

建筑工程全生命周期碳排放核算与低碳管理策略研究

任中磊

九江浩康建筑工程有限公司 江西九江 332000

摘 要：在全球气候变化与“双碳”目标背景下，建筑行业作为能源消耗和碳排放的主要领域，其减排任务艰巨。本文聚焦于建筑工程全生命周期的碳排放问题，系统构建了一套涵盖建材生产、运输、施工、运营维护及拆除处置五个阶段的碳排放核算方法体系。通过对各阶段碳排放源的详细界定与量化，深入分析了建筑材料选择、施工工艺、能源结构、建筑寿命等关键因素对碳排放的具体影响机制。基于核算与影响因素分析，本文提出了一套贯穿设计、施工、运营、拆除全过程的低碳管理策略，包括低碳设计与材料优化、施工低碳技术应用、运营节能措施以及拆除资源循环利用。本研究旨在为建筑行业提供一套科学、系统、可操作的碳排放核算工具与低碳管理路径，为推动建筑业绿色转型、实现碳达峰与碳中和目标提供理论支撑与实践指导。

关键词：建筑工程；全生命周期；碳排放核算；影响因素；低碳管理策略

引言

建筑行业是全球温室气体排放的重要来源，其碳排放贯穿于建筑材料生产、建造、使用和拆除的全过程。传统的建筑管理模式往往侧重于施工阶段的成本与进度控制，对全生命周期内的资源消耗和环境影响关注不足。随着我国“碳达峰、碳中和”战略的提出，对建筑行业进行系统性的碳排放管控已成为必然要求。然而，当前建筑领域的碳排放管理仍面临诸多挑战，如核算边界不清晰、数据基础薄弱、减排路径不明确等。因此，开展建筑工程全生命周期碳排放的精准核算，并在此基础上制定科学有效的低碳管理策略，对于推动建筑业可持续发展、服务国家“双碳”战略具有重大的理论价值和现实意义。

一、建筑工程全生命周期碳排放核算方法

（一）全生命周期碳排放的界定与范围

建筑工程全生命周期碳排放核算，首先需要明确其系统边界。该边界应从“摇篮到坟墓”，即从建筑材料原材料的开采和加工开始，到建筑材料运输至施工现场，经过建筑施工过程，再到建筑长达数十年的运营与维护，直至建筑功能终结后的拆除、废弃物运输与最终处置的全过程。核算范围需包含三个层面：一是直接排放，指施工现场燃烧化石燃料产生的排放，如施工机械燃油消耗；二是能源间接排放，指建筑使用阶段消耗的外购电力、热力等能源在其生产过程中产生的排放；三是其他间接排放，也称为隐含碳，主要指建筑材料（如钢材、

水泥、玻璃、铝材等）在其生产、运输过程中产生的排放，这是建筑全生命周期碳排放的重要组成部分，且常常被忽视^[1]。

（二）建材生产与运输阶段的碳排放核算

建材生产阶段的碳排放是建筑隐含碳的核心。核算方法主要采用过程分析法，即根据各类建筑材料的使用量，乘以其对应的碳排放因子。碳排放因子的获取是关键，应优先采用基于本地化生产数据的实测因子，若数据不可得，则可采用国家或行业发布的平均因子。例如，核算水泥碳排放时，不仅要考虑生产过程中的燃料燃烧和工艺排放（如石灰石分解），还应考虑电力消耗的间接排放。运输阶段的碳排放则需根据各类建材的运输重量、运输距离和运输方式（公路、铁路、水路）的能耗强度及碳排放因子进行计算。此阶段的核算精度高度依赖于建材供应链数据的完整性和准确性。

（三）施工阶段的碳排放核算

施工阶段的碳排放源相对集中，主要包括施工机械设备（如挖掘机、起重机、混凝土搅拌机）的燃油或电力消耗，施工现场办公、生活设施的能源消耗，以及施工过程中消耗的辅助材料（如模板、脚手架、焊接材料）的隐含碳。核算时，需根据施工组织设计，详细统计各类机械的台班数量和能源单耗，以及临时设施的能源消耗量。对于辅助材料，则需统计其用量并查找相应的碳排放因子。此阶段的特点是排放源动态变化，数据采集难度较大，需要建立精细化的施工能耗监测与统计制度。

（四）运营与维护阶段的碳排放核算

运营阶段是建筑全生命周期中碳排放时间最长、总量最大的阶段，主要来自建筑采暖、空调、照明、电梯、办公设备等系统的能源消耗。核算方法通常采用能耗模拟法或实际能耗统计法。能耗模拟法基于建筑设计参数、当地气象数据和用户使用模式，利用专业软件预测建筑全年能耗，再根据当地电网的碳排放因子将能耗转换为碳排放。实际能耗统计法则通过收集建筑全年的电费、燃气费等账单数据，结合能源结构碳排放因子进行计算。维护阶段的碳排放则包括在建筑使用周期内，为更换或修复建筑构件（如更换门窗、重刷涂料、更换设备）而产生的材料生产、运输和现场施工的碳排放，这部分排放具有间歇性和不确定性，需根据建筑维护计划和材料更换频率进行估算^[2]。

（五）拆除与处置阶段的碳排放核算

拆除阶段的碳排放主要来自拆除机械（如破碎机、挖掘机）的能源消耗。处置阶段的碳排放则取决于建筑废弃物的处理方式。若废弃物进行填埋处理，其碳排放主要来自运输过程的能耗；若进行焚烧处理，则需计算焚烧过程产生的直接排放和能量回收带来的减排效益；若进行回收再利用，则需考虑回收过程中的能源消耗，同时应扣除因回收材料替代原生材料生产而避免的碳排放，即实现“碳信用”。此阶段的核算体现了循环经济理念对建筑减排的贡献。

二、建筑工程碳排放的主要影响因素分析

（一）建筑材料选择对碳排放的影响

建筑材料的选择是影响建筑隐含碳的决定性因素。不同材料的碳排放强度差异巨大。例如，生产一吨钢材的碳排放远高于一吨木材或再生骨料混凝土。因此，在结构设计中，采用高强度钢材和高性能混凝土可以减少材料用量，从而降低总碳排放。在围护结构中，选用具有良好保温隔热性能的材料，如真空绝热板、气凝胶等，虽然其单位体积的隐含碳可能较高，但能显著降低运营阶段的采暖空调能耗，从全生命周期来看可能更具碳减排效益。此外，优先选用本地化、可再生、可回收的建筑材料，能够有效缩短运输距离，减少资源开采压力，是实现低碳建筑的重要途径。

（二）施工工艺与能源结构的影响

施工工艺直接影响施工过程的能源消耗和碳排放。例如，采用装配式建造方式，将大量构件在工厂预制，现场进行吊装连接，可以大幅减少现场湿作业，降低施工机械的台班数量和作业时间，从而减少施工阶段的直

接排放。同时，工厂化的生产环境更有利于能源的集约利用和废弃物的集中处理。施工现场的能源结构同样关键，使用电动机械替代燃油机械，并确保电力来自可再生能源，可以从根本上改变施工阶段的碳排放结构。此外，实施精细化的施工组织管理，减少材料浪费和返工，也是降低施工碳排放的有效手段^[3]。

（三）建筑使用阶段能源消耗特征

建筑使用阶段的碳排放与建筑能耗强度直接相关，而能耗强度又受到建筑形态、围护结构性能、用能设备效率和用户行为习惯的综合影响。例如，建筑物的朝向、窗墙比、体形系数等设计参数，决定了其获得自然采光和通风的能力，直接影响人工照明和空调的使用需求。暖通空调系统和照明系统的能效等级是决定其运行能耗的核心。用户行为，如空调温度设定、设备待机时间、开关灯习惯等，也会在较大程度上影响实际能耗。因此，运营阶段的碳排放是一个涉及设计、设备、管理和行为的复杂系统问题。

（四）建筑寿命与拆除方式的碳排放影响

建筑寿命的长短对全生命周期年均碳排放具有显著影响。一栋设计寿命为100年的建筑，即使其初始隐含碳较高，分摊到每年后，其年均碳排放也可能远低于一栋设计寿命仅为50年的建筑。因此，提升建筑的结构耐久性、功能适应性和维护管理水平，延长建筑使用寿命，是降低年均碳排放最有效的策略之一。在建筑寿命终结时，拆除方式的选择同样重要。采用保护性拆除，尽可能完整地回收建筑构件和材料，进行再利用或再生利用，能够最大限度地保留材料中蕴含的能源和碳，避免将其转化为废弃物处理的排放。这与传统的粗暴式拆除和填埋处置相比，具有显著的碳减排优势^[4]。

三、建筑工程低碳管理策略

（一）低碳设计策略与材料优化体系的构建与实施

低碳管理的核心理念应当从建筑项目的设计初期阶段就开始贯彻实施。在设计策略方面，需要确立“被动优先，主动优化”的基本原则。具体而言，首先应当通过科学合理的建筑布局规划、最优朝向选择、适宜体形系数确定以及自然通风采光系统的精心设计，最大限度地提升建筑的被动式节能性能，从而显著降低建筑对空调、照明等人工环境调节系统的依赖程度。其次，在建筑材料的选择上，需要建立一套完整的基于全生命周期碳排放评价体系的建材选型标准，优先选用具有低碳特性的建筑材料，包括再生材料、本地化建材等。例如，在建筑结构体系的选择上，经过全面的技术经济性比较分

析后,可以适当采用木结构或钢木混合结构来替代传统的钢结构或混凝土结构。在非结构构件的选择上,应当大力推广使用再生骨料混凝土、竹木复合材料等环保型建材产品。同时,要积极推进建筑、结构、机电、装修等各专业的一体化协同设计模式,有效减少设计变更和材料浪费现象,从项目源头阶段就严格控制建筑隐含碳排放量。

(二) 施工过程中的低碳技术创新与应用实践

在建筑施工阶段,低碳管理的重点应当放在技术创新和过程管控两个方面。一方面要大力推广装配式建筑、模块化建筑等先进的工业化建造方式,实现施工现场的“少人化”甚至“无人化”作业模式,从而显著降低现场施工的能源消耗和碳排放。另一方面要在施工现场建立智能化的能源管理系统,对塔吊、施工电梯等大型机械设备和临时设施的能耗情况进行实时监测,并实施优化调度管理。在施工机械的选择上,应当优先使用电能驱动或氢能动力等清洁能源设备,同时积极推动施工现场光伏发电系统、储能系统等微电网技术的应用示范。此外,要建立健全建筑废弃物的分类收集、运输和处理体系,将拆除产生的废混凝土、废砖瓦等建筑垃圾进行专业化加工处理,转化为再生骨料等资源化产品,用于场地回填或生产低强度再生混凝土制品,从而实现建筑垃圾的减量化处理和资源化循环利用^[5]。

(三) 运营阶段的系统性节能与减排措施体系

建筑运营阶段的碳排放管理是建筑全生命周期减排工作的重点环节。首先,应当建立完善的建筑能源管理系统(BEMS),对中央空调系统、照明系统、电梯系统等主要用能设备实施智能化控制和精细化管理,根据室内外环境参数变化和人员活动规律,动态调整设备运行参数和工作模式,有效避免能源的无效消耗。其次,要对既有高耗能建筑实施系统性的节能改造工程,包括更换高性能节能门窗、增设高效外墙外保温系统、更新高效能的暖通空调设备和LED照明灯具等。此外,要创新性地引入合同能源管理(EMC)等市场化机制,鼓励专业节能服务公司参与建筑运营管理,通过持续的技术升级改造和用能行为引导,不断挖掘建筑节能潜力。在条件具备的情况下,应当在建筑屋顶或立面空间安装分布式光伏发电系统,实现建筑部分用电需求的自发自用,从而有效降低外购电力带来的间接碳排放量。

(四) 拆除与资源循环利用的全过程低碳管理

建筑拆除阶段的低碳管理要以“变废为宝”为核心理念。在建筑规划设计之初,就应当充分考虑建筑未来的可拆解性能和材料的可回收特性,为建筑材料的循环再利用创造有利条件。在建筑拆除前,需要制定详细的

拆除实施方案和资源化利用专项计划,对具有再利用价值的建筑构件和材料进行明确标识,并采取保护性拆除措施。在拆除作业完成后,要对建筑废弃物实施精细化的分类分拣处理,将金属材料、玻璃制品、木材、塑料等可回收物运送至专业化的再生资源处理工厂进行加工利用,将混凝土、砖石等无机建筑垃圾加工成再生骨料等建材产品。通过建立区域性的建筑废弃物资源化利用产业体系,形成“科学拆除-专业回收-高效再生-合理应用”的完整产业链条,最大限度地减少原生建筑材料开采和建筑废弃物填埋处理带来的环境负荷和碳排放影响。

结语

建筑工程全生命周期碳排放核算与低碳管理是一项系统性工程,它要求建筑行业的参与者打破传统的阶段分割思维,树立全生命周期的整体观。精准的核算是科学管理的基础,它揭示了碳排放的源头和热点,为制定针对性的减排策略提供了数据支撑。而有效的低碳管理策略,则必须贯穿于设计、施工、运营、拆除的每一个环节,形成一个环环相扣、持续优化的管理体系。未来的研究与实践,应致力于完善碳排放核算的数据库和标准体系,开发更智能化的碳排放监测与管理工具,并探索将碳成本纳入项目经济评价的方法。只有将低碳理念深度融入建筑行业的每一个细胞,才能推动建筑业从传统的资源消耗型产业向绿色低碳的现代产业转型,为实现国家“双碳”目标贡献关键力量。

参考文献

- [1] 蒋柯夫, 杨璞. 碳中和目标下轻型木结构建筑碳排放计算及降碳策略研究[J]. 林产工业, 2022, 59(10): 51-55.
- [2] 赵伟祥. 装配式建筑物化阶段碳排放核算模型与低碳化路径研究[D]. 安徽建筑大学, 2022.
- [3] 董幼林, 陈松陵, 方小明, 等. 黄冈电网建设项目全生命周期低碳化研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2022(9): 3.
- [4] 李岳岩, 张凯, 李金潞. 居住建筑全生命周期碳排放对比分析与减碳策略[J]. 2021.DOI: 10.15986/j.1006-7930.2021.05.017.
- [5] 陈华盾, 赵子豪, 刘红波, 等. 基于过程的建筑全生命周期碳排放核算问题及对策[C]//第二十二届全国现代结构工程学术研讨会. 1. 天津大学管理与经济学部; 2. 天津大学建筑工程学院; 3. 河北工程大学土木工程学院, 2022.