

DOI: 10.7672/sgjs2023040081

# 装配式建筑建造全过程碳排放分析与研究

武涛,李松,廖聪,许贵传,陈煌勇  
(中建三局集团有限公司,湖北 武汉 430064)

[摘要] 针对装配整体式剪力墙建筑建造过程中建材生产及运输、构件生产及运输、构件吊装、现场施工6个阶段,构建装配整体式剪力墙建筑建造全过程碳排放预测模型。基于武汉市某项目,对装配式建筑、现浇建筑建造全过程碳排放量对比分析进行;计算装配式建筑建造各阶段的碳排放量,提出装配式建筑“减碳”策略与措施,为建筑工程节能减排提供了新思路,能有效促进装配式建筑进一步“低碳”发展。

[关键词] 装配式建筑;建造全过程;碳排放;减碳;碳达峰

[中图分类号] TU74

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2023)04-0081-06

## Carbon Emission Analysis of the Whole Process of Prefabricated Building Construction

WU Tao, LI Song, LIAO Cong, XU Guichuan, CHEN Huangyong

(China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430064, China)

**Abstract:** Aiming at the six stages of building material production and transportation, prefabricated component production and transportation, lifting of components, and on-site construction, the carbon emission prediction model of the whole process of prefabricated shear wall building construction is constructed. Based on a prefabricated shear wall project in Wuhan, the carbon emissions of prefabricated buildings and cast-in-place buildings are compared and analyzed. The carbon emissions of prefabricated buildings are calculated at each stage of construction, and the strategies and measures for carbon reduction of prefabricated buildings are proposed, which provide new ideas for energy saving and emission reduction of construction projects and can effectively promote further “low carbon” development of prefabricated buildings.

**Keywords:** prefabricated buildings; the whole construction process; carbon emission; carbon reduction; carbon peak

## 0 引言

随着全球经济的快速发展,温室气体的过度排放导致全球气候异常,引发了一系列的环境问题,造成了巨大的经济损失,全球“减碳”迫在眉睫。根据《2020年全球建筑现状报告》,2019年建筑运营和建造阶段的CO<sub>2</sub>排放高达130亿t,占全球与能源相关的CO<sub>2</sub>排放总量的38%;根据中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据委员会发布的《中国建筑能耗与碳排放研究报告(2021)》,我国2019年建筑全过程碳排放总量为49.97亿t,占全国碳排放比重高达50.6%,相比于全球建筑业碳排放占比,我

国建筑业碳排放占比更高,节能减排压力更大。

2022年,住房和城乡建设部、国家发改委联合印发的《城乡建设领域碳达峰实施方案》中明确要求在2030年前,城乡建设领域碳排放达到峰值,推进绿色低碳建造,大力发展装配式建筑,到2030年装配式建筑占当年城镇新建建筑比例的40%。相比于传统现浇混凝土建筑,装配式建筑用水节省80%,施工能耗降低约20%,施工周期缩短25%~30%,砌筑抹灰砂浆降低约60%,装配式建筑建造作为建筑业“减碳”的主要措施,将为我国建筑业2030年碳达峰发挥重要作用。

近年来,随着国家双碳战略的提出,国内学者对装配式建筑碳排放计算开展了广泛的研究,但在装配式建筑建造方面仍存在碳排放计算边界不清

晰、数据统计不全面等问题。本文基于武汉市某装配式项目,建立装配整体式剪力墙建造全过程碳排放预测模型,详细分析了装配式建筑建造过程中建材生产及运输、构件生产及运输、构件吊装、现场施工 6 个阶段的碳排放数据,对现阶段的装配式建筑碳排放计算研究进行补充完善,为装配式建筑进一步“减碳”提供思路,推动装配式建筑发展。

## 1 项目概况

武汉某项目装配式楼栋地上建筑面积 12 485.76m<sup>2</sup>,地上 32 层,单体装配率 50.3%,预制构件范围为外墙、凸窗、内墙、叠合板及空调板,部分隔墙采用 ALC 板材。主要建筑材料用量数据如表 1 所示。

表 1 主要建材总量统计

Table 1 Total statistics of main building materials

材料种类	总量
C30	2 349.80
C35	263.40
混凝 土/m <sup>3</sup>	263.40
C45	105.40
C50	158.01
C55	598.23
钢筋/t	582.46
钢丝/t	41.087
砂浆/m <sup>3</sup>	82.76
蒸压加气砌块/m <sup>3</sup>	826.73
蒸压加气条板/m <sup>3</sup>	380.01

## 2 建造全过程碳排放预测模型

对于碳排放计算方式,至今未形成统一的标准,目前常用的碳排放计算方法有实测法、质量平衡法和碳排放因子法。实测法的实测数据获取难度大,需专门的检测设备;质量平衡法计算方法多,无统一的计算方法;而碳排放因子法作为《国家温室气体清单指南》(IPCC)提出的第一种碳排放估算方法,也是 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》<sup>[1]</sup>所采用的计算方法,计算方法简单、计算结论权威、应用范围广,故本文基于碳排放因子法进行相关碳排放计算,本文采用的主要材料及施工机械碳排放因子如表 2,3 所示。

本文主要针对装配式建筑在物化阶段的碳排放进行计算,即建筑材料的生产阶段和建筑施工阶段的碳排放量,而装配式建筑不同于传统现浇建筑,存在预制构件生产和运输阶段,且在现场施工有一定的区别,故本文在常规建筑物化阶段基础上,将装配式建筑建造全过程细分为建材生产、建材运输、构件生产、构件运输、构件吊装、现场施工 6 个阶段,分别统计各阶段的人工、材料、机械消耗

表 2 主要能源碳排放因子清单

Table 2 Main energy carbon emission factors list

种类	碳排放因子
电力(华中)/(kgCO <sub>2</sub> ·kWh <sup>-1</sup> )	0.525 7 <sup>[1]</sup>
汽油/(kgCO <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> )	2.914 0 <sup>[1]</sup>
柴油/(kgCO <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> )	2.726 0 <sup>[1]</sup>

表 3 主要建材碳排放因子清单

Table 3 Main building materials carbon emission factors list

种类	碳排放因子
C30	295.0 <sup>[1]</sup>
C35	307.0 <sup>[2]</sup>
混凝土/ (kgCO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )	326.0 <sup>[2]</sup>
C45	357.0 <sup>[3]</sup>
C50	385.0 <sup>[1]</sup>
C55	403.0 <sup>[4]</sup>
钢筋/(kgCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup> )	2 340.0 <sup>[1]</sup>
钢丝/(kgCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup> )	2 375.0 <sup>[1]</sup>
砂浆/(kgCO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )	233.6 <sup>[1]</sup>
蒸压加气砌块/(kgCO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )	230.0 <sup>[5]</sup>
蒸压加气条板/(kgCO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )	260.0 <sup>[5]</sup>

量,如图 1 所示。并利用碳排放因子法计算各阶段碳排放量:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (1)$$

式中:  $C$  为建造全过程碳排放总量(tCO<sub>2</sub>);  $C_1$  为建材生产阶段碳排放量(tCO<sub>2</sub>);  $C_2$  为建材运输阶段碳排放量(tCO<sub>2</sub>);  $C_3$  为构件生产阶段碳排放量(tCO<sub>2</sub>);  $C_4$  为构件运输阶段碳排放量(tCO<sub>2</sub>);  $C_5$  为构件吊装阶段碳排放量(tCO<sub>2</sub>);  $C_6$  为现场施工阶段碳排放量(tCO<sub>2</sub>)。

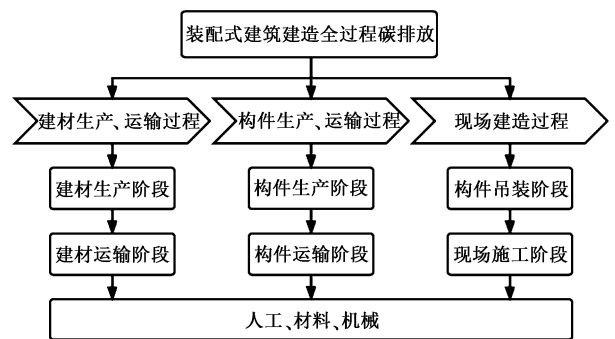


图 1 装配式建筑建造全过程碳排放预测模型

Fig.1 Carbon emission prediction model for the whole process of prefabricated building construction

### 2.1 建材生产及运输过程碳排放

#### 2.1.1 建材生产阶段

建材生产阶段的碳排放计算边界包括原材料开采、加工全过程的直接碳排放和间接碳排放,计算如下:

$$C_1 = \sum_{i=1}^n M_i F_i \quad (2)$$

式中:  $C_1$  为建材生产阶段碳排放量( $tCO_2$ );  $M_i$  为第  $i$  种主要建材的消耗量( $t$  或  $m^3$ );  $F_i$  为第  $i$  种建材的碳排放因子( $kgCO_2 \cdot m^{-3}$  或  $kgCO_2 \cdot t^{-1}$ )。

由表 1 和式(2)可得本项目在建材生产阶段的碳排放,如表 4 所示。由于预制构件生产阶段同样涉及建材生产的碳排放,为区分两阶段碳排放,本阶段的主要建材不包含预制构件的建材使用量。

表 4 主要建材生产阶段碳排放统计

Table 4 Carbon emission statistics of main building materials production

建材种类	碳排放量/ $tCO_2$
混凝土	1 199.47
钢筋	1 362.96
钢丝	97.58
砂浆	19.33
蒸压加气砌块	190.15
蒸压加气条板	98.80
合计	2 968.29

### 2.1.2 建材运输阶段

建材运输阶段的碳排放主要指将建材从工厂运输到现场,运输工具所生产的碳排放,假定运输车辆满载运输,空载返回,本阶段还需考虑空车返回产出的碳排放,根据相关研究<sup>[6]</sup>,运输车辆空载环境负载是满载时的 0.67 倍,则全过程中运输车辆碳排放计算应考虑放大系数 1.67。建材运输阶段计算如下:

$$C_2 = \sum_{i=1}^n M_i D_i F_i K \quad (3)$$

式中:  $C_2$  为建材生产阶段碳排放量( $tCO_2$ );  $M_i$  为第  $i$  种主要建材的消耗量( $t$ );  $D_i$  为第  $i$  种建材平均运输距离( $km$ );  $F_i$  为第  $i$  种建材运输车辆的碳排放因子( $kgCO_2/(t \cdot km)$ );  $K$  为运输车辆碳排放放大系数,取 1.67。

经统计,本项目采用的主要运输工具有 2 种,混凝土采用  $12m^3$  混凝土搅拌运输车,柴油油耗为  $0.35L/km$ ,换算成碳排放因子为  $0.024kgCO_2e/(t \cdot km)$ ,平均运输距离按《建筑碳排放计算标准》中默认值  $40km$  取值,其他主要建筑材料采用中型柴油货车运输(载重  $8t$ ),碳排放因子为  $0.179kgCO_2e/(t \cdot km)$ ,平均运输距离按按《建筑碳排放计算标准》中默认值  $500km$  取值。计算得到建材运输阶段碳排放量,如表 5 所示。

## 2.2 预制构件生产及运输过程碳排放

### 2.2.1 预制构件生产阶段

预制构件生产阶段碳排放除考虑主要建材生

表 5 主要建材运输阶段碳排放统计

Table 5 Carbon emission statistics of main building materials transportation

建材种类	碳排放量/ $tCO_2$
混凝土	18.73
钢筋	87.06
钢丝	6.14
砂浆	12.37
蒸压加气砌块	67.96
蒸压加气条板	31.24
合计	222.60

产阶段的碳排放,还需考虑构件在生产阶段的钢模具消耗、生产设备能源消耗等方面所产生的碳排放量。根据已有研究<sup>[7]</sup>,构件生产阶段建材生产所产生的碳排放占整个阶段碳排放量的  $94\% \sim 99\%$ ,故可将预制构件建材生产的碳排放量换算为整个构件生产阶段的碳排放量,换算系数取 0.94。则预制构件生产阶段的碳排放计算如下:

$$C_3 = \sum_{i=1}^n M_i F_i / \lambda \quad (4)$$

式中:  $C_3$  为预制构件生产阶段碳排放量( $tCO_2$ );  $M_i$  为预制构件第  $i$  种主要建材的消耗量( $t$  或  $m^3$ );  $F_i$  为第  $i$  种主要建材的碳排放因子( $kgCO_2 \cdot m^{-3}$  或  $kgCO_2 \cdot t^{-1}$ );  $\lambda$  为换算系数,取 0.94。

经统计计算,本项目预制外墙、预制凸窗、预制内墙、预制叠合板、预制空调板在构件生产阶段的碳排放量如表 6 所示。

表 6 构件生产阶段碳排放统计

Table 6 Carbon emission statistics of prefabricated component production

构件种类	碳排放量/ $tCO_2$
预制外墙	370.86
预制凸窗	151.28
预制内墙	147.31
预制空调板	11.91
预制叠合板	332.14
合计	1 013.50

### 2.2.2 预制构件运输阶段

不同于建材运输,预制构件运输因受构件尺寸、构件形状、运输车辆尺寸等方面限制,运输车辆无法满载运输,故构件运输阶段换算碳排放因子仅考虑运输距离,假定运输车辆每次仅运输同类型构件,考虑预制构件运输次数、空车返回等因素,预制构件运输阶段碳排放计算如下:

$$C_4 = \sum_{i=1}^n n_i D_i F_i K \quad (5)$$

式中:  $C_4$  为预制构件运输阶段碳排放量( $tCO_2$ );  $n_i$  为第  $i$  种预制构件运输次数;  $D_i$  为第  $i$  种预制构件

运输距离( $km$ );  $F_i$  为预制构件运输车辆碳排放因子( $kgCO_2/(km \cdot \text{运输次数})$ );  $K$  为运输车辆碳排放放大系数,取 1.67。

经统计,本项目预制外墙、预制凸窗、预制内墙、预制空调板、预制叠合板构件总数量及单次运输构件数量如表 7 所示。

表 7 预制构件数量统计

Table 7 Statistics on the number of prefabricated components

构件种类	构件数量/个	单次运输数量/个
预制外墙	700	6
预制凸窗	168	6
预制内墙	78	10
预制空调板	248	12
预制叠合板	1 178	24

预制构件运输时,运输车辆为低平板半挂车,平均柴油油耗 40L/100km,故换算碳排放因子仅考虑运输距离因素,则换算碳排放因子为 0.839 $kgCO_2e/km$ ,构件运输距离为 53.5km,则构件运输阶段碳排放统计如表 8 所示。

表 8 构件运输阶段碳排放统计

Table 8 Carbon emission statistics of transportation of prefabricated components

构件种类	碳排放量/ $tCO_2$
预制外墙	8.77
预制凸窗	2.10
预制内墙	0.60
预制空调板	1.57
预制叠合板	3.67
合计	16.71

## 2.3 现场建造过程碳排放

### 2.3.1 预制构件吊装阶段

预制构件现场吊装阶段碳排放包含构件吊装过程中的人工、自然资源、机械能源等形成的碳排放,计算如下:

$$C_5 = C_R + C_Z + C_J \quad (6)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^n M_i F_R \quad (7)$$

$$C_Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{i,j} F_j \quad (8)$$

$$C_J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{i,j} T_{i,j} E_j \quad (9)$$

式中:  $C_5$  为预制构件吊装阶段碳排放量( $tCO_2$ );  $C_R$  为预制构件吊装阶段人工碳排放量( $tCO_2$ );  $C_Z$  为预制构件吊装阶段自然资源或能源消耗产生的碳排放量( $tCO_2$ );  $C_J$  为制构件吊装阶段施工机械产生碳排放量( $tCO_2$ );  $M_i$  为第  $i$  种预制构件吊装所需的

人工数;  $F_R$  为单位人工碳排放因子( $kgCO_2/\text{单位人工}$ );  $M_{i,j}$  为第  $i$  种预制构件吊装消耗的第  $j$  种自然资源或能源总量( $kWh$  或  $kg$ );  $F_j$  为第  $j$  种自然资源或能源的碳排放因子( $kgCO_2/kWh$  或  $kgCO_2/kg$ );  $R_{i,j}$  为第  $i$  种预制构件吊装所用第  $j$  种施工机械的单位台班能源消耗量( $kWh/\text{单位台班}$  或  $kg/\text{单位台班}$ );  $T_{i,j}$  为第  $i$  种预制构件吊装所用第  $j$  种施工机械的台班数(台班);  $E_j$  为第  $j$  种施工机械消耗的能源碳排放因子( $kgCO_2/kWh$  或  $kgCO_2/kg$ )。

其中  $M_i, M_{i,j}, T_{i,j}$  根据设计图纸、采购合同等资料,查询《湖北省装配式建筑工程消耗量定额及全费用基价表》<sup>[8]</sup> 可得,  $F_j, R_{i,j}, E_j$  根据《建筑碳排放计算标准》可得,而根据国际能源署(IEA)发布的数据,我国 2019 年人均年碳足迹约为 6.8 $tCO_2$ ,则计算可得单位工日人均碳排放为 6.21 $kgCO_2$ 。预制构件吊装阶段各类预制构件碳排放如表 9 所示。

表 9 构件吊装阶段碳排放统计

Table 9 Carbon emission statistics of prefabricated component hoisting

构件种类	碳排放量/ $tCO_2$
预制外墙	6.03
预制凸窗	4.04
预制内墙	0.51
预制空调板	0.39
预制叠合板	9.30
合计	19.27

### 2.3.2 现场施工阶段

现场施工阶段碳排放包含后浇混凝土浇筑、钢筋绑扎、砌体结构安装等分项工程,及后浇混凝土模板支护、外架搭设等措施项目所产生的碳排放。计算如下:

$$C_6 = \sum_{i=1}^n C_{F,i} + \sum_{j=1}^m C_{C,j} \quad (10)$$

$$C_F = C_R + C_Z + C_J \quad (11)$$

$$C_C = C_R + C_Z + C_J \quad (12)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^n M_i F_R \quad (13)$$

$$C_Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{i,j} F_j \quad (14)$$

$$C_J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{i,j} T_{i,j} E_j \quad (15)$$

式中:  $C_6$  为现场施工阶段碳排放量( $tCO_2$ );  $C_{F,i}$  为现场施工阶段第  $i$  个分项工程的碳排放量( $tCO_2$ );  $C_{C,j}$  为现场施工阶段第  $j$  个措施项目的碳排放量( $tCO_2$ );  $C_R$  为现场施工阶段人工碳排放量( $tCO_2$ );  $C_Z$  为现场施工阶段自然资源或能源消耗产生的碳排放量( $tCO_2$ );  $C_J$  为现场施工阶段施工机械产生碳

排放量( $tCO_2$ );  $M_i$  为第  $i$  种分项工程或措施项目所需的人工数;  $F_R$  为单位人工碳排放因子( $kgCO_2$ /单位人工);  $M_{i,j}$  为第  $i$  种分项工程或措施项目消耗的第  $j$  种自然资源或能源总量( $kWh$  或  $kg$ );  $F_j$  为第  $j$  种自然资源或能源的碳排放因子( $kgCO_2/kWh$  或  $kgCO_2/kg$ );  $R_{i,j}$  为第  $i$  种分项工程或措施项目所用第  $j$  种施工机械的单位台班能源消耗量  $kWh$ /单位台班或  $kg$ /单位台班);  $T_{i,j}$  为第  $i$  种分项工程或措施项目所用第  $j$  种施工机械的台班数(台班);  $E_j$  为第  $j$  种施工机械消耗的能源碳排放因子( $kgCO_2/kWh$  或  $kgCO_2/kg$ )。

通过查询《湖北省装配式建筑工程消耗量定额及全费用基价表》,参考预制构件吊装阶段相关数据,可得现场施工阶段碳排放量如表 10 所示。

表 10 现场施工阶段碳排放统计

Table 10 Carbon emission statistics in field construction

分项工程/措施工程	碳排放量/ $tCO_2$
混凝土工程	9.68
钢筋工程	46.30
砌体工程	9.28
脚手架工程	2.15
模板工程	67.24
垂直运输工程	97.34
合计	231.99

### 3 计算结果分析

经统计计算,武汉某项目装配式楼栋建造全过程单位面积碳排放量为  $358.3kgCO_2$ ,建材生产、建材运输、构件生产、构件运输、构件吊装、现场施工各阶段碳排放占比分别为 66.38%, 4.98%, 22.66%, 0.37%, 0.43%, 5.19%。为方便与现浇建筑建造全过程碳排放进行对比,将装配式建筑全过程中建材生产阶段、构件生产阶段的碳排放数据统计至生产环节,建材运输阶段、构件运输阶段的碳排放数据统计至运输环节,构件吊装阶段、现场施工阶段碳排放数据统计至施工环节,可得装配式建筑建造各环节碳排放如表 11 所示。

表 11 装配式建筑建造各阶段碳排放统计

Table 11 Carbon emission statistics of each stage of prefabricated building construction

环节	碳排放量/ $tCO_2$	单位面积碳排放/ $kgCO_2$
生产	9 070.78	319.0
运输	558.73	19.2
施工	706.03	20.1
合计	10 335.54	358.3

基于碳排放因子法对该项目现浇楼栋建造全过程进行数据收集,分为建材生产阶段、建材运输阶段、现场施工阶段,可得现浇楼栋(地上建筑面积

$25\ 505.72\ m^2$ )建造全过程单位面积碳排放量为  $405.2kgCO_2$ ,建材生产、建材运输、现场施工各环节碳排放占比分别为 87.76%, 5.41%, 6.83%,如表 12 所示。

表 12 现浇建筑建造各阶段碳排放统计

Table 12 Carbon emission statistics of cast-in-place building construction

阶段	碳排放量/ $tCO_2$	单位面积碳排放/ $kgCO_2$
建材生产	9 070.78	355.6
建材运输	558.73	21.9
现场施工	706.03	27.7
合计	10 335.54	405.2

由表 11,12 可知,装配式建筑相比于现浇建筑单位面积碳排放量减少 11.6%,具体到生产、运输、施工环节,装配式建筑与现浇建筑单位面积碳排放对比如图 2 所示。由图 2 可知,现浇建筑在生产环节、施工环节的碳排放量明显高于装配式建筑,主要因为传统现浇建筑的粗放式管理导致资源、人工存在一定的浪费,使碳排放量增加。

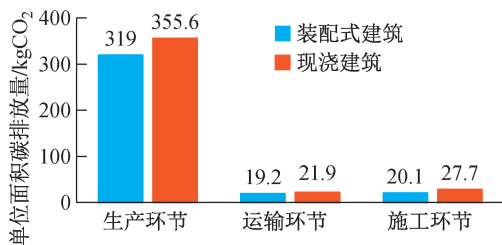


图 2 装配式建筑与现浇建筑不同环节碳排放量对比

Fig.2 Comparison of carbon emissions between prefabricated building and cast-in-place building

对比装配式建筑各阶段碳排放量,建材生产、构件生产的碳排放量占比 89.09%,采用环保、低耗能的建筑材料可大幅度减少建筑生产环节产生的碳排放量。相比于装配式混凝土建筑,装配式钢结构自重轻,混凝土用量少,且钢材可回收利用,是完美契合国家“双碳”战略的建筑结构形式,可大力推广装配式钢结构住宅以减少建筑建造过程中的碳排放量。此外装配式现场施工阶段碳排放量占比 6.83%,而仅垂直运输工程就贡献了 42.4%。一方面,拆分设计时应合理控制预制构件自重,平衡构件数量与构件自重间的关系,避免现场采用大型塔式起重机或因构件数量多导致吊装效率低下;另一方面,现场应合理组织施工工序,提高塔式起重机使用效率,降低塔式起重机机械能耗。

### 4 结语

本文基于碳排放因子法构建了装配整体式剪力墙建筑建造全过程碳排放预测模型,并以实际项

目为例,对装配式建筑和现浇建筑碳排放量进行了对比分析,得到装配式建筑各阶段碳排放量的差异,并提出装配式建筑进一步“减碳”的措施。主要得到如下结论。

1)装配式建筑建造全过程单位面积碳排放量为358.3kgCO<sub>2</sub>,现浇建筑建造全过程单位面积碳排放量为405.2kgCO<sub>2</sub>,相比于现浇建筑建造,装配式建筑建造能有效减少建筑物化阶段碳排放。

2)建材生产、构件生产阶段产生碳排放量占比超过总碳排放量的85%,远高于建造过程中其他阶段的碳排放量,采取环保、低能耗的新型建筑材料可大幅度减少生产环节碳排放量。

3)装配式钢结构住宅自重轻,混凝土用量少,且钢材可回收利用,可大幅度减少生产环节的碳排放量,无论是建筑物化阶段,还是建筑全生命周期,都是值得大力推广的绿色低碳住宅结构体系。

4)装配式混凝土建筑拆分设计时应合理控制构件自重,平衡构件自重和构件数量间的关系,同时现场应合理组织施工工序,以提高施工机械使用效率,降低施工机械能耗。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 中国建筑科学研究院有限公司,中国建筑标准设计研究院有限公司.建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.  
China Academy of Building Research,China Institute of Building Standard Design and Research. Building carbon emission calculation standard:GB/T 51366—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2019.
- [ 2 ] 耿皓晨.基于LCA的城市住宅碳排放计算及减排对策研究[D].西安:西安科技大学,2021.  
GENG H C. Research on carbon emission calculation and

emission reduction countermeasures for urban housing based on LCA [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.

- [ 3 ] 帅小根,李惠强,李思堂.混凝土物化资源耗竭影响的定量评价[J].水电能源科学,2009,27(3):100-103.  
SHUAI X G, LI H Q, LI S T. Quantitative evaluation of the impact of physical and chemical resource depletion of concrete [J]. Hydropower energy science, 2009, 27(3): 100-103.
- [ 4 ] 高源雪.建筑产品物化阶段碳足迹评价方法与实证研究[D].北京:清华大学,2012.  
GAO Y X. Carbon footprint evaluation method and empirical research on the materialization stage of building products [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [ 5 ] 房明慧.典型墙体材料的生命周期评价[D].北京:北京工业大学,2013.  
FANG M H. Life cycle evaluation of typical wall materials [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
- [ 6 ] 毛睿昌.基于LCA的城市交通基础设施环境影响分析研究——以深圳为例[D].深圳:深圳大学,2017.  
MAO R C. Research on the environmental impact analysis of urban transportation infrastructure based on LCA—taking Shenzhen as an example [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
- [ 7 ] 徐鹏鹏,申一村,傅晏,等.基于定额的装配式建筑预制构件碳排放量及分析[J].工程管理学报,2020,34(3):45-50.  
XU P P, SHEN Y C, FU Y, et al. Carbon emission measurement and analysis of prefabricated components of assembled buildings based on quotas [J]. Journal of engineering management, 2020, 34(3): 45-50.
- [ 8 ] 湖北省建设工程标准定额管理总站.湖北省装配式建筑工程消耗量定额及全费用基价表[S].湖北:长江出版社,2018.  
Hubei Provincial Construction Engineering Standard Quotations Management General Station. Consumption quota and full-cost base price table for assembled construction projects in Hubei Province [S]. Hubei: Changjiang Press, 2018.