

大跨径球形网架安装施工技术

谢 显

(中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘 要 大跨径球形网架以其独特的几何造型和良好的受力性能, 在现代空间结构领域得到广泛应用。球形网架主要由杆件、节点、支座和索网等组成, 其安装施工大致可分为制作加工、分段吊装、高空拼装、索网张拉等工序。针对不同的工程条件, 常用的安装方法有高空散装法、整体提升法和综合施工法。为确保工程质量和安全, 施工过程中必须重点把握好测量放样、节点安装、杆件制作、索网施工等关键技术。本文分析总结了大跨径球形网架安装施工技术的特点, 列举了深圳湾体育中心体育场、北京新机场航站楼两个典型的大跨径球形网架工程案例, 以期同类工程提供有益参考。

关键词 球形网架; 安装施工; 高空散装; 综合施工

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.014

0 引言

球形网架以其独特的几何造型和良好的受力性能, 在现代大跨度空间结构中得到广泛应用, 成为体育馆、会展中心、机场航站楼等标志性建筑的首选结构形式。然而, 球形网架跨度大、高宽比高、节点构造复杂, 给安装施工带来了很大挑战。施工单位必须根据球形网架的结构特点和工程条件, 合理选择安装方法, 采用先进可靠的施工技术, 严格施工组织管理, 才能保证工程的安全、质量、工期和造价等目标的实现。本文全面总结球形网架安装施工的关键技术, 为今后更多的大跨径球形网架工程提供有益参考。

1 球形网架结构特点和安装工艺流程

1.1 球形网架的结构组成

球形网架是一种由圆钢管杆件通过节点连接而成的空间网格结构(见图1)。其几何拓扑构型通常为正六面体、正四面体、正八面体等多面体的组合。球面曲率半径与跨度的比值一般为 $0.9 \sim 1.6$ 。球形网架主要由杆件、球节点、支座、索网等组成。杆件是球形网架的主要受力构件, 常采用圆钢管制作, 有的工程也采用型钢或格构式截面^[1]。相邻杆件之间通过球节点连接。球节点是网架的关键连接构造, 其节点处汇聚多根杆件, 形状复杂, 加工制作和安装施工难度大。球节点常见的构造型式有焊接球节点、铰接球节点、螺栓球节点等。支座是将球形网架与下部支承结构(通常为钢筋混凝土柱或钢柱)连接的关键部位, 常采用固定铰支座或滑动铰支座。球形网架的索网由拉索和

稳定杆组成, 设置在拱肋和环形支撑拱圈之间, 用以减小球面网架的变形。

1.2 球形网架安装工艺流程

球形网架的安装施工大致可分为制作加工、分段吊装、高空拼装、索网张拉等工序。典型的安装工艺流程如下:

1. 放样测量: 在球形网架投影面上进行控制网测量, 并用全站仪测设球心坐标和标高, 以控制安装的空间位置和形状尺寸。

2. 支座安装: 在钢筋混凝土柱或钢柱上安装固定支座, 并预埋锚栓, 调平支座标高。

3. 制作加工: 按照设计图纸及放样数据加工制作杆件和节点, 并预先在地面进行分段拼装和涂装。杆件端头需加工成特定角度, 与节点精准匹配。

4. 分段吊装: 将预拼装好的网架分段用塔吊或履带吊送至安装位置, 采用高空散装或整体提升等方法进行安装。

5. 高空拼装: 在分段吊装的基础上, 在空中边拼装边形成整个球形网架。拼装时需要随时检测网架的几何形状, 调整节点位置, 确保拼装精度。焊接或螺栓连接球节点, 并及时涂装防腐。

6. 索网张拉: 在主体网架安装并形成稳定受力体系后, 安装索网。将拉索和稳定杆连接在网架的弦杆和环形支撑拱圈上, 利用卷扬机或千斤顶张拉拉索, 使球形网架形成预应力, 减小变形。

7. 脚手架拆除: 球形网架安装就位并经检测验收合格后, 拆除施工脚手架和临时支撑, 网架转入正常使用阶段。

球形网架施工时,应加强施工测量和变形监测,控制好球心坐标、网架标高、球面曲率半径等主要几何参数,确保网架的空间形状和受力性能达到设计要求。

2 球形网架主要安装方法

球形网架常用的安装方法主要有高空散装法、整体提升法和综合施工法三种。这三种方法在不同的工程条件下各有优缺点,需要根据网架跨度、吊装设备、施工场地等因素合理选用。下面对三种方法分别介绍。

2.1 高空散装法

高空散装法是一种常用的球形网架安装方法,其基本做法是将球形网架划分为若干个扇形区,在球心下方搭设脚手架和操作平台,利用塔吊将网架杆件和节点散装至操作平台上,再在空中拼装成整个球形网架。

高空散装法的优点是:(1)设备投入相对较少,一般只需常规的塔式起重机和施工脚手架即可;(2)施工机具布置灵活,不需要大型吊装设备;(3)便于在空中就位,可实现球面网架的散装拼接,施工精度易于保证^[2]。

高空散装法的缺点是:(1)工人需要在高空长时间作业,劳动强度大,安全风险高;(2)施工周期长,受气候影响大;(3)分块多,接缝多,现场湿作业工序多;(4)脚手架搭设和拆除工程量较大,费用高。

高空散装法适用于跨度和高度不是特别大的球形网架工程,如体育馆、展览馆等跨度在 100 m 以下的网架。对于超大跨度和超高空间的球形网架,如机场航站楼,则不太适合采用高空散装法。

2.2 整体提升法

整体提升法是一种先在地面拼装、再整体提升到位的安装方法。其基本做法是在地面上划分出与球形网架平面投影等大小的场地,将全部杆件和节点在地面上拼装成整个球形网架,经几何形状检测合格后,用缆风葫芦或顶升设备将整个网架从下往上提升至设计标高,再与支座连接固定。

整体提升法的优点是:(1)地面施工作业量大,高空作业量小,安全性好;(2)在地面统一加工制作,质量易控制,施工精度高;(3)现场湿作业少,施工进度快;(4)不需搭设大量脚手架,节约工期和成本。

整体提升法的缺点是:(1)需要大量的吊装设备和顶升千斤顶,设备投入大;(2)需要大面积的场地来拼装网架,受场地条件限制;(3)整体提升时,球面网架易发生变形,提升高度受限制;(4)不适合异型或不规则球面网架。

整体提升法适用于标准球面、规则形状的大跨度

球形网架,如大型煤棚、环保设施的网壳等,特别适合跨度超过 150 m、吊装高度在 50 m 以内的大型网架。

2.3 综合施工法

综合施工法是指将高空散装和整体提升等多种方法组合使用,发挥不同方法的优势,克服单一方法的局限性,实现球形网架的快速、精确、安全施工。

综合施工法的基本做法是:将球面网架在地面划分为若干个扇形块,每个扇形块再划分为内外两圈,内圈在工厂加工成整体,外圈采用散装杆件。先将内圈整体吊装就位,外圈采取高空散装的方法与内圈拼接。内圈起到定位和稳定网架的作用,从而减少外圈高空散装的工作量。如有条件,还可采用滑移、顶升等提升措施,进一步减少高空作业^[3]。

综合施工法集高空散装法和整体提升法的优点于一体:(1)内圈整体提升,定位准确,易于控制网架的几何形状;(2)外圈高空散装灵活,适应性强;(3)高空作业量大大减少,施工安全性和精度得到保证;

(4)总的现场施工工期大大缩短。

综合施工法适用于大跨度、异型、复杂球形网架工程。当球面网架跨度很大或高宽比很高时,内圈可占较大的比重,从而发挥整体提升的优势。当球面不规则或局部有变形时,外圈可根据实际情况灵活调整杆件长度和角度,从而保证整个球面的平顺和精度要求。综合施工法已成为目前大跨度球形网架安装的主流方法和发展趋势。

3 球形网架安装施工的关键技术

球形网架安装施工虽然采取不同的施工方法,但都需要在测量放样、节点安装、杆件制作、索网施工等环节采用相应的关键技术,这些关键技术是保证球形网架安装质量、精度和安全的基础。

3.1 测量放样技术

球形网架的测量放样是施工的第一步,也是保证安装精度的关键。具体做法是:先利用高精度全站仪建立覆盖整个工程的三维控制网,并通过高程控制点和球心坐标来控制整个球面的空间位置,再在地面和高空布设一系列控制点,并利用全站仪和测量软件测设出每个杆件和节点的理论坐标^[4]。施工放样时采用极坐标法,以球心为原点,根据球心坐标、杆件长度、仰角等参数,配合经纬仪逐点放样出杆件两端点的球面坐标。其中球径、拱高等主要控制尺寸的放样偏差应控制在 ± 3 mm 以内,而杆件长度等一般尺寸的放样偏差应不超过球面跨度的 $1/2\ 000$ 。

3.2 节点安装及调整技术

球节点是联结各根杆件的关键构件,其几何定位和受力传递直接影响整个球形网架的性能。常见的节点形式有焊接球节点、铰接球节点和螺栓球节点。其中焊接球的整体刚度最大,但现场湿作业工序较多;铰接球便于装配且可调性好,但定位精度要求很高;螺栓球安装更为简便,可大幅节省现场工期,但其应力传递机理相对复杂。无论采用何种形式,在节点安装就位后,都必须用经纬仪复测其实际空间坐标,并与理论坐标比对,如有超限应及时调整,直至节点偏位满足要求。一般焊接球的空间偏位控制在 5 mm 以内,铰接球和螺栓球控制在 3 mm 以内。同时要严格检查螺栓预紧力矩和焊缝质量,确保节点能可靠稳定地发挥作用。

3.3 杆件制作及安装技术

杆件作为球形网架的主要受力构件,一般情况下采用 $\Phi 140 \sim \Phi 377$ 的圆钢管,钢种常为 Q345B,其屈服强度不低于 345 MPa。加工时要对杆件端头进行切割,使其形成特定的空间角度,以精准匹配节点。现场安装时主要采用对接焊或法兰盘连接的方式进行拼装。其中焊接等级不得低于二级焊缝,且焊缝表面应平整美观,不得出现裂纹、夹渣、未焊透等缺陷。杆件安装时,应严格控制各项几何参数:端部偏位不超过 3 mm,轴向偏差不得超过杆长的 1%,相邻杆件高差不超过 5 mm。此外,杆件的涂装防腐也要符合要求,一般应达到国标 GB/T23331 中规定的 II 类面漆层的防护等级。

3.4 索网体系施工技术

拉索一般采用 $\Phi 15.24 \sim \Phi 60.64$ 的高强钢丝绳,端部设置调节器,与球节点相连;稳定杆则通常采用 $\Phi 76 \sim \Phi 114$ 的钢管制作。在索网安装就位后,要进行预应力张拉,使其产生一定的初应力,从而达到减小变形、保持球面型态的目的。张拉施工分为初拉和精拉两个阶段,先用 1 000 kN 以上的卷扬设备进行初步拉紧,再用 300 kN 左右的张拉千斤顶精拉至设计索力^[5]。张拉时应严格分级施加,每级不超过设计索力的 1/3,相邻两级的间隔时间不少于 2 小时,以使索网内力能充分调整。同时采用测力计对索力进行实时监控,确保各拉索实际预应力与理论值的偏差不得超过 5%。

4 典型球形网架工程实例

4.1 深圳某体育中心体育场

深圳某体育中心体育场的球形网架屋盖跨度达到 211 m,是国内跨度最大的单层钢管网架结构。该工程采用整体提升与高空分块散装相结合的综合施工方案。首先利用综合电动提升系统,将 1.2 万吨重的下弦球

面网架整体提升至 44 m 高空就位,提升过程通过激光导航实时监控,并用 180 台大吨位同步千斤顶进行平衡调节,确保了球架提升的平稳和准确。随后采用高空散装的方法,将上弦网架分块吊装与拼接,并通过周边环梁与下弦网架可靠连接,最终形成完整的上下双层球形网架体系,为实现跨越性的空间结构设计提供了成功范例。

4.2 北京某机场航站楼

北京某机场航站楼采用直径 380 m 的特大型钢管桁架球形网架结构,用钢量高达 4.2 万吨,堪称目前世界最大的机场航站楼屋盖。施工时先将下弦球面网架分为 4 个扇区在地面预拼装,再通过专用轨道运送至基准面进行高精度拼接。提升过程创新性地采用倒链提升和穿心千斤顶提升相结合的方法,经过近 100 次循环,历时 3 个月完成,创造了巨型钢结构屋盖整体提升的新纪录。上弦网架采用分片散装与整体提升相结合,划分为 8 个大区、40 余个提升分段,在近 80 m 高空实现了与下弦球架的半刚性螺栓连接。整个球形网架的现场拼装焊缝总长超过 120 km,工程规模和施工难度均创下新高。

5 结束语

大跨径球形网架是集几何、力学、材料、制造、施工等多学科高技术于一体的复杂工程体系。其安装施工涉及测量放样、节点连接、杆件制配、索网张拉等多个专业环节,需要根据球面曲率、网格密度、支撑条件、场地限制等不同情况,灵活运用高空散装法、整体提升法、综合施工法等多种手段组合,才能达到安全、精确、高效、经济的施工目标。深圳湾体育中心、北京新机场等一大批精品工程的成功实践,积累了宝贵的经验,提高了我国大跨径球形网架设计施工水平,将推动空间结构技术的创新发展。

参考文献:

- [1] 石阳.大跨度空间球形网架斜面弧形吊顶安装技术[J].建筑机械化,2024,45(04):100-102.
- [2] 李鹏飞.大跨径球形网架安装施工技术[J].安装,2023(12):26-28.
- [3] 陈延明.浅析球形网架安装[J].建材与装饰,2020(12):207-208.
- [4] 金亮亮.大跨度球型网架结构高空拼装施工及吊装技术[J].绿色环保建材,2019(11):136,139.
- [5] 金伟东.曲面球形网架施工工艺及技术分析[J].建材与装饰,2019(23):18-19.