

上海世博阳光谷 钢结构工程焊接技术

长江精工钢结构(集团)股份有限公司 (浙江 312030) 高良 戴为志

上海世博轴及地下综合体工程,位于浦东世博园核心区,南起耀华路,跨雪野路、南环路、北环路及浦明路,至滨江世博公园。南北长1045m,东西宽80m,由-6.5m、-1.0m、4.50m、10.00m标高的平面及膜结构顶组成。

本工程屋顶结构包括膜结构屋顶和6个钢结构网壳“阳光谷”。膜结构屋顶为连续的结构体,总长度为840m,最大跨度约97m。阳光谷结构体系是由三角形网格组成的单层网架,由底部为垂直方向,到上部边缘逐步转化为环向。每个阳光谷的高度为41.5m或42m,呈下小上大的喇叭形,造型独特(见图1~图3)。

上海世博轴工程于2006年12月开工,通过各方面的共同努力,克服了工程量庞大、结构复杂、阳光谷及大跨索膜结构设计制作加工困难、地下空间深大以及工期紧迫等设计施工难关,经过28个月的奋战,19万 m^2 的地下空间结构、6万 m^2 的10m平台主体结构及清水砼已经完工。首批阳光谷已经落成,顶棚索膜结构也已部分安装张拉到位。按计划将于2009年底全面竣工。



图1 阳光谷钢结构效果图



图2 3号阳光谷钢结构构件撤除支撑后实体照片



(a) 3号阳光谷



(b) 4号阳光谷

图3 上海世博轴工程阳光谷钢结构实体图



一、工程概况

上海世博轴工程3号、5号、6号阳光谷钢结构由我公司承建，总共用钢量近5000t；本工程涉及构件主要为箱形弯扭节点、箱形连接杆以及铸钢件。是最典型的复杂异形箱形钢结构体系，其复杂程度为当时建筑钢结构行业少见；而且材质规格多，涉及板厚有：100mm、80 mm、45 mm、40 mm、35 mm、30 mm、25 mm、20 mm以及10mm；节点数量多、杆件数量多，涉及材质有：Q345B、Q345B—Z15、Q345GJB—Z15、GS20Mn5；杆件长度1.00~3.50m，界面高度180~240mm，宽度65~100mm。

阳光谷结构体系是由三角形网格组成的单层网壳，在底部为垂直方向，到上部边缘逐步转化为环向。每个阳光谷的高度为41.5m或42m，为轴对称结构。阳光谷的杆件材料为Q345B，由矩形空心截面焊接而成，杆件长度1.00~3.50m，截面高度180~500mm，宽度65~140mm。阳光谷支座采用铸钢件节点。

根据结构组成特点，可将阳光谷单体分为节点与杆件两部分，在不考虑加劲板等构造板件重量的情况下，单体的节点数量统计如表1所示。

表1 节点与杆件数目

名称	节点数/个	杆件数(约)/个	展开面积/m ²
SV3	1775	5340	4235
SV5	1775	5340	4235
SV6	1743	5220	6820
总计	5293	15900	15290

上海世博轴工程钢材满足《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)的要求，钢材的抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值 ≥ 1.2 。钢材具有明显的屈服台阶，且伸长率应 $> 20\%$ 。钢材具有良好的焊接性和合格的冲击韧度。采用焊接连接的节点，当板厚 $\geq 40\text{mm}$ ，应按现行国家标准《厚度方向性能钢板》(GB/T5313-1985)的规定，附加板厚方向的断面收缩率，其性能级别要求详见表2。

表2 钢材选用及要求

钢板厚度/mm	钢材型号
< 40	Q345B
40~60	Q345B-Z15
≥ 60	Q345GJB-Z15

铸钢件的强度设计值符合《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)的要求，参照欧洲标准 DIN EN10293，材质参照GS20Mn5，见表3和表4。

表3 GS20Mn5铸钢的化学成分(质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.17~0.23	≤ 0.6	1.0~1.5	≤ 0.02	≤ 0.015	≤ 0.3	≤ 0.15	≤ 0.4

表4 GS20Mn5铸钢的力学性能

处理状态	壁厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	破坏时伸长率(%)
正火(N)	≤ 50	300	500~650	22
	50~100	280	500~650	22
	100~160	260	480~630	20
	> 160	240	450~600	
调质(V)	-	350	≥ 530	22

铸钢件的表面质量要求、制作精度、热处理方式和质量检查方法由加工厂编制详细工艺流程交设计单位认可后执行，铸钢件内部曲面相交处应避免锐角，每个铸钢件均有化学成分、物理性能的光谱检查及探伤报告，严禁铸钢件内有夹渣、气孔、微裂纹存在，保证与Q345B、Q345GJB钢材均有良好的焊接性能；铸钢件节点与钢构件连接处应通过机械加工，使铸钢件的精度满足连接的要求；铸钢件须经超声波探伤检验，并符合《铸钢件超声波探伤及质量评级标准》(GB7233-1987)中二级的有关规定；铸钢件表面粗糙度值 $R_a \leq 6.3 \mu\text{m}$ 。

上海世博轴工程钢结构复杂、技术精度要求高、技术要求相当高，达到设备安装的精度标准。由于现场先散件安装，后整体焊接，所以焊接位置较差，安装焊缝多，焊接质量控制难度大；同时具有节点数量多，焊接质量要求现场高空焊接多、仰焊位置多，对焊工的焊接技术水平要求高等特点，钢结构焊接变形及残余应力的控制难度大，焊接质量控制难度大，图4和图5为阳光谷钢结构全貌及局部照片。



图4 阳光谷钢结构全貌



图5 阳光谷钢结构局部照片

二、阳光谷钢结构现场焊接方案整体思想

根据上海世博轴工程阳光谷钢结构工程的复杂程度,结合焊接应用技术理论和实践经验,编制了钢结构安装工程焊接技术路线,并在工程实践中严格执行,本工程焊接整体思想:“统一对称、分区进行;单杆双焊、双杆单焊,隔层焊接;分层错位合拢。”

(1) 统一对称、分区进行 以平面圆为基准,分为4个焊接施工区,每个焊接施工区域布置一个焊接施工班组,保证每个班组的焊机数量与焊工人数相近,焊接电流、电弧电压及焊接速度尽量一致,以圆心为对称点进行焊接。

(2) 单杆双焊、双杆单焊 针对节点间杆件的焊接采用此焊接原则,如图6~图8所示,单杆双焊即两根杆间与节点间的焊缝,采用两人对称焊,要求保证焊接速度及焊接电流、电弧电压参数基本一致。

双杆单焊即两个节点与中间杆件的焊接,先焊接一端,待焊缝温度冷却至常温方可进行另一端的焊接。



图6 阳光谷钢结构典型节点



图7 双杆单焊示意图

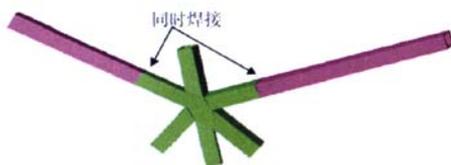


图8 单杆双焊示意图

(3) 隔层焊接 先将结构安装至第二层,确定各层螺栓连接已达到要求(即安装螺栓紧固),并进行精度确认后方可进行第一层钢结构的焊接工作。

首层焊接结束后,进行第三层钢结构的安装,安装固定后进行第二层钢结构的焊接,焊接顺序同首层钢结构的焊接顺序,以此类推,直至安装结束。

(4) 分层错位合拢 焊接时,每层设置焊接合拢,相邻层合拢位置依次错开 45° ,严格控制每层合拢时间。合拢时间应选择温度均匀,无温差的时间进行,选择晚上无日照的时间进行合拢焊接,即同时、同温焊接。

三、阳光谷钢结构现场焊接技术

(1) 焊接位置及技术的确定 焊接位置包括了横、平、立、斜、仰,其重点控制是斜、仰焊。

(2) 焊接顺序 焊接施工顺序对焊接变形及焊后残余应力有很大的影响,直接影响到焊接质量。应详细制定结构整体以及典型部分焊接顺序,以做到焊接时尽量减小结构焊后变形和焊后残余应力,根据统一对称、分区进行的原则,阳光谷钢结构立面、平面焊接总体顺序如图9所示。

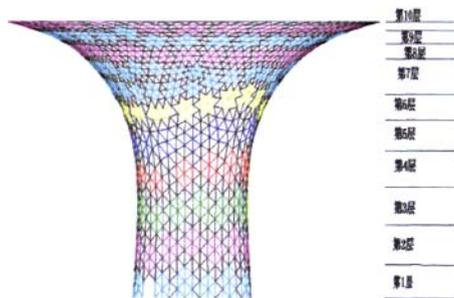


图9 钢结构立面分层示意图

阳光谷钢结构立面分层是根据现场拼装单元结构体进行分层;立面分区根据焊缝合拢技术要求,采用两种分区方法。其一,合拢焊缝设置每层4道;其二,每

层焊缝合拢位置错开45°。

具体见焊缝合拢：第1、3、5、7、9层焊接分区如图10所示；第2、4、6、8、10层焊接分区如图11所示；每层分区共分4个区，奇数层与偶数层的分区相差约45°左右。焊接时分4区同时对称进行。

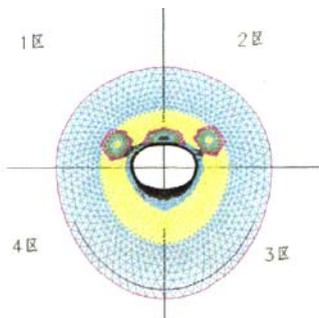


图10 第1、3、5、7、9层焊接分区示意图

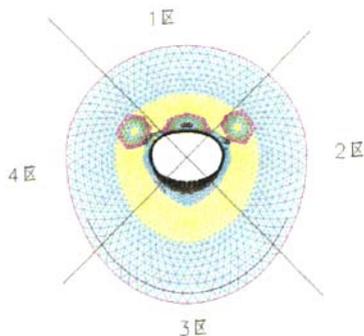


图11 第2、4、6、8、10层焊接分区示意图

(3) 开始焊接时间确定 执行隔层焊接原则。在第三层安装结束并找正结束后开始进行第一层的焊接，如图12所示。

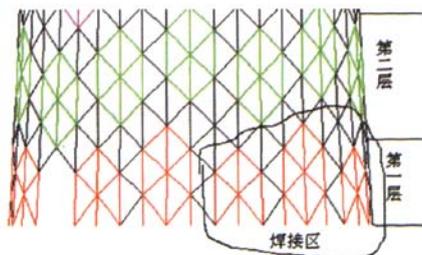


图12 开始焊接时示意图

第一，详细焊接顺序：第一层焊接结束后进行第四层的安装，第四层安装找正后进行第二层的焊接，以

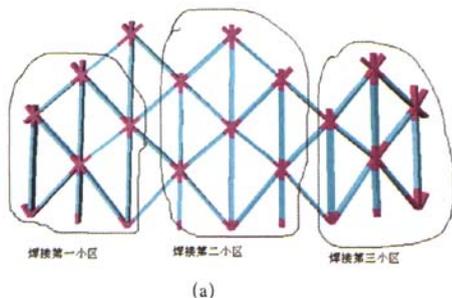
此类推，直到最后焊接结束。每层焊接后即可进行该层的合拢焊缝的焊接；焊接过程中严格执行单杆双焊，双杆单焊的原则；具体采用跳焊法。

第二，每层焊接时，首先进行该层杆件与节点的焊接，在合拢焊缝焊接前进行上下两层的连接杆件的焊接。

第三，执行统一对称的原则：每层焊接施工分为4个焊接施工区，每个焊接施工区域布置一个焊接施工班组，保证每个班组的焊机数量与焊工人数大致相同，焊接电流、电弧电压及焊接速度尽量一致，尽量保证同步进行焊接。

第四，以第一层中的一个区为例进行焊接顺序的介绍，其余各层各区均参照该区的焊接顺序进行施工。

将一个焊接施工区分为若干个焊接小区，焊接小区基本分法与吊装单元相同，如图13a所示：先进行焊接小区内的焊接，焊接顺序如下：先进行杆件与节点1之间（5道）焊缝的焊接（无先后顺序）→2→3→4→5→6→7→8→9→10→11→12→13→14→15→16→17→18→19→20→21→22→23逐次焊接，按照图13b进行焊接施工。



(a)

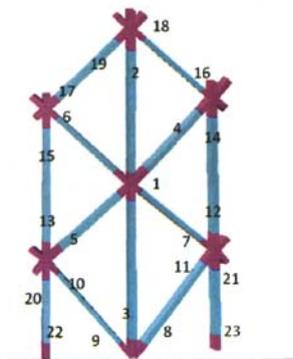


图13 焊接施工小区焊接示意图

第五,焊接施工小区焊接结束后,可进行焊接小区间焊缝的焊接,如图14所示。

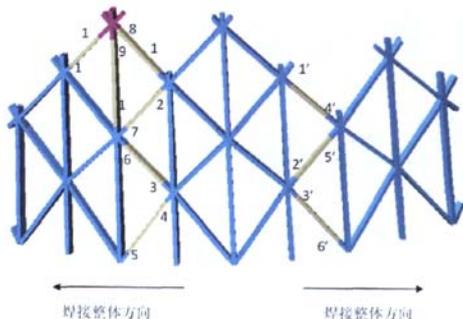


图14 小区间焊缝的焊接示意图

焊接小区间杆件的连接焊接顺序:两边焊缝可同时进行焊接,右侧焊接顺序如图14所示:1'→2'→3'→4'→5'→6';左侧焊接顺序:1→2→3→4→5……→12结束。到此,第一层其中一个大区已焊接结束。与此同时,将第二层至第一层间的连接杆件与第一层节点的连接焊缝焊接。之后进行合拢焊缝的焊接。焊接结束后,可进行第三层钢结构的安装,以此类推,完成所有钢结构的焊接。

四、吊装过程中防止变形的技术保障措施

1. 小拼单元吊装

为了保证其在吊装过程中的稳定性,空中姿态的可调节性,并防止小拼单元发生变形。根据我公司长期施工类似工程的经验,吊装时,设置一个铁扁担用来消除吊装时对小拼单元杆件产生的挤压力。随着塔吊的慢慢起吊,小拼单元将会逐步立直,然后慢慢落位,再用临时拉杆进行固定,如图15所示。

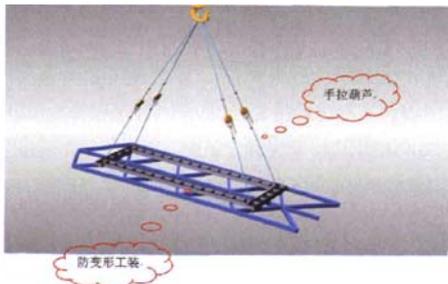


图15 小拼单元吊装示意图

2. 临时连接定位的技术措施

小拼单元高空对接时临时连接定位的技术措施:

在钢结构的安装对接过程中,为了减少对原有结构杆件的施焊次数,减少不必要的二次打磨,并保证在高空能够方便定位,在对接接头处设置一可拆卸装置。

3. 主体安装精度保障措施

(1)如何在高空中进行精确拼接是直接影响到工程安装质量的重要因素之一,为此我们采取以下措施保证高空的拼接质量。

第一,设计制作高空拼装专用胎架。为了能在高空中进行拼接,必须设计可行的胎架,并能对接头的位置进行适当的调节,并按要求安装固定到承重支撑架上。

第二,现场高空拼装的工艺流程。测量平台水平→测量并标记出胎具位置→安装并用垫铁调节胎架支座→安装并复检支架定位点标高→焊接垫铁→根据标记确定构件定位线→将分段构件吊入胎具并对好拼装定位线→对各段对接处进行微调和点焊→对整幅进行检查校正→焊接→连接构件的拼、焊。

(2)钢结构拼装精度的保障措施。①严格按设计要求进行焊缝尺寸控制,不任意加大或减小焊缝的高度和宽度。②采用小热输入量、小焊道、多道多层焊接方法以减少收缩量。③在保证焊透的前提下采用小角度、窄间隙焊接坡口,以减少收缩量。④组装焊接时,实施多人对称反向焊接,最大限度减少焊接变形。⑤地面组装时构件预留收缩余量,分段(块)矫正,控制好拼装块的焊接变形。⑥焊接时应根据杆件对称布置的特点,选好自由端,避免由焊接误差的累积而造成过大的内力,尤其是焊接对接口时应遵循先焊接下层再焊接上层的顺序。⑦提高构件制作精度,构件长度按正偏差验收。⑧对跨距、中心线及位移、标高及起拱度,利用钢尺、经纬仪器、水准仪及全站仪进行精确测量,及时发现并纠正可能出现的位置偏差,确保整体拼装精度。

4. 高空拼装的焊接工艺措施

根据设计,构件间采用焊条电弧焊接,焊接工艺采用工厂焊接工艺评定后的工艺措施执行,具体措施如下:

(1)焊接前必须编制合理的焊接工艺和焊接顺序,严格按焊接工艺进行焊接。

(2)焊接前对组装焊缝进行检验,根据焊接工艺方案的要求选用对应的焊材。

(3)组装焊接时,实施多人对称反向焊接,最大

(下转第24页)

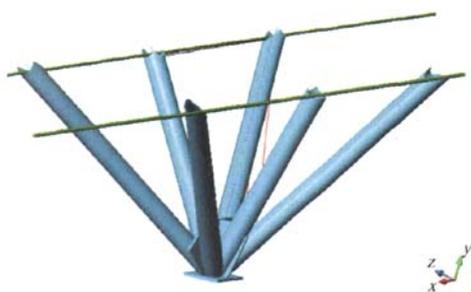


图6 V形撑贯口检查图

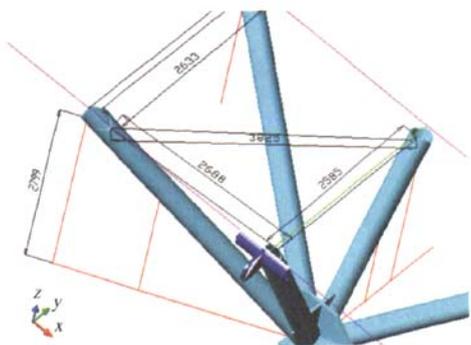


图7 V形撑尺寸检查图

表2是构件加工完毕后的一个关键尺寸的控制列表。

表2 尺寸检查控制表格

序号	关键尺寸控制点	测量方法
1	钢管和地面的夹角	以贯口内壁的最低点为基准点, 从此点吊铅锤, 然后测量其高度
2	钢管之间的尺寸	如图7所示, 选择贯口内壁的最低点为基准点, 测量间距和对角线, 保证贯口的尺寸
3	贯口	用水准仪测量贯口
4	钢管在胎架平面上的投影	用铅锤做出钢管的投影, 比对要求的尺寸

四、结语

V形撑在钢结构加工中特别是管结构加工中比较常见, 不可一味按照一般钢结构的加工方式来加工焊接, 这样会给装配和焊接控制带来很大的难度, 而且有一定的盲目性。最好从其最终需要达到的效果进行逆向思维, 首先确定哪些尺寸是需要重点保证的, 然后根据这个重点再思考如何装配和焊接变形控制。我们通过加工这种空间三维结构的V形撑, 熟悉了三维模型的应用、胎架的搭设、焊接变形的控制以及尺寸的测量, 若以后遇到类似的钢结构加工, 此种加工方法也不失为一种简单实用的方法。MW (20091215)

(上接第21页)

限度减少焊接变形。

(4) 严格按设计要求进行焊缝尺寸控制, 不任意加大或减小焊缝高度和宽度。

(5) 焊接前将焊接区边缘30~50mm内的铁锈、毛刺、污垢等清除干净, 以减少产生焊接气孔等缺陷。

(6) 焊后应清理焊缝表面的熔渣及两侧飞溅物, 检查焊缝外观质量, 检查合格后, 在工艺规定的焊缝及部位打上钢印。

5. 高空拼装的测量检验

(1) 焊接接头质量检验: 所有接头为对接焊缝, 焊缝焊接保证一级, 并100%超声波检查, 执行标准GB50205—2002《钢结构工程施工质量验收规范》中有关规定。

(2) 对跨距、中心线及位移、标高以及起拱度, 利用钢尺、经纬仪器、水准仪及全站仪进行精确测量, 及时发现并纠正可能出现的位置偏差, 确保整体拼装精度。

6. 临时固定校正机构

单元体的临时固定与校正利用专用的可调工具实现, 见图16。

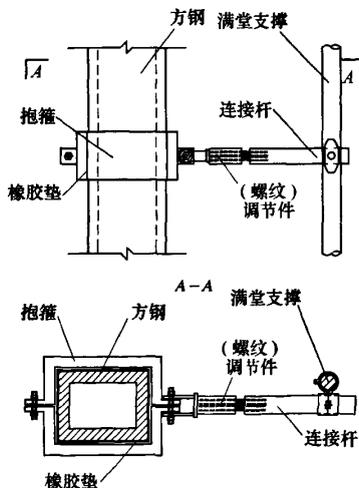


图16 临时固定校正机构

MW (20091227)