

基于LCA的装配式建筑全生命周期碳排放研究

——以重庆市某轻钢装配式集成别墅为例

郑晓云, 徐金秀

(重庆大学建设管理与房地产学院, 重庆 400045)

摘要: 基于装配式建筑建造、使用、废弃3个阶段资源能源消耗的基础数据, 构建装配式建筑生命周期评价模型, 并利用该模型系统核算重庆市某轻钢装配式集成别墅全生命周期的总碳排放量, 识别各个阶段碳排放的影响因素并对碳排放贡献率和灵敏度进行评价, 从而提出改进建议, 研究结果可为建筑领域的节能减排提供基础数据, 并促进装配式建筑的可持续发展。

关键词: 生命周期评价(LCA); 装配式建筑; 碳排放贡献率; 灵敏度分析

中图分类号: F407.9 文献标识码: A 文章编号: 1002-851X(2019)01-0107-05

DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.201901107

Research on Carbon Emissions of Assembly Building Life Cycle based on LCA: Take a Light Steel Assembly Integrated Villa in Chongqing as an Example

ZHENG Xiaoyun, XU Jinxiu

(Faculty of Construction Management and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: This paper builds a life cycle evaluation model based on the data of the three stages of energy consumption in the construction, use and disposal of assembly building. Then, uses the model to calculate the total carbon emissions of a light steel assembly integrated villa in Chongqing city, identifies the influencing factors of carbon emissions at all stages, and evaluates the contribution rate and sensitivity of carbon emissions, and thus puts forward the improvement suggestions. The results can provide basic data for energy saving and emission reduction in the construction field, and promote the sustainable development of assembly buildings.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); assembly building; contribution rate of carbon emissions; sensitivity analysis

1 引言

目前我国面临经济发展与环境效益相冲突的困境, 寻求更为节能环保的生产生活方式势在必行, 而每年建筑领域的碳排放量占总排放量的35%以上, 因此满足国

家“低碳、四节一环保”政策的装配式建筑必然会成为建筑行业发展的新方向。发展装配式建筑对减少污染物和废弃物排放、提高劳动生产率具有积极作用, 同时也是落实中央城市工作会议精神、推进建筑业转型升级的重要途径。

随着装配式建筑在国内的普及, 关于装配式建筑环保效益的研究也取得了一定成果, 例如齐宝库、朱娅等以某项目为依托, 从“四节”层面及引入碳排放计算, 得出装配式建筑相比传统建筑节约15.95元/m²的环境效益, 但并未分析其影响因素; 高宇、李政道引入LCA评

作者简介: 郑晓云, 女, 生于1965年, 重庆人, 副教授, 研究方向: 工程财务分析与管理、工程经济。

徐金秀, 女, 生于1994年, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向: 技术经济与管理。

收稿日期: 2018-06-16

价模型,分析了装配式建筑在建造阶段碳排放的贡献率,发现贡献率最大的环节是剪力墙和叠合梁的生产阶段,但未分析各阶段对碳排放影响的灵敏度,也未考虑建筑的使用和废弃阶段,存在一定的不完整性。本文以重庆市某轻钢装配式集成别墅为依托,研究装配式建筑建造、使用、废弃的全生命周期中各阶段碳排放的贡献率及其灵敏度,对贡献率大且灵敏度高的环节进行改进和完善,为有效提高装配式建筑节能减排效益提供基础数据,以促进装配式建筑的可持续发展。

2 装配式建筑生命周期碳排放评价体系

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种从产品的整个生命周期评估其对于环境影响的研究方法,目前已广泛应用于工程、材料、设备等领域。LCA方法包括目的与范围的确定、清单分析、影响评价、结果分析4个部分。以下详细展开:

(1) 目的与范围

研究目的是基于LCA理论的碳排放核算比较装配式建筑全生命周期不同阶段的碳排放量,分析生命周期各阶段的碳排放来源和主要影响因子。

装配式建筑涉及的构件类型较多,规模大小不一,为了便于比较,选取单位面积 $1m^2$ 作为1个功能单位的评价指标。本研究的系统边界为全生命周期,主要包括建材生产、建材运输、现场装配、建筑使用、拆除运输、回收填埋等,模型的系统边界如图1所示。

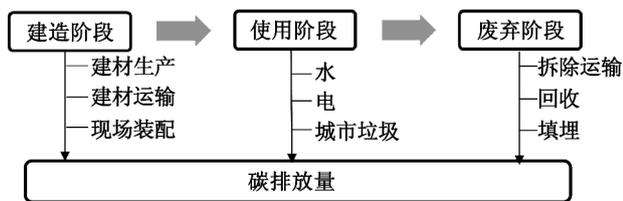


图1 装配式建筑生命周期评价的系统边界

(2) 清单分析

清单分析是整个LCA研究中最耗时的阶段,是LCA对基本数据进行收集和整理的过程,是进行LCA研究的关键和基础,是对整个生命周期资源、能源消耗

和对碳排放的量化分析,清单数据主要包括系统在全生命周期过程中消耗的资源、能源及污染物排放的种类和数量。

(3) 碳排放计算模型

碳排放主要指以 CO_2 为主的温室气体的排放量,还包括甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)等的排放量。国际能源署(IEA)将各类温室气体的排放量统一为二氧化碳当量(CO_2 -eq)进行碳排放的定量分析。

装配式建筑生命周期建造、使用、废弃阶段可能产生的碳排放来源如下表1所示,装配式建筑生命周期碳排放模型为各阶段产生的温室气体换算成二氧化碳当量后的总和。

$$Q=Q_C+Q_S+Q_M \quad (1)$$

式中, Q 表示装配式建筑生命周期的总碳排放量; Q_C 、 Q_S 、 Q_M 分别表示建造、使用、废弃阶段的碳排放。

(4) 影响评价

影响评价是在清单分析的基础上对清单分析的结果进行进一步的整理与分析。分析其能耗与碳排放的组成结果及各阶段对于环境影响的贡献率和敏感性。通过影响评价可以更深入地明确装配式建筑能耗与碳排放对环境的影响。明确关键环节,找到关键方法,解决关键问题,从而从重要环节上降低装配式建筑对环境的影响。

(5) 结果分析

结果分析是将清单分析和影响评价的结果进行归类与总结,对于装配式建筑对环境的影响给出评价结论并提供改进建议,降低其在生命周期的能耗及对环境的影响。

3 装配式建筑生命周期各阶段碳排放模型

3.1 碳排放当量因子的选取

装配式建筑生命周期中涉及的碳排放因子作为该研究分析的数据基础,包括材料类、能源类、车辆运输类。本文选取了国内成熟数据库中的二氧化碳当量因子,即四川大学研发的亿科Ebalance数据库CLCD。

表1 碳排放来源

阶段	说明
建造	原材料的开采、生产和运输到预制构件厂产生的碳排放,构件生产过程中消耗的资源及投入设备产生的碳排放,构件运输过程中资源消耗产生的碳排放,现场装配过程中施工机械运行的能源消耗产生的碳排放。
使用	建筑使用过程中消耗水、电等资源产生的碳排放,以及生活垃圾的排放和处理所产生的碳排放。
废弃	建筑拆除过程中机械运行能耗产生的碳排放,拆除物运输过程中资源消耗产生的碳排放,拆除物最终的处理(回收、焚烧/填埋)产生的碳排放。

3.2 装配式建筑全生命周期碳排放计算

3.2.1 装配式建筑建造阶段碳排放计算

建造阶段碳排放分为三部分计算, 一是预制构件生产过程中资源及能源消耗产生的碳排放, 该部分碳排放量由两部分构成, 一部分是预制构件原材料生产消耗的总碳排放量, 另一部分是预制构件在生产线上其加工机械运行所产生的碳排放量; 二是构件运输过程中产生的碳排放; 三是现场装配过程中设备消耗产生的碳排放。计算过程分别为式 (2)、(3) 和 (4)。

$$Q_{C1} = \sum_{i=1}^n q_i \times e_i + \sum_{t=1}^n (F_{td} \times M_d + F_{tx} \times M_x + F_{tg} \times M_g) \quad (2)$$

式中 Q_{C1} 是预制构件生产的总碳排放量, i 为原材料的种类, q_i 为原材料的使用数量, e_i 为原材料生产加工的碳排放系数, t 为不同的预制构件, F_{td} 、 F_{tx} 、 F_{tg} 分别代表构件 t 消耗的柴油、汽油、电力, M_d 、 M_x 、 M_g 分别为柴油、汽油、电力的碳排放当量因子。

$$Q_{C2} = \sum_{i=1}^n E_i \times G_i \times T_i \quad (3)$$

式中 Q_{C2} 是构件运输过程中的碳排放量, E_i 表示运输构件 i 的碳排放当量, G_i 表示构件 i 的运输质量, T_i 表示构件的运距。

$$Q_{C3} = \sum_{i=1}^n (F_{id} \times M_d + F_{ix} \times M_x + F_{ig} \times M_g + F_{ie} \times M_e) \quad (4)$$

式中 Q_{C3} 为施工安装过程单位体积的碳排放总量, i 代表不同的预制构件, F_{id} 、 F_{ix} 、 F_{ig} 、 F_{ie} 分别代表构件 i 消耗的柴油、汽油、电、水, M_e 表示所消耗的水的碳排放当量因子。

因此, 装配式建筑建造阶段碳排放总量为

$$Q_c = Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3} \quad (5)$$

3.2.2 装配式建筑使用阶段碳排放计算

装配式建筑在使用过程中碳排放的主要来源是能源的消耗和城市垃圾的处理, 其计算过程为式 (6)。

$$Q_s = F_{sg} \times M_g + F_{se} \times M_e + H_s \times M_h \quad (6)$$

式中 Q_s 表示建筑在使用阶段的总碳排放量, F_{sg} 、 F_{se} 、 H_s 分别表示在使用过程中消耗的电、水及产生的城市垃圾, M_h 表示建筑在使用过程中处理城市垃圾的碳排放当量因子。

3.2.3 装配式建筑废弃阶段碳排放计算

废弃阶段的碳排放分为两部分, 一是拆除过程中所使用的机械设备等能源消耗产生的碳排放, 二是处理 (回收/填埋/焚烧) 过程产生的碳排放, 其计算过程为式 (7)。

$$Q_M = F_{Md} \times M_d + F_{Mx} \times M_x + F_{Mg} \times M_g + G_1 \times E_{g1} + G_2 \times E_{g2} \quad (7)$$

式中 Q_M 为装配式建筑废弃阶段碳排放总量, F_{Md} 、 F_{Mx} 、 F_{Mg} 分别表示拆除建筑所消耗的柴油、汽油、电, G_1 、 G_2 分别表示回收和垃圾处理的材料量, E_{g1} 、 E_{g2} 分别

表示回收和垃圾处理时的碳排放当量因子。

4 实证分析

4.1 基础数据

本文选取的案例为重庆市某栋建筑面积为 81.69m^2 的轻钢装配式集成别墅, 具有提供空间、结构承重及围护保温等基本功能, 能满足普通四口之家的基本生活需求 (照明、空调、生活热水) 的双层轻钢别墅, 使用年限为 50 年。

(1) 建造阶段基础数据

建造阶段的数据主要来源于企业提供的设计方案或试验数据。主要原料包括建筑钢材、保温涂料, 主要能耗是电、汽油、柴油, 无其他替代燃料, 运输数据和上游数据均来自 CLCD 数据库, 由于本研究只考虑了基础的空间分隔和围护保温功能, 不包括进一步的美观、舒适和经济性, 因此装饰构件及家具、家电等末端设备未包含在清单范围之内。

(2) 使用阶段基础数据

使用阶段的数据为调研及参考文献取得。为方便建模, 本模型设定的功能单位中只满足居住者的照明、空调和生活热水需求, 因此使用部分的消耗只计生活用水和生活用电, 主要排放为生活垃圾。对生活用电计算了照明、空调、生活热水三大部分的用电, 其中空调电耗采用 Dest-h 软件, 按照实际情况对重庆地区普通四口之家的制冷采暖需求进行了模拟, 得到该建筑的年空调能耗约为 $6897\text{kW} \cdot \text{h}$; 照明电耗按照该案例建筑的照明设备配置情况计算为 $2670\text{kW} \cdot \text{h}$, 生活热水电耗按照文献中采集到的参数估算得 $1139\text{kW} \cdot \text{h}$ 。生活用水和生活垃圾消耗数据分别来自《2016年中国水资源公报》和《第一次全国污染源普查·生活源》, 具体数据见表 2。

表 2 装配式轻钢集成别墅使用过程清单数据

类型	清单名称	数量	单位	上游数据来源	用途/排放原因
产品	装配式轻钢集成别墅	1	A	—	
消耗	电力	1.074E+004	kWh	CLCD-China-ECER	照明、空调、生活热水
消耗	水	20651E+005	kg	CLCD-China-ECER	生活用水
排放	城市垃圾	1.168E+003	kg	—	生活垃圾

(3) 废弃阶段基础数据

装配式轻钢别墅的废弃过程为: 建筑拆除——拆除物运输——拆除物处理。建筑拆除过程的主要消耗为拆除机具用电, 运输过程的起始地及运输方式按照重庆市的实际情况考虑。将本建筑拆除得到的主要材料

表3 装配式轻钢集成别墅LCA累积贡献结果

过程名称	GWP (kgCO ₂ eq)	占比 (%)	过程名称	GWP (kgCO ₂ eq)	占比 (%)
1.建造过程	6.783E+04	16.36	3.废弃过程	-4.012E+04	-9.68
1.1结构体系	6.040E+04	14.561	3.1结构体系	-3.823E+04	-9.216
1.2结构附属体系	2.837E+03	0.684	3.2结构附属体系	-6.618E+02	-0.160
1.3安装体系	4.260E+03	1.027	3.3安装体系	-2.020E+03	-0.487
1.4电力	3.344E+02	0.081	3.4可回收材料废弃物	2.774E+02	0.067
1.5运输	1.62E+02	0.039	3.5电力	3.010E+02	0.073
2.使用过程	3.869E+05	93.32	3.6回收部分-运输	8.994E+01	0.022
2.1电力	3.844E+05	92.671	3.7填埋部分-运输	1.276E+02	0.031
2.2水	2.525E+03	0.609	合计	4.146E+05	100

分为可回收和不可回收两类。可回收材料按照90%的回收率进行回收,在模型中直接输入负值对其进行抵扣,并在上游追溯其生产过程。可回收材料中剩余10%的废弃物及其他不可回收材料采用焚烧、填埋处理。

4.2 案例分析

轻钢装配式集成别墅的LCA计算结果的指标为GWP(即气候变化,用二氧化碳当量值表示),因此本文主要分析轻钢装配式集成别墅各阶段的GWP指标。将各阶段数据带入模型中,利用公式计算得出各个阶段的碳排放量,为方便分析,计算结果按照轻钢装配式建筑构造的三大体系表示,建造阶段每个体系所包含的PC构件的碳排放均是从原材料开采到生产到安装整个过程的碳排放量,废弃阶段则包含每个PC构件从拆除到处理过程的碳排放,运输阶段的碳排放均单独计算。装配式轻钢集成别墅LCA计算结果具体如表3。

4.2.1 累计贡献率结果分析

从表中可以看出装配式建筑全生命周期中碳排放贡献最大的是使用阶段,达到全生命周期的90%以上,其原因是建筑产品的运营期较长。如果考虑单位时间的碳排放,则建造阶段的碳排放效率最高,相当于运行阶段8年的排放量。建造阶段碳排放占生命周期的16.36%。废弃阶段考虑到可回收材料重复利用产生的折减,在两项指标上均产生一定的负向影响。而整个生命周期中建造阶段作为源头,对环境的影响最大,因此接下来重点分析建造阶段。

从表3中可以看出,在建造阶段碳排放最多的是结构体系,其碳排放的贡献率为89%,而结构附属体系和安装体系的环境影响基本持平,在碳排放的贡献上均小于10%。

进一步分析得出结构体系中不同构件的碳排放排序为轻钢龙骨—围护结构—基础(表4),占比分别为

52%、34%和14%。如果将废弃阶段也考虑在内,则结果会出现很大变化,碳排放贡献最大的变为围护结构,且达到80%以上,基础部分反而下降了近10%,轻钢龙骨部分更是下降30%。由此可见围护结构是重点改进的对象。分析其原因可得,基础和龙骨中的主要材料为可回收的建筑钢材,而围护结构中的多数材料是不可回收材料,可见材料可回收的特性对降低建筑碳排放具有非常重要的作用,因此可寻找更加环保的围护结构来提高环保效益。

表4 装配式轻钢集成别墅考虑废弃阶段回收前后结构体系LCA累积贡献结果对比

结构名称	考虑废弃阶段回收前		考虑废弃阶段回收后	
	GWP (kgCO ₂ eq)	占比 (%)	GWP (kgCO ₂ eq)	占比 (%)
结构体系	6.04E+04	100.00	2.22E+04	100.00
1.基础	8.08E+03	13.38	8.08E+02	3.64
2.轻钢龙骨	3.15E+04	52.15	3.19E+03	14.39
3.围护结构	2.07E+04	34.25	1.80E+04	81.38
3.1楼板	3.30E+03	5.47	2.24E+03	10.12
3.2外墙	1.36E+04	22.58	1.27E+04	57.50
3.3内墙	2.60E+03	4.30	2.62E+03	11.83
3.4屋面	1.15E+03	1.90	4.27E+02	1.93

4.2.2 清单数据灵敏度分析

清单数据灵敏度是指清单数据中各PC构件使用量单位变化率引起的碳排放的变化率。结合本方案例以整套别墅为单位计算,其结果即为生命周期模型的所有实景过程中每一项消耗、每一项排放对轻钢装配式建筑碳足迹的贡献率。基于清单数据灵敏度可以识别模型中最重要、影响最大的消耗和排放,由此可以寻找系统的最有效的改进点。此外,清单数据灵敏度越大,意味着是数据收集和关注的重点,可为今后的研究提供重点参

考。为方便分析,本论文仅罗列了GWP(kgCO₂eq)灵敏度>0.5%的建造阶段的数据,如表5。

表5 建造阶段GWP指标清单数据灵敏度

过程名称	清单名称	GWP灵敏度
1.装配式轻钢集成别墅建造	结构体系	14.50%
1.1结构体系	轻钢龙骨	7.60%
1.1.1轻钢龙骨	矩形钢管	6.96%
1.1.1.1矩形钢管	双面热镀锌冷弯薄壁钢材	6.96%
1.2结构体系	围护	4.99%
1.2.1围护	外墙	3.29%
1.2.1.1外墙	呼吸纸	2.27%
1.2.1.2外墙	水泥纤维挂板	0.58%
1.3结构体系	基础	1.94%
1.3.1基础	地螺钉	1.94%
1.3.1.1地螺钉	钢制管桩	1.94%
2.装配式轻钢集成别墅建造	安装体系	1.02%
2.1围护	楼板	0.79%
3.装配式轻钢集成别墅建造	结构附属体系	0.68%
3.1围护	内墙	0.62%

通过对清单数据进行对比分析得出,在建造过程中对碳排放的灵敏度(贡献率)最大的是结构体系,结构体系中的轻钢龙骨和围护结构的灵敏度最大。经分析发现轻钢龙骨中的主要灵敏度来源是可回收的矩形钢管,围护结构中灵敏度最高的是外墙呼吸纸,此外,GWP指标的水泥纤维挂板也呈现出较高的灵敏度结果。综上所述,围护结构是装配式建筑中对环境影响最大且改进影响力最高的构件,如想进一步降低装配式建筑的环境影响,可从围护结构及保温涂料入手,改良其做法或寻找环保性能更佳的替代材料。

4.3 建议

基于以上研究对于如何有效提高装配式建筑的节能减排优势提出以下建议:

(1) 通过改良生产工艺,寻求更加环保的建筑材料来降低生产阶段的环境影响,同时提高建筑废弃品的回收利用率。生产阶段碳排放最多的是结构体系中的轻钢龙骨和围护结构,二者共同贡献了超过生产阶段75%的碳排放,其中轻钢龙骨的碳排约为围护结构的1.5倍。但是若将生产和废弃阶段综合考虑,围护结构的碳排放会反超轻钢龙骨,达到6倍之多,其原因是钢材有较大的回收率,废弃回收阶段产生了相当大的正向环境影响进行抵消,而围护结构中的材料如呼吸纸、防水涂料等不

仅碳排放较多而且不能回收利用,因此寻找更环保的替代材料是非常必要的。

(2) 从终端入手,通过采用性能更好的保温材料、效率更高的设备,提高用户的环境保护意识等来降低使用过程的碳排放。使用阶段中碳排放最多的是电力,因此降低使用阶段的电力消耗,尤其是占主要影响的空调电耗,这就需要从改善围护结构保温性能和提高设备效率两个方面入手对其进行改进。

5 结语

本文通过分析装配式建筑各阶段特点,建立较为精简的碳排放计算模型,结合项目案例定量测算了装配式建筑生命周期不同阶段及不同构件的碳排放量,选取主要的工艺流程及设备材料进行分析,识别影响碳排放的主要因素,可为装配式建筑的碳排放提供基础数据。分析结果表明,虽然装配式建筑使用阶段对环境的影响强度最大,但对环境影响效率更高的却是建造阶段;废弃阶段可回收材料的重复利用对于降低环境影响意义重大,本文案例中可减少碳排放达到60%以上。因此,一方面可以通过改良生产工艺,寻求更加环保的建筑材料来降低生产阶段的环境影响;另一方面,提高建筑废弃品的回收利用率折减建造阶段的碳排放。

本研究因条件限制仍存在一些局限性,例如未考虑到土地资源、末端设备、人工机械等消耗,因此可能会产生一定的横向截断误差。此外未考虑到构件的更换、维修以及回收建材的再生过程,建议在今后的研究中将过程和清单数据补充完整。▲

参考文献

- [1] 李兵,李云霞,吴斌,等.建筑施工碳排放测算模型研究[J].土木建筑工程信息技术,2011(2):5-10.
- [2] 齐宝库,朱妮,马博,等.装配式建筑综合效益分析方法研究[J].施工技术,2016(4):39-43.
- [3] 王玉,张宏.工业化预制装配住宅的建筑全生命周期碳排放模型研究[J].华中建筑,2015(9):70-74.
- [4] 肖鸿舰.基于LCA的钢筋混凝土连续刚构桥的环境影响分析[J].中国新技术新产品,2018(2):128-129.
- [5] 毛睿昌.基于LCA的城市交通基础设施环境影响分析研究[D].深圳:深圳大学,2017.
- [6] 张海涛,孟良,吕丽华.基于LCA的沥青路面设计参数对碳排放的影响[J].公路交通科技,2018(2):1-7.