其本体中轴线优化外形结构尺寸,使其沿本体中轴线两两对称,划分为 4 块马鞍形扭曲板(见图 8)。此划分方法既使管状互联节点由不可加工状态转变为可加工状态,又由于加工节点板是两两对称,减少了加工难度,提升了工效。

此划分法外形结构较合理,更有利于节点的成型制造,构件加工成型质量更为可控、加工操作更便捷;而且管状蝶形划分法使得整体结构更加稳固,更有利于建筑整体结构稳定性。

4 管状互联节点制作难点

本节点采用弧形的大截面厚壁钢管,钢管间采用马鞍形双曲连接体,在连接体中部采用高强螺栓消能连接形式,节点材料强度高,采用 Q390C 钢,节点大样如图 9 所示。

马鞍形扭曲板自身双重过渡曲面,不仅外形加工成型难度极大,而且制作时要保证构件精度更是难上加难。一般的冷加工工艺根部无法将其加工成型。

展示级外观质量要求
Rich Experience in Visual Quality of Show Case

AESS各级质量标准要求信息对照表

Category	目录	AESS C Custom elements	AESS4 Showcase elements	AESS 3 Feature elements	AESS 2 Feature elements	AESS 1 Basic elements	SSS Standard structural steel
Characteristics	特性规定:	客户定制要求		Viewed at a distance < 6 m	Viewed at a distance > 6 m		NZS 3404.1
1.1	Surface preparation to Sa2 to AS 1627.4	1.1 表面达到AS 1627.4的Sa2级;	√	√	√	√	
1.2	Sharp edges ground smooth	1.2 锐边打磨无棱;	√	√	√	√	
1.3	Continuous weld appearance	1.3 焊缝表面连续性要求;		√	√	√	
1.4	Standard structural bolts	1.4 焊接飞溅清除;	√	√	√	√	
1.5	Weld spatters removed	1.5 标准结构螺栓;	√	√	√	√	
2.1	Visual samples	2.1 需有参考外观样品;	Optional	Optional	Optional		
2.2	One-half standard fabrication tolerances	2.2 验收尺寸偏差减半;	√	√	√	√	
2.3	Fabrication marks not apparent	2.3 加工痕迹不明显要求;	√	√	√		
2.4	Welds uniform and smooth	2.4 焊缝外观统一无棱;	√	√	√		
3.1	Mill marks removed	3.1 清除轧制痕迹;	√	√	√		
3.2	Butt and plug welds ground smooth and filled	3.2 对接及塞焊缝打磨、磨平;	√	√	√		
3.3	RHS/CHS weld seam oriented for reduced visibility	3.3 降低矩形管/圆管焊缝的能见度	√	√	√		
3.4	Cross-sectional abutting surface aligned	3.4 中心对准要求;	√	√	√		
3.5	Joint gap tolerances minimised	3.5 接头间隙最小要求;	√	√	√		
3.6	All welded connections	3.6 全焊接连接;	Optional	Optional			
4.1	RHS/CHS seam not apparent	4.1 矩形管/圆管纵缝不明显要求;	√	√	√		
4.2	Welds contoured and blended	4.2 焊缝平顺过渡融合外形要求;	√	√	√		
4.3	Surfaces filled and sanded	4.3 表面腻子修复处理;	√	√	√		
4.4	Weld show-through minimised	4.4 降低焊缝可见度;	√	√	√		
Sample use/ 适用范围		Elements with special requirements	Showcase or dominant elements	Airports, shopping centres, hospitals, lobbies	Retail and architectural buildings viewed at a distance	Roof trusses for arenas, retail warehouses, canopies	
Estimated cost premium/ 估计成本		Low to high (20-250 %)	High (100-250 %)	Moderate (60-150 %)	Low to moderate (40-100 %)	Low (20-60 %)	None 0%

图 5 展示级外观质量要求

Fig. 5 Display-level appearance quality requirements

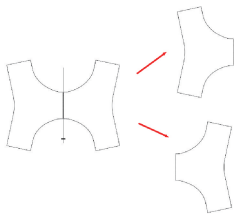


图 6 中轴线对称划分

Fig. 6 Symmetric division of central axis

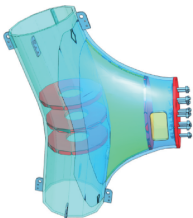


图 9 管状互联节点结构模型

Fig. 9 Structural model of tubular interconnection node

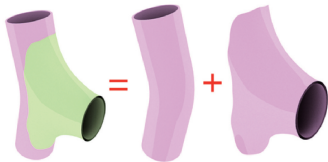


图 7 马鞍形划分

Fig. 7 Saddle-shaped division

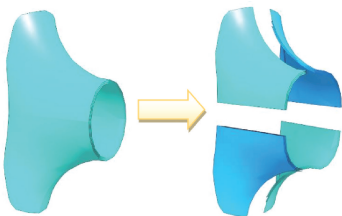


图 8 马鞍形节点划分

Fig. 8 Division of saddle-shaped node

5 管状互联节点制作方案

为了保质保量完成节点板加工成型,突破性设计了大型空间马鞍形铸钢模具,并研发了一次性热压成型技术。此成型方法在国内钢结构行业属于

首创。

5.1 铸钢模具设计及制造

本着精益求精、打造精品工程的理念,决定再次提高本项目的加工制作精度,结合初次加工试验经验,设计并制造大型铸钢压制模具。

设计人员利用 UGNX 软件设计了铸钢模具模型,模具设计时以蝶形扭曲板的外表面为基准。铸钢模具的 4 个角尽量拉平至同一水平高度,用以减少压制行程、提升操作安全性。考虑到节能、便捷原则,在保证强度足够、可多次重复使用的前提下进行了掏空设计,大大减少模具的钢材用量。为了保证压制成型精度及外观光洁度,铸钢模具四周弧形过渡,并将弧形沿压制方向延长(见图 10)。

为防止模具压制时损伤母材,在铸钢模具上设计了限位装置,一旦压制行程超过母材板厚便直接卡死。为方便节点板定位,在下模设计时加设定位挡板,防止模具压制时节点板发生滑动现象。铸钢模具背面设计了通用底板,可互相调换使用,可以减少工装使用从而降低成本。

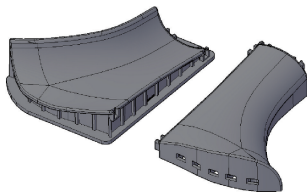


图 10 大型铸钢模具结构

Fig. 10 Structure of large cast steel mold

将模具 UGNX 模型导入大型 3D 打印机, 打印出消失模样板; 再将消失模样板转运至恒温机加工车间, 利用 CNC 精密加工, 保证模具的加工面误差 $\leq 0.1\text{mm}$ (见图 11)。



图 11 消失模

Fig. 11 Evanescent mold

铸钢模具基材选用优质铸造合金钢 G20Mn5Q, 此材质适用于厚壁铸件且力学性能优于其他合金铸件。为保证铸钢模具浇铸质量, 铸钢模具内部无气孔、夹砂, 故选用高压加密浇铸工艺。此工艺具有铸件成型精度高、内部质量好等特点(见图 12)。



图 12 模具浇铸

Fig. 12 Mold casting

待模具铸件自然冷却至室温后, 将其转运至恒温机加工车间, 对照设计的铸钢模具 BIM 模型, 再次利用 CNC 进行高精加工, 确保铸钢模具与设计图纸误差 $\leq 0.05\text{mm}$ (见图 13)。



图 13 模具机加工

Fig. 13 Mold machine machining

模具机加工完成后将铸钢模具表面浮锈、铁屑撇除, 并在其外表面加涂防锈漆, 压制加工面抹防锈润滑油(见图 14)。



图 14 铸钢模具

Fig. 14 Cast steel mold

铸钢模具加工制造完成后, 采用 3 种检验方法验证模具精准度, 即空间尺寸测量法、木模样板逐段检验法、美国天宝三维扫描对比法(见图 15)。

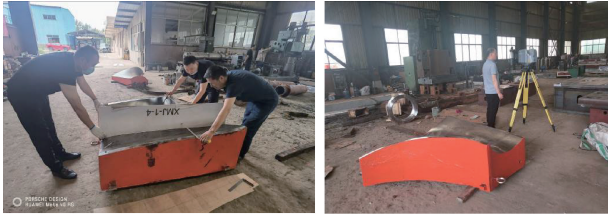


图 15 铸钢模具检测

Fig. 15 Cast steel mold detection

5.2 铸钢模具一次性热压成型

参照前期试验, 为提升蝶形扭曲板加工转运便捷性、压制加工中定位精度, 每块零件板下料时分别在零件板压制加工的进料、退料端加设定位吊装耳板(见图 16)。

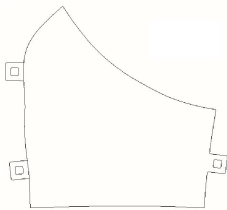


图 16 蝶形扭曲板下料

Fig. 16 Butterfly twisted plate blanking

将验收合格的铸钢模具加装可重复使用的工装底板, 并按技术人员提供的铸钢模具使用说明及工艺图用高强螺栓将铸钢模具与油压机工作平台固定。铸钢模具固定完成后进行空载试压, 检验铸钢模具的限位装置及安装精度, 并将铸钢模具安装位置精调(见图 17)。

根据前期试验的经验, 正式产品件加热时也选择加热至 900°C , 并保温一段时间保证每块产品板充分受热。产品件在加热平台上必须错开摆放, 保证每块产品件受热均匀(见图 18)。



图 17 铸钢模具安装定位

Fig. 17 Installation and location of cast steel mold



图 18 正式产品加热

Fig. 18 Formal product heating

正式产品件压制时一定要一次成型,当产品件表面温度 $<800^{\circ}\text{C}$ 时必须立刻停止压制,所以加热完毕的产品件由加热炉转运至压制平台 $\leq 10\text{min}$ 。对此设置了严密的流水施工工序,确保每块加热完毕的产品件由出炉到热压加工完成总时间 $\leq 20\text{min}$ 。热压完成的产品件互相分开放置并自然冷却,保证产品件的母材性能不受损伤(见图 19)。



图 19 正式产品压制

Fig. 19 Formal product suppression

产品件热压 24h 后,再次采用美国天宝三维扫描检测外形尺寸,将扫描数据与实体模型做全面对比,得出结论实际产品件的各方面尺寸误差都与理论尺寸相差 2mm 以内,满足本项目的公差要求及能确保加工后的节点弧顺美观。

5.3 异形管状曲线转换节点制造

异形管状曲线转换节点的整体组焊思路为:弧形弯管定位→隔板与 T 形加强板分别组装、焊接→单块蝶形扭曲板修整→蝶形扭曲板整体合拢、焊接→附件安装→焊缝修整。

5.3.1 对接前检测弧形弯管整体长度

以弧形段中心为基准画出杆件两端口的加工余量,并对主管进行平直度、端口尺寸检测,对超差部位进行校正(见图 20)。



图 20 弧形弯管加工

Fig. 20 Arc bending pipe processing

5.3.2 隔板、T 形加强板分别组装、焊接

T 形加强板组装、焊接时用激光水准仪定位并辅以铅锤检核其垂直度(见图 21)。



图 21 弧形弯管附件安装

Fig. 21 Installation of curved pipe accessories

5.3.3 蝶形扭曲板校核、割除加工余量

技术人员根据蝶形扭曲板的实体模型分别导出其内表面与外表面控制点的三维坐标图,车间制作时将 2 块节点板成对划线,以便检验各蝶形扭曲板对称性(见图 22)。

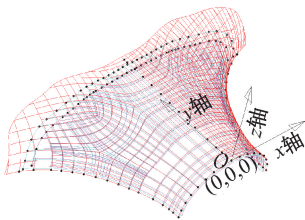


图 22 蝶形扭曲板校核

Fig. 22 Butterfly twisted plate checking

蝶形扭曲板转运至专用切割平台,并重新定位。切割工人根据节点板上标识的切割线采用磁吸式半自动轨道切割机将坡口及余量一次性切割成型(见图 23)。



图 23 蝶形扭曲板切割

Fig. 23 Butterfly twisted plate cutting

将切割完成的蝶形扭曲板分别成对进行试装,检验其安装间隙是否符合公差要求,并采用火工矫正其弧度偏差(见图 24)。



图 24 蝶形扭曲板试装

Fig. 24 Trial installation of butterfly twisted plate

矫正合格的蝶形扭曲板按三维空间坐标图用临时支撑固定安装至杆件上,并按规范点焊牢固(见图 25)。

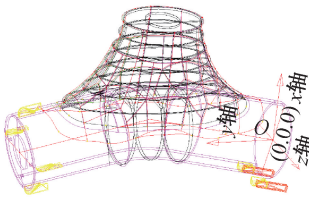


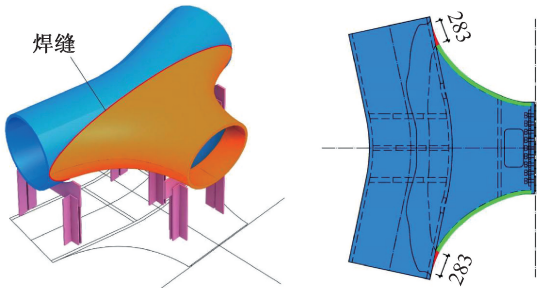
图 25 蝶形扭曲节点三维空间坐标

Fig. 25 Three-dimensional space coordinates of butterfly twisted node

5.3.4 蝶形扭曲板焊接

本项目蝶形扭曲板与弧形钢管间的焊缝较长,且由于双曲壁板与钢管呈自然坡口,如仅保证壁板与钢管的焊缝强度,则会留出台阶状,会影响整体节点的外观效果,因此为达到设计的建筑效果,必

须保证双曲壁板与钢管连接光顺,这样会导致此焊缝长度达 283mm(见图 26)。



a 扭曲壁板与钢管焊缝长度 b 扭曲壁板与钢管焊缝截面形式

图 26 蝶形扭曲板焊缝

Fig. 26 Weld of butterfly twisted plate

蝶形扭曲壁板体与钢管间的焊缝是相贯线焊缝,其切点夹角为 20°,内部焊接空间狭小,不可能采用内外焊接,因此锐角连接②号板与①号板要达到全熔透难度大,采取小角度加相同角度斜垫板,间隙 6mm,便于焊接,如图 27 所示。

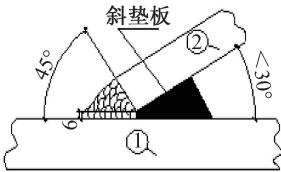


图 27 蝶形扭曲壁板与钢管间焊缝焊接

Fig. 27 Weld welding between butterfly-shaped twisted panel and steel pipe

钢管相贯线焊缝工厂焊接方式主要为 CO₂ 气体药芯保护焊。由于本工程要求高,对于上述相贯线焊缝均要求全熔透。

相贯线焊接是本次焊接的重中之重,必须从组对、校正、复验、预留焊接收缩量、焊接定位、焊前防护、清理、焊接、焊后热调、质量检验等工序严格控制,才能确保接头焊后质量全面达到标准。

组对:组对前将坡口内壁 20~30mm 仔细去除锈蚀。坡口外壁自坡口边 20~30mm 范围也必须仔细去除锈蚀与污物;组对时,不得在接近坡口处管壁上引弧点焊夹具或硬性敲打,以防圆率(管口圆度)受到破坏;同时,径管错口现象必须控制在规范允许范围内。

校正复验、预留焊接收缩量:加工制作可能产生的误差及运输中产生的变形,到现场组对时将集中反映在接头处。因此,组对后必须校正,焊前应经专用器具对同心度、圆率、纵向、曲率过渡线等认真核对,确认无误差后采用千斤顶之类起重机具布置在接头左右≥1.5m 距离处,预先将构件顶升到管

口上部间隙大于下部间隙 1.5~2mm,或采用火焰加热进行校正。应当注意的是,正在焊接的接头禁止荷载,否则对焊接接头十分不利。

相贯接头焊接须 2 名焊工,以左、右同时施焊方式,操作者分别采取共同先在外侧起焊后在内侧施焊的顺序,自根部起始至面缝(盖面焊缝)止,每层次均按此顺序实施,由于钢板较厚,应按规定的焊接工艺评定要求进行预热,预热温度 $\geq 100^{\circ}\text{C}$ 。

根部焊接:根部施焊应自下部超越中心线 10mm 位置起弧,且在定位焊接处前行 10mm 收弧,再次始焊应在定位焊缝上退行 10mm 起弧,在顶部中心处熄弧时应超越中心线至少 15mm 并填满弧坑;另一半焊接前应将前半部始焊及收弧处修磨成缓坡状并确认无未熔合即为熔透现象后在前半部焊缝上引弧。仰焊接头处应用力上顶,完全击穿;焊接接头处应不熄弧,连续焊接至接头前 5mm 时稍用力下压,并连弧超越中心线至少 1 个熔池长度(10~15mm)方允许熄弧。

次层焊接:焊接前剔除首层焊道上的凸起部分及引弧收弧造成的多余部分,仔细检查坡口边沿有无未熔合及凹陷夹角,如有必须除去。飞溅与雾状附着物采用角向磨光机时,应注意不得伤及坡口边沿。此层的焊接在仰焊部分时采用小直径焊条,仰爬坡时电流稍调小,立焊部位时选用较大直径焊条,电流适中,焊至爬坡时电流逐渐增大,在平焊部位再次增大,其余要求与首层相同。

填充层焊接:填充层的焊接工艺过程与次层完全相同,仅在接近面层时注意均匀流出 1.5~2mm 深度,且不得伤及坡边。

面层焊接:相贯焊缝面层焊接直接关系到接头的外观质量能否满足质量要求,因此在面层焊接时,应注意选用较小电流值并注意在坡口边熔合时间稍长,接头重新燃弧动作要快捷。

焊后清理与检查:相贯焊缝焊后应认真除去飞溅与焊渣,并认真采用量规等器具对外观几何尺寸进行检查,不得有低凹、焊瘤、咬边、气孔、未熔合、裂纹等缺陷存在。

接头焊接完毕静待 24h 后进行 UT 检验,合格后方可允许拆去防护措施。

5.3.5 斜立面脉动曲线节点焊接

焊接特点及难点分析:①主要构件和节点处使用的钢板板厚达 45mm,钢板厚度大,材质高;②钢材采用了较多厚板,焊接时填充焊材熔敷金属量大,焊接时间长,热输入总量高,因此结构焊后应力和变形大;③由于厚板焊接时约束度大,且节点复

杂,焊接残余应力大,焊缝单面施焊熔敷金属量大,易产生热裂纹与冷裂纹;④节点处的“十字角接和 T 形角接”接头较多,易产生层状撕裂。

斜立面脉动曲线节点主要材质为 Q390GJC 钢,主要板厚为 40,45mm,此类高强厚板钢材的淬硬倾向逐渐增加,焊接难度增加。

为保证焊接质量,主要从焊材选择、温度控制、焊接过程控制、变形控制、残余应力消除等几个方面进行焊接质量控制。

根据钢材化学成分、力学性能,对 Q355B, Q390C 钢材进行焊材选配:Q355, Q390,焊条型号为 E5015,药芯焊丝型号为 T492T1-1C1A,弧焊焊接材料(焊剂+焊丝)为 H10Mn2+ SJ101。经本工程“焊接工艺评定试验”的结果予以最终确认焊材。

温度控制:厚板在焊接前钢板的板温较低,施焊时电弧的高温导致厚板在板温冷热骤变情况下温度分布不均,焊缝热影响区易产生淬硬,焊缝金属变脆从而产生冷裂纹,为避免此类情况发生,厚板焊前必须进行预热,加热时母材的最小预热温度按板材不同厚度确定。

过程控制:此结构特殊,采用多层多道焊;在厚板焊接过程中,坚持多层多道焊,严禁摆宽道(焊接时每道焊缝不宜过宽)。由于母材对焊缝拘束应力大,焊缝强度相对较弱,摆宽道焊接易引起焊缝开裂或延迟裂纹产生。而对于多层多道焊,前一道焊缝对后一道焊缝来说是一个“预热”过程,后一道焊缝对前一道焊缝相当于一个“后热处理”过程,有效改善了焊接过程中应力分布状态,保证焊接质量。

焊后检测:对于厚钢板的超声波检测,应在焊后 48h 或更长时间进行,并在构件出厂前再次进行检测,以确保构件合格,避免延迟裂纹对工件的破坏。

变形控制:由于厚板异形结构造型奇特,断面、截面尺寸各异,在自由状态下施焊,尺寸精度难以保证;根据构件形状,制作了专用胎模夹具,对构件处于固定状态下进行装配、定位、焊接,进而控制焊接变形。

针对性编制合理焊接顺序,即“分散、对称、均匀、减小约束度”。

残余应力消除。刚性大、板材厚的构件焊接应力相当集中。若构件内积蓄的大量焊接残余应力无处释放,将会极大地降低构件承载力和抗疲劳强度,造成结构脆性断裂。另外,在结构受载、内力均匀化过程中,残余应力的存在往往会在无裂纹产生的情况下导致构件失稳、变形甚至破坏。因这些构

件的特殊性,尽管采取了上述多项措施控制焊接应力与变形,焊接完工后构件中依然存在相当大的残余应力;加工时,主要从以下几个方面采取措施进一步予以消除:①局部烘烤,即控制加热温度范围,在构件完工后对其焊缝背部或两侧进行烘烤,对消除残余应力非常有效(尤其对于“T”形连接);②自然时效,即提前生产计划,拉长厚板构件在加工到吊装的周期,使构件有一段存放时间过程,自然时效法不受工件尺寸、形状、自重等限制,对消除工件应力有明显效果;③冲砂除锈,冲砂除锈时,利用喷出的高压铁砂束对构件焊缝及其热影响区反复、均匀地冲击,不仅可除锈,也可消除构件部分残余应力。

5.3.6 斜立面脉动曲线节点展示级外观修整

按三维空间三维坐标图将蝶形扭曲板外弧延长边在本体上用石笔标识清晰,并采用堆叠焊接方法,将焊缝延伸至标识区域。重叠堆焊时一定要保证构件达到弧度饱满、弧顺过渡的效果。并全方位采用多角度的1:1木模实时检测,既要保证构件的纵向弧度,又要保证构件的横向弧度,将构件上所有凹凸不平处打磨至肉眼不可见状态(见图28)。



图 28 斜立面脉动曲线节点检测

Fig. 28 Detection of inclined facade pulsating curve node

经由专职质检员检验无误后,再转运至冲砂车间进行全面清洁、冲砂,去除构件表面污渍、浮锈、焊渣、毛刺等,将构件表面的缺陷再次暴露出来,进行二次修补(见图29)。



图 29 斜立面脉动曲线节点

Fig. 29 Inclined facade pulsation curve node

2个单独的节点由装饰结构环连接成一个完整的管状互联节点,构件达到 AESS4 展示级外观,在车间内涂装完成并检测完成后再装车发运。

6 结语

管状互联节点分别为1个弧形折弯圆管及4块马鞍形扭曲板,通过三维数据化加工分段划分减少了纵、横向焊缝,并提升了建筑结构的制造质量,同时完成了铸钢节点向钢板节点的转换,大大降低了工程造价。

大型铸钢模具设计及制造解决了厚板、异形、马鞍形扭曲板成型难题及母材易受损难题。通过模具内部掏空,在保证模具自身强度的同时又减少了钢材使用,提升模具加工的灵活性。采用美国天宝扫描技术精准检测了模具制作偏差。

通过对马鞍形扭曲板压制的监控和试验,解决了蝶形扭曲板热压成型难题,掌握了大型铸钢模具重复热压成型技术,保证了本项目节点的顺利实施,完美实现了设计和业主目标。

参考文献:

[1] 中冶建筑研究总院有限公司,中建八局第二建设有限公司. 钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205—2020[S]. 北京:中国计划出版社,2020.
Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, The Second Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division. Standard for acceptance of construction quality of steel structures:GB 50205—2020[S]. Beijing:China Planning Press,2020.

[2] 中冶建筑研究总院有限公司. 钢结构焊接规范:GB 50661—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group. Code for welding of steel structures:GB 50661—2011[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2012.

[3] 中国建筑股份有限公司,中建钢构有限公司. 钢结构工程施工规范:GB 50755—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
China State Construction Engineering Corporation, China Construction Steel Structure Co., Ltd. Code for construction of steel structures:GB 50755—2012[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2012.

[4] 王洪,张文津,李向冰,等. 肋环型弦支球面网壳结构施工技术[J]. 施工技术(中英文),2025,54(2):37-42.
WANG H,ZHANG W J,LI X B,et al. Construction technology of ribbed-ring string-supported spherical reticulated shell structure[J]. Construction technology,2025,54(2):37-42.

[5] 韩铭. 基于 YOLOv5 的钢结构节点损伤检测研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(21):11-16.
HAN M. Research on damage detection of steel structure joints based on YOLOv5[J]. Construction technology,2024,53(21):11-16.

[6] 兰学平,田坤. 竖向混合结构钢柱脚抗震性能试验研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(9):1-6,17.

底板在施工荷载作用下不会开裂,跨中挠度不超限值,能达到免支撑效果。

2)当免支撑措施相同时,随着板跨增加,免支撑措施效果逐渐变差,当板跨达到一定数值时,施工荷载作用下板底会开裂,再增加板跨,跨中挠度会超过限值。因此,建议采取本文提出的免支撑措施时,根据板跨进行设计,选取合适的三角型钢型号和列数。

3)免支撑钢筋桁架混凝土叠合板底板在施工荷载作用下板底钢筋受拉、三角型钢受压,且应力均达不到屈服强度,即使板跨为 5.4m、跨厚比达到 9。

4)采用免支撑钢筋桁架混凝土叠合板底板的板底钢筋应力明显小于普通钢筋桁架混凝土叠合板底板;随着板跨增大,免支撑钢筋桁架混凝土叠合板底板的板底钢筋和三角型钢应力均随之增大。

参考文献:

[1] 张忠良,陈玲珠,肖顺. 装配式混凝土结构套筒灌浆质量全过程管控技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(3):129-132.
ZHANG Z L, CHEN L Z, XIAO S. Whole process control technology for grouting quality of prefabricated concrete structure sleeve[J]. Construction technology,2024,53(3):129-132.

[2] 吴刚,冯德成,徐照,等. 装配式混凝土结构体系研究进展[J]. 土木工程与管理学报,2021,38(4):41-51,77.
WU G, FENG D C, XU Z, et al. Research developments in precast concrete structural systems[J]. Journal of civil engineering and management,2021,38(4):41-51,77.

[3] 满建政,俞凯木,皮淑萍,等. 新型预应力夹心叠合楼板双向受力分析及应用[J]. 施工技术(中英文),2023,52(4):94-100.
MAN J Z, YU K M, PI S P, et al. Analysis on bidirectional mechanical behavior and application of new prestressed concrete sandwich composite slab [J]. Construction technology, 2023, 52(4):94-100.

[4] 张敬书,倪永松,姚远,等. 不同拼缝方向的预制带肋底板混凝土叠合板面内受力性能[J]. 土木工程学报,2015,48(5):23-34.
ZHANG J S, NI Y S, YAO Y, et al. In-plane mechanical property of superimposed concrete slab with precast ribbed panels jointed in different directions[J]. China civil engineering journal,2015, 48(5):23-34.

[5] 周绪红,张微伟,吴方伯,等. 预应力混凝土四边简支双向叠合板的设计方法[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(4):54-57,94.
ZHOU X H, ZHANG W W, WU F B, et al. Design method of prestressed concrete simply supported on four sides of two-way composite slab[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2006,23(4):54-57,94.

[6] 叶献国,华和贵,徐天爽,等. 叠合板拼接构造的试验研究[J]. 工业建筑,2010,40(1):59-63.
YE X G, HUA H G, XU T S, et al. Experimental study on connections of superimposed slabs[J]. Industrial construction, 2010,40(1):59-63.

[7] 李杰,黄鹏飞,陈以一,等. 无支撑钢筋桁架混凝土叠合板受力性能试验研究[J]. 结构工程师,2013,29(4):132-139.
LI J, HUANG P F, CHEN Y Y, et al. Experimental research on mechanical properties of self-sustaining steel bar truss and concrete superposed slab[J]. Structural engineers,2013,29(4):132-139.

[8] MANSOUR R F, BAKAR A S, IBRAHIM S I, et al. Flexural performance of a precast concrete slab with steel fiber concrete topping [J]. Construction and building materials, 2015, 75: 112-120.

[9] 吴方伯,秦浩,文俊,等. 新型叠合板力学性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(1):33-40.
WU F B, QIN H, WEN J, et al. Mechanical properties test of new type of laminated slab [J]. Journal of architecture and civil engineering,2020,37(1):33-40.

[10] LIM S S, WONG J Y, YIP C C, et al. Flexural strength test on new profiled composite slab system [J]. Case studies in construction materials,2021,15:e00638.

(上接第 143 页)

LAN X P, TIAN K. Experimental study on seismic performance of vertical hybrid structure column base [J]. Construction technology,2024,53(9):1-6,17.

[7] 侯彦果,朱博莉,郭宇飞,等. 双曲面斜交网格筒冷却塔施工关键技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(2):74-78.
HOU Y G, ZHU B L, GUO Y F, et al. Key construction technology of hyperbolic diagonal intersecting grid cylinder cooling tower[J]. Construction technology,2024,53(2):74-78.

[8] 谢智勇,符方渠,廖言,等. 大跨度体育场钢结构倒序法施工技术[J]. 施工技术(中英文),2023,52(23):109-113,123.
XIE Z Y, FU F Q, LIAO Y, et al. Reverse order method construction technology of steel structure for large span stadium

[J]. Construction technology,2023,52(23):109-113,123.

[9] 江筠,方真刚,罗先林,等. 大跨度钢框组合结构分形协同建造关键技术[J]. 施工技术(中英文),2023,52(12):101-108,116.
JIANG Y, FANG Z G, LUO X L, et al. Key technology of fractal collaborative construction of large-span steel frame composite structure [J]. Construction technology, 2023, 52(12): 101-108,116.

[10] 晏金洲,周宏斌,吴兴明,等. 超长跨度钢结构网架屋盖安装关键技术[J]. 施工技术(中英文),2023,52(8):61-67.
YAN J Z, ZHOU H B, WU X M, et al. Installation key technology of super-long and large-span steel grid roof [J]. Construction technology,2023,52(8):61-67.