

材料导报

Materials Reports

ISSN 1005-023X, CN 50-1078/TB

《材料导报》网络首发论文

题目： 基于 LCA 理论的装配式高延性再生微粉混凝土结构碳排放研究
作者： 于晓涵, 李秀领, 马锐, 孙昊东, 苏振鹏
网络首发日期： 2023-12-12
引用格式： 于晓涵, 李秀领, 马锐, 孙昊东, 苏振鹏. 基于 LCA 理论的装配式高延性再生微粉混凝土结构碳排放研究[J/OL]. 材料导报, <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20231211.1002.008>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 LCA 理论的装配式高延性再生微粉混凝土结构碳排放研究

于晓涵^{1,2}, 李秀领^{1,2}, 马锐^{1,2}, 孙昊东^{1,2}, 苏振鹏^{1,2}

1 山东建筑大学土木工程学院, 济南 250101

2 山东建筑大学建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 济南 250101

装配式建筑碳排放与新型绿色建材环境影响评估是研究建筑业减碳路径重要方面。本文基于全生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 理论构建了含再生循环过程的装配式建筑碳排放计算模型, 提出了符合绿色建材生产方式的环境影响评估公式, 并运用排放因子法定量计算了高延性再生微粉混凝土 (High Ductility Recycled Powder Concrete, HDRPC) 结构物化阶段碳排放以及相较于 C30 混凝土结构全生命周期减碳量。经计算得出 1 m³HDRPC 与 C30 混凝土碳排放强度分别为 0.104 kgCO₂e/(MPa·年)和 0.193 kgCO₂e/(MPa·年), 证明了应用 HDRPC 相较于 C30 混凝土将带来更好的环境效益; 当 HDRPC 回收率取零时, 基于核算案例的 HDRPC 结构仍可比 C30 混凝土结构节约 31.86 kgCO₂e。

关键词 装配式建筑 高延性再生微粉混凝土 (HDRPC) 碳排放 全生命周期评价 (LCA)

通信作者: 李秀领, dlutiem@163.com

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A

引用格式: 于晓涵, 李秀领, 马锐, 孙昊东, 苏振鹏, 基于 LCA 理论的装配式高延性再生微粉混凝土结构碳排放研究[J].材料导报, 2024, 38(23): 23070172

Study on Carbon Emission of Assembled High Ductility Recycled Powder Concrete Structure Based on LCA Theory

YU Xiaohan^{1,2}, LI Xiuling^{1,2}, MA Rui^{1,2}, SUN Haodong^{1,2}, SU Zhenpeng^{1,2}

1 School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

2 Key Laboratory of Building Structure Reinforcement and Underground Space Engineering, Ministry of Education, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

The carbon emission of prefabricated buildings and the environmental impact assessment of new green building materials are important aspects of studying the carbon reduction path of the construction industry. Based on the Life Cycle Assessment (LCA) theory, this paper constructs a carbon emission calculation model of prefabricated building with regeneration cycle process, and puts forward an environmental impact assessment formula in line with the production mode of green building materials. The emission factor method is used to quantitatively calculate the carbon emission of High Ductility Recycled Powder Concrete (HDRPC) structure in the materialization stage and the carbon reduction in the whole life cycle of C30 concrete structure. It is calculated that the carbon emission intensity of 1 m³ HDRPC and C30 concrete is 0.104 kgCO₂e/(MPa·year) and 0.193

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52278507); 山东省自然科学基金 (ZR2020ME245); 山东省重点研发计划 (重大科技创新工程) (2021CXGC011204)。

This work was financially supported by the General Projects of National Natural Science Foundation of China (52278507) and Shandong Natural Science Foundation (ZR2020ME245) and Key R & D Program of Shandong Province (Major Science and Technology Innovation Project) (2021CXGC011204).

kgCO₂e/(MPa·year), respectively, which proves that the application of HDRPC will bring better environmental benefits than C30 concrete. When the HDRPC recovery rate is zero, the HDRPC structure based on the accounting case can still save 31.86 kgCO₂e compared with the C30 concrete structure.

Keywords: prefabricated building, high ductility recycled powder concrete (HDRPC), carbon emissions, life cycle assessment (LCA)

0 引言

近年来, 全球变暖引起了国内外各界的广泛关注, 成为目前亟待解决的问题之一。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告指出, 2019 年全球建筑温室气体排放量为 12 GtCO₂e, 占全球温室气体排放的 21%。因此, 降低建筑业的碳排放成为实现低碳发展的必然选择。工业化建筑是指构件工厂化生产、现场机械化装配的现代化结构建造方式, 这种建造方式不仅具备工期短、节约劳动力、施工质量高、绿色环保等优点^[1], 并且相较于传统建造方式其能耗降低 20%~30%、材料损耗约减少 60%、建筑垃圾减少 83%^[2]。我国高度重视工业化建筑于 2016-2022 年间陆续出台了《关于大力发展装配式建筑的指导意见》、《装配式混凝土建筑技术体系发展指南 (居住建筑)》和《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》等发展政策和指导意见, 鼓励并支持发展装配式建筑。

全生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是指用于评估系统或产品在其整个生命周期内环境影响的调查方法^[3], 将其应用于装配式建筑碳排放研究, 不仅能对建筑碳排放过程进行定量分析, 还能保证研究过程的完整性。在这样的背景下, 不少学者开始从事基于 LCA 理论的装配式建筑碳排放研究。文献[4-7]分别基于 LCA 理论从不同层面构建了装配式建筑碳排放核算模型, 并基于核算模型定量计算了不同案例项目的碳排放量。通过对比发现装配式建筑各阶段碳排放的计算思路主要有三种: 一是基于材料-构件-组件-模块四个层面计算碳排放^[4], 二是基于人、材料、机械三个层面计算碳排放^[5,6], 三是基于不同能耗层面计算碳排放^[7]。三种计算思路在现有的装配式建筑碳排放核算体系中具有代表性, 但并未考虑装配式建筑碳排放的研究还应适应低碳发展要求下的建筑固废利用和新材料、新构件、新结构的转变。

据统计, 中国每年约产生 16 亿吨建筑垃圾, 其中大部分为废弃混凝土^[8]。再生微粉作为废弃混凝土回收利用过程中的另一项资源化产品, 约占其质量的 20%^[9]。但是, 目前装配式建筑碳排放研究中并未重视再生微粉资源化利用所带来的减排潜力。本课题组研发高延性再生微粉混凝土 (High Ductility Recycled Powder Concrete, HDRPC), 用再生微粉和粉煤灰部分取代水泥, 能够降低高碳排水泥用量; 同时在混凝土中加入纤维, 能够改善基体的强度和韧性, 达到延长材料使用寿命的目的。基于以上背景, 本文首先从材料、构件、结构三个层面来构建全生命周期评价下的装配式建筑碳排放核算模型; 其次考虑材料再生循环过程, 计算再生微粉、HDRPC 的碳排放因子和 HDRPC、C30 混凝土的碳排放强度; 最后应用所建核算模型定量计算装配式 HDRPC 结构物化阶段碳排放量和相较 C30 混凝土结构全生命周期的减碳量, 并提出减排建议。

1 全生命周期评价体系

ISO 14040 生命周期评价系列国际标准将生命周期评价划分为四个步骤：确定目标和范围、清单分析、影响评价和结果解释。本文根据上述四个步骤进行装配式建筑全生命周期评价体系的构建。

1.1 确定目标和范围

本文 LCA 目标为计算装配式 HDRPC 结构从最初材料生产和回收到最后结构拆除和运输全生命周期碳排放，并计算 HDRPC 结构相较 C30 混凝土结构全生命周期减碳量。将装配式建筑全生命周期划分为三层九阶段：三层包括材料层面、构件层面、结构层面，九阶段包括建材生产、废弃建材二次加工、建材运输、构件生产、构件运输、构件装配与施工、结构运营、结构维护、结构拆除与运输。装配式建筑全生命周期各阶段流程图如图 1 所示。

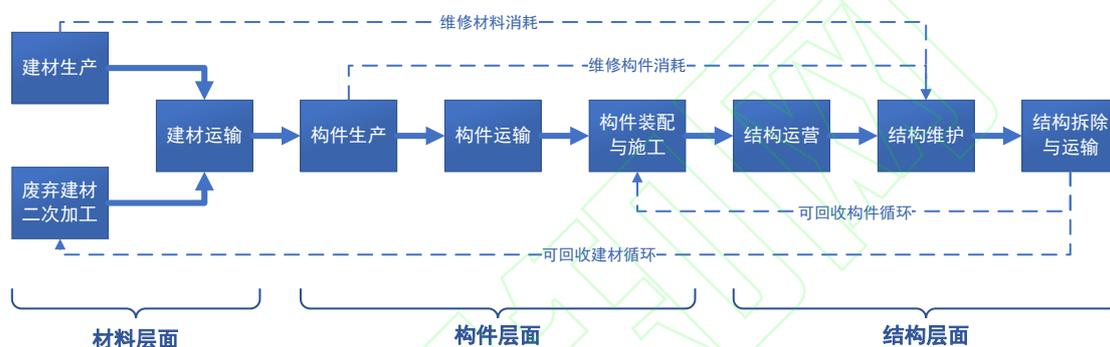


图 1 装配式建筑全生命周期流程图

Fig.1 The whole life cycle flow chart of prefabricated building

装配式建筑全生命周期碳排放系统边界确定如下：本文所建核算模型计入可回收建材^[10]和可再生能源^[11-12]减碳量。其中，可回收建材减碳量计入本轮生命周期，回收建材再加工碳排放计入下一轮生命周期。构件层面核算模型考虑构件回收再利用^[13]减碳量。其中，构件装配与施工阶段中，各种机械、构件产生的运输碳排放计入构件装配与施工阶段碳排放。根据 IPCC 第六次评估报告指出，全球城市树木每年封存约 2.17 亿吨碳；与此同时，土地利用、土地利用变化及森林（LULUCF）在 2010-2019 年期间约占全球人为温室气体排放总量的 7%-10%。因此结构层面核算模型考虑绿地碳汇系统减碳量和土地利用变化的碳排放。最终确定装配式建筑各层面系统边界如图 2 所示。

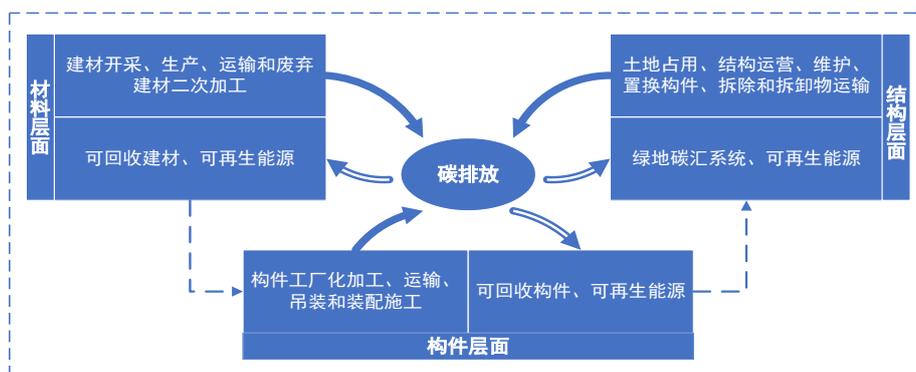


图 2 装配式建筑全生命周期系统边界

Fig.2 The whole life cycle system boundary of prefabricated building

1.2 清单分析

本文选择基于过程的清单分析, 在系统边界内以过程为单位进行数据收集。首先统计每个过程的活动数据, 建立数据清单, 其中生产设备耗电量采用功率法进行统计, 对于建材运输距离取样离散性较大, 个例项目不存在普适性, 取用建筑碳排放计算标准 (GB/T 51366-2019) 中规定的混凝土默认运输距离 40 km, 其他建材默认运输距离 500 km; 其次获取相应的碳排放因子, 再生微粉碳排放因子通过统计废弃建材运输和二次加工设备耗能碳排放数据获得, HDRPC 材料的碳排放因子通过排放因子法计算得到; 最后运用排放因子法进行结构碳排放量的计算。

1.3 影响评价和结果解释

基于生命周期清单, 对比全生命周期下不同材料所产生的环境影响差异, 以 1 m^3 不同材料单位使用寿命单位标准立方体抗压强度下的碳排放量作为功能单位进行比较。此外, 对装配式结构碳排放计算结果进行分析。首先, 对不同阶段进行纵向对比, 根据结果选取碳排放量较多、碳排放强度较大阶段分析碳排放来源, 提出减碳建议; 其次, 对不同层面进行横向对比, 分析不同材料、构件、结构的碳排放差异。

2 装配式建筑碳排放核算模型

本文选择排放因子法进行碳排放计算, 碳排放量按照二氧化碳当量进行定量计算。将装配式建筑全生命周期划分为三层九阶段, 三层碳排放之和即为全生命周期碳排放总量, 计算见公式(1)。

$$A = A_M + A_C + A_S \quad (1)$$

式中: A 为装配式建筑全生命周期碳排放量, kgCO_2e ; A_M 、 A_C 、 A_S 分别为装配式建筑材料层面、构件层面、结构层面碳排放量, kgCO_2e 。

2.1 材料层面

材料层面碳排放计算见公式(2)。建材生产阶段计入主要建材生产碳排放, 见公式(3)。废弃建材二次加工阶段计入废弃建材加工所用生产设备消耗不可再生能源产生的碳排放和可回收建材的减碳量, 见公式(4)。其中, 生产和维修机械设备碳排放因平摊使用期后可忽略, 故不再计入碳排放计算。建材运输阶段计入空载返回、材料运输量和运距因素影响下的碳排放量, 见公式(5)。需说明预制构件所需材料运至构件生产工厂, 现浇部分所需材料运至施工现场。

$$A_M = A_{P,M} + A_{T,M} + A_{R,M} \quad (2)$$

$$A_{P,M} = \sum_i M_i F_i \quad (3)$$

$$A_{R,M} = \sum_e a_e E_e E F_e - \sum_i C_i \quad (4)$$

$$A_{T,M} = \sum_i b M_i D_i T_i \quad (5)$$

式中: $A_{P,M}$ 、 $A_{R,M}$ 、 $A_{T,M}$ 分别为建材生产、废弃建材二次加工、建材运输阶段碳排放量, kgCO_2e ; M_i 为第 i 类建材的用量, t ; F_i 为第 i 类建材的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{t}$; a_e 为第 e 种不可再生能源占比; E_e 为第 e 种能源用量, kWh 或 kg ; EF_e 为第 e 种能源的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$ 或 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$; C_i 为第 i 类建材回收的碳排放量, kgCO_2e ; b 为空载返回系数, 铁路、船舶和飞机取 1, 卡车、货车取 1.67; D_i 为第 i 种建材平均运输距离, km ; T_i 为第 i 种建材的运输方式下, 单位质量单位运输距离的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$ 。

2.2 构件层面

构件层面碳排放计算见公式 (6)。构件生产阶段计入构件生产所需生产设备消耗的不可再生能源的碳排放, 见公式 (7)。构件运输阶段计入构件水平运输与装卸过程垂直运输的碳排放, 见公式 (8)。其中, 水平运输计入空载返回、构件数量、单个构件体积和运距因素影响下的碳排放量, 垂直运输计入所需吊装机械碳排放。构件装配与施工阶段中预制构件装配计入构件吊装机械、装配连接机械和工人碳排放, 局部现浇部分计入材料、施工机械、工人、用水碳排放和构件回收减碳量, 见公式 (9)。

$$A_C = A_{P,C} + A_{T,C} + A_{A,C} \quad (6)$$

$$A_{P,C} = \sum_e a_e E_e EF_e \quad (7)$$

$$A_{T,C} = \sum_j b N_j V_j D_j T_j + \sum_k L_k EF_k \quad (8)$$

$$A_{A,C} = \sum_k L_k EF_k + \sum_i M_i F_i + E_w EF_w + Rf - \sum_j N_j G_j \quad (9)$$

式中: $A_{P,C}$ 、 $A_{T,C}$ 、 $A_{A,C}$ 分别为构件生产、构件运输、构件装配与施工阶段碳排放量, kgCO_2e ; N_j 为第 j 类构件的数量, 个; V_j 为第 j 类构件的体积, m^3 ; D_j 为第 j 种构件平均运输距离, km ; T_j 为第 j 种构件的运输方式下, 单位体积单位运输距离的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{m}^3\cdot\text{km})$; L_k 为第 k 种机械的运行数量, 台班; EF_k 、 EF_w 分别为第 k 种机械、水的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{台班}$ 、 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{t}$; E_w 为施工阶段水资源用量, t ; R 为所需人工工日, 工日; f 为工人的平均碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{工日}$; G_j 为回收单个 j 类构件的碳排放量, kgCO_2e 。

2.3 结构层面

结构层面碳排放计算见公式 (10)。结构运营阶段计入各类家用设备消耗不可再生能源的碳排放、土地性质转化引起的碳排放和建筑绿地碳汇系统减碳量, 见公式 (11)。结构维护阶段计入局部材料修复、更换构件和工人产生的碳排放, 见公式 (12)。结构拆除阶段计入吊装机械、拆除机械和工人碳排放以及废弃材料、构件运输碳排放, 见式 (13)。

$$A_S = A_{O,S} + A_{M,S} + A_{D,S} \quad (10)$$

$$A_{O,S} = \sum_e a_e E_e EF_e + F_{L,A} - eF_P A_P \quad (11)$$

$$A_{M,S} = A_{P,M} + A_{P,C} + Rf \quad (12)$$

$$A_{D,S} = \sum_k L_k E F_k + R f + A_{T,M} + A_{T,C} \quad (13)$$

式中： $A_{O,S}$ 、 $A_{M,S}$ 、 $A_{D,S}$ 分别为结构运营、结构维护、结构拆除与运输阶段碳排放量， kgCO_2e ； F_L 为土地性质转换碳排放因子， $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ ； A 为建筑面积， m^2 ； e 为植被覆盖率； F_p 为绿地碳汇因子， $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ ； A_p 为建筑绿地面积， m^2 。

2.4 HDRPC 结构与普通混凝土结构的对比

装配式 HDRPC 结构相较装配式普通混凝土结构减碳量定义为 Δ ，包括材料层面减碳量和结构层面减碳量，见公式 (14)。材料层面减碳量包括 HDRPC 原材料减碳量、废弃建材二次加工阶段生产设备碳排放和建材运输阶段减碳量，见公式 (15)。结构层面减碳量计入 HDRPC 结构维修次数减少带来的减碳量，见公式 (16)。

$$\Delta = \Delta_M + \Delta_S \quad (14)$$

$$\Delta_M = \sum_i M_i' F_i - \sum_e a_e E_e E F_e - \sum_i C_i' + \sum_i b M_i' D_i T_i \quad (15)$$

$$\Delta_S = \Delta_{P,M} + \Delta_{P,C} + R' f \quad (16)$$

式中： Δ_M 、 Δ_S 分别为材料层面、结构层面减碳量， kgCO_2e ； M_i' 为 HDRPC 结构相较普通混凝土结构第 i 类建材的用量差值， t ； C_i' 为 HDRPC 结构相较普通混凝土结构第 i 类回收建材的碳排放差值， kgCO_2e ； $\Delta_{P,M}$ 、 $\Delta_{P,C}$ 分别为 HDRPC 结构相较普通混凝土结构维修阶段使用建材、更换构件碳排放差值， kgCO_2e ； R' 为 HDRPC 结构相较普通混凝土结构维修阶段所需工人工日差值，工日。

3 高延性再生微粉混凝土

HDRPC 是在工程水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composites, ECC) 基础上，用再生微粉部分取代水泥制成的具有高延性、高耗能特点的新型绿色混凝土材料。该材料通过使用再生微粉和粉煤灰不仅能减轻我国建筑固废存量，而且能降低高碳排水泥材料的用量。与此同时，HDRPC 高延性、高耗能特点使其能应用于结构受力复杂部位以改善结构受力性能，延长结构的使用寿命，进一步达到降低碳排放的效果。本文 HDRPC 碳排放研究采用 Song 等^[14]通过正交试验得出的优化 HDRPC 配合比，见表 1。

表 1 HDRPC 配合比

Table 1 Mix proportion of HDRPC

w/b	s/b	PVA 纤维掺量 (%)	玄武岩纤维体积掺量 (%)	玄武岩纤维长径比	RCP 取代率 (%)	减水剂掺量 (%)
0.28	0.4	1.7	0.1	1059	45	0.2

3.1 HDRPC 碳排放因子的确定

HDRPC 碳排放因子计算需要综合各类原材料获取和生产过程碳排放。粉煤灰是燃煤发电产生的固体废物，可忽略上游碳排放，但仍需计算收集、储藏和运输等过程的碳排放。石英砂、水、水泥用量较大，但三者碳排放因子研究目前较成熟，可直接从现有标准和数据库中取用。PVA 纤维、玄武岩纤维 (BF) 用量较少，两者碳排放因子从现有文献^[15]中取用。高效减水剂的生产碳排放略低于水泥^[16]，虽用量最小，但仍不可忽略。再生微粉作为建筑垃圾资源化利用过程中产生的粒径小于 75 μm 的颗粒^[17]，有两种获取方式：一是收集再生骨料制备过程中伴随产生的再生微粉，该过程再生微粉碳排放较小，约为 4 kgCO₂/t^[15]，这种方式收集到的再生微粉数量有限；二是通过机械加工制备获得，再生微粉在现场由废弃混凝土经过破碎、筛分、烘干、球磨等工艺制备而成，可以实现回收粉的全利用，制备 1 t 再生微粉生产设备碳排放见图 3。

本结构所用再生微粉原料来自济南某建筑工地建造与拆除过程中产生的废弃混凝土，其碳排放因子计算忽略上游碳排放，仅计算废弃混凝土运输和二次加工产生的碳排放。由于本案例废弃混凝土运输距离较短不存在普适性，取用 Luo 等^[18]统计所得平均值 50 km 进行再生微粉碳排放因子的计算。基于实际获取数据计算结果得出采用电热鼓风干燥箱和工业微波炉^[19]进行烘干的再生微粉碳排放因子分别为 1604 kgCO₂e/t 和 440 kgCO₂e/t。由于再生微粉有两种获取方式，会造成 HDRPC 碳排放因子存在较大差异，同时第二种获取方式中选用工业微波炉替换电热鼓风干燥箱更为低碳，得出不同因素影响下的 HDRPC 碳排放因子，如表 2 所示。虽然 HDRPC 中再生微粉取代水泥采用了 45% 的高取代率，但本文仅用于结构抗震关键部位，用量较少，由第一种获取方式能够满足用量要求。因此，本文中再生微粉碳排放因子取用 4 kgCO₂e/t，相应计算得出 HDRPC 材料碳排放因子为 145 kgCO₂e/t。

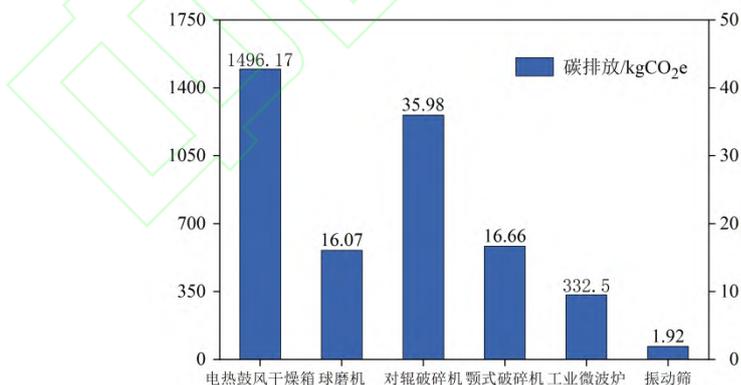


图 3 再生微粉生产设备碳排放

Fig.3 Carbon emissions of equipment for producing recycled fine powder

表 2 HDRPC 碳排放因子取用表 (kgCO₂e/t)

Table 2 Carbon emission factor table of HDRPC (kgCO₂e/t)

再生微粉获取方式	生产设备	再生微粉碳排放因子	HDRPC 碳排放因子
----------	------	-----------	-------------

间接获取	-	4	145
直接制备	电热恒温鼓风干燥箱	1604	314
	工业微波炉	440	187

3.2 HDRPC 与 C30 混凝土环境影响评估

本文提出了符合绿色建材生产方式的环境影响评估公式 (17), 选取单位使用寿命单位标准立方体抗压强度下, 1 m³ 材料碳排放为功能单位进行环境影响评估。由于 HDRPC 中再生微粉取代率为 45% 时, 水泥掺量减少会导致基体力学性能下降, 故由 C50 废弃混凝土制备得到的 HDRPC 抗压强度近似等同于 C30 混凝土。对比 C30 混凝土和 HDRPC 碳排放, C30 混凝土配合比如表 3 所示, 1 m³ C30 混凝土和 HDRPC 的碳排放分别为 295 kgCO_{2e} 和 279 kgCO_{2e}。对比 C30 混凝土和 HDRPC 力学性能, 通过抗压强度试验测得 C30 混凝土和 HDRPC 标准立方体抗压强度分别为 38.3 MPa 和 33.7 MPa。此外, 经试验测得 HDRPC 抗拉强度为 4.1 MPa, 改善了传统混凝土抗拉强度低和开裂后裂缝宽度难以控制等缺陷, 故而 HDRPC 维修次数约为 C30 混凝土维修次数的一半^[20]。C30 混凝土使用寿命取用 40 年, 根据公式 (17) 计算 1 m³ C30 混凝土与 HDRPC 碳排放强度分别为 0.193 kgCO_{2e}/(MPa·年) 和 0.104 kgCO_{2e}/(MPa·年)。综上所述, 应用 HDRPC 相较于应用 C30 混凝土将带来更好的环境效益。

$$A_i = (\sum_i M_i F_i + \sum_e a_e E_e E F_e) / (f_{cu,k} \cdot y) \quad (17)$$

式中: A_i 指材料碳排放强度, kgCO_{2e}/(MPa·年); $f_{cu,k}$ 指材料标准立方体抗压强度, MPa; y 指材料的使用寿命, 年。

表 3 C30 混凝土配合比 (kg/m³)

Table 3 Mix proportion of C30 concrete (kg/m³)

水泥	河砂	石子	水	减水剂
440	700	1050	181.7	3.85

4 HDRPC 结构全生命周期碳排放计算与分析

4.1 HDRPC 结构介绍

本文核算案例为一榀装配式 1:2 缩尺的两层两跨框架结构, 装配方式为套筒连接, 预制率为 33%。其中在结构抗震关键部位 (节点核心区、柱底、梁端) 用 HDRPC 材料浇筑, 其他部位浇筑 C30 混凝土。柱截面尺寸为 200 mm×200 mm, 柱高 1 500 mm, 梁截面尺寸为 200 mm×160 mm, 梁长 1 300 mm, 柱保护层厚度取 25 mm, 梁和基础保护层厚度取 20 mm。

4.2 碳排放因子和材料回收系数的确定

本文碳排放因子优先选择基于实际数据计算结果,其次为取用建筑碳排放计算标准(GB/T 51366-2019)、碳排放因子数据库和论文期刊研究成果。具体碳排放因子取用见表 4。据实际统计数据所得,用废弃混凝土制备再生微粉产出率约为 75%,故混凝土回收系数取 0.75。钢筋回收系数取 0.4^[24]。HDRPC 材料回收系数需做进一步研究,本文不对 HDRPC 材料进行回收考虑,因此回收系数取零。

表 4 碳排放因子取用表^{[15-16][21-23]}

Table 4 The table of carbon emission factors^{[15-16][21-23]}

名称	单位	碳排放因子	名称	单位	碳排放因子
现浇 C30	kgCO ₂ e/m ³	295	高效减水剂	kgCO ₂ e/t	720
预制 C30	kgCO ₂ e/m ³	270	柴油	kgCO ₂ e/t	3 160.5
普通水泥	kgCO ₂ e/t	735	电	kgCO ₂ e/(kWh)	0.581
再生微粉	kgCO ₂ e/t	4	吹风机	kgCO ₂ e/台班	4.06
石英砂	kgCO ₂ e/t	3.574	钢筋弯曲机	kgCO ₂ e/台班	7.44
粉煤灰	kgCO ₂ e/t	8	钢筋切断机	kgCO ₂ e/台班	18.65
HDRPC	kgCO ₂ e/t	145	轮胎式装载机	kgCO ₂ e/台班	185.68
水	kgCO ₂ e/t	0.168	涡桨式混凝土搅拌机	kgCO ₂ e/台班	19.81
钢材	kgCO ₂ /t	1 970	轻型汽油货车运输(载重 2t)	kg CO ₂ e/(t km)	0.334
BF	kgCO ₂ /t	3 400	人工	kgCO ₂ e/工日	6.61
PVA 纤维	kgCO ₂ /t	3 400			

4.3 材料层面碳排放计算与分析

由 2.1 节提出的材料层面核算模型,对核算案例材料层面碳排放进行计算。HDRPC 结构材料层面数据明细如表 5 所示。从各阶段来看,建材生产阶段钢材、现浇 C30 混凝土和 HDRPC 的碳排放分别占全部建材碳排放的 65.13%、26.69%和 6.42%,其用量分别占材料总用量的 11.10%、68.93%和 15.02%。由此可见,现浇 C30 混凝土和 HDRPC 相较于钢材而言单位材料生产碳排放更低,属于低碳建筑材料。建材运输阶段钢材、现浇 C30 混凝土、HDRPC 和预制 C30 混凝土运输碳排放占比分别为 61%、30%、7%和 2%。这可由上文公式(5)进行解释,即运输碳排放与材料质量成正比。废弃建材二次加工阶段包括两种 HDRPC 原材料的二次加工,即粉煤灰和再生微粉,其碳排放分别为 1.81 kgCO₂e 和 0.27 kgCO₂e。

从材料层面来看,如表 6 所示建材生产阶段碳排放占绝对比重,废弃建材二次加工阶段由于回收建材使得该阶段产生负碳值。由此可见,应重点降低建材生产阶段碳排放,提出如下三个方面减碳措施:第一,就材料本身而言,首先可提高建材的使用效率,如混凝土材料承载力提高,相同承载力要求下材料单位用量降低,进而达到降碳目的;其次可降低高碳排放建材的用量,就我国而言,建筑固废存量,用建筑固废

材料替代高碳排水泥可达到降低混凝土碳排放的效果；最后可以发掘新型绿色低碳材料，如 HDRPC 有效利用建筑固废，用于结构关键部位，可以减少建筑物维修次数，进而达到减碳目的。第二，就材料生产过程而言，首先选择低碳高效的生产工艺，比如生产钢材碳排放较大，可在生产过程中推广使用电弧炉低碳冶炼技术来达到降低碳排放的目的；其次，生产过程中优先选择低碳可再生能源。第三，重视建材分类回收，高效循环利用。

表 5 HDRPC 结构材料层面数据明细

Table 5 Data details of HDRPC structure at the material level

名称	HDRPC 材料									现浇 C30 混凝土	预制 C30 混凝土	钢材
	普通水泥	粉煤灰	石英砂	自来水	PVA 纤维	BF	高效减水剂	再生微粉				
数量/kg	82.97	226.29	150.86	105.60	7.04	0.84	0.38	67.89		2 945.28	211.46	474.47
比例/%	1.94	5.30	3.53	2.47	0.16	0.02	0.01	1.59		68.93	4.95	11.10
碳排放/kgCO ₂ e	88.61									368.16	24.19	898.27
回收系数	0									0.75	0.75	0.4
运输距离/km	40									40	40	500

表 6 HDRPC 结构材料层面碳排放

Table 6 The carbon emission of HDRPC structure at the material level

	建材生产	建材运输	废弃建材二次加工
碳排放/kgCO ₂ e	1 379.23	211.9	-651.49
比例/%	146	23	-69

4.4 构件层面碳排放计算与分析

由 2.2 节提出的构件层面核算模型，对核算案例构件层面碳排放进行计算。分阶段来看，构件生产阶段中预制构件工厂化生产能耗数据取用某预制构件厂统计数据^[25]，本案例中预制梁能源消耗量见表 7，其中用电产生碳排放占绝对比重，其他能源碳排放合计仅占 19.5%，降低电能碳排放可通过提高绿电比例、降低火电使用比例来达到减碳目的。构件运输阶段采用轻型汽油货车运输，构件运输取实际值 50 km 进行计算，具体参数见表 8，其中运输和吊装碳排放分别占该阶段碳排放的 74%和 26%，降低运输碳排放可通过车辆电气化、使用可持续燃料、提高能源效率等手段促进运输车辆脱碳。构件装配与施工阶段中现浇部分材料损耗量取用现浇所用建材的 2%进行计算，构件回收取用降低构件生产阶段碳排放的 20%^[13]，碳排放如表 9 所示，机械、人工和材料损耗碳排放分别占该阶段碳排放的 64%、20%和 16%。

从构件层面来看，如表 10 所示构件装配与施工阶段碳排放在构件层面总碳排放中占绝对比重，这是由于传统现浇建筑较装配式建筑施工阶段单位面积碳排放增加 20.06 kgCO₂e^[26]，本案例预制率较低故而在该阶段造成更多的碳排放。构件生产阶段碳排放在构件层面占比最小，也侧面说明了将构件生产由现场转移

至工厂可以提高生产效率, 减少能源消耗, 进而降低生产过程碳排放。构件层面降碳重点为构件装配与施工阶段, 提出如下三个方面减碳措施: 第一, 适当提高结构预制率, 降低现浇部分占比, 将施工现场转移至工厂。第二, 简化构件装配与连接方式, 降低连接机械的使用台班。第三, 施工机械优选小功率、使用可再生能源的设备。除此之外, 就构件本身而言应提高使用效率, 如构件耐久性提高, 可延长建筑物的使用寿命, 达到降碳目的; 合理选材, 随预制混凝土强度等级增加, 原材料内含碳排放比例逐渐增加^[27], 故而构件中受力较小处可用低强度混凝土浇筑来降低构件整体碳排放; 重视构件分类回收所带来的减排潜力。

表 7 HDRPC 结构构件生产阶段能源消耗量

Table 7 Energy consumption of HDRPC structure during component production stage

	用电量/kWh	柴油量/kg	用水量/m ³	碳排放/kgCO ₂ e
预制梁	1.707	0.075	0.019	1.232
碳排放比例/%	80.5	19.2	0.3	100

表 8 HDRPC 结构构件运输阶段碳排放

Table 8 Carbon emissions of HDRPC structure during component transportation stage

运输量/m ³	轻型汽油货车运输					运输碳排放/kgCO ₂ e	吊装碳排放/kgCO ₂ e
	载重/t	车载次数	运输碳排放因子/kg CO ₂ e/(m ³ ·km)	单程运输距离/km	空车返回系数		
0.166 4	2	1	0.788	50	1.67	10.95	3.87

表 9 HDRPC 结构构件施工与装配阶段碳排放

Table 9 Carbon emissions of HDRPC structure during component construction and assembly stage

机械	台班	碳排放/kgCO ₂ e	类别	备注	碳排放/kgCO ₂ e
轮胎式装载机	0.625	116.05	人工	6 人	39.66
钢筋切断机	0.125	2.33	用水	4.37 m ³	0.73
钢筋弯曲机	0.188	1.39	构件回收	20%	-0.25
吹风机	0.313	1.27	材料损耗	2%	32.46
涡桨式混凝土搅拌机	0.375	7.43			

表 10 HDRPC 结构构件层面碳排放

Table 10 Carbon emissions of HDRPC structure at the component level

	构件生产阶段	构件运输阶段	构件装配与施工阶段
碳排放/kgCO ₂ e	1.232	14.82	201.07
比例/%	0.6	6.8	92.6

4.5 结构层面碳排放计算与分析

由 4.3 和 4.4 节计算可知, 该结构物化阶段碳排放量为 1 156.762 kgCO₂e, 其中材料层面和构件层面碳排放分别占物化阶段总碳排放的 81%和 19%, 即材料层面为结构物化阶段减排重点。汤煜等^[7]对装配式住

宅进行碳排放核算, 得出材料准备和建筑施工碳排放分别占建筑物化阶段碳排放的 92%和 8%, 本核算案例与其计算结果大致符合, 但由于本案例预制率较低, 施工过程现浇部分碳排放较大, 故构件装配与施工阶段碳排放有所增加。

由于该结构刚刚建成并未投入使用, 无法定量计算结构层面碳排放。因此, 结构层面仅对比该案例中装配式 HDRPC 结构相较装配式 C30 混凝土结构减碳量。选用相同结构, 其中 C30 混凝土结构的结构抗震关键部位浇筑 C30 混凝土。由于装配构件相同, 因此, 只需比较材料层面和结构维护阶段碳排放差异即可。在材料层面普通混凝土结构相比 HDRPC 结构碳增量如表 11 所示, 运用 HDRPC 比 C30 混凝土碳排放增加了 63.96 kgCO₂e。由于该计算并未计入 HDRPC 材料回收减碳量, 为更贴合实际, 预测不同 HDRPC 回收系数下, 该结构材料层面碳排放, 如图 4 所示。当 HDRPC 回收系数大于 0.705 时, 相较于 C30 混凝土结构材料层面更低碳。在结构维护阶段, 两个结构使用寿命均以 50 年考虑, HDRPC 和 C30 混凝土结构抗震关键部位基本维修次数分别为 0 次和 1 次^[15], 经计算得出 HDRPC 结构比 C30 混凝土结构节约了 95.82 kgCO₂e。综合全生命周期来看, 即便 HDRPC 材料回收率为零, 基于该案例的 HDRPC 结构仍比 C30 混凝土结构节约 31.86 kgCO₂e。

表 11 装配式 C30 混凝土结构材料层面碳排放及碳增量 (kgCO₂e)

Table 11 Carbon emissions and carbon increment of assembled C30 concrete structure at the material level (kgCO₂e)

	建材生产	建材运输	废弃建材二次加工
碳排放/kgCO ₂ e	1 386.44	214.68	-725.44
碳增量/kgCO ₂ e	7.21	2.78	-73.95

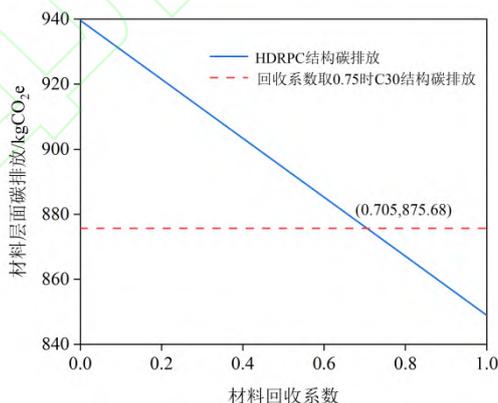


图 4 不同回收系数下 HDRPC 结构材料层面碳排放

Fig.4 Carbon emissions of HDRPC structure at the material level under different recovery coefficients

5 结论

本文基于 LCA 体系, 构建了含再生循环过程的装配式建筑碳排放核算模型以完善装配式建筑碳排放核

算方法; 并对 HDRPC 碳排放因子、碳排放强度和 HDRPC 结构碳排放进行了研究, 证明了 HDRPC 材料并将其应用于结构中的可推广性。主要结论如下:

(1) 将装配式建筑全生命周期划分为三层九阶段, 并构建了装配式建筑碳排放核算模型。定量计算了一榀 1:2 缩尺的 HDRPC 框架结构物化阶段的碳排放量为 1 156.762 kgCO_{2e}, 进行了该结构不同层面碳排放的横向对比和不同阶段碳排放的纵向对比, 提出了相应的减排建议。

(2) 进行了再生微粉技术与碳排放的交叉研究, 考虑材料再生循环过程的碳排放, 定量计算了不同获取方式和烘干设备下的再生微粉和 HDRPC 材料的碳排放因子。因该核算案例 HDRPC 材料用量较小, 所以取用再生微粉和 HDRPC 材料的碳排放因子分别为 4 kgCO_{2e}/t 和 145 kgCO_{2e}/t。

(3) 提出了符合绿色建材生产方式的环境影响评估公式, 并计算得出 1 m³HDRPC 材料与 C30 混凝土材料碳排放强度分别为 0.104 kgCO_{2e}/(MPa·年)和 0.193 kgCO_{2e}/(MPa·年), 从而证明应用 HDRPC 相较于应用 C30 混凝土将带来更好的环境效益。

(4) 提出了 HDRPC 结构相较普通混凝土结构减碳量计算公式。对于该核算结构, 从材料层面来看, 仅当 HDRPC 回收系数大于 0.705 时, HDRPC 结构相较于 C30 混凝土结构更低碳; 从结构维护阶段来看, HDRPC 结构比 C30 混凝土结构节约了 95.82 kgCO_{2e}; 从全生命周期来看, 即便 HDRPC 不进行回收, HDRPC 结构仍可比 C30 混凝土结构节约 31.86 kgCO_{2e}。

参考文献

- 1 Chang Y, Li X D, Masanet E, et al. *Resources Conservation and Recycling*, 2018, 139: 259.
- 2 China Real Estate Evaluation Center. *Research Report on Green Life Assessment of Low-carbon Real Estate*. China Real Estate Evaluation Center. Beijing, 2010 (in Chinese).
中国房地产评测中心. 低碳地产绿色生活测评研究报告. 中国房地产评测中心. 北京, 2010.
- 3 Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, et al. *Environment International*, 2004, 30(5): 701.
- 4 Wang Y. *Life-cycle carbon emission model of industrialized prefabricated buildings*, Nanjing Southeast University Press, China, 2017, pp. 79 (in Chinese).
王玉. 工业化预制装配建筑全生命周期碳排放模型, 南京东南大学出版社, 2017, pp. 79.
- 5 Liu G W, Mao C, Xu P P, et al. *List of main materials and parts of the whole industrial chain of industrialized buildings and manual for carbon emission measurement*, Chongqing University Press, China, 2020, pp. 11 (in Chinese).
刘贵文, 毛超, 徐鹏鹏等. 工业化建筑全产业链主要材料和部品清单及碳排放测算手册, 重庆大学出版社, 2020, pp. 11.
- 6 Wu G, Ou X X, Li D Z, et al. *Building carbon emissions calculation*, China Building Industry Press, China, 2022, pp. 240 (in Chinese).
吴刚, 欧晓星, 李德智等. 建筑碳排放计算, 中国建筑工业出版社, 2022, pp. 240.

- 7 Tang Y, Chen L. Research on life cycle carbon emissions of prefabricated high-rise residential buildings. In: The 17th Shenyang Science Annual Conference, Shenyang, 2020, pp. 1862 (in Chinese).
汤煜, 陈露. 装配式高层住宅建筑全生命周期碳排放研究. 第十七届沈阳科学学术年会, 沈阳, 2020, pp. 1862.
- 8 Xiao J Z. *Recycled Aggregate Concrete Structures*, 2018, 10. 1007/978-3-662-53987-3(Chapter 4): 65.
- 9 Tang Q, Ma Z M, Wu H X, et al. *Cement and Concrete Composites*, DOI:10. 1016/j. cemconcomp. 2020. 103807.
- 10 Thormark C. *Building and Environment*, 2012(37): 429.
- 11 Energy Research Institute, National Development and Reform Commission. China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study. Beijing, 2015 (in Chinese).
国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究. 北京, 2015.
- 12 Ma L M, Shi D, Pei Q B. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(02): 8 (in Chinese).
马丽梅, 史丹, 裴庆冰. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(02): 8.
- 13 Hong J, Shen G Q, Mao C, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112:2198.
- 14 Song S, Li X L, Wang Z, et al. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01546.
- 15 Li X L, Lv X R, Zhou X T, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129911.
- 16 Heede P V D, Belie N D. *Cement & Concrete Composites*, 2012, 34(4): 431.
- 17 Ma K L, Meng W Q, Shen J T, et al. *Materials Reports*, 2023, 38(10): 22100042 (in Chinese).
马昆林, 孟维琦, 申景涛等. *材料导报*, 2023, 38(10): 22100042.
- 18 Luo W J, Ma X C, Meng C Y, et al. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, 531: 012049.
- 19 Wu B, Li Y. patent, CN202210623496.2, 2022 (in Chinese).
吴波, 李彦. 专利, CN202210623496.2, 2022.
- 20 You D. *Construction and Building Materials*, 2018, 167(Apr.10): 414.
- 21 Gao C Y, Niu J G, Wang F R. *Contemporary Economic Management*, 2021, 43(08): 33 (in Chinese).
高春艳, 牛建广, 王斐然. *当代经济管理*, 2021, 43(08): 33.
- 22 Huang Z J. Economic and environmental assessment of carbon emissions from demolition waste. Master's thesis, Guangzhou University, China, 2021 (in Chinese).
黄正杰. 拆除建筑废弃物碳排放经济与环境评估研究. 硕士学位论文, 广州大学, 2021.
- 23 Gao X, Zhu J J, Chen M, et al. *Building Energy Efficiency*, 2019, 47(02): 97 (in Chinese).
高鑫, 朱建君, 陈敏等. *建筑节能*, 2019, 47(02): 97.
- 24 Zhao X, Fang S. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2012, 34(S2): 4 (in Chinese).
赵昕, 方朔. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(S2): 4.
- 25 Cao J, Shen Z M, Wang X Y, et al. *Construction Science and Technology*, 2020(Z1): 69 (in Chinese).
曹静, 沈志明, 王晓玉等. *建设科技*, 2020(Z1): 69.
- 26 Cao X, Miao C Q, Pan H T. *Building Structure*, 2021, 51(S2): 1233 (in Chinese).
曹西, 缪昌铅, 潘海涛. *建筑结构*, 2021, 51(S2): 1233.

- 27 Yu H Y, Wang Q, Zhang H, et al. *Coal Ash*, 2011, 23(06): 42 (in Chinese).
俞海勇, 王琼, 张贺等. *粉煤灰*, 2011, 23(06): 42.



于晓涵, 2021年7月于山东交通学院获得工学学士学位。现为山东建筑大学土木工程学院研究生, 在李秀领教授的指导下进行研究。目前主要研究领域为再生混凝土研究。2023年获专利授权2项。



李秀领, 山东建筑大学土木工程学院教授、博士研究生导师。2000年烟台大学大学建筑工程专业本科毕业, 2003年中国地震局工程力学研究所防灾减灾工程及防护工程专业硕士毕业, 2006年大连理工大学大学防灾减灾工程及防护工程专业博士毕业后到山东建筑大学工作至今。目前主要绿色高性能建筑材料等方面的研究工作。发表论文80余篇, 包括 *Engineering Structures*, *Journal of Cleaner Production*, *Construction and Building Materials*, *Case Studies in Construction Materials* 等。