

大跨度螺栓球网架吊挂系统高空散装施工技术与质量管控研究

方宝荣

中国电子系统工程第二建设有限公司 江苏 无锡 214000

摘要：随着大跨度空间钢结构在工业建筑中的应用不断深化，螺栓球节点网架凭借工厂化预制程度高、现场安装便捷、受力性能优异等特点，已成为精密工业建筑吊挂承重体系的优选结构形式。本文以某多功能微波屏蔽暗室工程为研究背景，系统分析了螺栓球网架结构的技术特性与节点构造原理，并对施工工艺及质量验收标准进行系统梳理，可为同类大跨度工业建筑网架吊挂系统施工提供参考。

关键词：螺栓球网架；吊挂系统；高空散装法；加工精度

引言

网架结构作为空间钢结构的典型形式，凭借受力合理、自重轻、用钢量低、综合造价优势明显等特点，广泛应用于体育馆、展览厅、工业厂房等大跨度屋盖承重体系，同时也逐步拓展至精密工业建筑的设备吊挂承重领域。本文依托某多功能微波屏蔽暗室工程项目，针对螺栓球网架吊挂系统的施工全过程展开研究，从节点构造、加工精度控制、现场安装工艺到质量验收标准进行系统梳理，总结形成适配精密工业建筑的标准化施工技术路径。

1 工程结构体系及特点

1.1 项目背景

该项目平面尺寸为42.3m×39m，其中暗室屏蔽壳体范围为41.3m×38m，建筑总高度21m。项目施工内容涵盖屏蔽钢结构安装、屏蔽壳体钢板铺设、屏蔽门、波导窗及吸波材料安装等。



图1 螺栓球网架吊挂系统

暗室采用“结构自重+吊挂系统”协同承重的方式保障整体受力稳定性：屏蔽壳体通过立柱将竖向荷载传递至地面基础，水平荷载分散至周边土建立柱；顶部吊挂系统则承担大跨度顶面的荷载分配，有效降低顶部结

构对基础的压力，同时保障41.3m×38m大跨度顶面的整体刚度。项目吊挂系统采用螺栓球钢网架结构（如图1所示），是暗室顶部屏蔽与吸波系统的核心承重载体^[1]。

1.2 螺栓球网架结构的技术特点

螺栓球节点网架作为空间杆系结构，在工业建筑应用中具备显著技术优势：

（1）材料强度高，结构自重轻：钢材强度与弹性模量高，密度与屈服强度比值远低于混凝土。螺栓球网架体系自重约为混凝土结构的一半，可大幅降低基础荷载价，尤其适合大跨度吊挂承重场景。

（2）塑性韧性优异，结构可靠性高：钢材塑性、韧性良好，可承受冲击与动力荷载，抗震性能突出。钢材内部组织接近各向同性匀质体，结构受力状态与理论计算模型契合度高，结构安全冗余度与可靠性更优，能够适应暗室吊挂系统的长期稳定承重需求。

（3）工业化程度高，施工周期短：网架杆件、螺栓球、套筒等构配件全部在工厂预制加工，成品精度高、生产效率高；现场仅需完成螺栓拼装作业，无需大量焊接工序，施工速度快，工期较传统混凝土结构可缩短三分之一以上，适配工业项目紧凑的建设节奏。

（4）绿色环保，综合效益突出：钢结构材料可回收利用，拆除后大部分构件可二次利用，符合绿色施工理念。同时因自重轻、工期短，基础成本与间接费用同步降低，全生命周期综合造价优势明显。

2 螺栓球节点构造与工厂加工精度控制

2.1 螺栓球节点构造组成

螺栓球节点通过高强螺栓实现杆件与钢球的机械连接，核心构件包括螺栓球、高强螺栓、六角套筒、紧固销钉、锥头（或封板）五部分，（如下图2所示）。

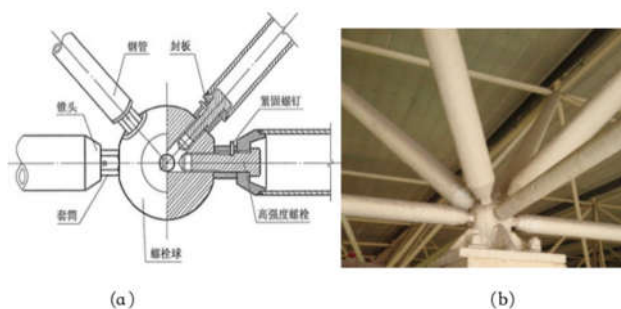


图2 螺栓球节点图

杆件端部采用等强连接方式：钢管直径 $>76\text{mm}$ 时采用锥头，直径 $\leq 75.5\text{mm}$ 时采用封板。螺栓球表面按杆件角度切削出平面，切削面与锥头/封板之间设置六角套筒，套筒侧壁开设小孔，内置紧固销钉嵌入高强螺栓凹槽；高强螺栓头部卡于锥头或封板内部，螺栓端通过销钉传力拧入螺栓球内，最终形成受力可靠的空间节点。该节点形式无需现场焊接，通过螺栓拧紧即可实现杆件多方向连接，角度调整灵活，且空心球自重较轻，大幅降低了高空安装的作业难度。

2.2 杆件加工精度控制

杆件长度精度是保障网架整体安装尺寸的核心基础，受螺栓球直径、切削量、套筒长度、锥头长度等多因素共同影响，加工前需进行精准计算复核。

杆件焊后长度 = 杆件几何长度 - (两端球半径 + 两端套筒长度) + (两端螺栓球切削量)

杆件下料长度 = 杆件焊接长度 - $2 \times (\text{锥头长度} - \text{锥头止口长度} - 1\text{mm})$

式中 1mm 为钢管与锥头的预留焊接间隙，用于保障焊缝熔透质量。通过公式逆推可计算锥头止口长度，用于核对成品锥头是否适配，偏差较大时需调整下料长度或定制锥头。

焊接收缩量补偿

钢管与锥头焊接过程中会产生焊接收缩，下料时需提前预留收缩量，一般收缩量根据钢管壁厚取值，钢管壁厚 $3 \sim 5$ 时，取值1；壁厚 $6 \sim 12$ 时，取值2；壁厚 $13 \sim 18$ 时，取值3；壁厚 $19 \sim 24$ 时，取值4。在理论焊接长度基础上增加对应收缩量，既保证焊接间隙充足，又能抵消焊接收缩影响，最终确保杆件成品长度精度。确保焊后杆件长度符合设计要求。

2.3 螺栓球加工精度控制

螺栓球采45号钢锻造成型，球面上按杆件空间角度加工螺栓孔，孔位角度直接决定网架拼装的准确性。常规平板网架中，弦杆螺栓孔呈十字正交布置，腹杆孔位由两组角度共同控制：一组为腹杆水平投影与弦杆的水

平夹角，另一组为腹杆与投影平面的竖向夹角。

螺栓球加工计算的核心作用包括：复核设计图纸加工角度的准确性；为工厂放样加工提供精准依据；提前校验杆件是否存在空间干涉；为支座筋板焊接提供角度指导，从源头避免现场拼装出现杆件“打架”问题。

2.4 支托节点设计

网架支托用于承托上部屏蔽结构与设备荷载，支托本体一般采用Q235钢，因与螺栓球材质不同，现场采用螺栓连接形式，无需现场焊接，适配网架高空安装的作业特点^[2]。

3 高空散装法关键施工工艺

3.1 施工方法选型与总体流程

本项目网架为大跨度顶面吊挂体系，覆盖面积大、整体重量大、安装标高高，若采用地面整体拼装后吊装，对起重设备吨位与作业空间要求极高，施工成本大幅上升。因此项目选用高空散装法进行安装，通过搭设满堂脚手架作为操作平台与临时支撑，在高空逐件拼装球节点与杆件。该方法对起重设备要求低，施工受力合理、安全可靠，同时便于精度调整，是大跨度网架施工的经济适用方案。

3.2 满堂脚手架搭设要点

满堂脚手架的承载力与稳定性直接决定施工安全与安装精度。因此，搭设前需进行承载力与稳定性验算，必要时做试压检验，确认安全后方可投入使用。

3.3 支座安装与定位控制

首先测量支座轴线与水平控制线，复核混凝土结构预埋钢板的标高与平整度，要求单块钢板平整度偏差不大于 2mm ，相邻预埋钢板标高偏差不大于 15mm 。

以最高处预埋板为基准，低处采用楔形铁垫平调差，消除预埋件施工偏差。

将球支座按设计轴线就位，校正标高与轴线位置后实施焊接。支座底部预留注浆孔，焊接完成后灌注环氧树脂，保证支座底部密实传力均匀。

3.4 网架高空拼装施工工艺

(1) 拼装原则：正式施工前先进行试拼试装，确认工艺可行后再全面展开。拼装遵循“从中间开始、向两边对称推进”的原则，减少累积安装误差；先组装小立体单元，再逐步扩展形成整体^[3]。

(2) 挠度动态控制：安装过程中全程监控网架挠度，发现挠度接近限值时，立即采用千斤顶顶升调整、垫实支撑点、紧固螺栓等方式修正，确保施工过程中挠度始终处于可控范围，最终挠度值不超过设计值的1.15倍。

3.5 防腐与防火涂装施工

(1) 防腐涂装: 工厂预制阶段完成主体防腐涂装, 采用喷砂抛丸除锈, 除锈等级达到Sa2.5级; 底漆采用2道无机富锌底漆, 单道漆膜厚度不低于 $40\mu\text{m}$, 干膜含锌量大于90%; 中间漆为2道环氧云铁中漆, 单道厚度不低于 $35\mu\text{m}$; 面漆为2道聚氨酯面漆。

现场仅对运输安装造成的涂层破损、拼接焊接部位进行补涂, 补涂前手工除锈达到St3级, 再按涂层体系补涂到位。

(2) 防火涂装: 网架钢构件外涂超薄型防火涂料, 耐火等级二级, 耐火极限1.5小时。施工前清除构件表面油污灰尘, 保持基面干燥洁净; 每遍涂料需待前一遍干燥固化后方可喷涂下一遍, 涂料当日搅拌当日用完, 最终涂层表面平整均匀, 无流淌、无裂痕^[4]。

4 施工质量控制与验收标准

4.1 工厂加工质量控制标准

杆件成品精度: 钢管杆件成品长度允许偏差 $\pm 1\text{mm}$, 杆件轴线不平直度为 $L/1000$ 且 $\leq 5\text{mm}$ 。

螺栓球精度: 螺栓球螺纹符合普通螺纹粗牙标准, 螺纹公差为6H级; 螺栓球直径、圆度、相邻螺栓孔中心线夹角等尺寸偏差符合规范要求。

检验要求: 每种规格螺栓球抽查5%且 ≥ 5 只, 采用标准螺纹规检验螺纹; 球节点尺寸偏差采用卡尺与分度头仪检测。

4.2 现场安装质量验收标准

小拼与中拼单元偏差

小拼单元节点中心偏差允许值为 2.0mm , 螺栓球与钢管中心偏移允许值为 1.0mm , 杆件弯曲矢高为 $L/1000$ 且 $\leq 5.0\text{mm}$; 锥体小拼单元弦杆长度偏差 $\pm 2.0\text{mm}$, 锥体高度偏差 $\pm 2.0\text{mm}$ 。

中拼单元根据单元长度区分偏差限值: 单元长度 $\leq 20\text{m}$ 时, 单跨拼接长度偏差 $\pm 10.0\text{mm}$, 多跨连续偏差 $\pm 5.0\text{mm}$; 单元长度 $> 20\text{m}$ 时, 单跨偏差 $\pm 20.0\text{mm}$, 多跨连续偏差 $\pm 10.0\text{mm}$ 。

整体安装允许偏差

网架纵横向长度偏差为 $L/2000$ 且 $\leq 30.0\text{mm}$; 支座中心偏移为 $L/3000$ 且 $\leq 30.0\text{mm}$; 周边支承网架相邻支座高差为 $L/400$ 且 $\leq 15.0\text{mm}$, 支座最大高差 $\leq 30.0\text{mm}$; 多点支承网架相邻支座高差为 $L/800$ 且 $\leq 30.0\text{mm}$ 。

挠度验收

总拼完成后与屋面工程完工后分别测量挠度值, 均

不得超过设计值的1.15倍。跨度 24m 及以下测量下弦中央一点; 跨度 24m 以上测量下弦中央点及各向跨度四等分点。

4.3 全过程质量管控措施

严格把控原材料质量, 所有构配件进场核查出厂合格证与检测报告, 关键材料按规范抽样复检; 安装前核对构件编号, 确保对号入座, 避免错装。

施工前复核土建轴线与柱顶标高, 确保网架定位基准准确; 拼装过程每完成一个单元即检测网格尺寸与矢高, 动态修正偏差。

建立挠度监控机制, 安装全过程跟踪监测, 发现异常及时调整; 螺栓终拧采用扭矩扳手控制, 确保紧固力矩符合要求。

涂装施工严格执行除锈等级与涂层厚度检测, 防火涂料分层验收厚度, 确保防腐防火性能达标。

结论

螺栓球网架吊挂系统是大跨度精密工业建筑顶部承重的高效结构形式, 其核心技术难点在于工厂加工的精度控制与现场高空拼装的误差管控。通过对杆件长度、螺栓球角度的精细化计算与焊接收缩量补偿, 可从源头保障构件加工精度; 采用满堂脚手架支撑的高空散装法, 遵循“中间起步、对称拼装、分次拧紧、动态调差”的施工原则, 可有效控制安装累积误差, 保障网架整体受力性能。

本文总结的施工工艺与质量管控体系在微波屏蔽暗室项目中得到成功应用, 网架安装精度、结构挠度、防腐防火性能均满足设计与规范要求, 有效保障了暗室大跨度顶面的吊挂承重需求。相关技术经验可为同类大跨度工业建筑、精密厂房的螺栓球网架施工提供参考, 对提升空间钢结构工业化施工水平具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 钢结构工程施工质量验收标准: GB 50205-2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [2]姜哲锋. 钢网架屋面结构螺栓球节点构造与施工控制研究[J]. 建筑与装饰, 2026, 29(6): 163-165.
- [3]张在晨, 贾新卷, 胡晨曦, 莫海钊. 大跨度空间网格结构常用安装方法及新思路[J]. 钢结构, 2022, 37(10): 43-49.
- [4]陆海奇, 高永强, 陈辉. 大跨度螺栓球网架施工与变形控制技术研究[J]. 建筑技术开发, 2026, 53(2): 50-54.