

装配式建筑全生命周期碳排放问题分析

刘晓彤

(宁波绿城房地产投资有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要 装配式建筑作为建筑业绿色转型的重要路径, 其在提高建造效率、改善施工环境方面具有显著优势。然而, 装配式建筑全生命周期涵盖的设计、构件生产、安装施工、运行维护、拆除处置等各阶段, 碳排放来源复杂且相互关联。基于此, 本文以装配式建筑全生命周期各阶段为研究框架, 系统梳理各环节碳排放存在的主要问题, 继而提出兼具针对性和可行性的低碳策略, 旨在为建筑行业低碳发展提供实践参考, 推动建筑领域碳减排从局部优化走向全流程协同管控升级。

关键词 装配式建筑; 全生命周期; 碳排放问题

中图分类号: TU767; X51

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.029

0 引言

全球气候变暖趋势不断加剧, 建筑行业作为能源消耗、温室气体排放的重要源头, 面临前所未有的减排压力。传统现浇建筑模式资源浪费严重、施工现场污染大、能耗高, 难以满足可持续发展的要求。装配式建筑以工厂预制、现场装配的方式, 缩短工期、减少现场作业, 被公认为建筑业绿色升级的关键方向。尽管装配式建筑在施工阶段展现出显著减排潜力, 但仅关注该阶段易忽视全生命周期内其他环节的高碳排放风险, 如设计缺陷、构件运输低效、运维能耗过高等问题, 仍是其碳减排的主要短板。因此, 需以全生命周期为框架, 系统解析各阶段碳排放特征, 识别关键制约瓶颈, 进而提出科学可行的全过程减碳策略, 以支撑建筑行业真正迈向低碳化、集约化和高质量发展。

1 装配式建筑全生命周期碳排放相关概念

1.1 装配式建筑

装配式建筑指将建筑结构系统、外围护系统、设备管线系统及内装系统各部分的主要部品部件在工厂预制完成, 再运至现场装配集成的方式进行建造。典型构件包括墙板、楼板、梁柱、楼梯、阳台等, 采用标准化设计、高精度连接的技术手段实现现场快速安装。减少现场湿作业及传统现浇施工, 大幅降低扬尘、噪声、建筑垃圾, 提高施工效率, 也更有利于保证工程质量。工厂化生产环境便于质量控制与资源集约利用, 有利于实现节能、节材与环保目标^[1]。装配式建筑目前已有混凝土、钢结构、木结构等多种体系, 适用于住宅、学校、医院、保障房、应急工程等场景,

其核心特征包括设计标准化、生产工厂化、施工装配化、装修一体化、管理信息化, 设计、生产与施工协同更加紧密, 推动建筑业向工业化与智能化转型。

1.2 建筑碳排放

建筑碳排放是指建筑物从材料生产、运输、施工、运行到拆除各阶段直接或间接产生的二氧化碳排放。建材制造阶段因水泥、钢材等高耗能材料而产生大量隐含碳, 施工阶段有机械设备运行时燃料燃烧的排放, 运行阶段供暖、空调、照明、热水等使用行为是主要排放源, 拆除阶段若没有充分回收资源会增加末端碳负担。碳排放计算的原理是将各活动量与相应排放因子相乘, 且目前已有《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019)明确指导。当前建筑碳排放管控的重点已从单一运行能耗转向全周期碳足迹评估, 故而优化结构形式、选用低碳建材、提高围护性能、集成光伏系统、推行智能用能管理, 可有效削减各阶段排放。新建项目需在可行性研究及设计阶段开展碳排放分析, 将其作为方案比选、绿色决策的可靠依据, 支撑建筑领域低碳转型实践。

1.3 建筑全生命周期

建筑全生命周期涵盖项目从前期策划、设计、施工、运营维护、拆除及资源再生等阶段, 且各阶段彼此衔接、互为因果, 对建筑的功能表现、经济指标、环境负荷共同影响。策划阶段确定建设目标及约束条件, 设计阶段确定技术路线及材料方案, 奠定性能基础, 施工阶段通过精细化管理实现高效建造; 运营阶段持续时间最长, 关注设施运行效率、空间适应性及用户舒适度,

作者简介: 刘晓彤 (1988-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 土木工程。

拆除阶段强调有序解体与建材循环利用,减少废弃物。全生命周期管理依托BIM、物联网等技术手段打通数据链条,支持跨阶段协同决策,管理重心从初期投资转向长期综合效益,切实降低运维支出,延长使用年限,提高资产价值。

2 装配式建筑全生命周期碳排放问题分析

2.1 设计阶段

设计阶段对装配式建筑全生命周期碳排放具有决定性影响。标准化、模块化的设计理念可减少构件种类与连接复杂度,提升工厂生产效率并降低材料损耗。结构体系选型直接关联碳排放强度,钢结构体系由于自重轻、可回收性好,在部分项目中展现出优于混凝土体系的减碳潜力。围护系统设计若能合理地整合高性能保温材料及气密构造,可显著降低后续使用阶段能耗。设备管线、内装一体化协同设计能避免后期拆改,减少资源浪费^[2]。BIM技术在设计阶段的应用有利于多专业协同,准确统计材料用量,优化运输、装配方案,为碳排放测算提供可靠的数据基础。绿色建材的选用宜在设计初期就确定,优先采用再生骨料、低碳水泥或生物基材料,从源头削减隐含碳。设计深度不够极易导致现场返工或构件替换,从而增加无效碳排放,因此深化设计及预制率控制成为关键环节。

2.2 构件生产阶段

构件生产阶段碳排放主要源于原材料获取、加工制造及厂内能源消耗。其中混凝土预制件因水泥熟料煅烧过程释放大量二氧化碳,构成该阶段主要排放源,而钢材构件则依赖电炉或高炉冶炼,电力结构直接影响碳足迹。工厂化生产虽集中能耗,但通过规模化作业、余热回收、自动化设备可提高能效。使用再生骨料或粉煤灰替代部分水泥可降低单位构件碳排放。从碳排放因子的角度看,能源结构清洁化是减排的可靠路径,引入光伏、地源热泵等可再生能源供电可大幅削减间接排放。但生产计划不合理造成的库存积压或重复运输会增加隐含碳负担,碳排放因子数据缺失或不统一影响核算准确性,亟需建立覆盖主流预制构件的本地化数据库。

2.3 安装施工阶段

安装施工阶段碳排放集中于现场吊装、临时支撑、节点连接及少量现浇作业。与传统现浇建筑相比,装配式方式大大减少了湿作业时间,因而能减少模板支设、混凝土搅拌、养护等高碳活动。大型起重机械燃油消耗构成主要排放源,其使用频次及作业效率受构件尺寸、吊装顺序、场地组织影响。运输距离过长或路线规划不当,导致构件进场过程中柴油车排放增大。

现场管理若不精细,构件破损或安装错误会造成返工及额外材料浪费。干式连接技术的推广应用可减少后浇混凝土用量,直接降低碳排放。施工组织设计需统筹物流、吊装与工序衔接,实现“一次就位、精准装配”,避免无效移动及等待。现场临时设施如围挡、办公用房若采用可周转模块,亦有助于降低整体碳足迹。

2.4 运行维护阶段

运行维护阶段是装配式建筑全生命周期中碳排放占比最高的环节,主要来自采暖、制冷、照明、通风及生活热水系统的长期能源消耗,建筑气密性、保温性能直接决定热损失水平,因此高性能外窗配合连续保温层能降低负荷需求。设备系统能效等级、智能控制策略及用户行为共同影响实际用能强度。部分项目在设计阶段已集成太阳能、光伏、空气源热泵等可再生能源系统,形成运行期碳抵消^[3]。定期检修、及时更换滤网、主动调适系统等精细化运维措施可维持低能耗状态。屋顶绿化、垂直植被等碳汇设计也具有辅助减碳功能。该阶段的减排潜力高度依赖于前期设计质量及后期管理能力,且有极强的长期持续性。

2.5 拆除处置阶段

拆除处置阶段碳排相对较低,但资源回收水平对全周期环境性能有直接影响,装配式建筑因采用标准化连接节点,具备良好的可拆解性,有利于构件完整回收再利用。混凝土构件破碎后用作路基材料或低标号混凝土的再生骨料,减少天然砂石开采及填埋过程中的碳排放。钢材构件除锈后可直接回炉再生,形成材料闭环循环,体现显著负碳效应。不当的拆除方式如爆破、重型机械碾压,必然造成材料损毁,失去再利用价值。缺乏分类收集及逆向物流体系,可回收物就会混入建筑垃圾,增加处理能耗。因此,拆除前进行构件评估并制定合理拆解方案,可最大化保留高价值可回收物。

3 装配式建筑全生命周期碳排放问题的应对策略

3.1 设计阶段策略

设计阶段是装配式建筑碳排放控制的源头环节,通过融入绿色设计理念,降低后续各阶段的环境负荷。采用模块化、标准化的设计方法,减少构件种类及连接节点的复杂度,有利于提高工厂预制效率、保证现场装配精度。在材料选用上优先采用低碳或再生建材,如高炉矿渣水泥、再生骨料混凝土等,从源头削减隐含碳。结构体系优化亦是关键,借助BIM技术对多种方案做严谨比选,在满足功能、安全的前提下减少材料用量。同时,建筑朝向、窗墙比及遮阳系统的设计都应结合当地气候特征,尽量减少对机械通风及空调

系统的依赖。集成自然采光引导、被动式隔热构造、屋顶绿化等,可有效降低建筑运行能耗。设计时要前瞻性地统筹未来维护、改造、拆除的便利性,预留构件更换通道及拆解接口,为全生命周期末端阶段的资源回收创造条件。

3.2 构件生产阶段策略

构件生产阶段的碳减排聚焦于工艺优化与资源高效利用。预制工厂宜建立精细化的生产管理体系,从图纸会审、模具准备、钢筋加工、混凝土浇筑、养护脱模等环节实施全过程控制。优化混凝土配合比,掺入粉煤灰、硅灰等工业副产品替代部分水泥,减少高碳排原材料的使用。同时推广蒸汽养护余热回收系统,精细调控升温、恒温、降温各阶段的速率,避免能源浪费,防止构件开裂。钢筋加工采用数控设备精确下料,减少边角废料,模具重复使用率提高摊薄单位构件的制造碳足迹^[4]。原材料进场后严格检验、规范分类存储,杜绝不合格品进入生产线造成返工。引入信息化管理系统对物料流、能源流进行实时监测,及时发现高耗能工序予以改进。应用自动化布料、智能振捣、机器人焊接等技术,提高产品一致性,降低人为因素造成的废品率。

3.3 安装施工阶段策略

安装施工阶段减碳核心在于缩短工期、减少现场作业及废弃物产生。依托 BIM 模型做施工模拟,查找管线碰撞及安装冲突,避免现场切割、返工。采用模块化吊装策略,把若干构件及设备机房在工厂集成大型单元,现场一次就位,大幅压缩高空作业时间及机械台班消耗。运输环节实施集中配送、路径优化,选用新能源或低排放货运车辆,合理装载提高单次运量。施工现场实行“无尘化”管理,预制构件精确对接,湿作业大大减少,杜绝传统现浇过程中产生的建筑垃圾。设备吊装前专门制定吊装方案,明确吊点、路径、应急预案,力求一次吊装成功,杜绝重复起吊造成的能源浪费。施工人员接受专项技术交底,熟练掌握装配式节点连接工艺,保证安装质量一次成优,避免因安装缺陷而导致后期维修时的碳排放。

3.4 运行维护阶段策略

运行维护阶段碳排放主要源于建筑使用过程中的能源消耗,需通过系统性措施实现长期节能。建筑交付后应建立智能运维平台,将照明、暖通、电梯诸子系统数据有机集成,实现用能动态监测、实时优化调控。同时大力推广太阳能光伏板、空气源热泵等可再生能源设备,替代部分电网电力及化石燃料。外墙、屋面、门窗的保温隔热性能在使用期宜定期检测,及时修补

破损密封处、重做脱落保温层,保持围护结构热工性能的稳定。鼓励用户行为节能,如设置分户计量及用能反馈系统,潜移默化地提高居住者节能意识。维护策略以预防性保养为主,避免事后维修,延长设备寿命、降低更换频率^[5]。公共区域照明及水泵等设施宜采用感应控制、高效电机,降低待机及运行时的能耗。定期开展建筑能效评估,据评估结果调整运行参数或进行局部改造,持续挖掘节能潜力。

3.5 拆除处置阶段策略

拆除处置阶段的明确目标是最大化资源回收与最小化填埋焚烧。建筑拆除前应编制构件拆解方案,充分利用设计阶段所预留的拆解信息,以非破坏性或低损伤方式将主体结构与连接件可靠分离。混凝土构件破碎筛分后所得骨料可直接用于路基或再生混凝土,钢材、铝材等金属材料熔炼回炉,实现闭环循环。木材、石膏板等有机及轻质材料分类收集后送交专业处理厂进行能源回收或再制造。拆除过程中尽量避免使用高冲击力机械,而采用液压剪、绳锯等精细施工工具保护材料完整性。建立建筑“身份证”制度,记录各构件材料成分与连接方式,为今后高效拆解提供数据支持。回收材料的质量检测及分级标准也宜统一,确保再生产品符合工程应用要求。

4 结束语

装配式建筑的低碳潜力不能仅停留在施工便捷性的表面优势,必须深入其全生命周期各环节,系统识别并解决碳排放问题。从设计阶段主动控制材料及构造选择,到生产阶段提高能效、优化资源利用,再到施工、运行、拆除等阶段的精细化管理,每个阶段都需嵌入减碳思维。唯有打破阶段壁垒,构建覆盖“生—产—用—废”全过程的协同减排机制,装配式建筑才能真正成为建筑业实现绿色低碳转型的坚实载体,为国家“双碳”战略提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 王辉,张程哲.超低能耗装配式建筑碳减排驱动因素研究[J].四川建筑科学研究,2025,51(01):90-96.
- [2] 梁春峰,王一飞,岳琳,等.全生命周期视角下装配式建筑减排有效路径研究[J].四川建材,2025,51(02):45-47.
- [3] 李军辉.装配式建筑全生命周期碳排放及减碳策略分析[J].建筑安全,2024,39(11):30-35.
- [4] 王彤云.全生命周期下装配式建筑减少碳排放的路径分析[J].中国建筑装饰装修,2024(21):90-92.
- [5] 千中启,高洁.装配式建筑全生命周期碳排放问题析[J].建筑与文化,2024(06):27-30.