

# 郑州碧波园网架设计与施工

朱坊云 孙建设 陈利华 胡爱云

**摘要** 本文介绍了一座大跨度锥型螺栓球节点网架结构,采用钢绞线施加预应力和特殊滑动支座措施,解决了网架杆件内力偏大和释放支座水平推力问题,明显降低了结构的含钢量。本文详尽阐述了其设计、施工过程。

**关键词** 预应力 螺栓球节点 滑动支座

## 一、工程概况

郑州碧波园是一座集嬉水、餐饮、健身于一体的大型室内综合娱乐中心,其嬉水大厅屋盖采用网架结构,平面为 $80 \times 80\text{m}$ 、四角切去 $8\text{m}$ 、网架自身起拱 $18.5\text{m}$ 、网格投影 $4 \times 4\text{m}$ 、网架厚度 $2.8\text{m}$ 、沿两条对角线方向起脊成三层网架,脊宽 $11.4\text{m}$ 、形成八面起拱对角起脊的八面锥体异形网架(见图1)。屋面采用阻燃聚苯乙烯复合板,檩条下吊挂 $50\text{mm}$ 厚吸音板,起脊部分采用中空玻璃采光,上弦悬挂 $\Phi 850$ 的玻璃钢风管,网架采用周边支承体系,展开面积约 $10,000\text{m}^2$ ,总用钢量 $270$ 吨。

## 二、基本设计资料

### (1) 荷载标准值

静载(不含网架自重)	$0.50\text{kN/m}^2$
活载	$0.50\text{kN/m}^2$
基本风压	$0.40\text{kN/m}^2$
地震烈度	$7^\circ$

### (2) 下部结构条件

下部为二层框架钢筋混凝土结构,提供周边圈梁,但不能承受较大的水平推力,支座必须做成可滑动的形式。

## 三、网架结构设计

按照常规设计,由于网架跨度和起坡都较大且支座水平释放,在满荷载下沿四条长边上的杆

件拉力较大,达到 $1600\text{kN}$ ,普通螺栓球节点高强度螺栓无法满足要求,使用焊接球节点考虑到工程施工工期为冬季,现场焊接质量和复杂体形的精度都难以保证。

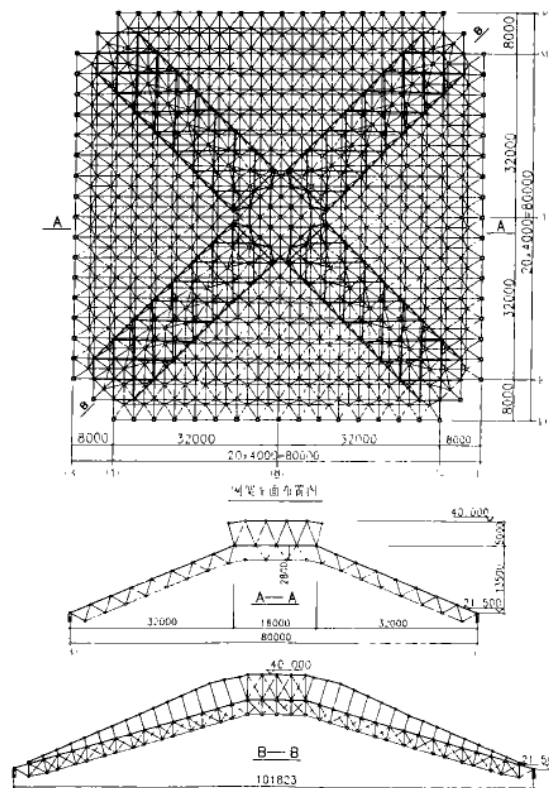


图1 网架尺寸图

朱坊云 云光建筑设计咨询开发中心

孙建设 陈利华 胡爱云 安利达金属工程有限公司

我们仔细分析了本工程的特点,发现杆件拉力大的仅局限于支座一圈,往上内力递减较快,且内力大的杆件呈直线状,有圈梁及天沟做工作面施加预应力条件是十分理想的。仅在网架自重荷载下,杆件的最大拉力为450kN,此时采用预应力钢绞线对网架四边施加预应力700kN,使边杆适当受反向一点压力,然后再施工屋面,所有杆件就都可以采用普通高强螺栓,避免出现节点现场焊接。

网架内力分析和设计采用SFCAD/386软件,针对预应力特点进行了修改,使之能够自动进行内力分析和杆件截面优化。计算考虑以下五种荷载组合:

- (1)  $1.2 \times$  网架自重
- (2)  $1.2 \times$  网架自重 +  $0.8 \times$  预应力
- (3)  $1.2 \times$  网架自重 +  $1.4 \times$  预应力
- (4)  $1.2 \times$  网架自重 +  $0.8 \times$  预应力 +  $1.2 \times$  屋面静载 +  $1.4 \times$  屋面活载
- (5)  $1.2 \times$  网架自重 +  $1.4 \times$  预应力 +  $1.2 \times$  屋面静载 +  $1.4 \times$  屋面活载

其中后两种组合要考虑钢绞线参与结构的共同工作。

预应力钢绞线采用低松弛级的 $\Phi 15\text{mm}$ ,抗拉强度 $1.86\text{kN}/\text{mm}^2$ ,锚具采用QM型,锚固效率系数大于0.95,预应力施加点为四边端部的八个支座。

支座设计须采用滑动支座来释放水平推力,由于网架呈拱形,水平变位较大,用常规橡胶支座比较困难,设计中我们采用了聚四氟乙稀(Teflon)垫片很好地满足了设计要求。因为它不是象橡胶支座那样靠剪切变形产生水平位移,而是与钢材间的摩擦系数较小,是真正意义上的滑动变形,水平位移量可以较大,施工方便效果较好,造价也低,值得推广应用。

此工程由于采用了预应力、Teflon滑动支座等技术,造价和用钢量均比其他投标单位低1.5%~20%。

#### 四、制作与安装

碧波园工程是郑州市的重点工程,其建设工期、质量和投资管理都是工程的重要环节。网架从备料、制作到安装,均由电力部郑州焊接技术监督

检验中心派出的两名监理工程师跟踪监理。按规范要求,网架所用材料均有原始材质及复检报告,对网架用杆件、高强螺栓进行了拉力试验及超声波探伤,网架零部件外观质量、焊接质量、外形尺寸公差、螺栓孔角度公差均符合优良工程规定。该工程施工面积较大,工期又紧。为确保安装进度,采用满堂红脚手架高空散装,网架安装前对预埋件轴向位置、水平高差及支座平整度进行了严格的检测和调整。根据网架设计受力及脚手架搭设情况,安装分四组,先安装I区(见图2),从四条边中部由下向上先拼四根,四组在拱顶合拢后,为防止支座位移,设计位移反方向设置拉索固定支座,经测试网架各部尺寸及轴线位置,并调整定位后,仍分四组同时由上向下安装II区,基本形成对称施工,以减小施工应力。安装过程中,随时检测安装情况,并作好记录。由于施工方法得当,制作精度高,安装非常顺利,十六天就完成了网架的整体安装。安装网架临时支承拆除后,根据设计进行全面自我验收,均符合设计要求。

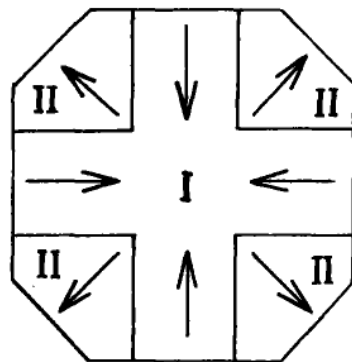


图2 安装顺序示意图

#### 五、施加预应力

##### (1) 设计要求:

整体网架安装完毕,拆除临时支承后,四边同时分级施加预应力至700kN。

##### (2) 张拉程序:

预应力张拉为本网架工程的关键,预应力的建立必须均衡,四边张拉须做到同步且应力大小一致,否则网架将受到损伤。因此张拉要慎重,我们采用了分级多次逐渐加荷方式(见图3)完成预应力的建立。

##### ① 预张力控制应力10%

- ②预张力控制应力 20%
- ③预张力控制应力 40%
- ④预张力控制应力 60%
- ⑤预张力控制应力 80%
- ⑥预张力控制应力 100%

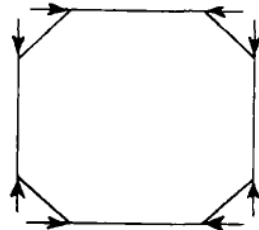


图3 预应力施加方向图

(3)预应力张拉:

预应力张拉过程中,必须严密监视网架的应力态势,确保网架安全。在张拉的同时,我公司委托电力部郑州焊接技术监督检验中心对网架周边杆件进行应力测试。根据实际情况,我们选取网架的西北两条边测试静载预应力(见图4)。西北两边分别沿网架轴线方向对称布置六个测点,应变片沿杆件方向贴置,测试结果表明,预应力张拉完全达到预期效果(见表1、表2)。

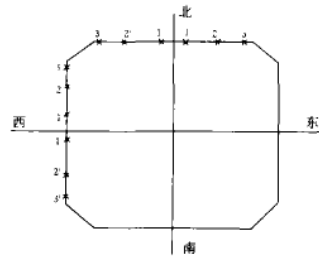


图4 应变片测点布置图

表1 西边各测点应力和内力值

测点	3	2	1	1'	2'	3'
$\sigma$ (MPa)	61	55	30	33	52	52
F(kN)	560	210	140	160	200	480

表2 北边各测点应力和内力值

测点	3	2	1	1'	2'	3'
$\sigma$ (MPa)	74	73	22	27	59	52
F(kN)	680	280	110	130	230	500

六、网架检测评定

预应力张拉完毕后,将过渡板与预埋板焊接固定,整个网架处于稳定状态。施工单位、建设单位及监理部门,对网架整体尺寸、网格尺寸、高度、挠度及支座偏移情况等各项技术指标,进行综合检测评定,质量均为合格,优良率为98%,被评为优良工程。

(上接第25页)

施加预应力后虽然许多杆件内力减小,但构造要求也不宜减小杆直径,这也是预应力作用不明显的原因。我们曾在广东省连州市第一中学体育馆进行过对比,该馆平面尺寸为36×40m,采用中央18×24m为单层,周边双层,四点支承扁网壳,非预应力时用钢量为23.4kg/m<sup>2</sup>;在四个边拱下弦以预应力索取代拉杆建立预应力后,刚度提高,用钢量为19.8kg/m<sup>2</sup>,下降15%。考虑钢索,锚板夹片及张拉费用后,其技术经济指标并不明显。

上述三类网壳,即双层非预应力网壳、局部单层非预应力网壳和局部单层预应力网壳的设计方案,我们进行计算对比,其刚度与用钢量指标如表1所示。

预应力曲面双层网壳结构在国内发展的历史仅仅四年多,点支承情况下其优良的力学特性和经济指标已为工程实践所证明。预应力局部单层曲面网壳结构是在预应力双层曲面网壳基础上的开拓与发展,实际工程不多。本文仅起抛砖引玉的作用。

表1 三类网壳结构的技术经济指标

类型	对比内容	建造地点	新建式改建	座席数网壳面积	支承条件	最大跨度(米)	最大相对挠度	用钢量(kg/M <sup>2</sup> )	总用钢量(T)	用钢量下降
组合扭网壳	四块组双层扭网壳	广东新兴县	露天球壳改建(平面尺寸) 51×76.6m	3200座	四点支承	15.2	1/355	51.2	210.3	1
	9.8					1/551	76.4	149.5	29%	
	8.5					1/635	28.7	117.9	44%	
曲面扁网壳	双层双曲面网壳	广东阳山县	新建(平面尺寸) 44×56m	2000座	八点支承	12.5	1/352	52.2	108.6	1
	9.2					1/478	38.8	95.6	25.6%	
	7.4					1/545	29.5	72.7	43.5%	
倾斜穹顶网壳	双层穹顶网壳	深圳市横岗镇	新建(平面尺寸) D=80m	4200座	周边支承	21.5	1/372	72.5	364.4	1
	17.2					1/465	60.8	302.7	17%	
	14.1					1/567	46.2	230.2	36.2%	

注:用钢量下降百分数均以非预应力体系为基数

参考文献

- (1)马克俭等,大跨度组合式预应力扭网壳结构的设计、构造与力学特点,空间结构创刊号,1994年8月。
- (2)马克俭等,预应力曲面网壳结构的研究与应用,空间结构,1996年第2期。
- (3)钟善桐,预应力钢结构,哈尔滨工业大学出版社,1986年。
- (4)Z. S. Makowski, Analysis, Design and Construction of Braced Domes.