

建筑工程物化阶段碳足迹评价研究

王秀红¹ 高永强^{2*} 张攀云¹ 刘璐¹

1 河北劳动关系职业学院 2 石家庄铁道大学

DOI:10.32629/btr.v8i7.4874

[摘要] “双碳”背景下,建筑行业碳排放占全球38.2%,低碳转型势在必行。物化阶段是建筑全生命周期碳排放核心环节,含材料开采、生产、预制、运输及装配全链条,其碳足迹精准评价是建筑低碳发展关键。本文基于LCA法,结合国标GB/T51366-2019与工程案例,构建全流程碳评价体系,明确核算方法与参数选取原则。对比PC与CC建筑碳排放,识别材料生产、运输为核心减排点,从材料替代等维度提减排策略,为该阶段碳管控提供理论与实践支撑。

[关键词] 建筑工程; 物化阶段; 碳足迹评价; 生命周期评价; 碳排放核算; 减排策略

中图分类号: TU198+.6 文献标识码: A

Study on Carbon Footprint Assessment of the Materialization Phase in Construction Engineering

Xiuhong Wang¹ Yongqiang Gao^{2*} Panyun Zhang¹ Lu Liu¹

1 Hebei Vocational College of Labor Relations

2 Shijiazhuang Tiedao University

[Abstract] Under the dual-carbon framework, carbon emissions from the construction industry account for 38.2% of the global total, making low-carbon transformation imperative. The materialization phase is the core stage of carbon emissions over the entire lifecycle of a building, encompassing the full chain of material extraction, production, prefabrication, transportation, and assembly. Accurate evaluation of its carbon footprint is key to low-carbon development in construction. Based on the LCA method, and in conjunction with the national standard GB/T51366-2019 and engineering case studies, this paper constructs a full-process carbon assessment system, clarifying accounting methods and principles for parameter selection. By comparing carbon emissions between precast concrete (PC) and cast-in-place concrete (CC) buildings, the study identifies material production and transportation as critical points for emission reduction, and proposes strategies such as material substitution to provide theoretical and practical support for carbon management at this stage.

[Key words] Construction engineering; Materialization phase; Carbon footprint assessment; Life cycle assessment; Carbon accounting; Emission reduction strategies

引言

全球气候变化引发的极端天气事件频发,温室气体排放管控已成为国际社会的共同议题。建筑行业作为国民经济的支柱产业,同时也是碳排放的主要来源,其碳排放量占全国总碳排放量的近40%,覆盖建材生产、施工建造、运营维护及拆除处置等全生命周期环节。其中,物化阶段(又称隐含碳阶段)的碳排放占建筑全生命周期总排放的30%-50%,且具有显著的不可逆性,成为建筑低碳转型的关键管控环节。

随着我国《建筑工程低碳建造与评价标准》《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》等政策文件的相继出台,这些政策

文件明确要求将建筑全生命周期碳排放评价纳入项目管理流程,尤其强调物化阶段碳排放的量化核算与管控。装配式建筑因全过程碳排放较传统现浇建筑降低30%-40%的显著优势,成为“双碳”目标落地的重要载体。但目前针对其物化阶段碳足迹的精准评价仍存在标准不统一、区域排放因子差异考虑不足、数据获取难度大等问题。因此,开展建筑工程物化阶段碳足迹评价研究,对推动建筑行业绿色低碳转型具有重要的现实意义。

1 建筑工程物化阶段碳足迹评价理论基础

1.1 核心概念界定

1.1.1 物化阶段定义

建筑工程物化阶段是指建筑从原材料开采、建筑材料与构件生产制造,经运输流通至施工现场,最终完成装配施工的全过程,涵盖“材料生产-构件制造-运输流通-现场装配”四大核心环节。该阶段碳排放主要源于材料生产过程的能源消耗、运输过程的燃料燃烧、施工过程的机械能耗等,以二氧化碳当量(tCO_2e)为统一计量单位,且排放后难以通过后期措施消减,具有显著的不可逆性。

1.1.2 碳足迹与碳排放相关概念

碳足迹是指特定产品或活动在全生命周期内产生的温室气体排放总量,建筑工程物化阶段碳足迹即该阶段所有环节温室气体排放的总和。根据《建筑工程低碳建造与评价标准》,建筑碳排放分为直接责任碳排放(范围1+范围2)与间接责任碳排放(范围3),其中范围1为施工机械燃料燃烧等直接温室气体排放,范围2为外购电力和热力产生的间接排放,范围3为建材采购、废弃物处理等其他间接排放。

碳排放因子是表征能源、资源消耗与温室气体排放关系的关键参数,用二氧化碳当量与相关活动单位表示,其准确性直接影响碳足迹评价结果的可靠性。不同材料、能源类型及区域的排放因子存在显著差异,需根据项目实际情况合理选取。

1.1.3 生命周期评价(LCA)方法

LCA是一种全面评估产品或活动环境影响的系统方法,通过识别和量化全生命周期内的能源消耗、物质消耗与环境排放,评估其环境影响并提出改进方案。在建筑物化阶段碳足迹评价中,LCA方法遵循“目标定义-清单分析-量化计算-结果评价”的核心框架,能够系统识别各环节碳排放贡献,为减排策略制定提供科学依据。

1.2 评价标准与规范依据

我国建筑碳足迹评价主要依据《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)、《建筑工程低碳建造与评价标准》等现行标准,明确了碳排放计算的范围、方法、参数与管理要求。其中,《建筑工程低碳建造与评价标准》规定了低碳建造的评价框架,包括基本规定评价、指标评价、要素评价等环节,将碳管理指标、直接与间接 CO_2 排放、可再生能源利用等纳入评价体系。

国际上主要参考ISO 14040/14044系列标准、PAS 2050等,为碳足迹评价提供通用技术框架。这些标准规范共同构成了建筑工程物化阶段碳足迹评价的依据,确保评价过程的科学性、规范性与结果的可比性。

2 建筑工程物化阶段碳足迹评价体系构建

2.1 评价目标与系统边界界定

评价目标是精准量化物化阶段各环节碳排放量,识别主要碳排放源与关键减排节点;对比不同建造方式、材料选择方案的碳排放差异;为建筑项目低碳设计、施工方案优化及减排措施制定提供数据支撑,最终实现物化阶段碳排放最小化。

系统边界界定为“从摇篮到工地”,具体涵盖四大核心环节:材料生产环节,包括混凝土、钢筋等建材的原材料开采与生产过程,再生材料需纳入废弃材料分拣、破碎等额外流程的碳排放;

构件制造环节,针对装配式建筑,涵盖预制构件在工厂的加工成型、模具制作、养护等过程的能源消耗与碳排放;运输流通环节,包括建材从生产厂、预制构件从加工厂到施工现场的公路、铁路等运输过程的碳排放;现场装配环节,包括构件吊装、连接、灌浆等施工现场作业,以及施工机械的能源消耗碳排放。系统边界不包括建筑运营阶段、维护及拆除阶段的碳排放,同时扣除固碳建材、再生材料回收利用等产生的负碳量。功能单位选取“单位建筑面积(m^2)”,确保不同建筑项目、不同方案之间的可比性。

2.2 碳足迹评价指标体系

基于评价目标与系统边界,构建多层次碳足迹评价指标体系,一级指标为物化阶段总碳足迹、减排潜力指标;二级指标包括材料生产碳排放、构件制造碳排放、运输流通碳排放、现场装配碳排放及材料替代减排率、工艺优化减排率、能源结构优化减排率;三级指标细化至混凝土生产碳排放、钢筋生产碳排放、吊装设备能耗碳排放等具体工序。

2.3 碳排放量量化计算方法

采用“活动数据×排放因子”的核心计算方法,累加各环节碳排放量得到物化阶段总碳足迹,公式如下:

$$\text{总碳排放量}(E_{\text{总}}) = E_{\text{材料}} + E_{\text{制造}} + E_{\text{运输}} + E_{\text{装配}} - E_{\text{负碳}}$$

其中, $E_{\text{材料}}$ 为材料生产环节碳排放量, $E_{\text{制造}}$ 为构件制造环节碳排放量, $E_{\text{运输}}$ 为运输流通环节碳排放量, $E_{\text{装配}}$ 为现场装配环节碳排放量, $E_{\text{负碳}}$ 为固碳建材、再生材料回收等产生的负碳量。

各环节计算方法如下: $E_{\text{材料}} = \sum(\text{材料用量}M_i \times \text{材料生产排放因子}F_i) + \text{再生材料加工能耗} \times \text{能源排放因子}$,普通混凝土与全再生粗骨料混凝土需区分核算; $E_{\text{制造}} = \text{生产能耗碳排放} + \text{模具摊销碳排放} + \text{养护碳排放}$,钢模重复使用次数取50~100次,工厂集中养护较现场降低15%能耗; $E_{\text{运输}} = \sum(\text{运输重量}W_i \times \text{运输距离}D_i \times \text{运输工具排放因子}F_i)$,推荐运输半径 $\leq 100\text{km}$; $E_{\text{装配}} = \text{吊装设备能耗碳排放} + \text{辅助作业碳排放}$; $E_{\text{负碳}} = \text{固碳建材固碳量} + \text{再生材料回收减排量}$,如全再生粗骨料混凝土可抵消废弃混凝土填埋碳排放 $5.37\text{kgCO}_2e/t$ 。

3 案例分析

选取河北省某总建筑面积 28000m^2 的星级酒店项目作为研究案例,项目地上12层、地下2层,分别采用预制率50%的装配式建造(PC)与传统现浇建造(CC)两种方案对比分析。装配式方案预制构件包括预制梁、预制板、预制楼梯等,构件加工厂距施工现场 85km ,材料供应商距施工现场平均距离 60km 。

数据收集涵盖两种方案的建材用量、能耗数据等,排放因子采用国标推荐值结合浙江省区域电网参数调整。计算结果显示:装配式方案总碳排放量 11816tCO_2e ,单位面积 $422\text{kgCO}_2e/m^2$;传统现浇方案总碳排放量 12286.4tCO_2e ,单位面积 $438.8\text{kgCO}_2e/m^2$,装配式方案减排率达3.83%。

结果分析表明,两种方案均呈现“材料生产主导、其他环节辅助”的碳排放特征,材料生产环节碳排放占总排放量的70%以

上,是核心排放源;现场装配环节装配式方案减排率达42.86%,是减排效益最显著的环节;运输流通环节因构件运输增加,装配式方案碳排放略有上升,可通过优化运输路线、采用铁路运输改善;装配式方案再生材料使用比例更高,负碳量较传统方案增加184.8tCO₂e。关键减排节点为混凝土与钢筋生产、施工机械能耗、构件运输距离。

4 结论与展望

本文基于生命周期评价(LCA)方法,结合现行标准与工程实践,构建了涵盖“边界界定-清单构建-量化计算-结果评价”的建筑工程物化阶段碳足迹评价体系,明确了各环节核算方法与关键参数,并通过案例验证了体系的科学性与实用性。研究表明,物化阶段材料生产环节是核心排放源,现场装配环节是最大减排潜力环节;装配式建造方案较传统现浇方案具有显著低碳优势,单位面积碳排放可降低3.83%以上。

未来研究可从四方面深化:细化新型低碳材料排放因子研究,建立更精准的数据库;拓展评价范围,将碳足迹评价与建筑全生命周期结合;结合AI大模型、数字孪生技术,开发智能化评价与减排优化系统;推动国际合作,建立国际化评价标准,助力全球建筑行业低碳转型。

[基金课题]

河北省教育厅科学研究项目资助,ZC2025137。

[参考文献]

- [1]中国工程建设标准化协会.建筑工程低碳建造与评价标准[S].2025.
- [2]住房和城乡建设部.建筑碳排放计算标准(GB/T51366-2019)[S].2019.
- [3]杨宏宇.基于BIM技术的装配式建筑全生命周期碳排放核算研究[D].北京:工程管理专业硕士学位论文,2025.
- [4]国家发展改革委,住房和城乡建设部.加快推动建筑领域节能降碳工作方案[Z].国办函〔2024〕20号,2024.
- [5]李丽.浅析装配式建筑结构物化阶段的碳排放计算[J].建筑节能,2025.

作者简介:

王秀红(1975--),女,汉族,山西晋中人,研究生,教授,研究方向或从事工作:建筑施工技术/工程管理。

高永强(1978--),男,汉族,河南许昌人,研究生,高级工程师,研究方向或从事工作:工程管理。

张攀云(1986--),男,汉族,河北石家庄人,研究生,副教授,研究方向或从事工作:建设法规/项目管理。

刘璐(1996--),女,汉族,河北石家庄人,本科,讲师,研究方向或从事工作:工程管理。