高层建筑主体结构施工关键技术应用研究

张媛媛

单县村镇建设和房屋征收服务中心　山东　菏泽　274300

摘　要：随着城市化进程加速与土地资源日趋紧张，高层建筑已成为城市空间拓展的主要载体，其主体结构施工面临高度攀升、荷载复杂、作业面狭小等多重约束，对施工技术的系统性与精细化提出更高要求。本文立足高层建筑主体结构施工的全过程链条，系统梳理了当前工程实践中广泛应用的模板与支撑体系、钢筋连接与混凝土泵送、垂直运输与机械配置、安全防护与信息化监测等关键技术，深入分析了各技术环节的工艺原理、适用条件及控制要点，并从技术集成与协同管理的角度阐述了关键技术之间的耦合关系。研究表明，高层建筑主体结构施工已从单一工法创新转向多技术系统集成，智能化监测与数字化管理正成为提升施工质量与安全水平的新驱动力。本文旨在为同类工程施工的技术方案选择与现场管控提供理论参考。

关键词：高层建筑；主体结构；施工技术；模板体系；混凝土泵送

引言

我国高层建筑自 20 世纪末高速发展，高度突破三百米，结构形式向框架-核心筒等复杂体系演进。主体结构作为建筑骨架，其施工质量直接关乎全寿命期安全。然而，高层施工具有高空作业多、交叉工序密、精度要求高等特征，传统方法在超高层泵送、高强钢筋连接及混凝土温控等方面存在局限。近年来，液压爬升模板、自密实混凝土、BIM 模拟等技术的成熟应用显著提升了工效与品质，但技术选择失当、工序衔接不畅及监测滞后等问题仍存。因此，系统梳理关键技术，明确其适用范围、控制指标及关联，对优化施工组织与决策至关重要。本文从施工技术体系构建角度出发，重点探讨模板支撑、钢筋混凝土、垂直运输及安全监测四大板块的核心要点与工程适用性，旨在为行业实践提供理论依据与技术参考。

1 高层建筑主体结构施工技术体系与核心挑战

1.1 主体结构施工的技术构成

高层建筑主体结构指基础顶面以上承受竖向和水平作用的承重体系，涵盖柱、墙、梁、板及核心筒等构件。施工技术体系涉及材料制备、构件成型、垂直运输、作业平台及质量检测等多维度。标准层施工循环通常包括钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑、养护及拆模，每层周期 4～7 天，超高层需穿插钢结构吊装与压型钢板铺设。技术类别可归纳为支撑与模板、钢筋加工与连接、混凝土生产与泵送、垂直与水平运输、施工监测与控制五大类。各项技术通过进度计划、流水段划分和资源调配形成有机整体，任一环节延误均可能引发连锁影响。

1.2 施工面临的主要技术难题

主要技术难点集中于五方面：其一，垂直运输效率与进度矛盾突出，高度增加使塔吊起吊能力、附着刚度及钢丝绳寿命面临考验，施工电梯运力制约作业节奏。其二，模板周转与混凝土强度增长需精准匹配，拆模过早易致损伤，过晚则延误工期。其三，高强混凝土（C60 及以上）泵送阻力随高度非线性增长，泵压损失、堵管及坍落度经时损失控制难度加大[1]。其四，高空环境下钢筋定位、预埋件安装及垂直度偏差控制要求远高于多层建筑，风荷载和温度变形加剧误差累积。其五，多工种立体交叉作业安全风险显著上升，被动式防护措施难以全面覆盖。上述难题相互交织，要求技术选择兼顾效率、质量与安全的综合平衡。

2 模板与支撑体系关键技术

2.1 爬升模板系统的应用

爬升模板（爬模）是高层建筑核心筒和剪力墙施工的主流模板形式，其核心原理是利用已浇筑混凝土墙体上的预埋锚固件，通过液压或电动顶升机构使模板系统随结构层逐层向上爬升。按照爬升动力方式，可分为液压自动爬模和电动葫芦爬模两类，前者爬升平稳、同步性好，适用于超高层核心筒施工，后者构造简单、成本较低，适用于百米级高层。爬模系统的设计需重点考虑模板面板刚度、背楞间距、爬架承载力及附墙装置可靠性，其中附墙锚固点的抗拔承载力应通过现场拉拔试验

验证。在施工控制方面，爬升前须确保下层混凝土强度达到设计允许值（一般不低于 10MPa），爬升过程中应保持各机位同步误差小于 20mm，就位后立即进行模板垂直度校正，允许偏差不得超过层高的 1/600。近年来，新型液压爬模系统集成了模板退模、清理、涂刷脱模剂等辅助功能，使标准层施工速度可缩短至 3～4 天一层。

2.2 滑模与顶升模板技术

滑模施工技术通过液压千斤顶沿支承杆连续提升模板平台，实现墙体混凝土的连续浇筑和滑动成型，适用于等截面筒体或剪力墙结构。滑模的突出优势在于取消了模板拆装工序，施工速度快（日平均滑升高度可达 2.5～3.5m），且结构整体性好、接缝少。但滑模对混凝土凝结时间要求苛刻，需根据气温、配合比及滑升速度动态调整坍落度和缓凝剂掺量，滑升速度通常控制在 200～300mm/h，且每滑升 300mm 需停顿约 30 分钟以利混凝土初步凝结。顶升模板技术则介于爬模和滑模之间，采用大吨位千斤顶将整个模板操作平台整体顶升，适用于钢结构核心筒外壁或大型设备基础施工，其顶升步距可调，便于处理变截面和预留洞口。

2.3 新型组合式支撑架体

对于高层建筑的梁板结构，传统扣件式钢管脚手架已逐步被承插型盘扣式支架和轮扣式支架取代。盘扣式支架具有杆件模块化、连接刚度大、搭拆快捷等优点，其立杆间距可按 0.3m 模数调节，水平杆和斜杆通过插销与盘扣连接，承载能力较扣件式提高约 30%。在超高楼层支模中，盘扣式支架配合可调底座和顶托，可实现大跨度梁底模的早拆体系——在混凝土强度达到设计值 50%时即可拆除部分支架，仅保留养护支撑，从而加速架体周转[2]。此外，铝合金模板体系近年来在高层住宅标准层中得到广泛应用，其自重轻、成型面光洁、可周转次数达 200 次以上，但需配合专用脱模剂和振动器，且对墙体阴角、门窗洞口等细部节点进行专门设计。

3 钢筋工程与混凝土施工关键技术

3.1 高强钢筋连接技术

高层建筑受力钢筋多采用 HRB400、HRB500 及以上等级，连接质量关乎结构安全。主流机械连接方式中，剥肋滚轧直螺纹连接因操作便捷、性能稳定而应用最广。工艺要点：钢筋端头用无齿锯切割平整，剥肋长度约为套筒长度的 1/2，滚轧丝头须经通规和止规检验合格，套筒拧紧力矩应满足 JGJ107 中 I 级接头要求。直径 > 28mm 的粗钢筋宜采用加长型或正反丝扣套筒，以适应安装偏差。接头布置应避开受力最大截面，同一连接区段内接头面积百分率不宜超过 50%。焊接连接成本较低，但在超高层大风、潮湿环境下质量波动大，仅用于次要构件或辅助筋。

3.2 超高层混凝土泵送技术

超高层泵送难点在于高泵程阻力大、离析风险高及管道磨损重。设备选型以理论输送量和出口压力为双控指标，300 米以上建筑泵送出口压力不宜低于 22MPa，管径常用 125mm 或 150mm。管道布置应遵循水平段长度不小于垂直段 1/4 的原则，垂直段每隔一定高度设置缓冲弯头或减压阀。配合比方面：采用聚羧酸高效减水剂（掺量 1.0%～1.5%），水胶比 0.30～0.35，砂率 42%～46%，掺入粉煤灰或矿渣微粉改善和易性。入泵坍落度宜控制在 220～250mm，扩展度≥ 600mm，倒锥筒排空时间≤ 5s，应定期检测坍落度损失。预防堵管需设置清洗装置和水洗系统，泵送间歇时定时反向抽吸。

3.3 混凝土浇筑与养护控制

高层主体混凝土应分层浇筑，每层 300～500mm，采用插入式振捣器，振捣间距不大于有效半径 1.5 倍，避免触碰钢筋和预埋件。核心筒厚墙及大截面柱宜采用二次振捣工艺。大体积混凝土（如基础底板、转换层）须进行温度裂缝控制，埋设测温元件监测内部温度场，控制内外温差≤ 25℃，降温速率≤ 2℃/d。养护方法视气候而定：夏季覆盖湿麻袋并喷淋，冬季采用保温被和薄膜，必要时蒸汽养护。养护期限：普通硅酸盐水泥混凝土不少于 7d，掺缓凝剂或矿物掺合料者不宜少于 14d。超高层竖向构件若高空供水受限，可喷涂养护液或贴覆养护膜作为补充。

4 垂直运输与施工机械配置技术

4.1 塔吊选型与附着技术

塔吊是高层建筑主体结构施工的命脉设备，其选型需综合考虑建筑高度、最大构件重量（钢柱或预制构件）、作业半径覆盖范围及群塔交叉作业条件。一般内爬式塔吊适用于高度超过 200 米的建筑，通过爬升框和支撑梁在核心筒内逐层爬升，有效避免外附着对结构外立面的影响；外附着式塔吊则需按每隔 20~30 米设置一道附墙杆，附墙杆与建筑结构的夹角宜控制在 45°~60° 之间。附着杆的设计应验算受压稳定性和连接节点强度，其预埋件应避开结构主筋，锚固长度满足拉拔要求[3]。塔吊的起重力矩应满足最远端吊物要求，通常以最大起重量与工作半径的乘积作为控制指标，同时需考虑高风速下的起吊限载（超过六级大风时暂停吊装作业）。在日常管理中，塔吊的垂直度偏差应控制在塔身高度的 1/1000 以内，各标准节连接螺栓需

定期紧固检查。

4.2 施工电梯与物料提升

施工电梯（人货两用升降机）承担人员上下和零星材料运输，其布置位置应避开塔吊回转范围和结构后浇带，基础设置于地下室顶板或回填土硬化地面上，承载力需满足电梯满载时的最大轴力要求。施工电梯的附墙间距一般为 6～9m，每一道附墙均需对结构梁板进行局部承载力验算，必要时增设加固杆件。随着楼层增高，电梯的运行速度和安全限位装置尤为重要，应采用渐进式防坠安全器，且每三个月进行一次坠落试验。物料提升方面，高层建筑常采用混凝土布料机与泵管协同工作，布料机回转半径应覆盖待浇区域，其支腿下方需铺设钢垫板以分散荷载。

4.3 整体式钢平台与集成操作架

整体提升钢平台是一种集模板支撑、操作脚手架、材料堆场及安全围护于一体的大型施工作业系统，常用于超高层核心筒施工。该系统通过多台液压千斤顶同步提升，将整个平台连同悬挂的模板和钢筋一并抬升，每次提升高度为一个标准层（约 3.6～4.5m）。钢平台的设计需进行整体稳定性分析、抗风验算及提升过程同步控制，提升偏差应控制在相邻点高差小于 10mm、平台倾斜度小于 1/300。集成操作架则是在爬模基础上扩展出挂架、挡脚板、安全网和卸料平台，使钢筋绑扎、模板安装和混凝土浇筑可在同一操作面上分层协同完成，显著减少交叉作业干扰。此类集成化装备虽然一次投入较高，但对于标准层重复性强的超高层工程，其综合经济效益十分显著。

5 安全防护与信息化监测技术

5.1 高空作业安全防护体系

高层主体施工属高风险作业，防护体系须从“防坠落、防物体打击、防坍塌”三方面构建。临边采用定型化防护栏杆（高度≥ 1.2m），配合密目安全网和挡脚板；洞口以盖板或水平网覆盖[4]。爬模及提升平台须设防坠保险装置，确保故障时机械锁止机构在 100mm 行程内卡住导轨。高空作业人员须佩戴双钩安全带，一钩始终挂设于安全母索（直径≥ 12mm 钢丝绳，锚固拉力≥ 15kN），实现全程不脱钩。随高度增加，应完善防雷接地与防风锚固，塔吊及电梯避雷针接地电阻≤ 10Ω。

5.2 BIM 与智能监测应用

BIM 技术应用已从三维交底延伸至进度模拟、碰撞检查及资源优化，可提前发现钢筋、预埋件及管线空间冲突，减少返工。智能监测方面，关键楼层布设应变计、倾斜仪及风速仪，实时采集施工荷载响应数据；通过监测核心筒与外围框架竖向变形差，及时调整水平构件高程预留量，避免累积偏差。物联网塔吊防碰撞及电梯监控系统可实时报警超载、超速等危险工况。

5.3 施工误差控制与纠偏技术

垂直度控制采用激光铅垂仪或全站仪，每层设轴线控制点逐层投测，单层误差≤ 3mm，全高累计偏差≤ 总高度 1/1000 且≤ 30mm。偏差超限时采取逐层纠偏，后续每层向反方向调整不超过 2mm，避免附加弯矩过大。预埋件及锚固螺栓须用定位模具固定，浇筑前后各复核一次。三维激光扫描技术可快速建立已施工楼层点云模型，与 BIM 比对后精准识别偏差位置和量值，为纠偏提供精确依据。

结束语

高层建筑主体结构施工涉及模板、钢筋、混凝土及垂直运输等多领域，技术间既独立又耦合。本文分析关键工艺特点与控制要点，揭示两大发展趋势：一是装备集成化，通过爬模等大型组合系统整合工序，压缩标准层循环时间；二是管控数字化，借助 BIM、物联网等手段，实现从经验判断向数据驱动的风险预警转变。然而，技术先进性的核心仍在于质量、安全与经济的三维平衡。工程技术人员需结合结构特征、高度、场地及工期等条件进行方案比选优化。未来，随着建筑高度攀升及超高性能混凝土等新材应用，主体结构施工技术将向更自动化、智能化方向演进，实时仿真与自适应调整有望成为新的研究热点。

参考文献

[1] 张立新, 王建平. 超高层建筑液压爬模施工技术研究进展 [J]. 建筑技术,2023,54(3):45-50.

[2] 陈明辉, 刘强, 赵志刚. 高强钢筋机械连接接头性能试验及工程应用 [J]. 施工技术,2022,51(8):112-117.

[3] 李国华, 吴志刚. 超长距离混凝土泵送阻力模型与减阻技术综述 [J]. 混凝土与水泥制品,2024(2):23-28.

[4] 孙瑞峰, 郑涛.BIM 技术在高层建筑施工进度与安全协同管理中的应用 [J]. 建筑科学,2023,39(6):78-84.