

高层建筑钢结构施工精度控制与安全管理措施分析

王群

(菏泽城建工程发展集团有限公司, 山东 菏泽 274000)

摘要 本文聚焦高层建筑钢结构施工精度控制的核心要素以及安全风险隐患, 基于从高层建筑钢结构构件制造到现场安装, 再到焊接连接的完整链条, 构建“数字化预控, 动态监测, 实时纠偏”的精度保障体系, 并且融合BIM技术、智能传感装置以及焊接机器人等创新应用, 同时建立“技术支撑, 智能预警, 责任到人”的安全管控机制, 重点覆盖吊装防护、高空作业以及应急处理等关键场景。经过某都市圈环线项目、某金融中心等工程实践的检验, 该体系能够把吊装定位误差控制在 ± 3 毫米的范围之内, 焊接一次检测合格率达到98%以上, 而且实现了安全事故零发生的目标。该成果旨在为高层建筑钢结构的施工质量与安全管理提供技术参考。

关键词 高层建筑; 钢结构施工; 精度控制; 安全管理; 智能建造

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.034

0 引言

超高层建筑大多采用钢结构体系, 该体系依靠承载力强、自重轻、建造速度快等特点, 成为大型地标项目的主流选择方式。然而, 当建筑高度超过300米的时候, 钢结构施工会面临不少挑战, 如单体构件重量大(单根钢柱可达50吨)、节点连接复杂(单个节点需容纳34根钢筋)、高空作业比例超过60%等, 这些问题使得精度误差逐步不断累积, 安全隐患叠加效应愈发显著。传统施工方法中, 依靠人工测量产生的定位偏差超过8毫米, 焊接变形量达到5毫米/米, 这不仅造成40%的节点返工, 还可能引发结构安全方面的问题。

目前, 智能建造技术和钢结构施工有机结合, 正推动该领域快速数字化升级。BIM技术通过三维建模功能, 完成从设计施工到维护全周期协同管理与施工环节模拟推演。物联网系统持续追踪施工现场环境机械设备及预制部件等核心指标, 为精准决策提供依据。自动化焊接设备以高效作业方式保证焊接质量, 同时减少人为失误。本文围绕技术落地和管理制度两个方面, 系统阐述覆盖方案设计、现场监督、质量检测等环节的精度保障方案, 建立涵盖风险防控、紧急处理技能培训的安全保障机制, 以为钢结构项目构建兼具创新性和可操作性的实施方案, 并为同类项目积累可借鉴的参考经验。

1 高层建筑钢结构施工精度控制的核心技术体系

1.1 构件制造阶段的精度预控技术

制造环节的精度控制从工厂化生产开始便要重视, 必须构建起从设计参数到加工工艺再到出厂检测的全过程数字化管理机制。在某金融中心工程实施过程中, 针对四百五十余个特殊连接部位, 借助BIM技术开展深化设计并获取三维坐标数据, 其精度能够达到0.1毫米。这些数据直接输入数控加工设备, 确保连接板孔径误差控制在正负0.5毫米范围之内。重要部件采用三坐标测量仪进行质量检测, 出厂前通过数字化虚拟拼装提前发现并解决安装冲突, 让预拼装时间缩短了六成。材料特性和加工精度有着直接关联, 对于厚度超过50毫米的钢板, 焊接前必须完成工艺性验证, 选用低氢型焊条(要求扩散氢含量不超过5毫升/100克), 并经过350摄氏度保温1小时的干燥处理, 有效降低了焊接缺陷和变形出现的风险。研究显示, 通过统筹优化设计与工厂化生产, 可使构件制作优良率超过98%, 进而为后续现场安装精度提供可靠保障^[1]。

1.2 现场吊装的动态定位技术

吊装是精度传递的核心步骤所以要构建“BIM定位—智能监测—实时调整”闭环管控体系。某都市圈环线项目借助BIM模型获取构件三维坐标, 并输入测角精度为 $\pm 0.5''$ 的全站仪, 同时在构件表面布设3个监测靶点, 采用“双机抬吊配合辅助牵引”作业方式

作者简介: 王群(1988-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程。

调整姿态, 确保初步就位偏差小于 5 毫米。高空对接过程中系统每 5 秒采集一次靶点坐标数据, 与 BIM 设计值对比后生成调整指令, 通过调节精度达 ± 0.5 毫米的螺旋千斤顶及张力误差控制在 ± 5 kN 的缆风绳完成三维定位, 并将误差控制在 ± 3 毫米范围内。当遭遇 10 米/秒以上强风时, 风速传感器会触发联动预警机制, 暂停吊装作业并固定构件。待风力减弱后, 利用北斗定位系统进行校核, 保证偏差不会超限。某金融中心创新实施“精准测量四步法”, 即通过经 GPS 校核的高精度控制网、三级测量验收机制、内外双层控制网及 50 米转换层复核来阻断误差累积, 让 180 米高的塔楼顶部累计偏差控制在 30 毫米以内。

1.3 焊接连接的变形控制技术

焊接变形是造成精度偏差的关键重要因素, 需要依靠“预设补偿—分步焊接—事后调整”组合方案来控制^[2]。在某超高层建筑项目中, 依据焊接试验所得到的数据(每米焊缝收缩 0.8 毫米), 于材料切割阶段预先留出 1 毫米/米的收缩补偿量。针对厚板焊接采用多层多道焊接技术, 保证每层厚度不超过 3 毫米, 焊接顺序是先完成内部 2/3 厚度的焊接, 等冷却至 60 摄氏度以下再焊接外部, 最终让变形量减少了 40%。智能装备的运用切实提高了焊接的精确程度, 在某都市圈环线工程里面, 使用了配备焊缝跟踪功能的焊接机器人, 单台机器的日焊接效率为人工操作的 3~5 倍, 焊接材料的消耗降低了 10%, 并且首次检测的合格率能达到 98% 以上。施工过程中通过布置应变片和红外测温设备, 把层间温度维持在 150~250 摄氏度之间, 一旦检测到角变形超过 3 毫米/米, 马上采用 600~650 摄氏度的局部加热进行反向矫正, 使变形量削减了一半。焊后的校准工作采用机械与热处理相结合方法, 当错边量处于 1~2 毫米之间时, 使用液压千斤顶进行校正(精度控制在 ± 0.5 毫米)。对于整体弯曲变形采用 700~800 摄氏度的火焰加热, 借助百分表进行实时监控直至达标。研究证实采用智能化焊接技术可将焊接变形控制在 2 毫米/米以内, 进而显著减少二次修复的工作量。

1.4 全过程精度监测与数据管理

某都市圈环线工程运用数字孪生技术建立施工全周期监测机制, 开发出综合关键指标的数据驾驶舱。该驾驶舱综合顶进距离、顶进速率及受力状态等关键指标, 依托大数据分析来实现趋势预判与主动控制。针对结构竖向变形监测这个情况, 项目采用分层布点方式即每五层设置测点的方式, 并且融合温度传感信息构建变形预测模型, 预先修正构件尺寸从而消除变形误差。在精度数据方面执行“一构件一档案”制度,

利用 RFID 芯片追踪构件从生产到安装全流程的偏差数据, 并且对接智慧工地平台以此确保数据可追溯。信息化管理让精度问题追溯效率提高了 80%, 为后续工序优化提供了数据依据^[3]。

2 高层建筑钢结构施工安全管理的关键措施

2.1 吊装作业的安全防护体系

吊装安全的根本保障贯穿在设备选用、工况监控和应急防范这三个关键环节。设备选型要结合构件重量以及吊装高度来确定, 起重设备的额定载重量必须达到构件实际重量的 1.2 倍以上。采用塔式起重机时, 需同步实施地基沉降监测工作, 其连接加固装置要每 20 层进行一次承压测试。某环形工程采用智能同步顶推技术, 构建全程监测预警加多重防护机制的立体安全体系, 通过动态数据采集和风险分析, 确保各类风险始终处于可控状态, 为吊装作业提供全方位的安全保障。

起吊之前必须完成安全性能核算工作, 对于超过 60 吨的重型构件要预先搭建临时支撑结构, 其承重能力不能低于构件自身重量的 1.2 倍, 以此规避吊装时因塑性变形导致的脱落危险^[4]。高空作业区域必须实施物理隔离并设置警示标识, 同时配备专职指挥人员和绑扎作业人员, 通过无线通信设备保证指令能够精准传达, 杜绝因交叉施工而引发的碰撞事件。

2.2 高空作业与临边防护技术

高空作业的安全保障依靠“防护设施—智能监测—个人防护”协同运作的管理模式。作业层要搭建标准化操作平台, 其护栏高度不能低于 1.2 米且防滑钢板脚手板需稳固。平台承重上限经精确核算后, 要以标牌形式明确展示出来。在某金融中心项目建设过程中, 针对附着式塔吊与核心筒结构施工, 通过严密工序衔接管控实现塔吊顶升与钢构安装同步化, 有效缩短临边区域危险暴露时长。在作业平台上布设高精度的倾角及荷载监测设备, 能够对设备运行状况进行实时追踪工作。平台倾斜角度超出 3 度或者承载量达到额定值的 80% 时, 系统会立刻触发声光警报并自动断电, 以此有效防止因设备失稳或者超载所导致的各类安全事故。施工人员所佩戴的智能安全帽配备了厘米级定位模块和紧急呼叫功能, 当人员意外进入高危区域时, 安全帽会通过震动和语音发出即时警报。若发生突发意外情况, 管理人员可以利用定位系统快速确定人员具体位置, 为救援行动争取到宝贵时间, 进而大幅提升施工现场的安全管理水平和应急处理效能。

2.3 焊接作业的安全管控措施

焊接作业要重点防范火灾触电以及中毒事故, 工作场所应当配备便携式的灭火设备, 并且确保和易燃

物间距不小于5米^[5]。高空焊接作业需要安装接火斗,同时铺设防火布且下方禁止堆放易燃物品。焊接设备必须采用三级配电两级保护的措施,电缆应当架空敷设以此防止其出现破损情况。操作人员必须穿戴绝缘防护的相关装备,在潮湿环境下还需要额外增设绝缘垫板。针对高空封闭空间开展的焊接作业,需要使用轴流风机来进行强制通风,同时要实时监测有害气体的具体浓度(一氧化碳含量要控制在30毫克/立方米以下),并且配备防毒面具以及紧急供氧装置。在某都市圈环线工程当中,已经采用焊接机器人替代人工开展箱型结构内部焊接工作,这一举措既提高了作业的精度,又消除了人员在有限空间内操作的安全隐患,研究表明智能化设备的应用能够让焊接作业的安全事故发生率下降九成以上。

2.4 智能安全预警与应急管理

打造具备“感知—分析—预警—处置”功能的智慧安全管控系统,依托物联网感知设备、无人机巡查以及视频监控技术来完成风险即时监测^[6]。在钢结构重要部位安装应变监测装置,当数值达到设计阈值的80%时,系统自动向管理人员发送警报并附带相应处置方案。应急管理工作遵循“一事一预案”原则,针对起重倾覆、火灾、人员坠落等突发情况组织定期模拟演练,配备液压顶升设备、破拆工具、医疗用品等应急物资并与周边医疗机构建立快速响应通道,确保事故发生后15分钟内能够开展救援。某都市圈环线工程借助智能预警与应急演练的双重保障,达成施工期间安全事故零发生的目标。

3 工程案例验证

3.1 某都市圈环线钢箱梁工程

某都市圈环线钢箱梁工程将数字孪生和智能装备结合技术方法创新性地整合运用BIM虚拟拼装工艺,实现了毫米级精准控制,确保构件误差限定在±1毫米区间内。在顶推施工环节,借助智能同步操控系统将纵向偏差精确控制在±2毫米,横向偏差维持在±1毫米,此项指标达到行业前沿水准。安全管理机制显著强化,部署全方位智能监测系统,实时收集顶推参数及结构应力信息,构建包含预警响应处置三个层级联动机制,有效抵御12米/秒强阵风侵袭。整个项目执行期间,保持零安全事故记录,依托数字化施工管理手段,工期压缩超30%,为大跨度钢箱梁工程建设树立新的技术典范。

3.2 某金融中心钢结构工程

某金融中心钢结构工程,为解决节点构造复杂以及空间精度传递困难问题,创新构建了“BIM三维深化

设计+双层控制网”技术体系。利用BIM技术针对452个特殊节点开展参数化建模与虚拟预拼装工作,并配合地面与高空双重测量控制网,达成毫米级精度控制目标,最终特殊节点首次安装合格率达到98.3%,塔楼结构垂直度偏差控制在4.8毫米且优于1/22 000设计规范。在安全管理层面,项目针对核心筒与钢结构交叉作业风险隐患,创新实施“生命线防护线—作业警戒红线—材料堆放黄线”三级管控体系,同时应用智能安全帽定位系统,对1 200余名施工人员进行实时位置监控和危险区域预警,确保高空作业实现零事故。通过技术创新与精细化管理双重保障,项目主体钢结构工程比预定工期提前15天完成封顶,为后续机电安装和幕墙施工奠定良好基础。

4 结束语

保障高层建筑钢结构施工质量和安全的关键是将技术创新和管理改进深度融合。借助数字化制造手段,依靠BIM模型和物联网技术实现吊装精确定位,运用自动化焊接机器人改良焊接工艺,能确保安装精度达到毫米级标准以保障结构连接稳固。通过智能监控系统实时采集分析施工全流程数据,规范临边防护和高空作业平台等防护设施设计标准,建立跨部门高效应急响应机制,可提前识别防范高空坠落和构件失稳等风险。未来发展方向是推广数字孪生技术在施工场景应用,构建包含设计优化施工模拟及运维监测的全生命周期管理平台。同时要加大研发力度,开发适用于强风高温等极端环境的智能吊装设备,以及具备自适应调节能力的大型焊接机器人,推动高层建筑钢结构施工朝全面自动化和智能风险预警方向发展,进而提升工程质量和施工安全保障水平。

参考文献:

- [1] 张红,杨少军,冯昊,等.智能建造技术在超高层钢结构施工中的应用研究[J].工程研究前沿,2025,02(05):113-120.
- [2] 中建三局.智控毫米级精度!三局“钢构桥建”经验亮相全国观摩会[J].建筑施工,2025(12):45-48.
- [3] 毛鹏程.高层建筑钢结构施工关键技术及精度控制研究[J].建筑科学,2025,41(12):78-85.
- [4] 李明华.建筑施工中超高层钢结构吊装精度控制与焊接变形矫正技术应用[J].施工技术,2025,54(07):62-67.
- [5] 胡伟.180米钢结构精细化施工管理实践:以信阳金融中心项目为例[J].工程管理学报,2025,39(09):91-95.
- [6] 王建国.高层建筑钢结构施工安全智能监测技术与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2024.