

Analysis of Carbon Emissions Throughout the Life Cycle of Prefabricated Buildings from the Perspective of Green Architecture

Ping Fan Junzhi Chen

China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

As a key industry in global carbon dioxide emissions, the construction sector plays a pivotal role in achieving the “dual carbon” goals through its transition toward low-carbon development. Prefabricated construction, as an industrialized building method, remains controversial regarding its actual carbon emission performance throughout its entire lifecycle. Based on the principles of green building and the theory of life cycle assessment, this study establishes a targeted carbon emission accounting model. Comparative analysis between typical prefabricated concrete buildings and traditional cast-in-place buildings reveals that while prefabricated construction generates incremental emissions during the material production phase, its overall lifecycle carbon emissions significantly decrease due to improved construction efficiency and operational performance, demonstrating high recycling potential. The findings highlight the low-carbon attributes of prefabricated construction and provide critical directions for integrated design, industrial chain optimization, and circular economy models.

Keywords

Green building; Prefabricated building; Life cycle assessment; carbon emission

绿色建筑视角下装配式建筑全生命周期碳排放分析

樊平 陈俊枝

中国建筑科学研究院有限公司，中国·北京 100000

摘要

建筑业作为全球二氧化碳排放的关键行业，其向低碳方向转型对实现“双碳”目标意义重大，装配式建筑作为一种工业化的建造形式，其全生命周期的实际碳排放成效尚存在争议，研究依托绿色建筑理念与全生命周期评价理论，创建了有针对性的碳排放核算模型。经由典型装配式混凝土建筑与传统现浇建筑的对比剖析能够发现，装配式建筑虽说在材料生产阶段有增量产生，不过借助施工效率提高、运营性能改良的高回收潜能，其全生命周期的总碳排放量显著下降，研究发现呈现了装配式建筑的低碳属性，还为集成化设计、产业链优化及循环经济形态指明了关键方向。

关键词

绿色建筑；装配式建筑；全生命周期评价；碳排放

1 引言

全球气候的剧烈变化与资源环境的沉重压力，推动建筑业开展根本性的绿色转型，在这样的情境下，装配式建筑借助其标准化、工业化的特质，成为助力建筑产业现代化与可持续发展的关键载体，就其是否真正实现“绿色低碳”这一情况，业内持有不同的观点，特别是对其前期生产阶段的碳排放情况抱有疑虑，这需要设立一个科学、全面的评估架构加以梳理。

2 绿色建筑理论概述

绿色建筑理论发端于对环境危机的深度反思以及可持

续发展理念的普遍传播，其核心要义是谋求建筑在全寿命周期内最大程度地节约资源、保护生态环境并削减污染，意在为大众营造健康、适宜且高效的使用空间，实现人与自然的协调共生，该理论突破了传统建筑仅聚焦初始成本与功能性的桎梏，进而运用一种体系化、全局性的视角，把建筑作为一个与外部环境不断开展能量和物质交换的动态生命体。其评价体系一般包含节能、节地、节水、节材以及室内环境质量等多个层面，并且碳排放管控已成为贯穿这些层面的关键综合性指标，绿色建筑着重于从规划设计、施工建设、运营管理直至最终拆除再利用的全流程把控，提倡采用被动式设计、高效能源系统、可再生建材以及水资源循环利用等关键技术策略，绿色建筑理论并非仅仅是一套技术准则或评估工具，而是一种弘扬资源效率与环境责任的价值指引，它引领建筑业从线性消耗模式转变为循环发展模式，为应对气候变化和实现低碳转变提供了基础性的理论架构与实践途径^[1]。

【作者简介】樊平（1990—），男，中国河北张家口人，本科，工程师，从事装配式建筑、绿色建筑等研究。

3 装配式建筑各阶段碳排放源

3.1 材料与构件生产阶段

此阶段形成装配式建筑全生命周期碳排放的关键部分，其排放强度明显高于传统现浇建筑，主要归因于预制构件生产过程的集约化与工业化属性，碳排放最主要且极为突出的源头是建筑主体结构材料，尤其是水泥和钢材的工业化制造，水泥的煅烧流程会直接排出大量二氧化碳，然而钢铁冶炼却要耗费巨量煤炭，二者皆为典型的高能耗、高碳排放产业。尽管在设计环节或许对截面进行优化从而降低材料使用量，但构件工厂普遍运用的蒸汽养护工艺，为加快混凝土的硬化进程而消耗化石燃料，成为另一直接排放源头，生产线上推动模板拼接、钢筋加工、混凝土布料与振捣、构件吊运等流程的机械设备，要是其运行依赖的电力或者热能是来自非清洁能源，同样会产生相当可观的间接排放。该阶段还涵盖了各类辅助材料，像预埋件、保温层、装饰面层等在制造进程中的能源与资源损耗，必须着重说明的是，鉴于生产活动从分散的施工工地转移至集中的厂区，这部分排放虽说在空间上更为聚拢，但在统计方面更易于清晰把控，还为运用先进节能技术、选用低碳替代材料（如绿色水泥、再生骨料）以及集成可再生能源供电营造了有利环境，由此成为减排潜力发掘与技术攻坚的关键部分。

3.2 物流运输与现场建造阶段

该阶段的碳排放大多源自连接工厂与工地的“物流链条”以及高效的现场施工作业，一般被视作装配式建筑彰显其低碳优势的关键环节，物流运输所产生的碳排放与运输距离、负载率以及运输工具的能源效率直接相关，包含把原材料运至预制构件厂的起始运输，以及将标准化成品构件从工厂运到施工现场的主体运输。后者的排放属于装配式建筑特有的且需着重留意，特别是当构件厂的选址与项目所在地距离较远时，长途公路运输引发的柴油消耗将大幅提升碳足迹，步入现场施工安装的阶段后，碳排放便显现出明显的下降态势，这是鉴于大量高能耗的湿作业，像现场浇灌混凝土所要求的搅拌、振捣和养护，已被构件的精准吊装与机械连接所替代，所以现场施工机械的种类、数量以及运行时长显著减少。塔吊、吊车这类重型机械的能源消耗主要聚焦于高效的结构组装，然而传统工地上频繁的砂浆搅拌、焊接操作、模板安装拆卸以及材料在场地内的二次搬运所带来的排放却被大幅降低，施工工期的大幅缩减，也直接减少了整个建造阶段的现场临时设施能耗与管理人员通勤带来的间接排放，虽然物流环节或许会产生额外排放，但现场施工环节的体系性减排效益通常更为明显，一同促成了该阶段碳排放相较于传统方式的净削减^[2]。

3.3 运营维护与废弃处置阶段

该阶段贯穿建筑数十年的使用期限直至最终拆除完毕，其碳排放在传统建筑当中常常占据最大份额，而装配式建筑凭借其自身特性，在这一漫长时期中呈现出特有的减排潜能

与循环契机，在持续数十年的运营维护时段，碳排放大多源自建筑运行时的能耗，尤其是采暖、制冷、照明以及设备用电所产生的能源消耗。装配式建筑借助工业化制造，能够实现更高的构件尺寸精确水平与装配气密性能，进而有利于营造热工性能更好、冷热桥效应更低的建筑围护结构，从根本上增强建筑能源效能，减少长期的暖通空调负载，鉴于主体结构构件在工厂的标准环境里制作，其材料的均匀性和耐久性一般更出色，降低了因渗漏、裂缝等状况引发的频繁维护或局部返修需求，这在一定程度上减少了维护活动产生的材料与能源损耗。进入最后的废弃处置环节，碳排放源于拆除作业机械的能源消耗、废弃物分类处理的能源消耗以及运输至填埋场或回收厂的能源消耗，装配式建筑的突破性优势在此得以彰显，其“螺栓连接”或“干式连接”技术让主要结构构件在理论层面能够实现非破坏性拆除，大幅提升了主体材料的完整回收比例与直接再利用概率。该“建筑即资源库”的设计理念，把传统线性模式的“生产—使用—废弃”末端排放，转变为循环经济范畴下的“生产—使用—回收—再生产”模式，防止了新材料生产所产生的高额碳排放，进而在全生命周期的末尾发掘出关键的碳减排潜力。

4 绿色建筑视角下装配式建筑全生命周期的碳排放优化路径

4.1 设计源头的集成优化

从绿色建筑角度出发的碳排放优化，务必要从设计开端处开启，这属于一种系统性、前瞻性的根本性革新，这一路径的关键在于采用集成设计理念，把低碳目标融入建筑方案、结构体系与构件设计的全过程，而非事后弥补，首要举措是促进建筑实现“少费多用”与“被动优先”，也就是于设计阶段充分利用自然采光、自然通风以及太阳能得热的优势，凭借合理的体形系数、朝向与窗墙比调整，竭尽全力减少建筑在长期运行中对主动式能源系统的依靠，从源头降低全生命周期中占比最高的运营碳排放。基于这一情况，设计师应把装配式建筑当作一个完整的“产品系统”，联合结构、建筑、设备与内装专业，实施一体化、模数化与标准化的深度设计，这表明借助精准化计算和模拟仿真，在确保安全和功能得以实现的基础上，最大程度实现结构部件的轻型化与材料节约化，减少每个预制构件的混凝土及钢材的使用数量，直接减少高碳建材引发的物化碳排放。

一体化设计可精准地预留设备管道和内装接口，防止现场二次切割与凿洞引发的材料损耗和能效降低，设计须具备全生命周期的视角，主动考量未来空间功能转变的灵活性，借助大开间、灵活隔断的设计来延长建筑主体结构的使用年限；并以前瞻性视角引入“可拆解设计”理念，运用利于拆分的干式连接节点和标准化接口，为建筑在达到使用寿命之后构件的无损伤拆除、高效率回收与直接再利用创造有利条件，在设计规划阶段就锁定了末端处理阶段的巨大减碳

潜能^[3]。

4.2 生产建造的低碳转型

当设计与材料选取确定之后，生产及建造环节的低碳变革是决定减碳目标能否实现的实践核心，这一路径需求对传统粗疏的生产施工模式进行技术与管理双层面的深度变革，在构件生产阶段，务必驱动预制工厂向绿色化、智能化迈进升级，这不但涵盖了针对养护窑等关键高耗能设备开展节能改良，比如利用工业余热、太阳能或生物质能等清洁热源替换传统的燃煤锅炉蒸汽养护，更表明要在生产线全面设置自动化、精细化的控制系统，通过优化配合比例、降低生产废品产出率、实现边角料在厂内的循环再利用，从而实现资源与能源的最大化节约，工厂需主动探寻构建基于区块链或者物联网的碳足迹跟踪体系，给每一块出厂构件赋予明确的“碳身份”，促使上游供应链选用获得绿色建材认证的低碳水泥、再生骨料或绿色钢材。

而在物流与施工环节，优化着重于从系统层面提高效率以降低非必要排放，凭借科学的区域产业布局谋划，构建“分布式”预制工厂网络，试图使构件运输半径减至最小，并倡导使用新能源重型运输车辆，施工现场的管理变革同样关键，基于BIM的数字化精准建造管理平台，好似指挥一场震撼的交响乐演奏一样，精准规划每一块构件的进场时刻与吊装次序，实现“零库存”的准时化施工，全面杜绝现场堆放损耗和二次搬运现象。装配化施工致使现场作业人员数量、施工用水量、建筑垃圾（预计可降低70%以上）以及施工时长（缩减30%以上）实现全面大幅降低，本身便是极为直接、极为显著的减碳成果，推行机器人安装、智能监测等智慧建造技术，能够进一步提升安装的精确程度与质量水平，减少由人为差错造成的返工现象，进而在微观作业环节筑牢碳减排的根基^[4]。

4.3 运营维护的智慧赋能与性能提升

建筑的价值主要体现在运营层面，将装配式建筑工业化的高质量优势转化成长久、稳定且低消耗的运营性能，是挖掘其全生命周期低碳价值的关键途径，装配式建筑鉴于构件精确程度高、衔接严密，天然拥有更卓越的气密性与结构稳固性，这为建筑实现超低能耗甚至近零能耗构筑了稳固的

物理根基。优化路径的关键，在于把这一先天优势与主动式绿色技术开展深度融合与智能化管理，这表明在建筑设计环节便系统地整合具备高性能的外保温体系、节能门窗、遮阳装置以及高效的热回收新风体系，并且充分运用建筑屋顶与外立面，大规模装设光伏发电系统，让建筑由单纯的能源消耗者转变为具备一定自我生产能力的“产消者”，直接冲抵部分运营碳排放。

最为关键的一点是，应当依靠物联网、大数据与人工智能技术，替建筑装上敏锐的“神经”与智慧的“大脑”，利用在建筑当中大范围设置传感器，实时监控室内外环境参数（温湿度、光照、CO₂浓度）和各分项能源消耗数据，接着基于机器学习算法构建建筑能耗模型，实现对供暖、通风、空调、照明等系统的自适应、预测性准确调控。智慧运维平台可察觉能耗异常状况，自行诊断设备故障或者效率减退现象，把“被动维修”转变为“预防性维护”，进而在长达数十年的运营期间，始终让建筑能效维持于最佳水准。

结语：装配式建筑借助工业化生产与现场装配的深度结合，在全生命周期当中体现出结构性的低碳特性，其减排益处不仅呈现于施工时期的效率增进，更来自设计开端的系统改良、运营维护的性能支撑以及拆除时期的循环潜力，为全面激发这一潜能，未来要进一步推进建筑设计与低碳目标的深度契合，加快建造流程的绿色智能化转变，且搭建以构件再利用为核心的循环经济体系，装配式建筑不应只是建造方式的革新举措，而应作为引导建筑业迈向资源高效利用、环境友好型的全面性解决办法，为实现城乡建设绿色发展和碳中和目标提供核心支撑。

参考文献

- [1] 何东琦.论绿色建筑视角下装配式建筑的优势与发展[J].经济技术协作信息, 2024(7):0250-0252.
- [2] 张建国.绿色建筑背景下装配式建筑技术的应用分析[J].建筑·建材·装饰, 2024(18).
- [3] 范英洁,成嘉莉.绿色建筑背景下装配式建筑技术的应用与实践分析[J].住宅与房地产, 2023(14):104-106.
- [4] 张庆生.绿色建筑背景下装配式建筑技术的运用分析[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术, 2023.