复杂竖向结构体系高层钢结构施工关键技术

侯志伟, 董玉强, 徐 娜

(山东华铭工程有限公司, 山东 潍坊 262600)

摘 要 随着城市化进程不断加快, 高层建筑向大跨度、异形化及多功能复合方向发展, 复杂竖向结构体系成为现代建筑的主流选择。虽然当前施工技术已实现模块化吊装与自动化焊接, 但仍面临变形累积、高空安全风险等瓶颈问题。而传统经验型施工管理难以满足非线性传力路径的精度需求, 动态荷载下的实时调控能力仍是行业短板。本文分析了在复杂竖向结构体系高层钢结构施工的关键技术, 旨在为施工人员提供有益参考。

关键词 复杂竖向结构体系; 高层钢结构; 塔吊安装技术; 大悬臂安装技术; 施工变形控制技术

中图分类号: TU974; TU758.11

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.017

0 引言

现代高层建筑中钢—混凝土混合结构, 融合巨型悬挑体系及动态调谐技术, 使施工过程需兼顾刚度协调和变形控制。创新性解决方案体现在整合三维动态模拟技术及智能监测系统, 其中液压提升装置联动防护体系的智能并协同高精度传感器网络, 能够有效突破传统施工的被动响应模式, 实现毫米级误差的动态修正。

1 复杂竖向结构体系解析

复杂竖向结构体系是指建筑或工程中由多层、多组件垂直叠加构成的承重以及支撑系统, 其核心特征在于经过不同材料、形态或功能的构件在高度方向上的组合, 实现荷载的整体稳定性^[1]。此类体系通常包含框架、核心筒等基本元素, 并相互连接形成的空间协同作用, 以应对重力及风荷载等多源外力的冲击。其复杂性主要体现在三个方面: 构件的多样性, 钢—混凝土混合结构或巨型柱以及悬吊体系相结合, 不同材料的构件需在刚度、强度及变形性能上协调; 传力路径的非线性, 荷载可能经过多次重分配交叉支撑、转换层或斜向构件, 形成立体传力网络; 几何形态的异质性, 退台和悬挑还有连体结构或扭转造型导致的重心偏移抗侧力系统不对称布局。此外, 现代高层建筑中出现的“多级次结构”体系或“自适应结构”能够进一步增加竖向层级间的动态相互作用。

2 复杂竖向结构体系高层钢结构施工关键技术分析

2.1 塔吊安装技术

高层钢结构建筑在现代城市建设中愈发常见, 此类建筑安装高度高, 大量构件处在数十米甚至上百米

高空, 安装作业难度极大, 同时构件重量大, 单根钢梁或钢柱重达数吨, 常规设备已经难以满足起吊要求。而塔吊吊装技术凭借其强大的适应性成为高层钢结构安装的核心解决方案^[2]。该技术经过科学规划, 能够完美匹配不同施工阶段的安装需求。但是塔吊布置及选型, 完全取决于施工人员制定的钢结构安装方案, 安装方案需规划不同施工阶段、各区域构件安装顺序以及作业时间^[3]。施工人员布置塔吊则需配合此顺序, 在合适位置设置塔吊, 确保能覆盖所有需吊装区域, 无作业死角。此外, 在选型方面, 施工人员要依据安装方案中构件重量、安装高度等参数, 大重量构件需起吊能力强的塔吊; 安装高度高, 要使用起重臂长度足够、起升高度达标的设备, 以保障安装作业顺利、高效开展。

以巨型框架支撑筒体混合体系的高层为例, 施工人员需针对外框巨型桁架和核心筒钢骨柱的错层安装需求, 采用动态模拟技术确定塔吊最佳附着点位。根据核心筒剪力墙内埋钢骨柱的逐节攀升轨迹, 在筒体西北两侧预埋重型支腿基座, 施工人员可配置两台塔吊形成 270° 覆盖半径。塔吊选型阶段重点校核外框桁架分段吊装工况, 最大起重量需满足 32 t 桁架节段在 120 m 高空的精准就位要求。起重臂长度则依据建筑立面收分曲线优化为 55 m, 确保顶层幕墙单元吊装时吊钩具有足够回转量。同时, 施工人员利用 BIM 模型对塔吊群协同作业进行碰撞检测, 调整塔吊顶升节奏使其始终高出钢结构作业面 15 m。针对高空风荷载影响, 在塔吊标准节增设侧向稳定器, 吊装狭长形钢柱时启用微速就位模式。塔吊附着件和钢结构预埋件采用高强螺栓连接, 每次顶升后需用全站仪复核垂直度偏差。

核心筒钢板墙吊装阶段, 施工人员可采用双塔抬吊工艺, 预先在钢构件重心位置焊接专用吊耳。塔吊司机操作室配备三维定位显示屏, 实时反馈钢柱法兰盘对接精度。施工人员根据钢框架施工进度动态调整塔吊配重块数量, 在吊装 18 t 以上巨型梁时自动激活超载保护系统。所有吊装指令均由数字化指挥中心统一发布, 塔吊运行数据实时上传至云端监测平台。施工人员每日核查钢丝绳磨损情况, 极端天气条件下启动塔吊架锁定装置^[4]。

2.2 大悬臂安装技术

外框钢构件悬臂安装是高层及大跨度建筑施工中的技术难点, 其安装质量直接影响建筑整体安全性。外框钢构件悬臂安装是指在建筑结构边缘将钢构件以悬臂形式伸出并固定。在此过程中, 钢构件仅一端和既有结构连接, 另一端处于悬空状态, 受力复杂, 不仅要承受自身重量, 还要应对施工过程中风力等多种因素造成的荷载。但是, 应用大悬臂安装技术, 能够进一步提升施工质量。该技术经过优化节点设计及分段吊装工艺, 既可以实现更大跨度的外挑结构, 减少临时支撑的使用, 还可以提高建筑的整体抗震抗风性能。

以高层建筑外挑 15 m 的环形桁架为例, 施工人员可把悬臂钢构件划分为三个安装单元, 每个单元在工厂预拼装后运输至施工现场。安装前施工人员需在悬挑根部设置临时加固措施, 采用液压千斤顶对接口施加预压力, 补偿焊接过程中的收缩变形。与此同时, 施工人员应运用全站仪实时监测悬臂端部挠度变化, 数据同步传输至中央控制系统, 偏差超过 2 mm 立即触发预警机制。并且, 悬臂段及核心筒连接节点需采用高强螺栓临时固定, 待整体姿态调整完毕后再进行熔透焊作业。焊接过程中施工人员应严格遵循对称施焊原则, 每完成一道焊缝即刻进行超声波探伤检测^[5]。

2.3 多角度全位置异形钢结构焊接技术

在复杂竖向结构体系的高层钢结构施工中, 多角度全位置异形钢结构焊接技术凭借其空间适应性强、质量稳定性高的优势, 成为确保结构安全的关键所在。该技术经过创新工艺方法能够有效解决异型构件空间交汇带来的焊接可达性难题, 可以提升复杂节点的焊缝成型的质量, 从而增强整体结构的承载能力。在施工实施过程中, 施工人员需基于 BIM 技术开展焊接路径模拟, 针对不同空间位置制定差异化焊接参数, 采用智能化设备实现精准热输入控制, 并配合实时监测技术动态调整焊接过程。同时, 经过严格的焊前预热、

层间温度控制及焊后热处理工艺, 最大限度降低焊接残余应力和变形风险, 确保接头质量满足高层建筑长期使用的严苛要求。

例如: 在高层钢结构建筑施工中, 施工人员需针对核心筒和巨型外框柱的斜交节点, 采用数字孪生技术构建焊接变形预测模型, 模拟不同焊接顺序对结构初始应力的影响。焊接前运用红外热像仪检测母材预热状态, 确保坡口两侧 100 mm 范围内达到 150 °C 标准要求。而对于箱形柱及环梁的异形连接节点, 施工人员应配置可 360° 旋转的自动化焊接机械臂, 根据 BIM 模型预设的轨迹完成仰焊位置的连续作业, 焊接过程中采用脉冲气体保护焊工艺, 将电弧长度精确控制在 2 ~ 3 mm 范围内, 每完成一道焊缝, 施工人员需立即采用磁粉检测排查表面裂纹。同时, 针对超厚板焊接的层间质量控制, 施工人员在焊道清理阶段应使用恒温加热毯维持 80 °C 的层间温度。窄间隙焊接时选用直径 1.2 mm 的金属粉芯焊丝, 焊接速度稳定在 12 cm/min, 电流电压参数则根据空间位置动态调整。此外, 施工人员可以运用三维激光扫描仪采集焊后构件形态数据, 与设计模型比对分析变形规律, 对于受力节点实施残余应力测试, 采用盲孔法测量关键截面的应力分布状态, 保证所有焊接参数以及检测数据录入区块链系统形成不可篡改的质量追溯链^[6]。

2.4 施工变形控制技术

在高层建筑建设过程中, 因自身体积庞大, 所以会承受巨大的重力, 导致结构在竖向出现明显变形^[7]。同时, 建筑材料性能、温度的剧烈变化, 以及施工过程中的动态荷载, 都会让变形问题雪上加霜。一旦变形超出允许范围, 不仅会影响建筑的外观, 还可能会威胁到结构的稳定性以及安全性。但是, 应用施工变形控制技术, 则可以有效抵消结构自重引起的变形, 确保建筑最终形态符合设计要求。因此, 施工人员在施工前需要制定详尽且合理的施工方案, 依据建筑的结构特点, 确定最佳施工顺序。并在施工过程中安排专业人员, 借助高精度测量仪器, 对结构变形进行实时监测获取准确数据。此外, 施工人员应引入 BIM 技术, 构建精确的建筑模型, 对施工过程进行模拟分析, 提前预测可能出现的变形问题, 制定相应的应对策略, 提高结构的承载能力。

例如: 在高层钢结构建筑施工中, 实施施工变形控制技术必须精准应对复杂竖向结构体系的多重荷载效应。施工人员需针对核心筒以及外框钢柱的差异沉

降问题,采用基于实时监测数据的动态补偿算法,在每层钢柱吊装前预调标高超差,利用光纤光栅传感网络持续采集结构应变数据,结合温度传感器记录的日照梯度变化,建立三维变形场预测模型。而对于巨型转换桁架的预起拱处理,施工人员可运用非线性有限元分析反推施工荷载下的弹性变形量,在工厂加工阶段将预拱柱植入构件几何形态,在施工过程中部署全自动全站仪监测系统,每隔六小时扫描关键节点的三维坐标变化,数据经云计算平台处理后生成变形趋势图谱。若监测到外框柱竖向累积偏差超过 15 mm 时,施工人员需要立即启动液压可调支座进行微调补偿。钢梁安装阶段则采用反向预偏位技术,根据相邻柱顶的实际位移差计算梁端连接板的精加工尺寸。在核心筒剪力墙混凝土浇筑时,施工人员在模板体系内集成液压调平装置,实时抵消新浇混凝土对钢骨柱的侧向推力。针对日照温差引起的周期性变形,施工人员可建立时变力学模型,选择每日凌晨五点钟作为基准测量时段,并且所有测量数据与 BIM 模型动态关联,可视化展示结构变形发展的历程。另外,施工人员需要每周召开变形协调会议,根据最新监测结果修正后续二十层的施工预调值,最终结构合拢前进行七十二小时连续观测,确认变形趋于稳定后实施锁定焊接。

2.5 安全防护技术

复杂竖向结构体系高层钢结构施工关键技术中的安全防护技术是保障工程顺利推进的关键要素,其作用不仅仅体现在降低高空作业的风险,还可以提升整体施工效率,能够有效避免钢结构吊装过程中的倾覆隐患,同时减少交叉作业带来的安全隐患。在复杂竖向荷载作用下,防护体系能够协同主体结构变形,实现动态平衡,从而确保施工精度符合高层钢结构的设计要求。此外,施工人员开展此项技术需结合 BIM 模型进行安全工况模拟,提前预判钢结构安装过程中的危险源分布特征,据此制定分级防护方案,而在施工阶段应注重防护和液压提升装置的同步适配,采用无线传感技术实时采集风速荷载,借助云平台分析及及时调整防护参数。施工全过程需严格执行钢结构焊接防火隔离标准,运用热成像仪监测火花飞溅轨迹,确保高温作业不破坏周边防护结构^[8]。

例如:在复杂竖向结构体系高层钢结构施工过程中,施工人员需要把安全防护技术贯穿工程全周期,依据 BIM 模型模拟不同工况下的结构受力状态,精准识别高空作业危险区域,据此部署模块化防护平台。

并针对高层钢结构特有的风振效应,在悬挑部位安装动态阻尼装置,结合无线传感器网络实时监测风压变化,数据同步传输至云端分析系统,动态调整防护设施刚度系数。与此同时,钢结构吊装阶段可采用智能防倾覆系统,利用北斗定位技术追踪构件运动轨迹,液压提升装置与防护支架形成联动机制,确保吊装过程始终处于可控状态。焊接作业区域则铺设纳米防火毯,配合红外热成像仪实时捕捉温度场分布,一旦检测到异常高温立即触发自动灭火装置。核心筒和外框钢结构衔接部位需设置多重缓冲层,采用高强纤维复合材料吸收冲击能量,防止节点区域因应力集中导致防护失效。高空走道采用格栅式防滑钢板,边缘安装毫米波雷达探测人员活动轨迹,联动声光报警系统预防越界风险。而夜间作业期间启用自适应照明系统,根据施工进度自动调节光照强度及覆盖范围,消除视觉盲区带来的安全隐患。此外,所有防护设施每日实施无人机巡检,结合深度学习算法识别结构缺陷,生成数字化维保清单定向推送至责任班组,最大化避免高空作业的危险性。

3 结束语

现代高层建筑向着结构复杂化、功能多元化方向发展,复杂竖向结构体系对施工技术提出了更高要求,整合数字化技术可以实现施工过程可视化预控,推动传统施工模式向智能化转型。而随着材料科学、传感技术的持续进步,未来复杂竖向结构施工将更加注重全生命周期的性能优化提升建造效率,既能为高层建筑发展提供支撑,也可以引领土木工程领域向更高效、更安全的方向迈进。

参考文献:

- [1] 陈树炯.高层装配式钢结构住宅施工设计及关键技术研究[J].中国建筑装饰装修,2024(17):175-177.
- [2] 陈锦根.高层建筑钢结构安装关键技术研究[J].建设监理,2024(08):92-93,111.
- [3] 同[1].
- [4] 同[2].
- [5] 洪鑫纯.高层建筑钢结构工程施工关键技术及应用要点研究[J].四川水泥,2024(06):130-132.
- [6] 牛天晨.高层住宅建筑结构设计的关键技术研究[J].居舍,2024(07):46-48.
- [7] 同[6].
- [8] 尹政雯.试论民用建筑结构设计的关键技术发展[J].中国新技术新产品,2014(11):169.