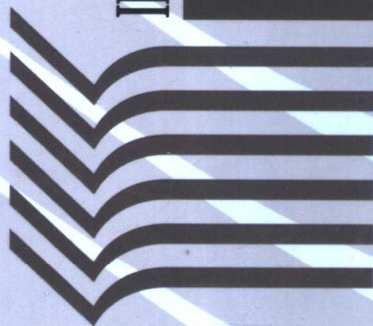


钢结构工程

施工技术措施

GANGJIEGOU GONGCHENG SHI GONG JI SHU CUO SHI

◆北京土木建筑学会 编



 经济科学出版社

钢结构工程施工 技术措施

北京土木建筑学会 编

经济科学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构工程施工技术措施/北京土木建筑学会
主编. —北京:经济科学出版社, 2005.6
(建筑工程施工技术措施系列丛书)
ISBN 7-5058-4999-9

I. 钢... II. 北... III. 钢结构-建筑工程-工程
施工-技术措施 IV. TU758.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 054079 号

责任编辑:张 力 杨秀华
责任校对:杨 海
技术编辑:董永亭

钢结构工程施工技术措施

北京土木建筑学会 编

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址:北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编:100036

总编部电话:88191217 发行电话:88191109

网址:www.esp.com.cn

电子邮件:esp@esp.com.cn

北京义飞福利印刷厂印装

787×1092 16开 16.25印张 350千字

2005年6月第一版 2005年6月第一次印刷

印数:0001—5000册

ISBN 7-5058-4999-9/F·4271 定价:32.00元

(图书出现印装问题 本社负责调换)

(版权所有 翻印必究 封面无防伪标均非正版)

本册编委会成员

主编单位：北京土木建筑学会

主 编：张伯熙

编写人员：(以姓氏汉语拼音为序)

安 伟	鲍广监	鲍广镒	蔡江洪	曹瑞峰	常永锁	陈柏全	陈华岛
陈木龙	陈桥生	陈绍游	陈 韬	陈贤德	陈祥贵	陈 颖	陈支明
程道广	崔振中	丁 胜	丁延敏	董传和	董小东	范玉平	方美财
冯金江	冯顺强	葛冬云	葛会来	古先琪	顾国荣	郭 强	郭少先
郭文耀	郝晨钧	何江羽	何文杰	何亚瑞	胡名凯	胡正平	黄建川
黄 昕	黄宗襄	江薇薇	姜德祥	姜忠国	李凤林	李国荣	李建洪
李文祥	李星辰	李 治	李宗洲	刘建普	刘进贵	刘秋生	刘树春
刘伟亮	刘新习	卢立香	鲁 林	吕 羽	罗 刚	罗 军	罗 义
马爱民	马行空	倪洪革	欧阳超	庞京辉	庞 涛	彭德喜	钱惠敏
强艳红	秦 宾	邱正清	曲成平	邵 茂	邵荣福	盛为光	石伟国
史凤莉	孙大军	孙 涛	田正宏	王炳昭	王 恒	王 宏	王继华
王康强	王力尚	王 琦	王申有	王维迎	王 煦	王学武	王云飞
王 照	吴柴生	吴焕林	吴 鸣	吴清策	吴圣杰	伍灿良	向纪才
肖水生	忻鼎康	邢克宣	徐 坤	徐联明	徐祥兴	徐重良	许霖苍
许 勇	杨 静	杨李忠	姚 刚	姚晋华	尹敏达	尤华忠	游志文
于宏才	于万东	余 鹏	张从思	张海升	张海雄	张科青	张全民
张同波	张伟中	张文英	张希黔	张喜一	张益龙	张友恩	赵 俭
赵荣耀	赵亚云	朱嘉亮	邹传学				

(由于部分作者地址变动,未能支付稿酬,敬请谅解,并请作者及时与出版社联系)

前 言

20世纪90年代以来,建筑技术发展方兴未艾,新技术、新工艺、新材料、新机具设备和新的技术管理经验层出不穷;特别是在地基与基础、墙体、钢筋混凝土、预应力混凝土、钢结构、防水、装饰装修等方面发展迅速,使建筑施工技术有了很大的进步和创新。同时为适应新形势,国家对设计规范、施工验收规范、规程以及各种技术标准等进行了全面修订和制定,并陆续颁布执行。在此情况下,为了能够更好地应用新规范,推广新技术,解决新问题,我们编写了这套“建筑工程施工技术措施”,以满足当前工程施工实际的迫切需要。

“建筑工程施工技术措施”系列丛书取材于全国各地近十年期间建造各类建(构)筑物共760个工程实例,集中收录了在建筑施工中采用的新结构、新材料、新工艺和新技术,是当今我国建筑施工最高技术水平的体现,并展示了施工技术现代化所取得的科技进步。本书可帮助工程技术人员开阔眼界、增长知识、丰富经验,提高分析问题和解决问题的能力,可作为工程技术人员日常工作、学习用书和相关专业人员参考。

本丛书分为六分册,即《地基与基础工程施工技术措施》、《钢筋混凝土工程施工技术措施》、《模板与脚手架工程施工技术措施》、《钢结构工程施工技术措施》、《建筑装饰装修工程施工技术措施》以及《防水工程施工技术措施》。

在本丛书的编写和审稿过程中,参阅了一些资料和书籍,并得到各省市建筑公司的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢,由于我们水平有限,加上时间仓促,书中缺点在所难免,恳切希望读者提出宝贵意见。

编者

2005年6月

目 录

第 1 章 概 述	1
第 2 章 钢结构安装	2
2-1 体育会展中心大跨度钢管桁架安装技术	2
2-2 体育场马鞍形钢屋盖工程难点与技术措施	6
2-3 体育场大型悬挑钢屋盖安装技术高空拼装法	9
2-4 机场航站楼扩建工程钢结构施工	13
2-5 大跨度巨型箱梁安装技术	16
2-6 超长箱形钢结构空间环梁的安装	22
2-7 大型设备无锚点吊推法	25
2-8 某国际贸易中心大厦双 H 形钢柱安装技术	28
2-9 某金融大厦倾斜圆管柱安装	32
2-10 某广播电视中心工程钢管柱施工	34
2-11 冷轧带肋钢筋焊接网在高层住宅工程中的应用技术	38
2-12 铸钢节点枝状空间钢结构的研究与应用技术	41
2-13 悬挂式钢 - 混凝土组合结构中钢结构安装技术	43
2-14 博览中心钢结构施工技术	47
2-15 室内小空间钢结构整体安装技术	51
2-16 30m 大跨度预应力 V 形折板屋盖安装技术	53
2-17 高层办公楼钢结构安装的施工方法	55
2-18 某报业大厦钢结构施工技术	59
2-19 某大厦全国产化高层钢结构施工技术	62
2-20 某中心大厦钢结构转换桁架施工技术	64
2-21 某国际会议中心钢结构安装技术	68
2-22 某国际会展中心钢管主桁架安装技术	71
2-23 体育场空间钢桁架屋盖施工技术	75
2-24 某地三期重水堆核辅助厂房钢结构施工技术	77
2-25 双曲面穹顶钢结构屋盖主桁架安装技术	82
2-26 某机场扩建航站楼屋盖钢桁架滑动技术	85
2-27 航站楼钢屋盖区段整体移位系统的开发与应用技术	89
2-28 大跨度钢屋盖定点吊装与整体滑动施工技术	94
2-29 国际机场航站楼钢结构安装技术	99
2-30 某机场航站楼大跨度钢结构施工技术	102
2-31 大面积钢屋盖多吊点非对称整体提升技术	107

2-32	特大型钢结构整体顶推平移技术	111
2-33	大型门式铰提刚架制作与拼装技术	114
2-34	大跨轻钢刚架梁安装技术	117
2-35	钢结构逆做法施工技术	119
2-36	某交易中心大厦球体高处安装施工技术	126
2-37	某广场大型钢屋架吊装技术	129
第 3 章	钢网架结构安装	132
3-1	某大剧院壳体钢结构吊装技术	132
3-2	某体育馆网架施工技术	137
3-3	某国际会展中心展厅屋盖钢结构施工技术	139
3-4	大跨度异型网架滑移施工技术	141
3-5	电厂厂房网架安装技术	144
3-6	某新机场货运站钢网架屋盖安装技术	147
3-7	大跨度柱面网架折叠展开提升的控制技术	151
3-8	某大厦钢网架施工技术	154
第 4 章	预应力钢结构	157
4-1	预埋预应力锚栓的大直径销轴铰支座安装技术	157
第 5 章	张力膜结构	163
5-1	体育场膜顶钢结构安装技术	163
5-2	高空张拉式索膜屋盖施工技术	166
5-3	预应力单索结构施工探讨	171
5-4	某体育场空间箱梁、拉索网壳悬挑结构施工技术	175
5-5	大直径高强钢棒安装和张拉技术	178
5-6	某体育馆屋盖钢结构的安装施工技术	181
5-7	挑篷钢结构屋盖预应力斜拉索施工	184
5-8	某市体育场钢屋盖拉索施工技术	188
5-9	某体育会展中心体育场索膜结构篷盖的设计与施工	190
第 6 章	钢塔桅结构吊装	194
6-1	超高层建筑钢塔杆安装及质量控制	194
6-2	某高层建筑群钢桅杆液压提升施工技术	195
6-3	倒装吊升法安装高层建筑屋顶天线桅杆	197
第 7 章	轻钢结构安装	202
7-1	某联合厂房大跨度轻钢结构安装技术	202

第 8 章 高强度螺栓连接	204
8-1 高精度大直径地脚螺栓固定技术	204
8-2 超高层工程中的应用双向可调锥螺纹套筒钢筋连接技术	209
8-3 钢结构独立柱基定位板地脚螺栓满中筋施工技术	210
第 9 章 金属压型板工程	214
9-1 高层住宅斜坡屋面彩钢板安装施工	214
9-2 彩色复合保温钢板在大跨度屋面工程中的应用	217
9-3 压型钢板屋面施工技术	219
9-4 可移动金属拱形屋面设计与施工技术	220
第 10 章 钢构件焊接与加工制作	223
10-1 某国际展览中心屋面管桁架结构焊接技术	223
10-2 核电站钢衬里环吊牛腿的制作与焊接技术	227
10-3 高层建筑屋顶钢棚架加工技术	230

第 1 章 概 述

1. 钢结构的特点

(1) 钢结构的优点

与其他形式相比，钢结构具有许多优点，主要归为以下几点：

1) 钢材的抗拉、抗压、抗剪强度相对来说较高，钢结构构件断面小、自重轻。钢材与混凝土、木材相比，虽然密度较大，但是其强度较混凝土和木材要高得多。在同样受力的情况下，钢结构与钢筋混凝土结构和木结构相比，构件较小，重量较轻。

2) 钢结构有较好的延性，抗震性能好，尤其在高烈度地区，使用钢结构就更为有利。

3) 钢结构占有面积（或称为结构平面密度）小，实际上是增加了使用面积。高层建筑钢结构的结构占有面积只是同类钢筋混凝土建筑面积的 28%。

4) 钢结构制作简便，施工工期短，钢结构构件一般是在金属结构厂制作，施工机械化，准确度和精密度较高。

5) 钢结构的材性好，可靠性高。

6) 钢结构建筑在使用过程易于改造，如加固、接高、扩大楼面等内部分割、变动比较容易、灵活。

7) 钢结构的密闭性好，焊接的钢结构可以做到完全封闭，因此适宜建造要求气密性和水密性好的气罐、油罐和高压容器。

8) 钢结构可以做成大跨度、大空间。

9) 在钢结构建筑中管线的布置、更换、修理十分便利。

(2) 钢结构的缺点

1) 耐腐蚀性差。新建造的钢结构一般隔一段时间需要重新刷涂料，维护费用高。

2) 耐火性能差。钢结构耐火性较差，在火灾中，未加防护的钢结构一般只能维持 20min 左右。

2. 钢结构应用范围

目前我国在工业与民用建筑中钢结构的应用，大致有如下范围：

(1) 重型厂房结构

(2) 大跨结构

(3) 塔桅结构

(4) 多层、高层及超高层建筑

(5) 承受震动荷载影响及地震作用的结构

(6) 板壳结构

(7) 其他构筑物

(8) 可拆卸或移动的结构

第2章 钢结构安装

钢结构具有强度高、抗震性能好、施工速度快等优点，因而广泛用于高层建筑中。钢结构通常在专门的钢结构加工厂制作，然后运至工地经过组装后进行吊装。

2-1 体育会展中心大跨度钢管桁架安装技术

从构件制作、吊机道路、双机抬吊同步控制、支座就位、现场焊接、高空拼接等方面介绍了某体育会展中心百米跨度倒三角形钢管桁架的安装技术，统计汇总工期进展和质量检测等相关数据。

2-1-1 钢桁架屋盖系统概况

该工程钢屋盖为大跨度钢管桁架形式，由钢管桁架、檩条、蜂窝梁、象鼻子等组成。

A区展览馆主要由10榀81m跨度、南北方向设置的主桁架及其次桁架和①~③轴的10榀箱形蜂窝梁等组成；B区体育馆主要由10榀95m跨度（长120m）、东西向设置的主桁架及其次桁架和⑤~⑦轴的10榀双曲线象鼻子等组成；A区和B区交叉部位为AB区设备区。

A区主桁架为无缝钢管，材质为Q345C，最大钢管直径为351mm，壁厚最大为18mm，桁架为倒三角形，截面约为4.5m×5m；桁架长81m，单榀桁架最重约47t；支座形式为一端固定一端滑动，以减少施工和使用中的热胀冷缩变形。

B区主桁架为焊接钢管，材质为Q345C，最大钢管直径为550mm，壁厚最大为28mm，桁架也为倒三角形，截面约为4.7m×7m；桁架长约120m，单榀桁架最重约128t，同样采用一端固定一端滑动。

2-1-2 吊装方案的比较、分析、优化和确定

1. 目前国内大跨度钢结构吊装方案的现状

针对该工程钢结构跨度大、自重大、建筑功能设计特殊和施工场地情况等特点，结合以往类似工程的施工经验和国内大跨度钢结构安装施工的工程实例，进行了多方案的比较、分析。目前国内大跨度、大吨位钢构件的安装一般可采用高空散拼成形、整体吊装、整体提升及整体顶升、分段吊装高空拼接、高空滑移等方法，并可分为跨内吊装和跨外吊装。各种吊装方法的特点和优缺点比较如表2-1所示。

2. 多种方案的比较分析

(1) 综合分析了该工程的具体情况，结合各种吊装方法的特点和优缺点，并考虑现有的机械设备情况、施工工期要求，我们认为整体提升或整体顶升难以适用该工程如此大跨度和大吨位的钢屋盖系统；如采用一次性整体吊装，则需超大型吊装设备，对现场地基土

的地耐力要求较高,且现场供吊装回旋场地及配套起重设备的工作半径相对较大,地面拼接成形后的大跨度桁架的转移十分艰难。而高空散拼需耗用大量的支撑架体材料,占用大量的施工工期,高空焊接量十分可观。

表 2-1 多种吊装方法的对比

序号	吊装方法	特点	优点	缺点
1	高空散拼成形	结构在设计标高一次拼装完成	可用简易或小吨位的起重运输设备	现场及高空作业量大,同时需要大量的支架材料
2	分段吊装	地面拼接,高空吊装就位	高空作业量较高空散拼法大为减少,拼装支架也相应减少,可充分利用现有起重设备,较为经济	对于分割后结构的刚度和力度状况改变较大的钢屋盖影响较大
3	整体提升整体顶升	将结构在地面拼装完成,再由起重设备垂直将结构整体提升至设计标高,可利用结构柱作为提升结构的临时支撑结构	可以将屋面板、防水层、采暖通风与电气设备等分项工程在最有利的高度处施工,可节省施工费用	对于周边支撑点较少或整个屋盖系统较重的不适用,对提升设备的整体协同作业要求较高
4	整体吊装	将结构在地面总拼成整体后,用起重设备将其吊装到设计位置	地面总拼可保证焊接质量和几何尺寸的准确性	对吊装设备要求高,需超大型吊装设备,费用昂贵
5	高空滑移	将结构条状单元在建筑物上由一端滑移到另一端,就位后总拼成整体	结构的滑移可与其他土建工程平行作业,缩短总工期,设备简单,不需大型起重设备	对施工单位机械综合配置能力要求高,需增加安装滑道、支柱等辅助钢构件

(2) 会展中心二层楼面为大跨度预应力梁板,工作量较大。如采用跨内吊装,会展中心楼盖需在吊装后施工,且结构中涉及大量的节点预留、后期的连接处理,并造成大量的后续工程难以实施,工期难以保证。而跨外吊装,则可在不影响内部施工的情况下实施,现场可交叉流水作业,工期可以保证。通过分析,我们认为会展中心采用跨外吊装施工方案可行。

(3) 通过比较分析,我们认为该工程屋盖系统大跨度桁架的吊装单独采用某种方法都难以成功,应综合应用目前国内较为先进可行、技术成熟的施工技术,针对会展中心和体育馆2个区段的不同情况分别采用适用的施工方法。

3. 吊装方案的确定

A区展览馆钢桁架主要采用2台150t履带吊机进行吊装,桁架现场整体组装后,双机抬吊,原地提升到34m高度,稳定后,同步行走约130m(最大)后,稳定就位。如图2-1所示。

B区体育馆钢桁架主要采用2台150t履带吊进行吊装,先在体育馆南侧留设1个施工通道,桁架在跨外现场胎架整体组装后,每榀桁架分4段,采用双机分段抬吊,2台吊机场外分段抬吊后,行走至场内,利用跨内搭设的临时支撑柱稳定就位,每段之间采用高空对接的施工方法。如图2-2所示。

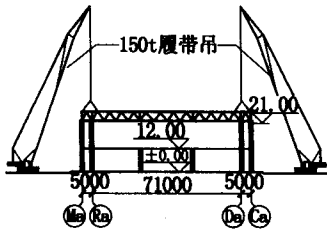


图 2-1 会展部位双机抬吊示意

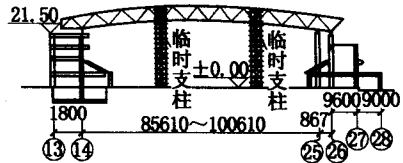


图 2-2 体育馆部分分段吊装示意

通过采用上述2种吊装方案,在进行钢桁架和屋盖施工时,可充分利用现有设备,且不会影响下部的混凝土结构施工,这样可保证总工期。

2-1-3 施工概况

1. 构件制作

主要材料为无缝钢管,主弦杆材质为Q345C,其他部位材质为Q345B。

钢管桁架、蜂窝梁、檩条、幕墙柱、幕墙钢结构、马道、设备平台、舞台马道等所有钢结构构件,均由工厂加工制作成单个杆件形式。

2. 吊机行走道路

施工前采用碎石垫层碾压对行走道路进行加固处理,并进行试行走,对在试行走中发生的道路下沉、凹陷等现象及时处理,在碎石垫层上再铺一层厚钢板,经多次试行走确认无碍后进行正式的吊装。

3. 双机抬吊同步控制

施工中我们采用了多种方法进行同步控制,对2台150t履带吊的行走速度严格控制,在1m/s左右,1榀桁架从起吊到安装就位约2h,并在两侧行驶道路上设置了标线,在操作中进行核对,以保证两侧吊机行驶速度均匀一致。

同时在高空桁架前进方向两侧各设1名协调指挥员,对行走过程中的同步情况进行检查,发现问题及时与对方和下方的司机沟通,在上部高空位置同样设置了标线,要求每行走1m即检查复核1次,发现不同步即进行调整,防止偏差累积造成同步调整困难。

4. 安装就位

根据支座方式的不同,分别在两侧柱顶安装相应的支座板。支座为子母式,分别由固定在桁架下端和柱顶预埋件上口的部件组成。安装到位后对准支座位置落槽固定,并预先检查轴线、标高尺寸,就位后及时进行支座板板间的焊接固定和桁架间的横向联系杆件的焊接固定,保证桁架安装就位牢固不移位。

5. 低位安装胎架及现场焊接作业

该工程钢桁架为工厂加工预制杆件，根据深化设计将组成桁架的每根杆件在数控机床上进行相贯线曲线、焊接坡口等的切割加工，制作出半成品再运至现场组拼。

相贯线加工管件现场进行组拼焊接作业，根据桁架几何尺寸在胎架上设置若干控制点，保证外形尺寸准确，并在组拼过程中安装1台数字式全站仪进行测量控制，对焊接过程中的焊接变形进行随时调整。

现场焊接采用BX-500-2交流焊机4台和ZXE-400-1直流焊机6台，根据杆件厚度、焊接温度等调整相应电流参数，以保证焊接质量达到设计要求。

6. 高空组拼作业

B区体育馆大跨度钢桁架分4段进行高空组拼，2台150t履带吊将场外分段组拼成形的桁架件分段行走吊装到场内后，放置在临时支撑立柱后，再进行调整就位和对接焊缝的作业。临时支撑立柱采用角钢制作成的桁架式周转件分块组拼，并在各独立的立柱间加设横向联系杆件和剪刀撑，以保证临时支撑立柱的稳定可靠。

高空组拼作业顺序：钢桁架→横向联系杆件→马道→檩条→象鼻子等，后期安装的杆件利用前期已安装的钢桁架作为操作平台。

7. 涂装防腐

钢结构部分所有构件表面涂装除锈Sa2.5级+环氧富锌底漆2道+环氧云母氧化铁中间漆2道+超薄型防火涂料+配套面漆。

2-1-4 质量控制

1. 焊接要求

所有桁架对接缝为《建筑钢结构焊接技术规程》JG J81规定的一级焊缝，检测标准依据《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205，所有焊缝外观要求100%检测，对接焊缝超声波100%检测。

2. 原材料

所有材料（主材和辅材）到达工厂后，首先由工厂专职质检员会同驻厂监理工程师进行验收，查验合格证、材质证明书、特殊检验报告等，同时工厂监理见证取样进行检验，并取得合格检验报告。

3. 构件制作及安装质量

构件在工厂制作，现场安装，其中主要检验批：预埋件9份，零部件17份，组装32份，焊接45份，安装12份，涂装28份等；图纸会审、设计变更、洽谈记录共7份；原材料出厂合格证及进场检验报告共126份；隐蔽工程验收记录共20份；分项工程检验批质量验收记录、分项验收记录共131份。

4. 构件焊接检测

(1) 工厂检验焊缝2866处，其中超声波探伤一次合格2809处，一次合格率为98%，二次返修合格率为100%。

(2) 现场检测焊缝455处，其中超声波探伤一次合格451处，一次合格率为99%，二次返修合格率为100%。

(3) 该工程铸钢件共20套，探伤报告共80份，其中表面磁粉探伤和内部超声波探伤

各 40 份, 检验合格率为 100%。

工程实例:

该工程总工期为 508d, 钢结构施工总工期为 120d, 于 2004 年 1 月 10 日通过结构中间验收, 被评定为无锡市优质结构工程。

无锡市体育会展中心是无锡市的标志性建筑之一。体育会展中心分为 A 区和 B 区两部分, 其中 A 区为展览馆, B 区为体育馆。整个工程总建筑面积约 56000m², 长 260m, 宽 100m, 高 32.8m, 体育馆设 6600 个固定座位。

2-2 体育场马鞍形钢屋盖工程难点与技术措施

某奥林匹克体育中心主体育场屋盖结构体系是由与水平面成 45° 倾斜的、拱身跨度为 361.582m 的三角形变断面钢桁架拱和由 104 根钢箱形梁形成的中空马鞍形空间罩棚结构屋面系统组成, 总用钢量 12153t。整个屋盖结构体系在各种不同荷载组合情况下, 分别由主拱和钢箱形梁外端的“V”形支撑将荷载传至下部结构。

2-2-1 工程难点

奥体中心主体育场屋盖结构体系独特, 倾斜主拱通过前吊杆为箱形梁的悬臂端提供竖向约束, 而箱形梁则通过后撑杆为主拱提供平面外的侧向稳定, 两者互相依托。在整个结构体系未形成之前, 屋面系统与主拱皆非独立的结构静定体系。施工过程中, 不但要考虑吊装方案、吊装顺序、支撑系统布置方案、铸钢件焊接方案、温度和焊接变形控制方案、主拱组装和翻身方案、主拱合拢方案, 而且还要考虑吊装完成后的整体卸载方法和顺序, 施工难度相当大。

1. 本结构体系是由钢桁架拱、吊杆、马鞍形屋面网格及支撑柱组成的复合结构, 与纯拱结构、壳体结构具有不同的受力特点和失稳模式。倾斜主拱和屋面箱形梁互相依托, 体系异常复杂, 国内尚无相应的理论分析计算软件。同时, 为避免以往惯用的焊接连接节点存在的焊接残余应力、多次热影响使节点钢材变脆以及次弯矩对节点的影响等一些难以定量分析的问题, 本工程的关键节点设计采用了大量的铸钢节点。虽然国内已经在铸钢技术上解决了以往存在的缺陷, 但是国内对铸钢节点研究尚少, 无现成标准可循, 设计难度较大。

2. 本工程中既有 $\phi 50\text{mm} \times 4\text{mm}$ 薄壁无缝钢管, 又有 $\phi 1000\text{mm} \times 60\text{mm}$ 厚壁压制钢管; 既有 6mm 的薄板, 又有 85mm 的厚板; 既有角钢, 又有方钢; 既有铸钢件, 又有销轴、栓钉。材料规格齐全, 种类繁多, 采购与质量控制难度相当大。

3. 本工程既有主体结构件——主拱、M 杆、箱形梁、环形梁、连系梁、悬索管、屋面支撑、V 形支撑, 又有辅助结构件——屋面檩条、拱腹桁架、拱腹檩条、屋面马道、主拱马道等, 构件共有 33 种、杆件 16565 根, 致使加工制作和现场管理难度加大。

4. 本工程的主要受力部位——主拱、M 杆、箱形梁、悬索管、V 形支撑、V 形支座采用了大量的铸钢节点。铸钢节点共 8 种, 814 件, 合计 1643.3t, 其中最大铸钢件重量为 7.578t。从形状上看既有板式铸钢支座、锥形铸钢连接件, 又有圆柱形铸钢节点、球形铸钢节点、H 形钢铸钢节点。圆柱形铸钢节点和球形铸钢节点上支管数量多 (最长达 11

根),且大部分铸钢节点外形、尺寸均不一样,其木模制作与铸造难度巨大。同时,因铸钢节点承载力大、构造复杂、造型奇特、材质高,铸钢件的内在质量(主要是S、P含量和机械力学性能指标)和外形尺寸要求高,加大了铸钢件的铸造工艺、后处理难度及质量检查难度。

5. 本工程中既有 $\phi 1000\text{mm} \times 60\text{mm}$ 进口厚壁压制钢管、最大断面 $2100\text{mm} \times 500\text{mm}$ 及钢板厚度达 85mm 的变断面箱形梁,又有铸钢球及各种铸钢节点。整个屋盖系统除V形支撑柱与V形支座之间、M杆与箱形梁之间采用销轴连接外,其余部位均采用焊接连接。一级焊缝的焊口8656道,焊缝总长 76km ,焊材用量360余吨。现场大量的高空焊接(最高达 64.712m)、厚壁钢管焊接、厚板焊接及铸钢件的焊接更大大了焊接难度。

6. 本工程中的箱形梁节点构造相当复杂,既有与前支撑柱连接的H形钢铸钢件,又有与后支撑柱相接的铸钢球;既有与环形梁、连系梁相接的短管,又有与M杆销接的耳板;并且各箱形梁中连接节点的空间方位均不相同,箱形梁组装时,连接节点的空间定位难度大、定位精度要求高。同时,节点区域存在大量的隐蔽焊缝,加大了箱形梁的组装及焊接工艺的难度。

主拱节点采用铸钢节点、压制球节点及箱节点,铸钢节点体形大、重量重、支管数量多、空间角度变化多样、空间定位困难、组装难度大。相贯焊缝局部存在二次相贯现象,不可见焊缝的焊接必须采取合理的组装焊接顺序和组装方法,才能保证焊口的组装与焊接质量。因此,组装、焊接难度大。

7. 由于箱形梁长度长、重量重、迎风面大,吊装过程中易产生变形,就位时定位困难,就位后易产生侧向失稳。而主拱更是体型庞大、节点复杂,分段吊装时提升高度高,工作半径大,主拱翻身与吊装难度大。

8. 为保证安装过程中结构的稳定性与施工的可操作性,屋面和主拱安装时必须设立临时支撑系统,安装完成后屋面临时支撑需卸载和拆除,卸载过程中结构体系逐步转换,稳步成型。但是,杆件内力和临时支撑的受力在卸载过程中会发生变化,工况分析相当困难。支撑系统的布置既要满足施工阶段结构的受力性能,符合设计要求,又不能对下部混凝土看台结构产生过大的影响,还要方便施工(包括安装阶段和卸载阶段),保证安全。故支撑的布置、计算及设计十分复杂。

9. 由于空间结构体系平面外的刚度相对较小且各部位的强度和刚度均不相同,卸载时结构体系的变形相对较大且不均匀,相邻支撑在卸载过程中互相影响。本工程支撑胎架数量多,卸载的先后顺序、卸载方法及工艺都会对结构本身和支撑胎架产生一定的影响,卸载难度大。

10. 地面分段拼装时的温度和合拢时的温度可能存在温差,如果温差过大,主拱长度方向将会产生较大的变形。尤其是从两端往中间对称进行主拱安装的,按照常规的施工方法,则在中间位置势必出现错口、错边及尺寸偏差现象,造成主拱无法顺利对接。同时,主拱安装是直接在屋面系统上进行的,屋面系统的变形也会对主拱变形产生很大的影响,主拱变形控制难度大。

2-2-2 理论计算与试验研究相结合

针对本工程屋盖结构体系的独特性,用国际先进软件程序进行理论分析计算,作为施

工图设计的依据。

为了论证设计理论分析的正确性和可靠度,工程开始前进行 1:20 实体模型试验,通过试验取得的数据与理论计算结果分析比较,验证设计采用的计算模式的程序理论的正确性与可靠度。

在安装阶段和正常负荷情况下,对实体结构的主要杆件节点和支座均进行了应力、应变、挠度测试,获得的数据与理论数据分析比较,同时作为实体结构验收的依据。

对于大跨度罩棚结构,风荷载往往是较大的,但风压值和风载系数的取值却很难确定。为此,针对工程地理位置和结构特征,同济大学和北京大学分别进行了风洞试验,通过风洞试验结果确定风荷载的相关参数。

2-2-3 施工工艺和技术措施

1. 铸钢件的制造

(1) 选择合适的材质 (GS20Mn5N)。

(2) 制定严格的技术要求和质量标准,严格控制铸钢件的化学成分 (特别是 S、P 含量)、各项性能指标 (主要是延伸率和强度) 及外形尺寸偏差。

(3) 加强过程控制,如木模制作、浇铸、热处理、精加工等,确保铸钢件的外形尺寸和内在质量。

(4) 加强事后检查,包括取样试验和尺寸检查,对不符合技术要求和质量标准的铸钢件,严禁出厂和使用。

2. 箱形梁及主拱的加工制作

(1) 箱形梁的加工制作在进行箱形梁中的短管节点及铸钢球节点定位时,采用三维定位法,确保节点的空间位置和角度准确无误。同时,箱梁厂内分段制作,现场拼装,分段点尽量避开厚板位置,以减少现场焊接难度。

(2) 主拱组装根据主拱弧度长、断面大且为斜等腰三角形等特点,主拱采用卧式连续拼装法,通过三维建模来搭设组装胎架并通过全站仪进行测量控制。由于主拱分两大部分:屋面外主拱和屋面内主拱,所以它们分别在场外和场内进行组装。其中 1~4、18~21 分段在场外进行拼装,5~17 分段在场内进行拼装。实际操作时,采用坐标定位法,即根据交界处屋面外主拱分段点最终的坐标来确定交界处屋面内主拱分段点的坐标。

3. 支撑体系设置

根据屋盖结构体系的传力途径,主拱与屋面系统共同设置 1 套支撑胎架,主拱施工直接在屋面系统上进行,屋面及主拱荷载由支撑胎架体系直接传递,即屋面系统下设置支撑胎架 (合计 150 个胎架),并支撑在箱形梁下,待屋面系统安装完毕后,再安装主拱。主拱安装时,出屋面部分主拱单独设置支撑胎架 (合计 12 组胎架),对于屋面内主拱部分,先将连接主拱和屋面箱形梁的 M 杆安装就位,主拱安装时直接支撑在 M 杆上。

4. 大跨度重型结构的吊装

(1) 总体方案

选用“1 套支撑胎架,2 组吊机”的作业方案,“分区安装、齐头并进”的施工原则。

选用 600t 和 300t 履带吊为主吊机,150t 履带吊和 M440 塔吊为辅助吊机分区安装、齐

头并进的施工方法。由于本结构为空间马鞍形组合结构,构件的空间方位、角度及重心均不相同,为保证吊装及就位准确、平稳,所有箱形梁和主拱吊装前均根据三维模型通过平衡滑轮和倒链来进行角度调节,并根据计算机准确计算得出的重心确定吊点的位置。吊装顺序为:V形支座预埋件→屋面支撑胎架→V形支撑前支撑柱→箱形梁→V形支撑后支撑柱、环形梁、连系梁→屋面支撑→M杆→主拱→檩条、天沟梁、马道,屋面系统与主拱的安装顺序均由低向高进行,以保证屋面体系和支撑胎架体系的整体稳定性。

(2) 主拱安装

主拱组装完成后,分段吊装就位。吊装从两端向中间进行。由于主拱采用卧式连续拼装法,所以吊装前要进行翻身,翻身时采用双门滑轮,以减少翻身过程中的冲击。吊装前通过葫芦来调节主拱的空间角度,确保高空对口就位准确无误。

对于大跨度拱,其温度变形和温度应力是较大的,故设置合拢段,合拢段的长度根据合拢时的实际测量尺寸下料。在从两端往中间安装主拱的过程中,逐段消除安装误差,合拢前要进行连续观测,确定温差对拱身的影响,选择合适的时间及合拢温度,20℃安装就位,28℃定位焊接,焊接时2人对称连续施焊。

5. 现场焊接

为确保焊接质量,特制定了一系列技术措施:①根据焊接工艺评定试验制定专门的焊接工艺;②通过焊接培训和焊接考试筛选优秀的焊工;③厚壁钢管及厚板的焊接,焊前进行预热,焊后保温缓冷;④搭设防风屏及雨布,做好防风防雨措施;⑤进行严格的焊前技术交底和焊后质量检查。

6. 钢屋盖系统整体卸载

根据支撑胎架的布置及结构本身与支撑胎架的受力情况,将支撑胎架分为9个区,每区分级同步卸载。卸载的分级大小和卸载顺序根据结构计算和工况分析结果进行,先小后大,先拆主拱支撑胎架,然后拆屋面支撑胎架,由高到低、由内到外、东西同步、共分20步进行。卸载时,通过胎架下端安置的可调节支撑装置(螺旋式千斤顶),按多次循环、反力控制与位移控制相结合的原则,来实现荷载平稳转移。

工程实例:

南京奥体中心主体育场钢结构工程难点众多,但通过采取一系列技术措施,该工程取得了圆满成功,取得了较好的经济效益和社会效益,为我国大跨度空间钢结构的新形式作了大胆的尝试。

2-3 体育场大型悬挑钢屋盖安装技术高空拼装法

某体育场为钢管桁架彩钢板篷顶结构,共由12个区域组成,每个区域由4榀三角形径向主桁架、2榀平面径向次桁架和20榀环向三角形次桁架组成(见图2-3)。屋面为双曲线平面,每相邻2榀桁架均在不同标高面上。悬挑主桁架设在由钢管混凝土柱顶、钢筋混凝土柱顶和钢管斜撑杆构成的三点铰支座体系上(见图2-4)。