

国家体育场（鸟巢）工程施工新技术综述

李久林， 杨俊锋， 杨庆德， 邱德隆， 盛宇， 张颖

（北京城建集团有限责任公司，100088 北京）

摘要：国家体育场是2008年北京奥运会的主会场。其造型呈马鞍形，外壳由钢结构编织成鸟巢状，内部为三层碗状看台混凝土结构。看台结构存在大量斜柱、斜梁、空间环梁等异形构件。钢结构总用钢量约4.2万t。施工中通过采用高强高性能混凝土技术、钻孔灌注桩后压浆技术、HRB钢筋应用技术、Q460高强钢厚板焊接技术、成套箱形弯扭构件加工制作技术等，取得了一系列研究成果，提高了我国建筑技术水平，社会经济效益和环保效益非常显著。其中7项科技成果填补国内空白，达到国际先进或国际领先水平，完成了国家级工法4项。本工程已获得结构“长城杯”金杯和中国钢结构金奖。

关键词：体育场；鸟巢；钢结构；混凝土；厚板焊接

中图分类号：TU 74 **文献标识码：**B **文章编号：**1000-4726(2008)08-0564-00

SUMMARY OF NEW CONSTRUCTION TECHNOLOGIES IN NATIONAL STADIUM

LI Jiulin, YANG Junfeng, YANG Qingde, QIU Delong, SHENG Yu, ZHANG Ying

(Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., 100088, Beijing, China)

Abstract: As the main stadium for 2008 Olympic Games, National Stadium has a saddle-like configuration and a bird nest steel shell while its internal structure is three floors of bowl concrete stands in which a lot of oblique posts and beams as well as spacial ring beams are arranged, with total steel consumption of 42,000 t. Some technologies were applied in the construction, including concrete of high strength and high performance, post pressure grouting into driven cast-in-place pile, applied technology for HRB steel bar, thick plate weld of high strength steel Q460 and fabrication of bending-twisting box components and etc. The research achievements made in the project have improved the construction level of our country, reached remarkable social, economical and environmental benefits. Among them, 7 scientific achievements attain the international advanced or leading level, 4 construction methods completed reach the national level. The project has been awarded “Great Wall Cup” of structure and golden prize of China steel structure.

Key words: stadium; bird nest; steel structure; concrete; thick plate weld

国家体育场（图1）位于奥林匹克公园中心区南部，是北京2008年第二十九届奥运会的主会场，承担开幕式、闭幕式和田径比赛，赛时可容纳观众91000人，其中临时坐席11000个（赛后拆除）。工程占地面积20.4hm²，总建筑面积25.8万m²。建设单位为国家体育场有限责任公司，设计单位为瑞士赫尔佐格和德梅隆、中国建筑研究院、奥雅纳组成的设计联合体，总承包单位为北京城建集团。工程于2003年12月24日开工建设，2008年6月27日竣工。

1 工程概况

1.1 建筑工程概况

本工程分体育场、基座和热身场地三部分，体育场建筑造型呈椭圆的马鞍形，外壳由4.2万t钢结构有序编织成鸟巢状独特的建筑造型；内部为三层混凝土结构碗状看台；钢结构屋顶上层为4.2万m² ETFE单层张拉膜，



图1 国家体育场

下层为5.3万m² PTFE膜声学吊顶。建筑物南北向（长轴）长333m，东西向（短轴）长280m；观众看台下地下2层，地上4~7层，建筑物高69.21m（混凝土结构高51.1m），±0.00相当于43.50m。本工程为特级体育建筑，工程设计使用年限为100年，耐火等级为一级，抗震设防烈度8度，人防等级为6级，物资库防化等级丁级。地下工程防水等级为I级，采用三道设防。其中一道为钢筋混凝土自防水；在钢筋混凝土结构外侧，基座底板、外墙采用柔性防水层为两道4+4 SBS改性沥青卷材防水；基座顶板采用柔性防水层为两道3+4 SBS改性沥青

收稿日期：2008-07-15

作者简介：李久林(1968-)，男，河北丰润人，北京城建集团国家体育场工程总承包部，总工程师，教授级高级工程师。

卷材防水。室内防水采用 1.5 mm 厚单组分聚氨酯涂膜。总体设计贯彻“绿色奥运、科技奥运、人文奥运”三大理念。

1.2 结构工程概况

1.2.1 混凝土结构

本工程混凝土结构工程是由 12 个混凝土剪力墙形成的核心筒与周边梁、板、柱组成的异型框架-剪力墙结构,框架结构上部支撑着预制看台板,约 14 700 块预制看台板与大跨度斜梁组成观众看台。除预制看台板外均为现浇混凝土结构。基础采用桩承台式基础,基础桩采用后压浆钻孔灌注桩,桩顶承台通过混凝土筏板连接为整体。

看台结构存在大量斜柱、斜梁、空间环梁及弧形墙等大量异形构件。其中斜柱断面尺寸为 1 000 mm×1 000 mm,共分两种形式;一种为单向倾斜,另一种为在单向倾斜基础上沿纵向旋转一个角度(简称斜扭),倾斜角度从 59°~89°不等,共 70 种,旋转角度从 1°~89°不等,共 36 种,跨层(二、三、四)与楼板相连的斜柱最大垂直高度达 18.65 m。斜梁为超长鱼腹式 T 形结构,中层看台斜梁断面尺寸 1 000 mm×(333~2 278) mm 不等,上层看台斜梁截面尺寸 1 000 mm×(442~1200) mm 不等;上层看台斜梁端部为椭圆形马鞍状空间环梁,断面尺寸最大 1 200 mm×1 615 mm。基础外墙大量为弧形墙体。零层顶板、下层看台叠合现浇斜板采用无粘结预应力,直线布置;通道转换梁、看台悬挑梁采用有粘结预应力。

各层结构外边梁为折线形,边线里出外进极不规则,6 条变形缝间板长约 172 m,为超长结构。基础底标高变化大,其中钢结构组合柱 P 承台 -3.9 m、-9.5 m、-11.0 m,最大 14 m×26 m×9.5 m,为大体积混凝土结构。钢结构与混凝土结构为独立受力结构,但在空间上相互交叉在一起,钢结构组合柱、大楼梯柱局部穿过混凝土结构楼板(图 2)。

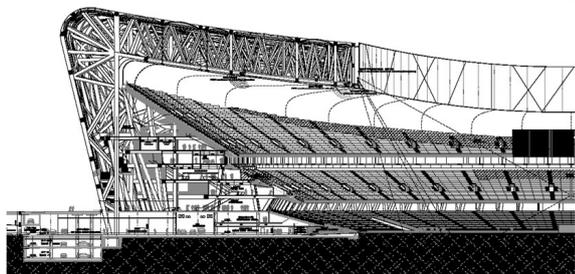


图 2 国家体育场东西向剖面图

1.2.2 钢结构

钢结构主结构(图 3)由 24 榀门式桁架组成,其中 22 榀是直线贯通或近似直线贯通。屋盖开口长轴方向(南北向)长度约为 185 m,开口边缘接近跑道的外侧;短

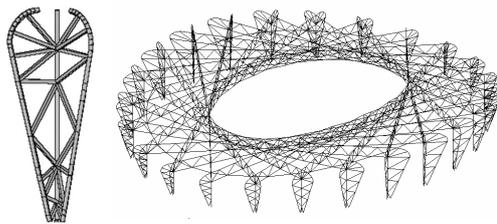


图 3 钢结构主结构示意

轴方向(东西向)约为 125 m,边缘接近一层看台内侧。组合柱间共设置 12 对瀑布状大楼梯。

屋顶桁架矢高 12 m,其中上弦杆(组合柱外柱相连)截面基本为 1 000 mm×1 000 mm,下弦杆(组合柱内柱相连)为 800 mm×800 mm,腹杆截面基本为 600 mm×600 mm。组合柱(菱形内柱+2 方形外柱)的截面保持 1 200 mm×1 200 mm 不变,次结构截面为 1 000 mm×1 000 mm。

钢板的最大厚度不大于 110 mm。板厚不大于 34 mm 时采用 Q345 钢材;板厚不小于 36 mm 时,采用 Q345GJ 钢材;板厚不小于 100 mm 时采用 Q460E 钢材,此种钢材在国内建筑用钢中首次使用,共约 700 t,应用在 4 个柱脚和 6 根桁架柱中。桁架柱的菱形内柱下端(标高+1.5 m)的上部采用了 Gs20Mn5V 铸钢件。铸钢件单件重量最大近 30 t,共计约 600 t。钢材 Z 向性能要求:40 mm ≤t≤60 mm, Z15; 60 mm <t≤90 mm, Z25; t>90 mm, Z35。设计用钢量总计约 42 000 t。

1.3 装饰装修工程概况

本工程装饰装修设计将中国元素、人文关怀、国际潮流相融合,通过不同材料、不同色彩、不同元素的运用,将不同功能分区有机结合在一起。体育场的外立面与结构是统一的,各个结构元素之间相互支撑,汇聚成网格状,就如同一个由树枝编织成的鸟巢。其中 3 层餐厅层外侧、4 层包厢层内外两侧设置隐框全玻璃幕墙,采用 60×120 钢框、中空玻璃,其中玻璃内侧彩釉图案处理。集散厅墙面采用红色涂料、亚麻地面、顶棚平板部位喷涂黑色涂料,看台板下表面喷涂红色涂料。混凝土柱喷涂与钢结构一致的金属银灰色面漆。其中 1 层集散厅地面采用机切碎拼石材拼砌。内隔墙除钢筋混凝土墙外,主要墙体均为 300、250、150 mm 厚陶粒混凝土空心砌块及轻钢龙骨轻质隔墙。

外墙保温材料为 100 mm 厚岩棉保温层,二层以上集散厅楼板保温材料为 30 mm 厚挤塑板保温层,部分看台板下面有用房的,在底板做 50 mm 厚挤塑板保温层,一层集散厅及基座平台保温材料为 50 mm 厚挤塑板保温层。

1.4 机电工程概况

机电设备安装工程包括给排水、通风空调、电气、

智能建筑及电梯五大系统 38 个专业系统。

给排水工程中给水系统采用紫铜管,最大口径达 250 mm,钎焊连接;生活排水系统卫生间坐便器均采用同层排水方式;观众区域设直饮水系统,采用食品级薄壁不锈钢管材;钢结构屋面雨水排水系统采用重力和虹吸相结合的排水方式,屋面雨水及场区径流雨水经 6 个雨水收集处理池收集处理后补充市政优质中水供体育场内消防、喷灌、后期改造卫生间使用。

通风空调工程中空调主导冷源采用双工况冷水机组,赛时为空调工况,赛后采用冰蓄冷模式;体育场部分区域采用地源热泵系统,比赛场地下设置地源换热器。

电气工程中变配电系统采用 10 kVA 四路进线、两路供电模式,设两台 1 680 kW 柴油发电机组作为应急电源,另设 UPS 作为计算机类负荷应急电源, EPS 作为应急照明的电源;照明工程包括一般、应急、场地、景观及立面照明。

智能建筑工程中除常规的建筑设备监控等系统外,还包括安全防范系统、场地扩声系统及体育赛事系统。

1.5 节能环保技术

1.5.1 雨洪利用

国家体育场雨洪利用系统设施,年回收利用的雨水量可能达到年平均总降水量的 66%,年回收总量近 6.7 万 m³。既可有效地减少北京市的供水负担,降低径流量,减少对市政水管网的压力,又能为体育场运营中年回用水提供约 23% 的补水量;与使用自来水相比,还能为业主节约大量水资源费、自来水费和排污费,同时每年节约约 400 多万元的城市防洪费,具有显著的效益。其技术水平达到国际先进水平:(1)体育场内 70% 的供水由回用水代替,其中 23% 来自雨水;(2)世界范围内建筑雨洪利用系统处理标准最高的处理设施;(3)世界范围内建筑雨洪利用系统处理规模最大的设施之一;(4)世界范围内建筑再生水处理设施供水最洁净、最卫生的系统;(5)供水水质标准和先进的收集、处理、自控技术填补国内再生水处理领域空白,相关技术处于国际先进水平。

1.5.2 地源热泵技术应用

通过专项研究,利用体育场足球场草皮下的土壤资源,设计地源热泵冷热源系统,高效、节能、环保。本工程在足球场草坪下部设了 312 口深 75 m 地源热泵井,夏季可提供 1 500 kW 制冷量,冬季可提供 1 800 kW 制热量。这样既减少了部分负荷运行时的能耗,又充分利用可再生能源,积极响应了“绿色奥运”和“科技奥运”的理念。

1.5.3 膜结构技术应用

采用新型、绿色建材 ETFE 及 PTFE 膜结构覆盖屋

顶,并已编制完成了由设计联合体作为主编单位的《国家体育场膜结构技术规程》、由施工总包作为主编单位的《国家体育场 ETFE 膜结构施工验收规程》和《国家体育场 PTFE 膜结构施工验收规程》,作为国家体育场膜结构设计的技术指导性文件。

膜结构具有燃烧性能优越、透光率好的特点,根据采用的膜材和使用部位的不同,具有防水、透光、吸声等作用。本工程的膜结构由两部分构成:上层镶嵌在主体钢结构上层钢梁区格之间透明的 ETFE 膜结构,下层悬挂在主体钢结构下层钢梁下面半透明的 PTFE 膜结构吊顶。

2 施工概况

2.1 施工特点和难点

2.1.1 混凝土结构工程

(1)桩基设计施工难度大。国家体育场为大跨度空间结构,基础受力复杂,同时抗浮水位较高,桩基承受的抗压、抗水平、抗拔荷载极大,且工程基底土质复杂,对于桩基设计参数的取得,尤其是水平荷载作用下桩顶嵌固效应以及桩土承台共同作用效应需通过系统的试桩确定,国内外民用建筑领域尚无成熟经验借鉴。

(2)异型框架结构复杂。为实现鸟巢独特的建筑效果,混凝土结构中大量采用斜梁、斜柱构成异形框架结构。1 800 根混凝土柱中斜柱、斜扭柱占 80%,最大倾角 60°;其中跨三层、四层斜扭柱 124 根,最大高度 21 m;大断面、大跨度斜梁长 25 m,倾角 30°。结构外边缘不规则,支撑架体施工难度大,采用现浇混凝土建造异形框架结构,国内外尚无先例。

(3)耐久性指标高。地上结构单块最大长度为 170 m,钢结构柱下承台厚达 10 m,基础底板不设伸缩缝,面积 300 m×400 m,结构裂缝控制难度大。工程为具有重大意义的标志性建筑,混凝土结构需满足 100 年耐久性要求,对此类民用建筑工程国内外没有相应的规范可以依据,也无同类工程可供借鉴。

(4)预制看台板数量大、要求高。国家体育场由约 1.5 万块预制混凝土看台板组拼而成。预制看台板型号多,约 2 400 种,工程量大,构件形式复杂;重量大,最重 18 t,且为非预应力薄壁长构件,最长约 11 m。看台板设计要求为清水混凝土构件,不做任何饰面处理,加工标准极高,构件制作以及安装技术需研究解决。

2.1.2 钢结构工程

(1)大量采用空间弯扭构件、节点复杂,加工制作及安装难度大。为体现鸟巢独特的建筑造型,本工程 1/3 以上的构件采用空间弯扭构件,无固定的线型。同时,本工程中无论是主结构之间,还是主次结构之间,都存

在多根杆件(达14根)空间汇交现象;加之次结构复杂多变、规律性少,造成主结构的节点构造相当复杂,节点类型多样,制作、安装精度要求高(图4)。

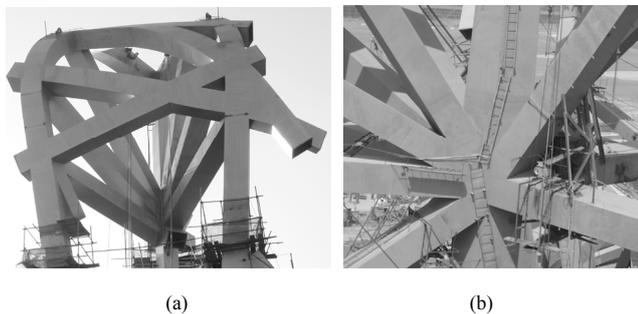


图4 桁架柱施工示意图

(a)桁架柱上柱弯扭段;(b)桁架柱下柱顶节点

(2) 构件体型大、单体重量重,构件翻身、吊装难度大。作为屋盖结构的主要承重构件的桁架柱最大外形尺寸达 $25\text{ m}\times 20\text{ m}\times 68.5\text{ m}$,分两段吊装,吊装单元最重达360多t,吊装高度最高达68.5m。而主桁架高度12m,双榀贯通最大跨度约260m,吊装单元最重262t,构件最长约43m。由于构件体型较大,重量重,各类构件重心位置互不相同,翻身时吊点的设置和吊耳的选择难度较大,特别是桁架柱的翻身,吊耳在翻身和吊装时的受力有所变化,需考虑三向受力。翻身过程中的稳定性控制难度大。起吊时,必须调整好分段构件的角度和方位,而对于体型大、重量重的构件,角度调节相当困难,吊装难度大。

(3) 焊接量大、焊接难度大。本工程为全焊接钢结构,焊缝总长度约30万m,焊缝折算总长度约280万m。钢板厚度3~110mm,焊接位置涉及平焊、横焊、立焊和仰焊,且焊接工作跨整个冬季。既有高强钢(Q460E-Z35)的焊接,又有铸钢件(GS-20Mn5V)的焊接。薄板焊接变形大,厚板焊接熔敷量大,温度控制和劳动强度要求高。而高空焊接、冬雨季焊接的防风雨和防低温措施更使得焊接难度增大。

(4) 安装精度控制难、施工质量要求高。由于施工过程中结构本身因自重和温度变化均会产生变形,结构形体复杂,均为箱形断面构件,位置和方向性均极强,安装精度受现场环境、温度变化等多方面的影响极难控制。另外,本工程无论是外观质量,还是内在质量(如焊缝质量等级等),都要求相当高。其中,钢板拼接、弯扭段构件组装焊缝及现场拼装、安装焊缝均为全熔透一级焊缝;钢结构立面在距视线10m内可见焊缝的余高要求为0~1mm,所有焊缝表面均需进行磨光处理。

(5) 合拢口多,合拢温度要求严,实施难度大。根据设计要求,本工程中的主桁架和立面结构各设置了四条合拢线。其中,主桁架合拢口100个(含上、下弦

和腹杆),立面结构的合拢口28个,合拢口数量众多。虽立面结构和主桁架可采取分次合拢方案,但一次合拢的对接口数量仍高达50个,为确保合拢线上的对接口同时合拢,需组织大量的人力和物力。而且,整个钢屋盖安装及制作误差最终均集中在这四条合拢线,选择何种合拢方式来消纳误差难度特别大。同时,对于如此复杂的结构和复杂的温度场分布情况,要保证分次合拢时的温度条件基本一致,满足 $(19\pm 4)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 要求,难度巨大。

(6) 卸载点多、吨位重、设计要求高,同步控制难度大。本工程卸载点多、卸载吨位大,屋盖总面积约 $60\ 000\text{ m}^2$,卸载吨位约14 000t,78个卸载点,设计要求“结构整体分级同步卸载、严格进行比例控制”,单点卸载吨位大、最大点支撑力约300t,卸载实施难度大。

(7) 顶面及肩部次结构安装难度大。按设计要求,4 000t顶面及肩部次结构在主结构卸载之后进行安装,卸载之后主结构发生变形,而现有的加工制作依据是卸载前位形,所以卸载前后的变形量将会严重影响次结构的安装精度。

2.1.3 装饰装修工程

装饰面层材料的选择以及节点构造追求与钢结构乱形相对应的效果,具体装饰节点作法上体现了粗犷与细腻相结合的方式,不追求选材的高档次,而是选择特异的材料,通过特殊的作法来表达设计师的意图,具体实施起来难度很大,如异形金属格栅吊顶、自然面石材地面拼砌。

2.1.4 防水工程

室内外空间连续过渡,室内外建筑作法混合运用。由于钢结构和混凝土结构相互穿插,其变形缝受温度影响长期存在45~72mm大变形,变形缝防水难度极大;基座顶板和楼板采用挤塑板保温形成所谓的漂浮地面;大面积轻钢龙骨墙体内墙外用,防裂难度大。

2.1.5 机电工程

本工程专业设备大量采用了国内乃至国际建筑智能化的前沿技术,科技含量高,例如雨洪利用技术、地源热泵技术、智能照明综合控制技术等。本工程规模宏大,各专业系统复杂,子系统项目繁多,各现场控制设备分散,机电管线纵横交错,随异形结构敷设,机电综合排布预控要求高。

2.1.6 其他

(1) 国家体育场功能繁多,科技含量高,世界领先的建筑新技术、新材料、新工艺、新设备多,是世界上独一无二的特大型体育场馆建筑,特别是重型钢结构和顶面大面积ETFE和PTFE膜结构,没有先例,近10项专项施工没有验收标准或国家现行施工验收标准不能覆盖,需要在施工过程中进行研究,制定专项验收标准

用于指导施工，具有巨大的技术、质量风险。

(2) 建设标准要求高。建设验收标准要求严格，综合调试、体育场地、体育设施技术标准必须与 IOC、SPOC、BOCOG 及国际单项体育联合会最新技术标准相一致；工程建设及工艺质量验收标准除了符合规范及国家最高质量标准——“鲁班奖”要求外，还应与国际接轨，接受国际奥委会、田联等国际相关组织的验收，满足体育场馆建设有关国际技术标准规定。

(3) 施工时间短，工期紧。施工专业多，国际、国内分包单位多，特殊、特种专业施工队伍多，现场质量协调、管理与控制难度大。

2.2 施工部署

2.2.1 部署原则

(1) 施工总体顺序：先体育场，后基座、热身场地。以钢结构安装为主线，综合考虑施工工期，先行施工混凝土结构，合理安排混凝土结构施工顺序，为钢结构施工创造条件。对影响钢结构吊装的混凝土结构，根据设计图纸要求留设施工缝，待钢构件吊装后进行施工。预制混凝土看台板待钢结构支撑卸载完成，随支撑塔架的分区拆除适时插入施工，同时保证顺序交接、先后有序、自然过渡。总体施工程序见图 5。

(2) 时间上的原则：计划先行、统筹考虑，综合安排施工作业，尽量避开雨季、冬季不利因素，同时兼顾北京地区季节性气候影响；否则提前布置，为施工创造条件。

(3) 空间上的原则：平面分区段，立体分流水，交叉作业，合理组织，保证施工的连续性、均衡性、节奏性；做好分阶段验收安排，提前插入二次结构、钢结构、装饰装修、机电安装工程。

2.2.2 施工区域划分

(1) 体育场混凝土结构工程依照 6 条变形缝划分为六个大的施工区域：NE 区、E 区、SW 区、SE 区、NW 区、W 区。安排三支施工队，每队负责二个区，区内流水施工。

(2) 钢结构工程划分为南北对称安装区域，总体划分为内环、中环及外环，安排两支安装队，分区对称安装。

主结构的安装顺序遵循对称同步、尽早形成安装区域局部稳定的原则。总体上分为三个阶段八个区域，第一阶段安装 1、2 区域；第二阶段安装 3、4 区域，第三阶段安装 5、6、7、8 区域（图 6）。

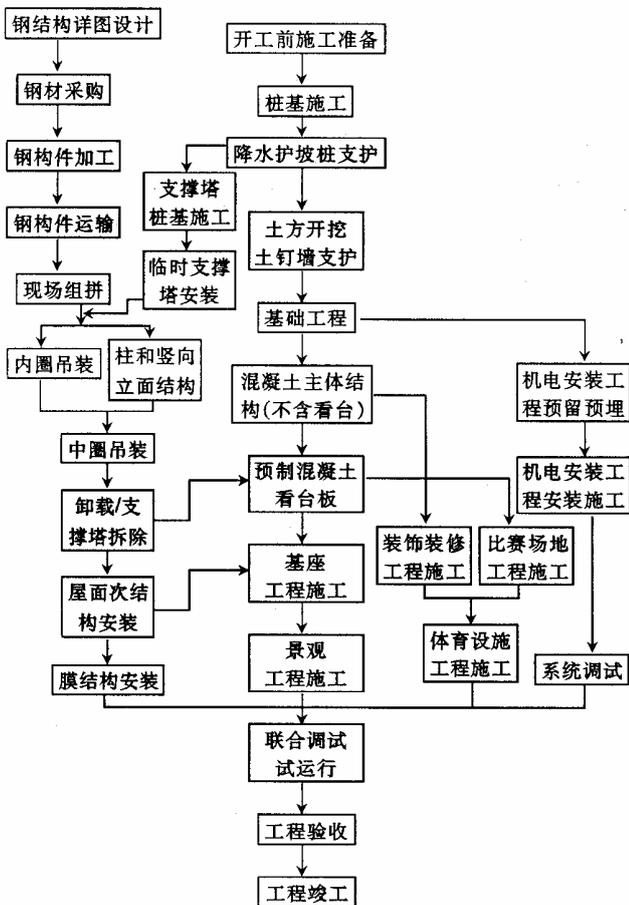


图5 总体施工程序

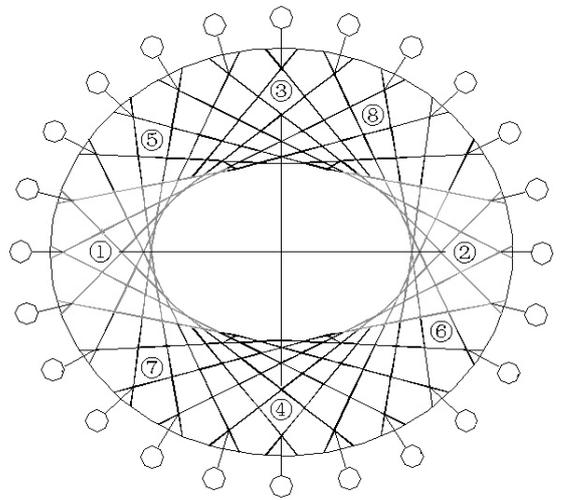


图6 主结构安装顺序

次结构的安装顺序对整体钢结构的安装具有重要的影响，为加强在每个安装阶段及支撑塔架卸载过程中的整体侧向稳定性，确定在支撑塔架卸载前随每个阶段钢组合柱的安装进行立面次结构的安装。

根据设计要求，顶面及肩部次结构在主结构卸载完成后进行安装。

3 施工中主要创新技术

本工程除大量推广应用建筑业十项新技术中的近 50 个分项技术外，还结合本工程的特点难点，在新技术的应用中有所突破创新。

3.1 混凝土结构耐久性技术

3.1.1 高耐久性混凝土配制试验研究

配制本工程高耐久性混凝土,主要应符合以下要求。

(1) 混凝土各种原材料技术指标必须符合耐久性设计要求,且相互之间具有良好的适应性。关键控制指标应包括:P·O42.5水泥,碱含量小于0.6%;非碱活性或低碱活性砂石,其中砂含泥量小于2.0%,石子最大粒径5~25mm,连续级配,空隙率小于40%;缓凝型外加剂,减水率大于20%,28d收缩率比小于125%。

(2) C40以上强度等级混凝土,水胶比不应大于0.41,砂率40%~42%。地下结构可采用大掺量粉煤灰混凝土,上部结构混凝土中水泥用量不可降低过多,以免影响混凝土的抗碳化能力。

(3) 在地下墙体混凝土中同时掺加适量微膨胀剂和聚丙烯纤维,可以较好地解决混凝土的开裂问题。

(4) 应采用缓凝和低收缩的高效减水剂,并适当结合其他缓凝措施,控制混凝土初凝时间至少在12h以上,避免混凝土早期强度发展过快。

3.1.2 大体积混凝土、超长结构的裂缝控制研究

3.1.2.1 大体积混凝土和超长结构温度场和应力场的仿真分析

(1) 计算结果分析

基础底板内承台温度与其相连的混凝土底板之间的温度梯度较大,因此大承台表面及其与底板相连区域的温度应力会比较大,可能超过混凝土的抗拉强度;底板转角处的应力基本上较同期的强度高,属于几何形态引起的应力集中问题,应力集中的部位基本在内角处。

钢结构承台计算最高温度为86℃,内外最大温差46℃;最高温度出现在3~7d之间,表明在表面出现裂缝的可能性很大;最大应力出现在表面和角部,内部应力较小;根据计算表面和转角处应力大部分区域出现超过同期砼强度的情况,承台表面可能出现龟裂;混凝土内部拉应力基本小于同期强度,因此,在养护较好的条件下,出现通裂的可能性较小。根据混凝土龄期分析,应力最大出现时间在7~21d期间,随着混凝土抗拉强度随龄期的增长,环境温度和湿度变化不大的情况下,28d后的最大应力基本小于同期抗拉强度。所以混凝土后期开裂的可能性不大。

(2) 结构构造优化

1) 基础底板:调整底板全截面配筋率,并在大承台上表面和承台与底板连接区域增配温度筋;底板有孔洞、厚度有变化或内转角处减少折角,采取弧线过渡,进行构造筋加强,适当增配斜向钢筋或网片。

2) 钢结构柱承台:应力较大点位置基本在表面与内转角处,针对承台施工分2~3次浇筑的情况,第一次浇

筑时,在厚侧壁表面与转角处增配温度筋,在施工停止面增配剪力钢筋;第二次浇筑时,在新浇筑混凝土表面增配温度筋。

(3) 混凝土浇筑工艺优化

控制混凝土入模坍落度,控制拌合物和易性、均质性;控制混凝土入模温度在25℃以下;混凝土采用合理分层分块连续浇筑;大面积底板施工采用跳仓浇筑;混凝土浇筑后表面泌水及时排除,表面搓平,二次振捣;采用覆盖塑料布后再加盖保温材料的保温保湿的养护方法,缓慢降温;钢结构承台根据现场实际情况采取“暖棚”方法进行保温保湿养护。

3.1.2.2 混凝土温度监测

钢结构承台在混凝土养护期间内部最高温度为60~70℃,测温结果与预控方案及计算数据一致性良好;混凝土养护期间最大温差为25℃左右,钢结构承台与入模温度相比较,内部最大温升为40℃左右。承台内部温度较高,根据测试温度计算出混凝土浇筑期间应力与同期抗拉强度比较,应力小于抗拉强度。

底板、环梁、大断面框架梁柱测温结果与预控方案中计算值相符性较好。所有结构没有出现有害裂缝。

3.1.3 混凝土结构耐久性检测评估

本工程的混凝土结构在国内的民用建筑领域首次全面应用《混凝土结构耐久性设计与施工指南》。现场检测表明,结构地下室外墙、钢结构承台、看台框架结构使用的混凝土材料,其强度全部满足设计要求,混凝土中的氯离子含量、碱含量均满足100年耐久性混凝土的要求。

混凝土结构的表层透气性系数在0.50以下,取芯检测的DNEL低于 $3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$,满足高性能混凝土的要求,对钢筋有良好的保护作用。按普通大气环境下的钢筋锈蚀耐久性评定,体育场看台的混凝土框架结构寿命可以达到100年以上。

“国家体育场混凝土结构耐久性(100年)关键技术研究”首次在国内民用建筑工程领域中以耐久性100年为目标,从设计、施工到检测进行了系统、全面的研究,并应用于本工程中,取得了显著的社会、经济效益。在北京市建设委员会组织的专家鉴定会上一致认为:该项目研究成果达到国际先进水平,在同类工程中具有重要的推广应用价值。

3.2 异型混凝土结构施工技术

本工程主体结构属于异型框架结构体系,由外围混凝土基座结构和内部混凝土碗状看台两部分组成,其中看台结构分成看台结构体系和楼盖框架结构体系(图7)。楼盖框架结构由混凝土梁板、斜柱、核心筒及外围剪力墙组成。

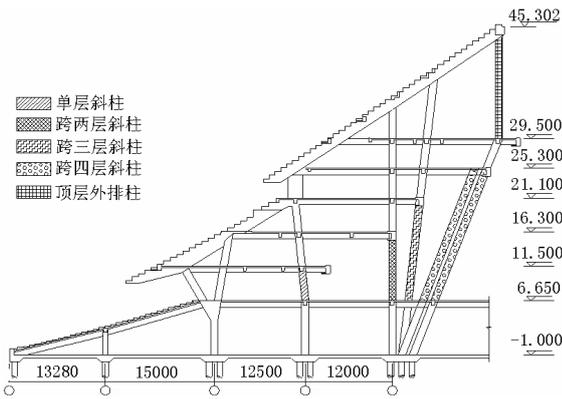


图7 典型框架立面示意图

3.2.1 普通斜柱的模板设计

普通斜柱是指单层斜柱和跨两层的斜柱，柱长6~12 m，采用现有模架技术，经设计和技术改造能够满足施工的需要。本工程采用了木工字梁斜柱模板体系和钢框木面板斜柱模板体系两种模板体系。以钢框木面板斜柱模板体系为例说明：面板采用18 mm 维萨板，100 mm×60 mm 和40 mm×80 mm 方钢作为背楞，面板和背楞采用钢制自攻螺钉背面背钉。各侧模板的连接采用了专用柱模锁具，在相互垂直的模板节点上为边框的刚性连接，以加强模板的整体性。考虑到提高柱模的周转使用率，体系由“下异型板+中标准板+上异型板”组成，为增加整体刚度，每面增加通长背楞2道100 mm×60 mm 方钢，配置中按照装配式的原则配置，使标准板可以充分周转利用。

3.2.2 超高混凝土斜扭柱施工技术研究与运用

跨三、四层柱柱长在14 m以上，其各项技术参数均超出常规混凝土柱的施工技术要求，因而采用普通模架体系无法解决。超高混凝土斜扭柱是本工程异型结构的典型代表，也是施工阶段最困难的施工技术问题。

综合分析多种方案后，提出将跨三、四层斜扭柱和顶层外排斜扭柱共124根变更为矩形钢管永久模板混凝土斜扭柱，简称钢模柱。采用10~14 mm厚的钢板组拼成矩形钢管，作为斜扭柱的永久模板而本身并不参与结构受力。经过现场实体试验柱的工艺检验，确定的最终方案如下。

(1) 钢模柱的吊装：采用分节套装法。跨三层的（垂直高度13.5 m）分为两节，跨四层的（垂直高度18.65 m）分为三节，钢筋现场分节绑扎，矩形钢管分节加工，现场分节套装。

(2) 混凝土施工：对于跨三、四层钢模柱，采用泵送顶升施工工艺。通过混凝土泵送压力检测推导出了在配置密集钢筋的钢模柱泵送压力分布公式。

北京市科学技术委员会组织同行专家对“国家体育场工程矩形钢管永久模板混凝土斜扭柱施工技术与应用

研究”项目进行成果鉴定，认为该项目的研究与应用，很好地解决了高斜扭柱混凝土结构的施工难题，确保工程质量，加快了施工进度，取得良好的经济效益和社会效益，填补了国内外该类施工技术的空白，达到国际领先水平。

3.3 后压浆钻孔灌注桩的试桩研究

基于工程的复杂性，桩基受力形式包括抗压、抗拔、抗水平力多种类型，桩顶标高差异很大，桩长不统一，特别是大跨度巨型空间钢桁架柱下基础的设计，难度极大。为解决以上问题，在充分研究、比较的基础上，根据地勘报告提供的数据和建议，采用了后压浆钻孔灌注桩，主要桩径为800、1 000 mm，桩端持力层为⑨层卵石、圆砾层，桩长31~37 m；确定了巨型空间钢桁架柱下考虑桩、土、承台共同作用的桩基设计方案和混凝土看台部分的桩基设计方案。本工程共确定了24根试桩，施工工艺采用旋挖钻孔灌注桩，桩身混凝土强度等级C40。试桩结果如下。

(1) Ø800 mm 钻孔灌注桩采用后压浆工艺后，单桩抗压极限承载力提高幅度不低于44%。

(2) 带承台固接体系的水平极限承载力与自由单桩的水平静载试验结果相比，单桩水平极限荷载提高了59%。

(3) 临界荷载时6根水平试验桩 m 值取值在59~131 MN/m⁴范围之间，平均值为92 MN/m⁴；桩顶水平位移为6 mm时 m 值在40~70 MN/m⁴，平均值为53 MN/m⁴。按JGJ 94—2006《建筑桩基技术规范》，桩身配筋率较高且水平荷载为长期作用时， m 值按系数0.4折减，因此，临界荷载时 m 值取37 MN/m⁴，对应于6 mm水平位移时 m 值取21 MN/m⁴。 m 值随变形增加而降低，设计中 m 值可考虑按变形控制取值。

(4) 部分试验桩单桩抗压极限承载力受桩身强度控制，单桩抗压承载力设计取值中应考虑水下灌注混凝土对桩身强度的要求。在试验桩的成桩工艺条件下，桩身混凝土强度工作条件系数为0.75~0.80。

(5) 确定了旋挖钻机成孔的工艺和桩径0.8~1.2 m、桩长31~37 m的施工参数。

3.4 预制清水混凝土看台板技术

(1) 清水混凝土预制技术是集混凝土构件结构研究、模板设计、混凝土施工和项目管理为一体的集成技术。鉴于设计师对“清水”并未提出明确要求，根据国家体育场构件特点，制定了清水混凝土预制看台板质量标准，用于体育场看台板的质量验收依据。

(2) 确定了看台板的生产方法为台座法。与机组流水法和流水传送法相比，选用台座法在浇筑混凝土后不被二次扰动，更利于保证看台板成品的结构质量和外观质量。

(3) 看台板浇筑为立打和反打相结合的成型方式。L 形和一字形构件立打成型, U 形和 L+U 形反打成型, 使看台板只留下一个成型面, 在充分保证外露面是模板成型面的同时还节省了收面时间, 可以确保外观质量满足清水混凝土要求。

(4) 地下浅池蒸汽养护。蒸汽养护能有效地加快生产周期, 提高预制生产率, 控制构件外观颜色差异。

(5) 采用组合式钢模板。模板刚度、稳定可靠性高, 有利于保证结构成型质量, 且易于细部处理。其连接组装体系由连接螺栓、螺母和拉杆组成。

3.5 Q460 高强特厚板焊接技术

本工程钢结构因结构跨度大、构造复杂, 局部构件受力特别大, 桁架柱设计时局部选用 100~110 mm 厚的 Q460E-Z35 级钢材。具体应用部位有: 桁架柱为 C1、C10、C12、C13、C22 和 C24, 柱脚为 C10、C12、C22 和 C24 (图 8), 图 8 中圈中为 Q460E-Z35 厚板应用部位。Q460E-Z35 钢构件截面形式有箱形和菱形两种, 总用钢量约 700 t。

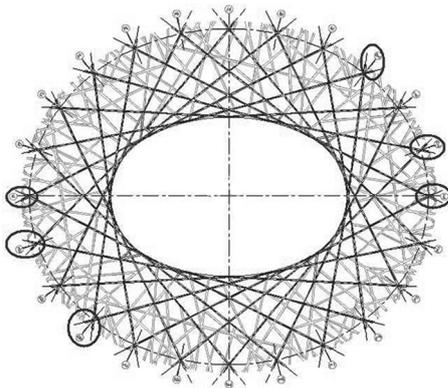


图 8 Q460E-Z35 厚板应用位置示意

3.5.1 热加工及焊接性试验

在进行焊接性及热加工试验研究时, 本工程主要从焊接裂纹敏感性、热切割及热矫正等方面进行了研究。在进行 Q460E-Z35 钢的焊接冷裂纹敏感性试验研究时, 从焊接连续冷却组织转变图、热影响区最高硬度试验、斜 Y 坡口焊接裂纹试验和焊接冷裂纹插销试验等四方面进行了研究, 共进行了 71 组试验, 得到如下试验结果。

(1) 由于 Q460E-Z35 钢碳当量较高, 板材采用热切割工艺时, 应在切割前以高于 150℃ 的预热温度进行预热; 对于 Q460E-Z35 钢箱形构件板材的热切割, 建议选取更高的预热温度或采取切割后刨(铣)边措施。

(2) 钢构件的热矫正应在最低预热温度为 640℃ 并空冷的条件下进行。

(3) Q460E-Z35 钢焊接前必须以高于本试验确定的最低预热温度(150℃)充分预热。同时, 通过控制焊接操作手法以保证焊缝和热影响区的冷弯和冲击性

能。

(4) Q460E-Z35 异种钢焊接时, 可依据强度级别较低的钢材选择焊接材料; 在预热温度和预热范围的选择上, 应执行抗冷裂性较差的钢材的预热标准。

3.5.2 Q460 厚板焊接施工技术

3.5.2.1 焊接工艺流程

国家体育场钢结构工程 Q460E-Z35 厚板焊接工艺流程如图 9。

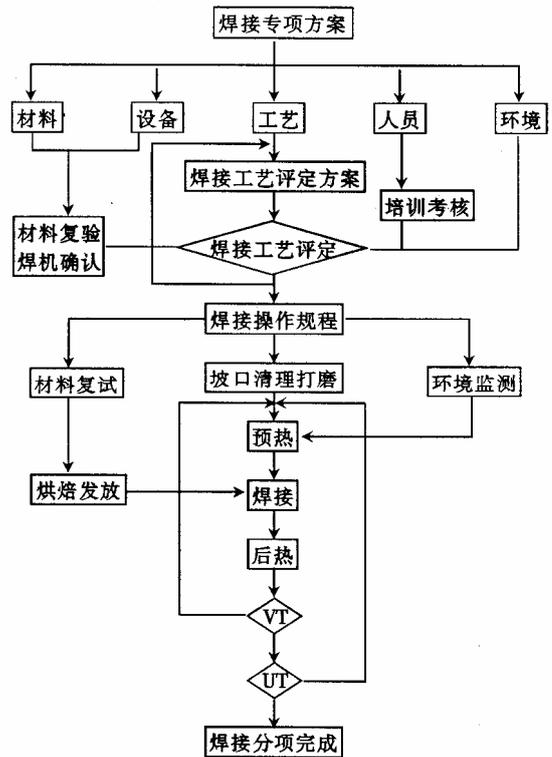


图 9 焊接工艺流程

3.5.2.2 操作工艺

(1) 焊前清理: 焊接前, 对 Q460 钢的热切割面用角向磨光机进行打磨处理, 打磨至露出原始金属光泽。同时对坡口加工造成的钝边、凹槽进行打磨处理。

(2) 坡口形状控制: 设计有明确要求的按设计要求进行, 没有明确要求时按坡口角度 35°、间隙 8 mm 处理。焊前坡口尺寸检查项目为间隙、错边、焊缝原始宽度三项, 并做好原始记录。

(3) 预热、层间温度及后热温度控制: 预热温度不得低于 150℃, 层间温度控制同预热温度要求但不得高于 200℃。焊接完毕后, 立即进行后热处理, 后热温度 250~300℃, 后热时间 2 h。后热完成, 岩棉被保温缓冷至环境温度。

(4) 加热方法: 采用电加热的方法, 加热板设置在焊缝正反两面, 预热温度达到设定值后, 将焊缝正面的加热板拆除, 焊缝背面的加热板作为伴随预热, 焊后后热处理时再将正面加热板重新布置, 并用岩棉被包裹

严密。

(5) 焊接环境要求: Q460 钢焊接要求在正温焊接, 当环境温度在负温时, 需搭设保温棚, 确保焊接环境温度达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 环境风速需小于 2 m/s 方可施焊。

(6) 焊接技术要求: 焊接过程严格执行多层多道、窄焊道薄焊层的焊接方法; 同一焊缝应连续施焊一次完成, 特殊情况下不能一次完成时应进行焊后的缓冷, 再次焊接前必须重新进行预热; 焊接完成 48 h 后进行无损检测。

(7) 其他要求: 禁止在母材上焊接卡码及连接板等临时设施, 若必须焊接, 在焊前按照正式焊接要求对母材进行预热 ($150\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$); 在切割临时设施时, 必须进行预热 ($150\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), 避免伤及母材, 否则, 必须及时进行焊补后打磨圆滑过渡; 在焊接过程中, 严禁出现在母材上随意打火或拖拉焊把、焊枪对母材造成电弧擦伤, 若发生该种情况, 应立即报告技术人员, 并采取措​​施进行焊补和打磨, 预热和后热温度同正式焊接。

3.5.2.3 质量控制要点

(1) 将焊机、焊材厂家作为质量保证体系中的重要闭合控制环节, 选择工程需要的焊机及焊接材料, 确保工程的焊接质量;

(2) 严把焊工水平关, 制定严格的考核和准入制度;

(3) 采用远红外电加热技术, 对 $\delta \geq 36\text{ mm}$ 的焊缝和重要焊接节点全部采用电加热, 保证焊缝预热 (后热) 温度的均匀和准确性, 严格控制焊接应力、防止焊接裂纹的产生;

(4) 自检无损检测单位参与焊接的全过程管理, 对坡口处理、焊接方法、焊接参数等进行见证, 为最终检测结果提供正确判断。

3.5.2.4 焊缝质量检查

本工程钢结构工程 Q460E-Z35 厚板焊接完成后, 由监理单位组织相关单位进行焊接质量检查。检查结果表明: 焊缝外观质量及内部缺陷均能够满足设计文件及《国家体育场钢结构施工质量验收标准》关于一级焊缝的有关要求。

北京市科委组织了科技成果专家鉴定, 其结论为: 本课题研究成果填补了国内低合金钢特厚板焊接领域的空白, 达到国际先进水平; 本课题研究成果在重、大型焊接钢结构中的推广应用有重要意义, 技术成果资料可供相关国家标准、规范及规程的修订参考。

3.6 箱形空间弯扭构件加工制作技术

本工程为编织“鸟巢”独特的建筑造型, 设计时在连接屋面结构与立面结构部位 (即肩部) 及主桁架单 K 形、双 K 形节点全部采用了弯扭构件, 其截面尺寸主要为 $1\ 200\text{ mm} \times 1\ 200\text{ mm}$, 材质涉及 Q345C、Q345D、

Q345GJD, 板厚为 $10\sim 60\text{ mm}$, 总用钢量 14 000 多 t。

3.6.1 箱形弯扭构件三维建模及壁板展平放样软件开发

在进行弯扭构件三维建模及壁板展平放样软件开发时, 分别从箱形弯扭构件成型原理、软件架构分析、三维建模及展平放样软件开发等方面进行了研究。

在进行箱形弯扭构件壁板展平放样软件开发时, 利用“单参数平面族包络曲面必可展的原理”和“可展面保角保长原理”, 在面积保持不变的前提下, 对弯扭曲面在短方向进行划分, 然后再对展开后的曲面再进行拼装, 最终得到原始弯扭曲面的展平放样。

3.6.2 弯扭板件成型工艺及成型检查技术

3.6.2.1 弯扭板件无模成型技术

为保证不同厚度弯扭板件的加工精度, 按照国家体育场钢结构工程弯扭构件的厚板规格共进行了 12 组多点无模成型工艺参数试验。根据试验结果, 总结出一套满足本工程需要的弯扭板件的无模成型工艺参数。

3.6.2.2 三辊卷板成型技术

根据本工程箱形弯扭构件及多向微扭节点的特点, 结合现有设备情况, 对三辊卷板机配套软件开发、三辊卷板机卷制成型工艺及油压机整形、弯扭板件成型质量检查等方面进行了深入研究, 总结出一套针对三辊卷板成型工艺压制箱形弯扭构件及多向微扭节点的制作工艺技术。

3.6.2.3 弯扭板件成型质量检查技术

为检验弯扭板件的无模成型质量, 在深入研究的基础上将 Metro In 工业三维测量系统首次引入建筑钢结构加工质量检查过程中, 开发出国家体育场钢结构工程弯扭板件成品质量检查的三维坐标测量系统, 该技术也可用于弯扭构件成型质量检查。

3.6.3 弯扭构件加工制作

3.6.3.1 工艺流程

国家体育场钢结构工程箱型弯扭构件制作工艺流程如图 10 所示。

3.6.3.2 箱形弯扭构件的制作工艺

(1) 根据图纸要求制作胎架, 胎架模板的设置必须保证模板上口线形与构件表面外形一致, 并有效地增加构件焊接过程中抗焊接变形的临时刚度; 整个胎架制作完成后既要便于构件拼装, 又要便于在制作过程中对构件变形及精度的监控、测量。

胎架制作时, 根据平面投影尺寸划出地脚线外形及模板位置线并设置模板, 模板两端高度尺寸根据主视图上的尺寸量取。

(2) 将成型加工好的箱体下翼缘板吊上组装胎架进行定位, 箱体壁板应与胎架模板上口紧贴, 其间隙应控制在规范允许范围内。

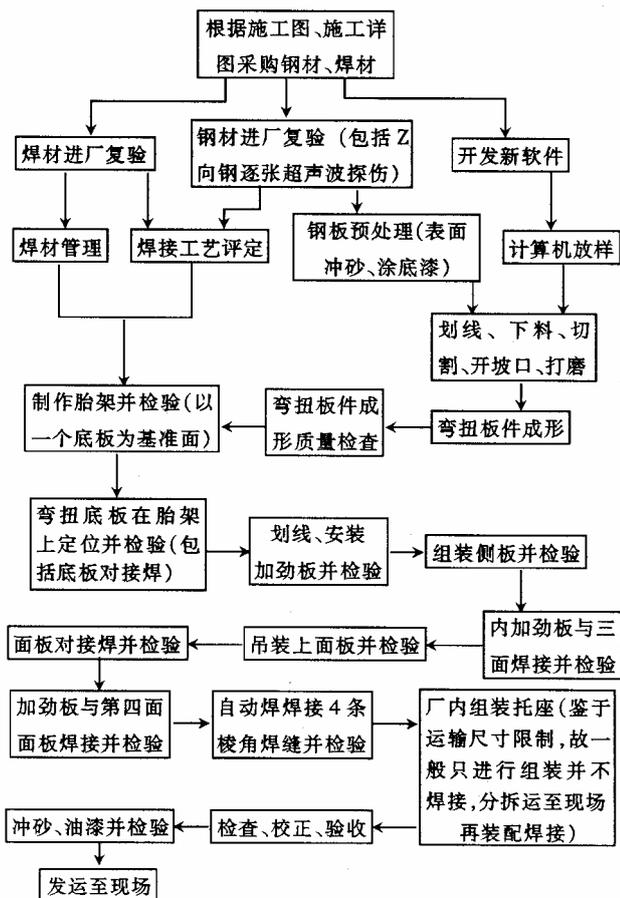


图10 弯扭构件制作工艺流程

(3) 安装加肋肋及两侧腹板, 检查与壁板的安装间隙, 定位后提交检查员验收, 验收合格后先进行箱体内部的焊接, 焊接时注意采取合理措施减少焊接变形。

(4) 箱体内部焊接并检验合格后, 进行封板(即装上翼缘板), 封板同样必须保证与加肋肋的安装间隙, 进行翻身后再焊, 焊后校正测量(图11)。

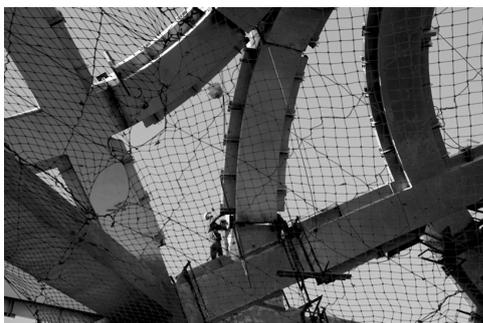


图11 典型弯扭构件实物图片

3.6.3.3 成型质量检查

由于现行国家规范、标准及规程对弯扭构件及多向微扭节点验收均无相关规定, 在充分调研的基础上, 制定出国家体育场钢结构工程弯扭构件及多向微扭节点的验收标准, 并将相关内容编入《国家体育场钢结构施工质量验收标准》(JQB-046-2005)。

国家体育场钢结构工程弯扭构件加工完成后, 由监理单位组织相关单位进行检查。结果表明, 弯扭构件的成型质量均满足要求。

北京市建设委员会主持召开了“国家体育场钢结构工程箱形弯扭构件及多向微扭节点制作技术及应用研究”科技成果鉴定会, 专家认为研究成果在建筑钢结构制作领域填补了国内空白, 达到了国内外同类研究项目的领先水平; 成果在建筑钢结构制作领域的推广应用具有重要意义, 技术成果资料可供相关国家标准、规范及规程的修订参考。

3.7 主钢结构吊装技术

国家体育场钢结构工程由24根桁架柱与48根主桁架围绕着体育场内部碗状看台区旋转而成。这24根桁架柱和48根主桁架作为编织“鸟巢”钢结构的“纲”形成国家体育场主钢结构, 主钢结构总用钢量约21700t。

3.7.1 桁架柱吊装

国家体育场主钢结构共有24根桁架柱, 每根桁架柱重量均超过600t, 综合考虑大型吊机的资源情况及经济性, 桁架柱分为上、下柱两段进行吊装。其中, 下柱分段高度32~45m, 上柱分段高度15~19m, 纵横向宽度16~25m。吊装时, 南北两区对称进行安装。

3.7.1.1 桁架柱吊装工艺流程

桁架柱拼装完成并验收合格→桁架柱下柱脱胎→桁架柱下柱翻身→桁架柱下柱吊装→桁架柱下柱吊装就位→临时固定→调整校正→对接口焊接至坡口深度2/3→吊机松钩→与柱脚焊接完成→桁架柱上柱脱胎→桁架柱上柱翻身(图12)→桁架柱上柱吊装→桁架柱上柱吊装就位→临时固定→调整校正→对接口焊接至坡口深度2/3→吊机松钩→焊接完成。



图12 桁架柱上柱翻身

3.7.1.2 安装质量控制点

由于桁架柱下端与柱脚相连, 上端与主桁架相接, 且承受整个屋盖的荷载, 所以其安装质量十分重要。具体质量控制点如下: (1) 柱脚各管口的中心和标高; (2) 桁架柱内柱垂直度和桁架结构的相对间距; (3) 桁架柱

侧弯、扭曲及托座的翘曲；(4) 上下段桁架柱的对口偏差、坡口角度和间隙。

3.7.1.3 桁架柱安装稳定措施

桁架柱安装时，均采用独立悬臂安装的顺序，且由于桁架柱从下至上呈发散的趋势，即头重脚轻，所以桁架柱吊装就位后的稳定性至关重要。

对此，根据仿真计算分析安装过程中安装接口变位情况，在桁架柱下柱安装就位后在安装接口部位设置刚性拉压杆，保证桁架柱下柱上接口的变位在验收标准允许范围内，从而保证桁架柱上柱的安装质量。同时，桁架柱上柱安装就位后在下柱顶节点部位拉设缆风绳，保证整根桁架柱的整体稳定及安装精度。

3.7.2 主桁架吊装

国家体育场主钢结构共有 48 榀主桁架，吊装时遵循分区对称、尽早形成独立稳定区域的原则，按照三个阶段八个区域的吊装顺序进行施工。具体施工时，南北两区同步使用 1 台 800 t 和 1 台 600 t 吊车进行外圈和内圈主桁架的吊装。为充分利用现场场地条件，内圈主桁架提前吊装，与桁架柱吊装的第二个阶段同步进行，并尽早形成南北方向的稳定区域。同时确保内环 600 t 履带吊尽早退场，并最终由外环 800 t 履带吊进行屋面主桁架的分区合拢工作。

主桁架共分为 182 段，其中平面桁架共 166 段，立体桁架共 16 段。

3.7.2.1 工艺流程

主桁架脱胎→主桁架翻身摆放→分段吊装→就位→临时固定→校正调整及稳定设施设置→焊接→吊机松钩→相邻段吊装。

3.7.2.2 立体桁架吊装工艺

立体桁架共 16 个吊装单元，形成钢结构屋盖的内环，吊装时采用 CC2800 型 600 t 大型履带吊在内圈场地进行吊装。立体桁架吊装时不存在翻身、回直工序，构件脱胎后经构件调平工序即可通过吊机转臂、负载行走等动作吊装就位。但是，由于立体桁架吨位大，分担到滑轮组上的受力也大，故采用多门滑轮组，在调平过程跑绳行程长。

3.7.2.3 平面桁架吊装工艺

平面桁架吊装时，采用两种吊装工艺：南区外圈主桁架均在龙门吊拼装场地拼装，其吊装时采用两台龙门吊配合主吊机实现翻身动作，然后由主吊机单机吊装就位（简称三机吊装）；内圈及北区外圈主桁架吊装采用单机翻身、就位作业（简称单机吊装）。

3.7.2.4 安装质量控制点

具体质量控制点如下：(1) 桁架柱与主桁架连接处管口中心与标高；(2) 各分段桁架的管口中心与标高；

(3) 主桁架垂直度和侧向弯曲；(4) 相邻段主桁架的对口偏差和间隙。

3.7.2.5 主桁架安装稳固措施

主桁架安装高度高，风载较大，在未形成分块稳定单元之前，主桁架分段安装单元的侧向稳定性较差，为保证主桁架的安装精确和施工过程的安全性，采取如下安装稳固措施。

根据工程特点选择合理的安装顺序，先进行内环南北两个最大立体桁架安装单元的吊装，然后按照确定的安装顺序进行其他相关联的主桁架安装单元的吊装，调整就位后立即进行相连对接接口的焊接，以保证主桁架的平面外稳定性。其中，南北两个最大立体桁架安装单元吊装完成并调整就位后，立即采用刚性支撑进行加固，以保证其稳定性。

3.8 支撑塔架卸载施工技术

3.8.1 卸载具体步骤

根据卸载工况分析结果最终确定卸载步骤为：七大步、三十五小步。第一、二、三大步卸载步骤为：外圈卸载 10%、中圈 5%、内圈 5%，再中圈 5%，内圈 5%；前三大步完成后，外、中、内三圈各卸载总位移量的 30%。第四、五、六、七大步卸载完成总位移量的 70%，每大步卸载量为 17.5%，每大步步骤为：外圈卸载 17.5%、中圈 8.75%、内圈 8.75%，再中圈 8.75%，内圈 8.75%。卸载从外圈开始，最终支撑脱离工作顺序为外、中、内圈。

3.8.2 支撑体系

3.8.2.1 支撑体系设计选型

根据卸载分析结果，同时结合主结构安装分成三个阶段八个区域的顺序，将整体支撑体系设计成四大块，长短轴各两个区块，这四个区块支撑塔架通过连系桁架连成整体，形成自受力体系的过程总用钢约 5 500 t。

3.8.2.2 支撑体系施工

(1) 施工总体顺序

安装支撑塔架总体施工顺序为：先安装南北 A 区域；由 A 区域向东西侧扩展，逐步形成 B 区块；再在东西两侧向南北对称施工逐步形成 C 区块。

(2) 吊装工艺

除内圈个别支撑外，绝大多数支撑要穿过看台楼板坐落在混凝土看台基础底板支撑承台上（下设 9 根 $\phi 600$ mm 基础桩）。因此，所有外圈及部分中圈支撑塔架都不同程度的与混凝土看台斜梁交叉穿越。根据支撑塔架和混凝土看台交叉关系实际情况，支撑塔架的施工工艺可分为三类。第一类为可整体吊装的支撑塔架，包括绝大多数内圈支撑塔架及部分中圈、外圈支撑塔架，共计 46 个；第二类为分片吊装的支撑塔架，包括部分中圈、外

圈支撑塔架,共计20个;第三类为须单根柱肢吊装的支撑塔架,包括部分外圈支撑塔架,共计12个。

3.8.3 卸载系统

结合本工程的技术特点和实际需求,同时考虑到本工程的重要性和卸载对钢结构施工的重要性,最终确定了采用双作用液压千斤顶及计算机同步控制系统作为本次卸载操作的动力和控制设备。卸载设备由液压千斤顶,控制阀组,平衡阀,电动泵,截止式节流阀,压力、位移传感器和控制模块等组成。

按照卸载点的平面布置,整个卸载系统分为10个区域。卸载系统包括:中央控制器1台,区域控制器10台,油泵54台,千斤顶156台(每个卸载点2台千斤顶)。控制器、油泵、千斤顶通过控制电缆和高压油管连接。其中:区域控制器设置在支撑塔架的连系桁架上;内圈卸载点油泵设置在支撑塔架顶部平台上,中圈、外圈油泵设置在连系桁架上;中央控制器设置在体育场中央,是整个卸载系统的中枢。

3.8.4 卸载实施

卸载实施是一个复杂的系统工程,不仅需要技术保证,还需要建立完善的卸载组织机构。卸载组织机构分三大层面:指挥决策层,信息处理层,监测、操作管理及实施层。卸载实施过程中所有指令都通过设在场中央的指挥中心发出,同时所有监测数据和信息都汇集到场中央的信息中心。

3.8.4.1 卸载过程控制

制定了多种实施过程记录表格,便于卸载过程中能够详细确认和记录各种卸载数据和信息;同时在卸载过程中,配备监督管理人员和质量巡视监督人员,对操作人员的各种操作进行监督,确保按要求准确无误地执行卸载指令和程序。

3.8.4.2 卸载实时监测

卸载实施是钢结构从支撑受力状态向自身受力状态的转变过程。为及时准确掌握转换过程中各种参数的变化情况和比较实际转换结果与模拟计算的差别,以保证整个卸载过程在掌控之中,在卸载过程中对千斤顶反力、屋盖内环的变形、结构本体代表部位的应力应变、典型支撑塔架的应力应变、结构本体温度等5项内容进行了实时监测,同时监测结果实时地与计算值进行对比分析。

3.8.4.3 卸载结果

卸载实施过程历经3.5d,各种监测数据表明卸载实施过程正常,结果满足结构设计要求和相关验收标准的要求。其中:钢结构屋盖实测卸载最大变形平均值271mm与计算值286mm相差5%,卸载过程中主体钢结构的实测应力与理论计算值吻合良好。

北京市建设委员会主持召开了“国家体育场大跨度马鞍形钢结构支撑卸载技术研究及应用”科技成果鉴定会,专家认为本项目研究成果填补了国内外大跨度、复杂空间钢结构工程支撑卸载技术的空白,达到了国际先进水平。

3.9 钢结构防腐防火技术

本工程为突出鸟巢独特的建筑造型,整个钢结构工程全部暴露于大气环境中,属于室外钢结构,防腐涂装系统的防护设计年限25年。为此,设计对钢结构的防腐涂装提出很高的要求:防腐涂装系统在长年紫外线照射、雨水、冰雹、风霜、沙尘等环境下色彩与光泽无明显的变化;面漆层应具有较好的防静电与自洁性;防腐涂料在高温情况下不产生有毒物质;有效控制面漆红外线反射率,尽量降低太阳辐射吸收系数;防腐涂装本身应具有较好的绝缘性和良好的耐磨性。

3.9.1 防腐配套体系

根据大气腐蚀环境分析及试验结果,并综合考虑方案的经济性、涂料的技术可靠性等因素,鸟巢钢结构防腐配套体系如表1。

表1 鸟巢钢结构防腐配套体系

涂料类型	涂料名称	型号	涂装道数	干膜厚度/ μm
底漆	无机富锌底漆	ZB-06-8	1	75
封闭漆	环氧封闭漆	ZB-06-29	1	25
中间漆	环氧云铁中间漆	ZB-06-3	1	100
面漆	氟碳金属漆	ZB-04-603	1	25
清漆	常温固化型氟碳清漆	ZB-01-1	1	25

3.9.2 涂装工艺

(1)在经过处理并达到规定要求的钢结构表面上,采用高压无气法喷涂无机富锌底漆一道,控制干膜厚度在75~80 μm 之间;由于醇溶性无机富锌底漆干燥速度快,同时又是直接喷涂在喷砂的表面上,如果采用湿膜仪测定湿膜厚度,误差大,因此规定4h后用干膜测厚仪测定干膜厚度,若厚度达不到要求,应进行补涂。

(2)在钢结构加工厂喷涂一道无机富锌底漆,若条件允许,封闭漆最好也在加工厂喷涂。

(3)采用普通有气喷涂法喷涂环氧封闭漆一道,喷涂结束后,应立即测定湿膜厚度。24h后进行干膜测定,控制干膜厚度在25 μm 左右,然后进行下道漆的施工。

(4)采用高压无气喷涂法喷涂环氧云铁中间漆一道,可采取湿碰湿喷涂两遍后立即测定湿膜厚度。24h后进行干膜测定,控制干膜厚度为100 μm ,同时进行前3道复合层总厚的测定,应达到200 μm 。若达不到,可用ZB-X-1稀释剂将环氧云铁中间漆稀释到适当粘度,再薄

喷一道。

环氧云铁中间漆涂装完毕6个月内宜涂装氟碳金属漆,时间间隔最长不得超过10个月。在喷涂完环氧云铁中间漆干燥24h后即可吊装。

(5) 吊装完毕,在喷涂氟碳金属漆之前,因为环氧云铁中间漆已裸露在空气中较长时间,因此应对其表面进行必要的除尘除油及轻微打毛处理后,再采用普通有气法喷涂氟碳金属漆,采取湿碰湿的方法进行涂装,测定湿膜厚度为85~100 μm ,控制干膜厚度最低为25 μm 。

(6) 24h后采用普通有气法喷涂常温固化型氟碳清漆,采取湿碰湿方法涂装,测定湿膜厚度为58~70 μm ,控制干膜厚度最低为25 μm 。在涂装氟碳清漆前,要对氟碳金属漆表面吹尘,但不允许打磨。

待所有涂层涂装完毕并彻底干燥后,测定总干膜厚度应达到250 μm ,若达不到要求,需补涂氟碳清漆。

(7) 在整个涂装过程中,所用的各种涂料必须严格按照规定的比例配制,使用各自配套的专用稀释剂,配好后的涂料必须在规定时间内用完,否则失效。

为确保涂装质量,每涂下一道漆前,必须对上一道涂膜进行除尘(或除油污)清理,以保证涂料涂装质量。

底漆、封闭漆、中间漆之间、面漆与罩光清漆之间的最小涂装间隔时间均为24h。

3.9.3 涂装施工

为有效控制面漆涂装对周围环境、特别是对国家游泳中心膜结构的污染,针对工程实际情况,对涂装工艺进行了适当调整,具体调整如下。

(1) 顶面钢结构面漆高空涂装时,对于安防系统以内主桁架上弦、位于PTFE膜结构第二个吊点以里的下弦部分及腹杆和安防系统以内的肩部次结构及顶面次结构等部位采用滚涂方式进行施工。

(2) 立面钢结构面漆涂装应采取高压空气喷涂方式进行喷涂;涂装时,应通过控制喷枪与构件表面的距离和加入5%~10%的慢干剂等措施控制漆雾扩散量,减少对周围环境的污染。

(3) 立面钢结构面漆涂装时,充分利用风向来减少喷涂时产生的漆雾漂浮物对国家体育场周围环境的污染,比如当刮西北风时主要在西北部位进行面漆涂装;另外,当风力达到4级以上时,应停止面漆的喷涂工作。

本工程钢结构的涂装工作,随着钢结构的加工制作、安装过程分段进行涂装,历时约2年时间,涂装总面积约17 m^2 ,涂装施工质量完全满足设计文件及《国家体育场钢结构施工质量验收标准》的有关要求。

3.10 综合布排平衡技术

3.10.1 零层环道布排

零层为主要机房的设备层,大量的动力热力主管线集中在零层环道,而环道对车道的净空有严格要求,管道的综合布排主要为解决:(1)综合各专业的支吊架,解决各专业支架借用问题;(2)12个核心筒馈出的各管线分支打架衔接问题;(3)预留统一的设备检修空间和检修通道;(4)满足建筑整体的美观协调效果。

3.10.2 集散大厅公共区域布排

集散大厅公共区域包括1~5层的大厅和走廊,由于该区域集中了大量的风管、桥架、灯具,设备安装空间较小,布排工作可以最大化地合理分配各专业的空间,避免管线打架的同时压缩设备安装空间,满足建筑效果的要求。

3.10.3 基座超高区域布排

基座超高区域净空高达9m,机电管线分贴梁和长垂吊安装,布排工作主要提供贴梁各专业管线的合理层高、长垂吊管线的支架形式及路由、各专业施工顺序和整体美观效果。

3.10.4 设备机房布排

进出设备的管线垂直设备接口布排,其余管线平行设备布置;同类机房的管线支架应统一型式;需操作的部件(阀门、控制开关等)安装在便于操作的位置,且其安装位置、方向等一致。

3.10.5 要员区精装修布排

在满足机电专业功能需求的前提下,要员区精装修进行深化设计,确定各机电专业的终端设备点,布排调整机电各设备的安装位置及管线标高,达到安装和规范的要求。

4 结语

国家体育场工程被列为全国建筑业新技术应用示范工程。经过历时近5年的科技攻关,在诸多领域获得了突破性进展,取得了大量的测试数据、技术参数。截至目前,获得北京市科技进步二、三等奖各一项、获3项国家专利、2项软件著作权、4项国家级工法、6项市级工法。国家体育场科技示范工程成果经专家鉴定总体达到国际先进水平,其中高强厚板钢结构焊接技术、复杂异型钢结构综合安装技术、矩形钢管永久模板混凝土斜扭柱施工技术、箱形空间弯扭构件加工制作技术等成果达到国际领先水平,提升了我国建筑技术实力。本工程三次获得奥运工程质量安全流动杯,获得2006年度结构“长城杯”金杯和中国建筑钢结构金奖。本工程经济效益显著,通过推广应用新技术,节约造价8700万元,降低成本3.01%。