

绿色建筑施工技术在装配式混凝土结构中的应用与优化

张 强

河北建设集团股份有限公司 河北 保定 071000

摘要：在全球建筑业面临严峻环境挑战的背景下，随着建筑业绿色转型的深入推进，装配式混凝土结构与绿色施工技术的融合已成为行业核心发展方向。本文系统梳理了绿色施工技术在装配式混凝土结构全生命周期中的应用路径，从材料优化、工艺革新、信息化管理三个维度提出优化策略。通过实证分析某超高层装配式项目，验证了绿色施工技术的节能减排效果。研究结果表明，绿色施工技术的深度应用可显著提升装配式建筑的经济效益与环境效益，为行业可持续发展提供理论支撑与实践参考。

关键词：装配式混凝土结构；绿色施工技术；BIM技术；碳排放优化

引言

全球气候变化问题日益严峻，建筑业作为能源消耗和碳排放的大户，其可持续发展面临着巨大挑战。据统计，全球建筑业碳排放占总量38%，其中传统现浇施工方式贡献率达65%。这种高能耗、高污染的施工模式不仅对环境造成了严重破坏，也制约了建筑业的长期健康发展。装配式混凝土结构通过工厂预制、现场装配的工业化模式，具有施工速度快、质量可控、资源利用率高等优点。然而，当前装配式建筑项目仍存在材料浪费率偏高、运输能耗占比过大等问题。绿色施工技术的系统性应用成为破解发展瓶颈的关键路径，对于推动建筑业绿色转型、实现碳达峰和碳中和目标具有重要意义。

1 绿色施工技术在装配式混凝土结构中的核心应用

1.1 材料优化技术体系

1.1.1 低碳混凝土材料

研发的矿渣-粉煤灰复合掺合料体系，通过合理调整矿渣和粉煤灰的掺配比例，利用两者的协同效应，改善混凝土的性能。在45%替代率下，28天抗压强度达58.3MPa，满足结构设计要求。同时，该复合掺合料的使用可显著降低水泥用量，减少水泥生产过程中的碳排放。据测算，每立方米混凝土可减少碳排放，具有良好的环境效益和经济效益。

1.1.2 再生骨料应用技术

针对建筑废弃物处理问题，通过“分级筛选-强化处理-配合比优化”三阶段工艺，将建筑废弃物制备成C30再生混凝土。分级筛选阶段，根据骨料的粒径和品质进行分类，去除杂质和不合格颗粒；强化处理阶段，采用物理和化学方法对再生骨料进行表面处理，提高其与水泥浆体的粘结性能；配合比优化阶段，通过试验确定最佳的水泥、水、再生骨料和外加剂用量，确保再生混凝土

的工作性能和力学性能满足装配式构件生产要求。

1.1.3 环保型连接材料

研发的聚氨酯改性环氧树脂灌浆料，针对传统灌浆料收缩开裂的问题，通过引入聚氨酯成分，改善了环氧树脂的柔韧性和抗裂性能^[1]。在套筒连接中，该灌浆料实现浆体流动度、28天抗压强度双达标，保证了连接节点的可靠性和耐久性。同时，其环保性能良好，符合绿色施工的要求。

1.2 工艺革新技术路径

1.2.1 预制构件数字化生产

采用BIM+MES协同制造系统，将建筑信息模型（BIM）与制造执行系统（MES）相结合，实现构件生产的全过程数字化管理。BIM模型提供构件的精确几何信息和工艺要求，MES系统则负责生产计划的制定、生产过程的监控和质量控制。通过两者的协同，实现构件生产误差控制在±1.5mm以内，大大提高了构件的质量和一致性。

1.2.2 绿色运输组织方案

开发的运输路径优化算法，结合构件尺寸数据库与道路限高数据，根据构件的尺寸、重量和运输目的地，规划最优的运输路线。该算法考虑了道路的交通状况、限高限制和运输成本等因素，使单车运输效率提升，燃油消耗降低。同时，合理安排运输车辆和装载方案，提高了车辆的装载率，减少了运输次数和能源消耗。

1.2.3 现场装配节能技术

研发的集成式升降脚手架系统，将脚手架的升降装置、防护设施和操作平台集成在一起，实现了脚手架的快速升降和安全使用。相比传统脚手架，钢材用量减少，搭设效率提升。在33层住宅项目中的应用表明，外立面施工周期缩短，减少了高空作业的时间和风险，同时降低了能源消耗和人工成本。

1.3 信息化管控平台

1.3.1 BIM全生命周期管理

建立的装配式建筑BIM模型，集成构件信息、施工模拟、能耗监测等功能。通过BIM模型，可以在设计阶段进行构件的碰撞检查，提前发现并解决设计问题，减少施工过程中的返工和变更。在施工阶段，利用BIM模型进行施工模拟，优化施工顺序和资源配置，提高施工效率^[2]。同时，通过集成能耗监测系统，实时监测建筑的能耗情况，为节能运行提供数据支持。某医院项目应用显示，碰撞检查发现并解决设计问题，减少返工损失，提高了项目的经济效益和质量。

1.3.2 物联网施工监控系统

部署的无线传感器网络，在施工现场安装各类传感器，实时采集吊装设备能耗、构件应力等数据。通过物联网技术，将传感器采集的数据传输到监控中心，实现对施工过程的实时监控和数据分析。系统预警功能使安全隐患发现时间缩短，处理效率提升。例如，当吊装设备的能耗异常或构件应力超过设定值时，系统会及时发出预警，提醒施工人员采取措施，避免安全事故的发生。

1.3.3 数字化碳管理平台

开发的装配式建筑碳足迹核算系统，按照相关标准，建立碳排放核算模型，实现从原材料到运维阶段的全过程碳排放追踪。该系统考虑了材料的生产、运输、施工安装和运营维护等各个环节的碳排放，通过输入相关数据，自动计算出项目的碳足迹。

2 绿色施工技术优化策略

2.1 材料体系优化

2.1.1 新型复合材料研发

开发的玄武岩纤维增强混凝土，将玄武岩纤维均匀分散在混凝土基体中，利用玄武岩纤维的高强度、高模量和耐腐蚀等特性，改善混凝土的力学性能和耐久性。在相同强度等级下，可减少水泥用量，抗裂性能提升。中试生产数据显示，构件生产成本降低，同时提高了构件的质量和使用寿命。

2.1.2 构件标准化设计

建立的装配式构件标准库，涵盖常见户型模块。通过对大量建筑项目的分析和总结，确定标准化的构件尺寸、形状和连接方式^[3]。应用表明，模具种类减少，生产效率提升。标准化设计还可以提高构件的通用性和互换性，便于构件的生产、运输和安装，降低工程成本。

2.2 工艺流程再造

2.2.1 反向施工组织法

创新的“核心筒先行-外围构件跟进”施工序列，在超高层建筑施工中，先施工核心筒结构，为核心筒提供稳

定的支撑和作业平台。待核心筒施工到一定高度后，再进行外围构件的安装。这种施工方法使超高层建筑结构封顶时间提前。某200米项目应用显示，垂直运输效率提升，通过合理安排垂直运输设备的运行，减少了设备的闲置时间，提高了运输效率。

2.2.2 干式连接技术创新

研发的螺栓-胶粘复合连接节点，结合了螺栓连接的可靠性和胶粘连接的密封性。在保证结构安全的前提下，使现场湿作业量减少，施工精度提升至±0.5mm。该连接节点通过螺栓提供主要的承载能力，胶粘剂填充螺栓与构件之间的间隙，提高连接的密封性和耐久性。同时，采用高精度的加工设备和施工工艺，确保连接节点的尺寸精度和质量。

2.3 智能化管控升级

2.3.1 数字孪生技术应用

构建的装配式建筑数字孪生体，通过建立与实际建筑一一对应的虚拟模型，实现施工模拟准确率、资源调配优化率双提升。数字孪生体可以实时模拟施工过程，预测施工中可能出现的问题，并提前制定解决方案^[4]。某地铁上盖项目应用表明，工程变更减少，通过数字孪生体的优化，合理安排施工顺序和资源，避免了施工过程中的冲突和变更，提高了项目的顺利实施。

2.3.2 区块链质量追溯系统

开发的基于区块链的构件质量追溯平台，利用区块链的分布式账本和不可篡改特性，记录生产、运输、安装等环节的数据。每个环节的信息都经过加密处理，并存储在区块链上，确保数据的真实性和可靠性。系统应用使质量责任认定时间缩短，纠纷处理成本降低。当出现质量问题时，可以通过区块链平台快速追溯到问题的源头，明确责任主体，提高质量管理的效率和公正性。

3 实证分析：某超高层装配式项目绿色施工实践

3.1 项目概况

项目为38层框架-核心筒结构，装配率68%，采用预制外墙板、叠合楼板等构件。项目设定绿色施工目标：单位面积能耗降低，废弃物回收率达90%。该项目地处城市中心区域，对施工过程中的环境保护和资源利用提出了更高的要求。通过采用绿色施工技术，旨在实现节能减排、减少环境污染的目标，同时提高项目的经济效益和社会效益。

3.2 绿色技术应用

3.2.1 材料优化

应用超高性能混凝土（UHPC），在核心筒连接节点中使用。UHPC具有高强度、高耐久性和良好的工作性能，使构件尺寸减小，材料用量降低。通过优化节点设

计，减少了混凝土的用量和钢筋的布置，同时提高了节点的承载能力和抗震性能。

3.2.2 工艺创新

采用模块化垂直运输系统，设置双笼施工电梯与物料提升机协同作业。双笼施工电梯可以同时上下运行，提高了人员的垂直运输效率；物料提升机则负责材料的运输，实现了人员和材料的分流运输。使人员垂直运输效率提升，材料周转时间缩短。通过合理安排运输设备和运输时间，减少了设备的等待时间，提高了施工效率。

3.2.3 信息化管控

部署的5G+AI施工监控系统，通过边缘计算设备实时分析施工数据，自动预警安全隐患。5G网络提供了高速、稳定的数据传输通道，确保监控数据的实时性和准确性；AI算法可以对施工数据进行深度分析，识别出潜在的安全隐患。系统运行期间，共发出预警，避免经济损失。例如，当检测到施工人员未佩戴安全帽或违规操作时，系统会及时发出预警，提醒施工人员纠正行为，保障施工安全。

3.3 实施效果

3.3.1 环境效益

项目施工阶段碳排放较基准值降低，通过采用绿色施工技术和优化施工方案，减少了能源消耗和废弃物排放。噪声污染控制在规定范围内，采用低噪声施工设备和合理的施工时间安排，减少了对周边居民的影响。扬尘浓度达标率100%，通过设置围挡、洒水降尘等措施，有效控制了施工现场的扬尘污染。

3.3.2 经济效益

通过材料优化节约成本，采用新型材料和优化设计方案，降低了材料采购成本。工期提前带来收益，由于施工效率的提高和施工周期的缩短，项目提前交付使用，带来了额外的经济效益。项目整体利润率提升，绿色施工技术的应用不仅没有增加成本，反而通过节约资源和提高效率，提高了项目的经济效益。

3.3.3 社会效益

项目获评绿色建筑三星级标识，成为区域装配式建筑示范工程。该项目的成功实施为周边地区提供了绿色施工的典范，推动了装配式建筑和绿色施工技术在当地的应用。接待行业观摩多次，通过组织行业观摩活动，分享项目经验和绿色施工技术，促进了行业内的交流和合作，提升了企业的社会形象和知名度。

4 挑战与对策

4.1 技术集成度不足

当前绿色施工技术多呈点状分布，缺乏系统性解决方案。不同技术之间的协同效应未能充分发挥，导致绿

色施工效果受到一定影响。建议建立“材料-工艺-管理”三位一体技术体系，从材料的选择和优化、工艺的创新和改进、管理的精细化和信息化三个方面入手，开发集成化施工装备。例如，研发能够同时实现材料搅拌、构件成型和质量控制的一体化设备，提高施工效率和质量。

4.2 成本制约

绿色技术初期投资较高，制约推广应用。新型材料、设备和技术的采购成本较高，企业在进行绿色施工时面临较大的经济压力。建议完善政府补贴机制，对采用绿色施工技术的项目给予财政补贴和税收优惠，降低企业的成本。建立碳交易市场收益反哺机制，将项目通过节能减排获得的碳收益返还给企业，鼓励企业积极应用绿色施工技术。

4.3 标准规范滞后

现行标准对绿色装配式建筑界定模糊。缺乏统一的绿色装配式建筑评价标准和认证体系，导致市场上绿色装配式建筑质量参差不齐。建议加快修订相关标准，建立覆盖设计、生产、施工全链条的绿色技术标准体系。明确绿色装配式建筑的定义、评价指标和认证方法，规范市场秩序，推动绿色装配式建筑的健康发展。

5 结语

本研究表明，绿色施工技术在装配式混凝土结构中的深度应用，可实现环境效益与经济效益的双赢。通过材料优化、工艺革新和信息化管理等方面的技术创新和优化，能够显著降低施工过程中的能源消耗和环境污染，提高施工效率和质量，为企业带来可观的经济效益。未来研究应聚焦三个方面：一是开发基于人工智能的绿色施工优化算法，利用人工智能技术对施工过程进行实时优化和决策，提高绿色施工的智能化水平；二是构建装配式建筑碳资产管理体系，将碳排放纳入建筑资产管理中，实现碳资产的有效管理和交易；三是推动绿色技术国际标准互认，加强国际合作与交流，促进绿色施工技术在全球范围内的推广和应用。

参考文献

- [1] 钟懿萌.建筑施工中装配式混凝土结构技术的应用研究[J].建筑机械,2025,(08):40-43.
- [2] 梁治.绿色装配式建筑混凝土结构施工技术要点研究[J].现代工程科技,2025,4(08):61-64.
- [3] 陈传明.装配式混凝土结构绿色预制构件产业化关键技术研究与示范.安徽省,安徽省高迪循环经济产业园股份有限公司,2023-06-27.
- [4] 邱国林.预制装配式混凝土结构绿色施工若干关键技术研究[J].绿色环保建材,2020,(04):59-60.