

高性能装配式钢结构材料选择与节材增效施工实践

杜明明

上海建工二建集团有限公司 上海 200080

【摘要】：本文以桃浦606项目为实证，系统研究高性能装配式钢结构材料选择与节材增效施工实践。通过构建型钢混凝土柱框架体系、优化连接件配置、应用防腐防火涂层体系，结合BIM技术深化设计、预制装配化施工、高强螺栓连接工艺等创新措施，实现材料利用率92%、工期缩短25%、碳排放降低500吨的显著成效，形成可推广的绿色施工范本。

【关键词】：高性能装配式钢结构；材料选择；节材增效

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.087

引言

在“双碳”战略背景下，装配式钢结构建筑作为绿色建筑重要载体，其材料选择与施工实践的节材增效研究具有重大现实意义。本文以桃浦606商办项目为研究对象，通过系统分析材料选择体系、施工实践路径、组织设计优化及实践验证数据，构建高性能装配式钢结构全流程节材增效技术体系，为行业绿色转型提供理论支撑与实践范例。

1 高性能装配式钢结构材料选择体系

1.1 主体结构材料选择

1.1.1 钢材性能对比

本项目对Q235B、Q345B、Q355B、Q355C、Q390GJ五种主流结构钢进行力学性能对比，结果如下：①Q235B：屈服强度235MPa，抗拉强度375MPa，伸长率 $\geq 26\%$ ，适用于次要构件。②Q345B：屈服强度345MPa，抗拉强度470-630MPa，伸长率 $\geq 21\%$ ，适用于高层框架。③Q355B：屈服强度355MPa，抗拉强度470-630MPa，伸长率 $\geq 21\%$ ，适用于大跨度、高层结构。④Q355C：屈服强度355MPa， -20°C 冲击功 $\geq 34\text{J}$ ，低温韧性更优。⑤Q390GJ：屈服强度390MPa，抗拉强度490-630MPa，适用于超高层、大跨度重载结构。

依据《钢结构设计标准》（GB 50017-2017），承重结构宜采用Q235、Q345、Q355、Q390等牌号，并结合荷载、结构形式、使用环境综合选定。

1.1.2 截面力学计算对比

（1）钢梁截面与节材计算（30m跨，控制弯矩一致）。①Q235B：截面最大，用钢量基准值1.00，成本按1.00计。②Q345B：截面高度减小15%，截面面积减少10%，用钢量0.90。③Q355B：截面面积较Q235B减少12%-15%，用钢量0.85-0.88。

（2）钢柱截面与节材计算（控制轴力一致）。①H型钢

柱：截面效率高，用钢量经济。②箱型柱：刚度更大，但同承载力下用钢量比H型钢多约20%。

（3）成本对比（按当期市场单价）①Q235B：单价较低，但用钢量大、总成本偏高。②Q345B/Q355B：单价略高，但截面减小、总重量下降，综合成本更低。③测算：采用Q355B替代Q235B，钢材单价上涨约3%-5%，但用钢量减少10%-15%，综合成本下降7%-10%。

1.1.3 传统常规材料组合

传统项目常用方案：（1）主体钢材：Q235B为主；（2）截面形式：大截面箱型柱+厚壁H型钢；（3）特点：截面偏大、用钢量高、加工量大、综合成本高

1.1.4 本项目采用的材料组合（高性能节材方案）

本项目T1-T3塔楼采用型钢混凝土柱框架+钢筋混凝土核心筒体系：（1）T1塔楼劲性柱：800×400×25×30十字型钢；（2）T2塔楼钢柱：600×300×30×40 H型钢；（3）T3塔楼钢柱：500×250×15×30箱型柱；（4）塔楼钢梁：Q345B/C级H型钢，典型截面H450×16×300×35；（5）裙楼及多层建筑：Q345B/C钢框架体系，钢柱H550×10×250×25，钢梁H450×14×300×26、H400×38

该组合在满足170.55m超高层强度、稳定性、抗震要求的前提下，实现截面最优、用钢量最少、综合成本最低。

1.1.5 节材与成本结论

在满足GB 50017-2017规范前提下，Q345B/Q355B高性能钢材可使构件截面减小15%，用钢量降低10%-18%。

采用H型钢为主、关键部位采用箱型柱的截面组合，可比全箱型方案再节材15%-20%。

本项目方案与传统Q235B+大截面方案对比：

主体结构用钢量降低10%-18%

综合材料成本下降7%-12%

整体材料利用率达到 92%

最终实现性能提升、用钢量下降、成本更优的三重目标，为装配式钢结构绿色节材施工提供实证支撑。

1.2 连接件与加固材料

本项目采用 10.9 级摩擦型高强螺栓替代传统 8.8 级高强螺栓，摩擦型高强螺栓抗剪承载力按式(1)计算：

$$N_v = 0.9n_f \mu P(1)$$

式中：

N_v ——单个螺栓抗剪承载力设计值 (kN)；

n_f ——传力摩擦面数，取 $n_f = 2$ ；

μ ——抗滑移系数，喷砂后涂无机富锌漆取 $\mu = 0.45$ ；

P ——螺栓设计预拉力 (kN)。

(1) 单螺栓承载力对比

10.9 级 M20 螺栓： $P=155\text{kN}$

$$N_{v1} = 0.9 \times 2 \times 0.45 \times 155 = 125.55\text{kN}$$

8.8 级 M20 螺栓： $P=80\text{kN}$

$$N_{v2} = 0.9 \times 2 \times 0.45 \times 80 = 64.80\text{kN}$$

(2) 螺栓数量节材计算

相同节点剪力条件下，螺栓数量与承载力成反比：

$n_1/n_2 = N_{v1}/N_{v2} = 125.55/64.80 \approx 1.94$ 即达到相同承载力，8.8 级螺栓需用数量为 10.9 级的 1.94 倍。本项目通过替换，螺栓总用量减少约 15%。

(3) 连接板尺寸优化与节材计算

8.8 级螺栓：中心间距取 200 mm，连接板宽 300mm，厚 16mm；

10.9 级螺栓：按 2.5 倍直径取 150mm，连接板宽 240mm，厚 12 mm。

连接板体积（长度相同）节材率： $\eta = (1 - 240 \times 12 / 300 \times 16) \times 100\% = 40\%$

扣除构造与施工余量，实际连接板材料用量降低 18%~20%。

(4) 节点性能提升

T1 塔楼关键节点增设局部加劲肋，形成“箱型-H型”复合节点，经有限元分析验证：

节点刚度提升 25%；应力集中系数降低 15%；极限承载力提升 20%。实现“以强代多、以焊代铆”的节材与性能双优化。

2 节材增效施工实践路径

2.1 预制装配化施工体系

在预制装配化施工中，钢柱、钢梁采用工厂高精度加工，尺寸偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，确保现场安装误差 $\leq 5\text{mm}$ ，减少返工率。通过优化构件分段设计，将单个钢梁长度控制在 12m 以内，重量 $\leq 8\text{t}$ ，适配塔吊额定起重量，避免超重吊装。采用三维扫描技术实时校准构件位置，吊装一次就位率提升至 98%，减少二次吊装时间 30%^[1]。

2.2 施工工艺流程优化

装配式钢结构与型钢混凝土组合结构的施工流程，直接决定构件安装精度、材料损耗率、工期效率及综合成本。桃浦 606 项目围绕工厂预制、现场吊装、节点连接、精度控制、工序穿插五大核心环节，对传统施工流程进行系统性重构，形成适配高性能装配式钢结构的节材增效标准化工艺流程，实现材料损耗降低、安装效率提升、工期与成本双控目标。

2.2.1 基于 BIM 的全流程流程优化

项目采用 Tekla Structures 与 Revit 建立钢结构三维精细化模型，完成构件深化、节点优化、碰撞检查与施工模拟，实现设计→工厂→现场数据同源、流程贯通。

(1) 预制加工流程优化：基于 BIM 模型自动生成构件加工图、开孔定位图与材料清单，钢柱、钢梁、连接板全部实行工厂数控下料、机器人焊接、标准化预拼装，现场零切割、零开孔、零随意修改，构件尺寸偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，从源头避免材料浪费与返工损耗。

(2) 施工工序模拟优化：通过 4D-BIM 模拟吊装、连接、浇筑、防护等全工序，提前识别型钢与钢筋冲突、支撑干涉、节点空间不足等问题，优化施工顺序与流水段划分，设计变更减少 32 次，返工率降低 15% 以上，材料利用率显著提升。

2.2.2 安装工艺流程优化

项目建立“工厂预制→精准运输→分级验收→快速吊装→高强螺栓连接→精度校正→防腐防火→组合结构浇筑”的标准化装配流程，替代传统“现场切割、现场焊接、现场支模”的粗放模式。

(1) 构件分段与吊装流程优化：遵循由下至上、先柱后梁、先主后次、先核心筒后框架的原则，合理划分吊装区段与流水节拍；钢柱分段长度控制在 12 m 以内、单件重量 $\leq 8\text{t}$ ，

与塔吊额定起重重量匹配,避免超重、超长导致的构件拆分与材料浪费。采用全站仪+三维扫描联合定位,吊装一次就位率达98%,大幅减少二次倒运与临时加固用料。

(2)节点连接流程优化:全面推行10.9级摩擦型高强螺栓连接替代现场焊接为主的连接方式,执行初拧→复拧→终拧标准化流程,扭矩偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内;节点域先螺栓固定、后精准校正、再少量焊接,现场焊接量降低70%,焊材消耗与变形修复用料显著减少,安装效率提升30%以上。

2.2.3 型钢混凝土组合结构工序优化

针对型钢混凝土柱、型钢混凝土梁等关键部位,优化钢筋绑扎—模板支设—混凝土浇筑工序衔接,实现与钢结构施工的高效协同:

钢筋工程优先采用贯通式、避让式布置,减少型钢开孔与钢筋弯折,降低截面削弱与材料损耗;

模板采用早拆体系+可调节钢框模板,与型钢截面精准适配,拼缝严密、周转次数提升,支撑用料减少30%;

混凝土采用自密实混凝土+分层对称浇筑,节点区用小直径振捣器密实,避免胀模、漏浆导致的材料浪费与修复成本。

2.2.4 流程优化成效

通过上述施工工艺流程系统性优化,项目实现:

材料利用率提升至92%,主体结构钢材损耗率控制在3%以内;

安装效率提升35%,整体工期缩短25%;

临时设施、支撑、焊材、模板等辅助用料综合降低20%以上;

3 结论

桃浦606项目通过全过程工程实践,系统验证了高性能装配式钢结构施工体系的可靠性、经济性与先进性。在材料选型与构件性能方面,T1塔楼采用 $800\times 400\times 25\times 30$ 十字型钢柱,经现场力学性能检测,钢材实测屈服强度达345MPa,截面承载力、整体稳定性及延性指标均满足超高层建筑抗震设计要

求,构件受力安全可控。项目采用的 $H450\times 16\times 300\times 35$ 型钢梁经焊接工艺评定与抗疲劳试验验证,焊接接头性能稳定,焊缝一次合格率达100%,满足一级焊缝质量标准。

在施工工艺与精度控制方面,项目实施工厂预制、现场装配的工业化建造流程,钢柱、钢梁安装精度控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内,安装就位偏差较传统现浇工艺降低40%,有效减少因精度不足造成的材料切割、补强与返工损耗。依托BIM深化设计、三维模拟与数字化交底,提前解决构件碰撞、节点冲突、管线预留预埋等问题,累计减少设计变更32项,避免无效施工与材料浪费,直接缩短工期15天。

整体实践表明,本项目采用的高性能钢材选型、优化节点连接、高精度装配施工与数字化管理技术,可有效支撑超高层装配式钢结构节材、提速、降碳目标落地,技术体系成熟可行,具备大规模推广条件。

3.1 经济效益与社会效益

经济效益方面,通过节材技术创新实现材料利用率提升至92%,较传统施工节约钢材800吨。工期优化方面,通过施工顺序优化和工序衔接紧密,整体工期缩短25%,减少管理费用支出300万元。能源消耗方面,采用CO₂药芯焊丝气体保护焊工艺,较传统电弧焊节能35%,年减少碳排放量约500吨。

社会效益方面,项目实施绿色施工措施,扬尘浓度降低至 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$,噪音控制在55分贝以下,获评“上海市绿色施工示范工程”。社区影响方面,通过合理的交通疏导方案,居民投诉率降低70%,社区满意度提升至95%。项目还带动周边就业,新增就业岗位200个,促进区域经济发展。

3.2 推广价值

推广价值方面,技术体系可复制性强,已在长三角地区5个类似项目成功应用。经济性方面,单位面积施工成本降低18%,投资回收期缩短至3年。社会效益方面,形成的绿色施工标准被纳入上海市地方标准,推动行业绿色转型^[4]。管理模式方面,智慧工地系统已在10个重点项目推广,提升管理效率30%。

参考文献:

- [1] 韩俊伟.建筑钢结构装配式施工关键技术研究[J].居业,2025(7):33.
- [2] 刘成立.装配式钢结构施工技术创新与应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(27):168-170.
- [3] 郑亮东.绿色建筑理念装配式钢结构的优化研究[J].绿色中国,2025(7):169-171.
- [4] 马晋鲁.装配式钢结构住宅施工管理技术要点研究[J].城市开发,2025(9):140-142.