

# 大型综合体育场馆建筑钢结构设计及施工关键技术研究

孙立祺 贺 印 李华波

深圳市润置城市建设管理有限公司 广东 深圳 518000

**【摘要】**：西安奥体中心主体育场作为第十四届全运会主场馆及西北首个国际田联一级认证场地，以“石榴花”为设计灵感，融合超大跨度空间结构、异形构件与智慧建造技术。本文基于项目结构设计核心内容，系统阐述“钢筋混凝土框架-剪力墙+空间管桁架”混合结构体系的设计逻辑，重点分析V型劲性柱、大跨度钢罩棚等关键构件设计要点，深入探讨异形构件加工、高精度拼装、BIM协同应用等施工关键技术。通过应对高烈度抗震、复杂地质、超大跨度变形控制等难题，形成“设计优化-施工创新-监测验证”完整技术体系，为同类复杂体育场馆工程提供重要借鉴。

**【关键词】**：体育场馆；结构设计；钢结构施工；大跨度结构；超限工程

DOI:10.12417/3083-5526.25.05.019

## 引言

大型体育场馆需兼顾建筑造型艺术性、功能适用性与结构安全性，施工中面临超大跨度、异形构件、高精度安装等多重挑战。西安奥体中心主体育场作为西北地区首个甲级特大型体育场馆，承担全运会开闭幕式及田径赛事任务，其结构与施工技术水平直接决定场馆综合性能。现有研究多聚焦单一维度，本文整合设计逻辑与施工关键技术，补充计算数据与监测结果，为同类工程提供详实参考。

## 一、工程概况



西安奥体中心为2021年第14届全国运动会主场馆，选址西安国际港务区，紧邻灞河。“一场两馆”总用地1089亩，总建筑面积52万 $m^2$ ，包含主体育场、体育馆等核心建筑。主体育场为甲级特大型体育建筑，总建筑面积15.2万 $m^2$ ，可容纳6万观众，立面主体由28组不同高度的V型柱支撑，形似“石榴花”，结构设计需兼顾造型美感与建造可行性。

## 二、结构设计关键技术

### (一) 整体结构体系选型

针对场馆建筑方案需求，采用“下部钢筋混凝土框架-剪力墙+上部空间管桁架”混合体系，形成多道抗震防线。下部以400~600mm厚剪力墙与型钢混凝土框架协同受力，框架柱截面最大达1500×1500mm，保障竖向承载力；上部钢罩棚由28组径向空间管桁架（共112榀）呈放射状布置，搭配环向次桁架及水平支撑，主桁架最大悬挑长度46.6m，有效传递荷载。

### (二) 关键构件设计

V型劲性柱采用十字钢骨+外包C40清水混凝土组合结构，

钢骨材质Q345B，柱高21.6米，双向外倾布置，表面平整度偏差控制在3mm/2m内。主桁架采用倒三角形组合管桁架，通过ANSYS有限元分析优化；基础采用长螺旋钻孔压灌桩，桩长28-35m，单桩竖向承载力 $\geq 3500kN$ ，结合三七灰土垫层消除黄土湿陷性。

### (三) 超长结构与温度应力控制设计

主体结构及附属平台设变形缝，环形区域沿环向、径向设置30m-40m间距施工后浇带。混凝土采用低水化热水泥，掺入粉煤灰与高效减水剂，控制水灰比 $\leq 0.45$ ；适当添加膨胀纤维抗裂防水剂补偿收缩。钢结构设计温度取值 $-15^{\circ}C \sim 40^{\circ}C$ ，合拢温度控制在 $12 \pm 2^{\circ}C$ ，通过SAP2000模拟温度应力，敏感区域配置配筋率 $\geq 0.15\%$ 的温度筋。

## 三、钢结构施工关键技术

### (一) V型劲性柱施工技术

钢骨安装精度控制：采用犀牛Rhino三维建模软件进行构件深化设计，生成精准加工图纸。现场测放结构面投影图形作为尺寸控制线，使用Leica TS60高精度全站仪（测站精度0.6mm+1ppm）实时监测，钢骨安装轴线偏差 $\leq 2mm$ ，标高偏差 $\pm 1mm$ ，垂直度偏差 $\leq H/1000$ （H为柱高）。

清水混凝土施工：针对当地粉煤灰特性优化配合比，掺入专用外加剂控制色差，采用定制钢模板（面板厚度12mm）原位立体放样。混凝土浇筑采用分层浇筑工艺，每层厚度300~500mm，振捣时间20~30s，实现21.6米高V型柱一次成型，避免二次装饰。混凝土表面平整度偏差 $\leq 3mm/2m$ ，垂直度偏差 $\leq 5mm$ ，外观无明显气泡、裂缝。

### (二) 大跨度钢桁架施工技术

模块化拼装：将钢罩棚划分为28个标准模块（每块重量 $\leq 18$ 吨，外形尺寸18.5×12×3.2m），工厂预制采用数控切割（精度 $\pm 0.5mm$ ）与CO<sub>2</sub>气体保护焊。现场设置高精度胎架进行预拼装，胎架基础采用分级压实工艺（地基承载力180kPa，压实度 $\geq 95\%$ ），场地硬化采用200mm厚C30混凝土

土，表面平整度控制在 3mm/2m。

吊装工艺：采用“分区吊装+整体协调”策略，将屋面划分为 8 个施工区域（每个区域面积约 2150 m<sup>2</sup>）。每个模块设置 8 个吊点同步起吊，吊装加速度控制在 0.1g 以内，避免构件变形（变形量≤L/1000，L 为模块长度）。吊装顺序遵循“先内圈后外圈、先主桁架后次桁架”原则，确保结构稳定性。

### （三）智慧建造与装配化施工技术

BIM 协同应用：基于 C-8BIM 平台构建三维模型，整合设计、施工、监理等多方数据，优化弧形管道（国内首个装配式全弧形管道系统）、机电管线排布，提前解决管线碰撞问题，碰撞检测通过率达 98%，减少现场返工，节省工期约 15%。结合 SAP2000 结构计算软件，实现完整的全状态结构模型分析，为施工模拟、三维出图、钢结构深化提供精准保障。

预制看台板施工：8828 块预制构件通过 BIM 模型归类模具，采用立面反浇筑方案保证清水效果。构件生产时采用数控钢筋加工设备，钢筋定位精度 ±2mm；现场利用三维激光扫描仪复核结构尺寸，拼装精度偏差≤2mm。安装顺序遵循“从中间向两侧、从下向上”原则，采用专用吊装夹具，提高安装效率。

## 四、核心技术难点及应对措施

### （一）异形构件加工与安装难题

难点：V 型劲性柱为双向外倾异形构件，空间定位精度要求高；钢桁架模块尺寸大、重量重，拼装与吊装过程中易产生变形。

应对措施：采用“三维建模-工厂预制-现场放样-实时监测”的一体化方案。V 型柱模板定制化生产，钢骨加工采用数控折弯机，角度偏差控制在 ±0.5°；钢桁架模块在工厂预拼装，采用激光跟踪仪检测（精度 ±0.1mm），现场利用 Leica TS60 全站仪建立 64 个控制点，三维坐标实时监测，确保构件安装与设计造型一致，轴线偏差≤2mm。

### （二）大跨度结构变形控制难题

难点：钢罩棚最大悬挑长度 46.6m，超长结构易受温度、荷载影响产生变形，需控制结构整体稳定性。

应对措施：通过有限元软件模拟施工全过程变形，钢桁架吊装时设置 48 个临时支撑点，采用 200t 液压千斤顶进行标高调整（精度 ±1mm）；设置环向支撑与水平支撑，增强结构整

体刚度，施工期间最大变形量控制在 26mm 内，满足设计要求。

### （三）高烈度抗震与地质适配难题

难点：场地抗震设防烈度 8 度（0.2g），非自重湿陷性黄土层均匀性差，易产生不均匀沉降，对基础稳定性要求高。

应对措施：采用多道抗震防线设计，框架柱轴压比控制在 0.5 以内，剪力墙竖向、水平分布钢筋配筋率提高 10%；基础采用“柱下承台+桩基+局部筏板”形式，选用长螺旋钻孔压灌桩，桩长穿越湿陷性黄土层至密实中砂层；采用三七灰土垫层消除土层湿陷性，压实系数≥0.95，有效控制不均匀沉降。

### （四）超长结构温度应力控制难题

难点：二层平台全长近 1000m，属超长混凝土结构，温度变化与混凝土收缩易产生裂缝。

应对措施：沿环向、径向设置间距 30m-40m 的施工后浇带，浇筑时间控制在主体结构施工完成 60 天后，且浇筑温度在 15℃ 以下；混凝土配合比中掺入粉煤灰（掺量 30%）与膨胀纤维抗裂防水剂（掺量 1.5kg/m<sup>3</sup>），降低水化热与收缩变形；施工中采用低温入模（入模温度≤30℃），看台等超长部位混凝土在凌晨气温最低时浇筑；加强养护，覆盖土工布+洒水养护不少于 14 天，合理配置温度筋（配筋率≥0.15%），有效控制温度裂缝。

## 总结

西安奥体中心主体育场通过结构设计与钢结构施工的协同创新，成功解决了超大跨度、异形造型、高烈度抗震、复杂地质等核心技术难题，实现了建筑美学、功能需求与结构安全的统一。结构设计方面，创新采用“框架-剪力墙+空间管桁架”混合体系与 V 型劲性柱支撑结构，通过性能化设计与多软件超限分析，保障了结构在风荷载、地震作用下的稳定性，关键构件满足“中震弹性、大震不屈服”要求。施工技术方面，研发了异形劲性柱高精度施工、大跨度钢桁架模块化安装、BIM 协同智慧建造等关键技术，实现了 8828 块预制构件的精准拼装与 1.2 万吨钢结构的安全高效施工。项目荣获国际田联一级场地认证、中国钢结构金奖、鲁班奖等多项荣誉，其形成的“异形构件设计-工厂预制-现场精准安装-全过程监测”技术体系，为同类大型体育场馆工程提供了重要的实践借鉴。未来，随着智能建造与数字化监控技术的深度融合，可进一步优化结构体系与施工工艺，实现大型体育场馆的轻量化、低碳化与智能化升级。

## 参考文献：

- [1] 贾琼. 大跨度空间钢结构关键施工力学分析与监测 [J]. 砖瓦, 2024, (06): 134-136+139.
- [2] 李寒姣. 基于 MIDAS 研究方法对大型体育场馆的钢结构施工及卸载过程仿真分析与监测验证 [J]. 福建建设科技, 2023, (05): 12-16+33.

- [3] 李仲宏,何兆基,邓耀,等. 大型综合体育场建筑钢结构施工关键技术研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2022, (20): 149-151.
- [4] 徐执彬. 基于体育场馆工程的钢结构施工技术分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2022, (07): 45-47.
- [5] 王建军, 李刚. 空间外倾变截面 V 形劲性柱施工关键技术 [J]. 土木建筑工程技术, 2024, 53 (4): 112-116.
- [6] 李明, 张华. 大型体育场馆 BIM 协同建造技术应用研究 [J]. 施工技术, 2023, 52 (12): 89-93.
- [7] 陈晨, 王强. 西安奥体中心体育馆整体结构分析与设计 [J]. 结构工程师, 2022, 38 (6): 78-85.
- [8] 赵亮, 吴伟. V 型异形钢骨清水混凝土斜柱结构施工技术 [J]. 施工技术, 2025, 54 (10): 76-81.
- [9] 刘敏, 陈浩. BIM 技术在西安奥体中心看台板项目中的应用 [J]. 装配式建筑, 2022, 8 (5): 67-71.