

绿色建筑理念下钢结构工程的施工技术探讨

杨万里 张峰

浙江省中南绿建科技集团有限公司，浙江省杭州市，311200；

摘要：聚焦于钢结构工程施工阶段的资源消耗管控及环境影响治理难题，选取某科创中心二期钢结构工程作为研究案例，围绕绿色建筑理念指导下的施工技术展开探索，借助采用精细化下料及余料循环利用技术、高强度螺栓环保紧固工艺以及装配式整体式围护系统装配技术，优化施工过程中的材料利用效率与施工组织模式，同时结合资源消耗统计与碳排放核算手段对施工阶段的环境绩效实施量化评估，该研究阐明了装配化施工、材料节约管理与碳排放管控三者间的协同关联，提出了以绿色施工为目标的钢结构施工技术路线，为同类工程的绿色施工管理提供借鉴。

关键词：钢结构工程；绿色施工；资源节约；碳排放控制；装配式施工

DOI：10.69979/3029-2727.26.05.039

引言

伴随绿色建筑理念的持续深化，工程建设领域中施工环节的资源利用效率提升与环境影响管控正日益成为核心关注点^[1]。钢结构建筑因构件标准化水平高、施工周期较短以及装配化程度突出等特性，在绿色建造体系里具备显著优势，不过其施工过程依旧会产生材料加工、能源消耗及设备运转等多种环境负担，而如何在确保施工质量与效率的基础上，借助技术改良减少资源浪费并控制碳排放，已成为当下钢结构工程施工管理的关键议题，基于这一背景，本文选取某钢结构工程作为研究案例，针对绿色施工的关键技术与资源环境管控方法展开分析，旨在探索钢结构工程施工阶段达成绿色建造目标的技术路线。

1 工程概况

选定某科创中心二期钢结构工程作为本次研究的案例，该项目总建筑面积达 8.7 万 m²，地上共 8 层、地下 2 层，采用的结构体系为钢框架—中心支撑体系，所谓中心支撑体系是指在框架内部设置以轴向受力为主的斜撑构件，以此提升结构的侧向刚度并增强耗能能力，该工程的抗震设防烈度为 7 度，建设目标对标绿色建筑三星级标准，依据场地开发历史与地质勘察资料可知，项目地处冲洪积平原区域，原始地貌为低起伏人工台地，地层中的③层淤泥质黏土分布连续且压缩性较大，平均厚度约 6.8m，地下水埋深较浅，这对基坑止水、变形控制及桩基施工均提出了更高要求。

该钢结构工程总钢材用量约为 4200t，装配化率达

到 85%，本文中装配化率指的是工厂预制构件在整体建筑构件中的占比，用于体现工程的装配化水平，施工过程中确立绿色施工管理目标，将碳排放强度限定在 38 kgCO₂e/m²以下，施工能耗控制在 18 kWh/m²以内，同时通过精益化下料设计、构件工厂预制、绿色运输安排、现场高效吊装以及能耗与碳排放的过程核算等手段，构建起闭环式的管理流程。

2 绿色建筑理念下钢结构关键施工技术

2.1 精益化下料与余料再生技术

在某科创中心二期钢结构工程的构件制造环节，依据区域钢材单价约 4800 元/t、运输半径约 150km 的采购与供应条件，将构件信息模型作为下料方案优化的数据支撑^[2]。借助 Tekla 深化模型的自动排料功能，对整板规格、切割缝宽度及孔边保护距离实施参数化管理，并按照节点板厚度及孔距开展分类排样，减少螺栓孔密集区域的无用切割，把不规则边角料转化为可二次利用的规则板料。通过对切割路径与加工余量进行联合优化，梁柱节点板的废料率从人工排样时的 8.3% 下降到 3.1%，进而在设计、制造与施工各环节构建起一体化的节材管控体系。

在剩余材料的有效利用方面，将剩余板材按尺寸分为三种处理办法——尺寸达到或超过 400mm 的板条用于屋面檩托加劲肋，尺寸在 200 至 400mm 之间的板条用作现场临时节点板，尺寸小于 200mm 的碎块经过剪切压制成块后进入二次冶炼的原料系统并通过厂区内短距离运输达成资源循环利用；据统计数据显示，节约

材料约 126t, 带来的经济效益约为 60.5 万元, 同时降低了跨厂运输产生的能源消耗和碳排放量; 为确保过程管理的标准化, 余料率的计算使用公式 (1), 并在构件的批次维度上进行持续记录, 从而确保不同批次数据的可比性和可追溯性。

$$R = \frac{W_w}{W_t} \times 100\% \quad (1)$$

其中, R 表示余料率, 单位为%; W_w 为废弃余料质量, 单位为 t; W_t 为总投料质量, 单位为 t。

2.2 高强螺栓绿色紧固工艺

考虑到项目所在区域湿热气候导致相对湿度长期维持在较高区间, 钢结构节点预拉力的稳定性容易受摩擦系数变动以及表面轻微腐蚀的干扰^[3]。本研究选用无铬锌铝涂层的 10.9S M24 高强度螺栓作为核心紧固部件, 同时把干式摩擦界面作为设计基础, 以此减少湿热环境下扭矩与轴力转换关系波动所引发的不确定性, 为提升批量作业的一致性, 现场采用电动定扭矩扳手开展紧固操作, 将扭矩设定为 580 N·m, 允许偏差范围为±3%, 施工时采用分级紧固的方法, 先对构件姿态进行调整并完成初拧定位, 待结构线形稳定后再进行终拧, 进而降低节点刚度恢复与预拉力建立过程中的施工矛盾。

在施工管控层面, 将潮湿高温环境下的构件转运与待安装阶段归入绿色施工管控范畴, 涵盖构件进场后的包装拆卸次序、螺栓与垫圈的干燥存储、孔壁与摩擦面的清洁以及受潮构件的复检替换等举措, 以降低异常扭矩峰值和重复紧固现象^[4]。为确保施工质量的一致性, 作业班组按班次校准定扭矩扳手, 并在抽检时复核扭矩系数和轴力数据, 同时给返还件和重拧件设置唯一标记, 防止混入后续批次; 在质量信息化管控层面, 借助移动端应用记录每颗螺栓的初拧和终拧时间, 并关联作业人员、设备编号与构件编号, 数据同步上传到工程云平台, 达成全过程数字化质量管控; 管理人员能根据楼层和网格定位查询节点信息, 进而对紧固质量、施工进度和构件安装状态开展协同管控。

2.3 装配式建筑一体化围护系统安装技术

考虑到本工程所在地湿热的气候条件以及场地吊装路径受限的实际情况, 作为担负次结构支撑与环境分隔功能的复合单元^[5]。本工程的围护系统安装技术以提升吊装效率和把控气密性能为关键, 外墙围护选用 120mm 厚的石墨聚苯板与 0.6mm 的镀铝锌波纹钢板组

合形成模块化板块, 单元尺寸设定为 3.6m×1.2m, 单块重量大约 78kg, 安装过程中借助桁架机械手一次吊装 4 块, 并搭配滑槽型可调连接件与定位销达成快速找正, 使得单块构件的安装时间从原有工序的 25min 缩减到 6min, 同时降低了高空作业的时长以及交叉施工带来的安全与组织方面的干扰。

选用本地制造的 MS 低模量密封胶对板缝开展连续密封作业, 将水平与竖向拼装缝控制为 2mm, 并通过打缝与表面整形操作确保围护系统整体的气密性能; 围护结构的气密性控制目标设定为 $q \leq 0.8 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$, 该性能要求可通过优化节点构造与管控施工工序来达成; 为实现施工效率与环境绩效的协同管控, 围护构件先在工厂完成预拼装并附上二维码标识, 再统一采用托盘化方式运输至施工现场, 现场施工仅开展定位、临时固定及最终固定三道工序; 施工能耗的核算范畴涵盖现场吊装设备能耗和辅材、密封材料使用量, 碳排放以单块构件为单位统计并归集到楼层施工计划中; 相关统计数据详见表 1, 从而实现施工节拍、资源投入与碳排放强度的统一管理。

表 1 围护模块安装效率对比表

工艺做法	人工	工时	碳排放当量
传统现浇加外保温	6 人/块	25 min/块	12.1 kgCO ₂ e/块
装配式一体化模块	3 人/块	6 min/块	6.2 kgCO ₂ e/块

3 绿色施工效果评估

3.1 资源节约与碳排放核算

本节将核算边界划定于钢结构施工阶段的现场作业环节, 统计范畴涵盖焊接与构件二次加工、起重设备及临时用电、机具运输及燃油消耗以及周转材料的运用, 所涉及的面积为钢结构施工影响面积 8700 m², 数据的获取渠道主要有物料到货及领用台账、切割与焊接工序报表、临时用电抄表记录以及燃油加注信息, 并结合设备运行情况及施工日志对异常数据予以校核和修正, 让各类作业数据与当前区域碳排放因子数据库形成对应关联, 进而达到全过程可追溯的核算标准。

$$E = \sum(Q_i \times F_i) \quad (2)$$

其中, E 表示施工阶段碳排放总量 (单位: tCO₂e), Q_i 为第 i 类能源或材料的实际用量 (单位: 与具体品类一致), F_i 为对应的碳排放因子 (单位: tCO₂e/单位用量)。

在装配式施工与节能设备配备的条件下, 电力使用

强度得到了显著优化,项目使用两台 35 kW 变频塔吊作为核心起重装置,共完成 480 台班的作业量,相比同规格工频塔吊节省电量约 13000 千瓦时,且已在电能项目中进行抵扣核算,依据表 2 的统计数据,施工阶段碳排放量总和为 308.0 tCO₂e,相应的排放强度为 35.4 kgCO₂e/m²,

低于预设的管理指标 38 kgCO₂e/m²,通过精细化下料与余料回收利用降低材料损耗,配合变频设备与分时用电方案减少电力相关排放,同时通过运输及设备调度的优化减少柴油用量,从而构建起施工阶段较为稳定的碳排放管控体系。

表 2 资源消耗与碳排放汇总表

项目	用量 Qi	单位	排放因子 Fi	排放量 tCO ₂ e
钢材	30.0	t	0.25 tCO ₂ e/t	7.50
焊丝	12.0	t	2.00 tCO ₂ e/t	24.00
电能	290000	kWh	0.00057 tCO ₂ e/kWh	165.30
柴油	40000	L	0.00263 tCO ₂ e/L	105.20
周转材料	10.0	t	0.60 tCO ₂ e/t	6.00
合计	—	—	—	308.00

3.2 绿色性能现场检测

为验证施工阶段绿色目标的落实情况,本研究选取已完成主体安装及围护结构封闭的 1~3 层作为样本区域开展现场检测。检测内容包括钢构件防护性能、耐火性能、室内空气质量及施工噪声控制四类指标。考虑钢结构长期使用及湿热环境影响,采用每层轴网 4×4 布点,并在节点区及阴角部位加密测量。利用磁感应测厚仪对防护涂层干膜厚度进行逐点检测,抽检平均值为 152 μm,与 150 μm 设计控制值基本一致。防火涂层通过针式测厚与局部剖面复核相结合的方式检测,实测厚度为 24.6 mm,可满足构件耐火极限 2.0 h 的设计要求。对处于预警范围内的测点采取补涂与复测措施,使局部偏差控制在施工允许范围内。

室内空气质量检测在各层选取典型功能空间进行定点采样和实验室分析,检测过程遵循封闭条件达标、背景环境无新增污染源及采样时间统一的原则。检测结果表明,甲醛浓度不高于 0.03 mg/m³,TVOC 浓度不高于 0.15 mg/m³。施工环境噪声在场地边界四角进行 A 计权等效声级测量,测次覆盖作业高峰与低谷时段,并对风速及反射面影响进行修正,昼间测值为 58 dB(A),夜间测值为 46 dB(A),均满足绿色施工控制要求。检测数据同时与构件二维码及施工时间信息进行关联存储,为后续楼层复核及施工阶段优化提供数据支撑。

4 结语

选取某钢结构工程项目作为研究对象,对构件的精细化加工、高强螺栓的连接施工工艺及装配式围护体系

的安装技术等关键施工技术展开探究,同时结合资源消耗的统计数据与碳排放的核算结果对施工阶段的环境绩效进行分析,研究结果显示通过对构件加工方式进行优化、推动装配式施工组织模式的实施并强化施工过程的管理工作,不仅能够提升材料的利用效率,还能有效控制施工阶段的碳排放量,此外借助现场检测手段对绿色性能指标加以验证,为绿色施工目标的达成提供了有力支撑,该研究成果可为钢结构工程绿色施工技术的应用以及管理优化提供有益的参考。

参考文献

- [1]李钰,郗凯.基于绿色建筑理念的高层钢结构抗震优化设计研究[J].绿色建造与智能建筑,2026,(02):40-44.
- [2]李远达.建筑工程项目管理中绿色建材的现场应用管控策略[J].陶瓷,2026,(01):233-236.
- [3]张月清,陈铨御,董楠楠.装配式钢结构安装工程技术在西北地区超高层建筑的应用[J].安装,2025,(12):111-114.
- [4]李胜杰.绿色施工在市政建筑工程中的实践与成效分析[J].城市建设,2025,(26):20-22.
- [5]李洁敏.绿色节能导向下装配式钢结构配电站的设计与应用[J].机电信息,2025,(21):62-65.

作者简介:杨万里(1984.12.06-),男,汉,籍贯:河南省开封市杞县,学历:大专,研究方向:建筑工程。