

引用本文:王怡萍,刘铁,吴艳萍,等.基于 Hybrid-LCA 模型的装配式夹芯保温墙板碳评价[J].建筑节能(中英文),2024,52(1):23-26.
doi:10.3969/j.issn.2096-9422.2024.01.004

基于 Hybrid-LCA 模型的装配式夹芯保温墙板碳评价*

王怡萍¹, 刘铁², 吴艳萍², 金超², 管小军², 杨莉琼^{1Δ}

(1.西南科技大学 土木工程与建筑学院,四川 绵阳 621010;2.宁波建工股份有限公司,浙江 宁波 315000)

摘要: 为了量化不同构造的夹芯保温墙板的减排效果,选取 6 种典型保温构造,基于 Hybrid-LCA 法建立外墙全生命周期的碳评价模型。量化分析表明:夹芯保温体系的减排效果明显优于外保温体系。以建筑垃圾为保温芯材的夹芯保温墙板减排效果明显优于其他保温墙体。复合夹芯保温墙板减排效果较好,但保温性能下降。普通混凝土夹芯保温墙板物化阶段减排效果优于预制清水混凝土和轻骨料混凝土夹芯保温墙板,同时墙体厚度小的优势增加了住房使用面积,但增加了运营阶段碳排放;预制清水混凝土与轻骨料混凝土夹芯保温墙板物化阶段减排效果差异不大,但由于其保温性能的提升,可降低建筑物运营能耗。

关键词: 保温墙板; 碳排放; 混合生命周期

中图分类号: TU5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-9422(2024)01-0023-04

Carbon Assessment of Fabricated Sandwich Insulation Wallboard Based on Hybrid-LCA Model

WANG Yiping¹, LIU Tie², WU Yanping², JIN Chao², GUAN Xiaojun², YANG Liqiong^{1Δ}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China; 2. Ningbo Construction, Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: In order to quantify the emission reduction effect of sandwich insulation wallboards with different structures, six typical insulation structures are selected, and a carbon assessment model for the full life cycle of exterior walls is established based on Hybrid LCA method. The quantitative analysis shows that the emission reduction effect of sandwich insulation system is obviously better than that of external insulation system. The emission reduction effect of sandwich insulation wallboard with construction waste as insulation core material is obviously superior to other insulation walls. The composite sandwich insulation wallboard has good emission reduction effect, but its thermal insulation performance is reduced. The emission reduction effect of ordinary concrete sandwich insulation wallboard in the physical and chemical stage is better than that of prefabricated fair faced concrete and lightweight aggregate concrete sandwich insulation wallboard. Meanwhile, the advantage of small wall thickness increases the use area of housing, but increases the carbon emissions in the operation stage; The emission reduction effect of prefabricated fair faced concrete and lightweight aggregate concrete sandwich insulation wallboard is not different, but due to the improvement of its insulation performance, it can reduce the energy consumption of building operation.

Keywords: insulation wallboard; carbon emission; hybrid life cycle assessment

0 引言

根据《中国建筑能耗与碳排放研究报告

(2021)》,2019 年我国建筑全过程碳排放总量为 49.97 亿吨 CO₂,占全国碳排放比重为 49.97%。其中建材生产阶段碳排放占全国碳排放比重为 28%^[1]。有学者通过分析 129 栋住宅物化阶段的碳排放数据

收稿日期:2022-10-02; 修回日期:2024-01-19

* 基金项目:宁波市科技计划资助项目(2022T003)

得出砂浆、钢、混凝土以及墙体材料的碳排放量比例之和超过了住宅物化阶段碳排放总量的 70%^[2]。建筑施工阶段碳排放占全国碳排放的 1%,装配式建筑施工阶段的碳排放优于传统建筑^[3]。建筑运营阶段碳排放占全国碳排放比重为 21.6%。建筑物运营阶段碳排放主要来源于水、电、气等能源的消耗^[4]。其中,建筑围护结构的保温隔热性会直接影响能源的使用效率,进而增加能耗^[5]。因此,大力推广装配式保温墙板是建筑业实践碳中和远景目标的有效途径之一。

外保温体系是我国围护结构长期采用的一种构造形式,国内学者们大都针对外保温体系进行碳评价^[6,7]。但外保温体系主要采用有机保温隔热材料使得建筑运营期存在火灾隐患,目前很多城市禁止采用外保温体系,提出大力发展夹芯保温体系。目前国内学者很少关注夹芯保温体系的节能减排效果。因此,本文重点选取典型的 6 种保温墙板,通过对物化阶段的碳评价,量化分析不同类型保温墙板的节能减排效果,从而为装配式建筑墙板的选材和设计提出建议和参考。

1 生命周期碳排放评价方法

建筑生命周期评价方法主要包括:基于过程生命周期评价法(Process - based LCA, P - LCA)、投入产出生命周期评价法(Input - output LCA, IO - LCA)和混合生命周期评价法(Hybrid - LCA, H - LCA)。基于过程生命周期评价法是将不同阶段的碳排放量叠加在一起,具有计算简便等优点,国内外学者大多使用该方法进行微观产品或项目碳评价^[8-10]。但此方法存在截断误差,为解决 P - LCA 系统边界确定具有主观性的弊端,Leontief 将投入产出表引入生命周期评价中,创建投入产出生命周期评价模型,依据行

业相关部门的产出数据换算得出能耗与碳排,该方法主要用于宏观领域的碳评价^[11-14]。

混合生命周期评价法是指综合 P - LCA 和 IO - LCA 结合使用的方法。该方法是由 Bullard 等人在 20 世纪 70 年代第一次石油危机之后提出,主要用于能源投入产出分析。国内外研究表明,Hybrid - LCA 结合了前两种方法的优点,既保持了结果的精准性,又消除了截断误差^[15-17]。结合本文研究目标和范围,选用 Hybrid - LCA 法分析不同保温构造的外墙物化阶段的碳足迹,从而量化夹芯保温墙板的减排效果。

2 保温墙板全生命周期碳活动分析

基于 Hybrid - LCA 建立全生命周期碳排放计算模型,保温墙板生命周期碳排放计算模型主要包括物化阶段和运营阶段,其中物化阶段系统边界为预制构件生产阶段、运输阶段、现场施工阶段。本文测算全生命周期墙板碳排放的具体过程见图 1。在功能单位上,本文选用 1 m³ 为功能单位。

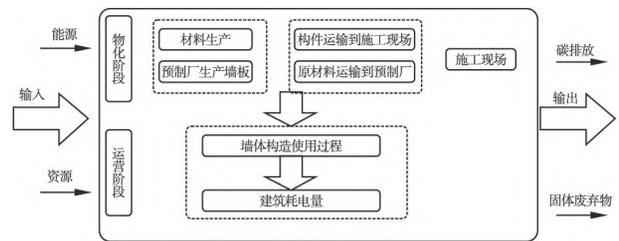


图 1 全生命周期碳排放研究的系统边界

3 基于 Hybrid - LCA 的物化阶段装配式夹芯保温墙板碳评价

3.1 典型保温墙板构造

根据市场调研,选取了 6 种不同构造的保温墙板,具体构造见表 1。

表 1 各种夹芯保温墙板做法

保温墙板	构件做法	厚度/mm	导热系数/ [W/(m·K)]	密度/ (kg/m ³)
普通混凝土夹芯保温墙板 ^[18]	普通混凝土(外叶墙板)	60		2230
	XPS 保温板(夹芯保温层)	40	/	30
	普通混凝土(内叶墙板)	60		2230
预制清水混凝土夹芯保温墙板 ^[19]	清水混凝土(外叶墙板)	200		2500
	XPS 保温板(夹芯保温层)	30	0.865	30
	清水混凝土(内叶墙板)	60		2500
轻骨料混凝土夹芯保温外挂墙板 ^[20]	轻骨料混凝土(外叶墙板)	55		1780
	XPS 保温板(夹芯保温层)	40	0.67	30
	轻骨料混凝土(内叶墙板)	100		1780
新型夹芯保温墙板	再生骨料、矿物掺合料、轻骨料的高性能混凝土	50		
	保温芯材(废弃渣土、泥浆的水泥基纳米多孔材料)	100	/	1000
	再生骨料、矿物掺合料、轻骨料的高性能混凝土	50		
复合夹芯保温墙板 ^[21]	全轻轻集料混凝土(外叶墙板)	50		1200
	泡沫混凝土(夹芯保温层)	50	1.11	500
	全轻轻集料混凝土(内叶墙板)	50		1200
XPS 板外保温墙板 ^[22]	抗裂砂浆	5		1700
	混凝土多孔砖	240	0.82	1450
	XPS 板	25		25

3.2 墙板材料生产阶段

目前,我国已建立了较完善的建筑原材料碳排放因子数据库。因此,墙材生产阶段的碳排放计量选用基于过程生命周期评价法,见式(1):

$$\text{生产阶段碳排放量} = \text{建材碳排放因子} \times \text{材料消耗量} \quad (1)$$

依据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)和上述公式,6种保温墙板生产阶段的碳排放量如图2所示。其中,新型夹芯保温墙板的碳排放量最低,XPS板外保温墙板碳排放量最高。主要是由于新型墙板采用建筑垃圾作为保温芯材,减排效果明显。

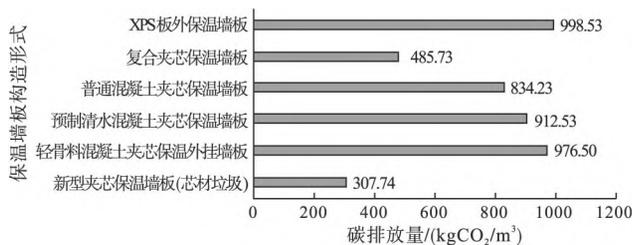


图2 保温墙板生产阶段产生CO₂排放量

3.3 墙板运输阶段

预制构件运输阶段碳排放包括原材料运输到工厂和构件运输至现场过程中产生碳排放总和。目前,我国已建立了较完善的运输工具碳排放因子数据库。因此,墙材和墙板运输阶段的碳排放计量选用基于过程生命周期评价法,见式(2):

$$\text{运输阶段碳排放量} = \text{建材(墙板)重量} \times \text{运输距离} \times \text{运输工具碳排放因子} \quad (2)$$

6种保温墙板运输阶段碳排放量如图3所示。图

中数据表明:相比外保温墙体,夹芯保温墙板运输阶段的减排效果并不十分明显,甚至新型夹芯保温墙板的碳排放高于外保温墙板。其中,轻骨料混凝土夹芯保温墙板运输阶段的碳排放最小,主要是保温芯材采用了自重轻的XPS材料。

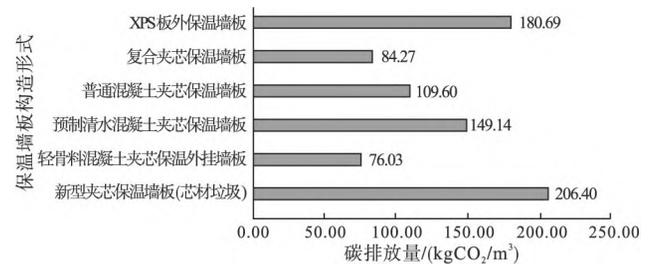


图3 保温墙板运输阶段CO₂排放量

3.4 墙板施工阶段

墙板施工过程中的碳排放主要来自施工机械设备、机具等的能源消耗。由于能源消耗数据统计受限,大型机械设备施工阶段碳评价更适合采用投入产出分析法,见式(3):

$$\text{施工阶段碳排放量} = \text{墙板的施工预算费} \times \text{其对应的部门碳排放系数} \quad (3)$$

本文通过IO-LCA模型计算得出与建筑密切相关部门的碳排放系数见表2。根据装配式构件基础价格表、《全国统一施工机械台费用定额》等计算得出墙板的施工预算费。6种保温墙板施工阶段碳排放量如图4所示。图中数据表明:装配式夹芯保温墙板的施工碳排放明显低于外保温墙体;不同构造的装配式墙板施工阶段的碳排放差异较小。

表2 施工现场部门完全碳排放系数

部门代码	部门	完全碳排放系数/(tCO ₂ e/10 ⁴ CNY)	备注
25041	精炼石油和核燃料加工品	4.46	汽油、石油
35073	采矿、冶金、建筑专用设备	2.64	施工机械
44098	电力、热力生产和供应	6.68	施工机械电力
54110	道路货物运输和运输辅助活动	1.97	现场二次运输工具

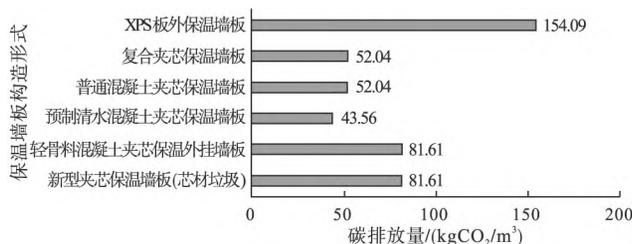


图4 保温墙板施工阶段CO₂排放量

3.5 墙板物化阶段

综合材料生产阶段、运输阶段以及施工阶段碳排放量,墙板物化阶段碳排放量如图5所示。图中数据表明:基于建筑垃圾、废弃泥浆等固废的新型夹芯保

温墙板减排效果最优。

4 运营阶段装配式夹芯保温墙板碳评价

本文以典型房屋为例,使用Ecotect软件对使用阶段能耗进行模拟,比较不同保温墙板使用阶段的碳排放量。本文运营阶段的能耗主要考虑房屋的耗电量,同时选择Weather Tool中典型的成都地区气象数据进行模拟,计算方法见式(4):

$$\text{运营阶段碳排放量} = \text{使用阶段单位能源年消耗量} \times \text{能源碳排放因子} \times \text{保温材料的使用年限} \quad (4)$$

运营阶段保温材料的使用年限取值为20年,6种保温墙板的碳排放量见图6。图中数据表明:外保温

墙板运营阶段的碳排放量明显高于夹芯保温墙板。其中轻骨料混凝土夹芯保温外挂墙板和预制清水混凝土夹芯保温墙板运营阶段的单位碳排放量较低。

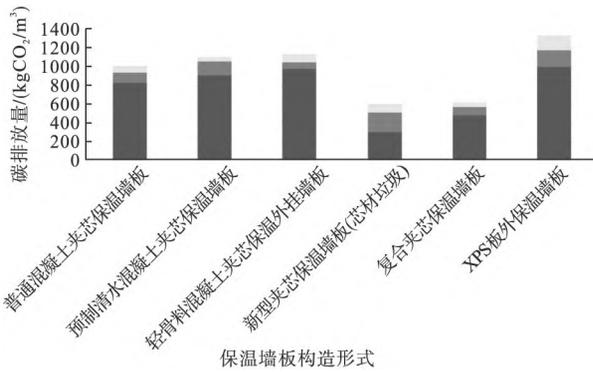


图5 物化建筑各保温墙板 CO₂ 排放量

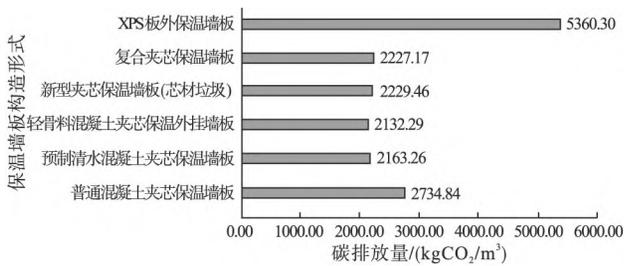


图6 运营阶段各保温墙板 CO₂ 排放量

5 全生命周期保温墙板碳评价

综合物化阶段和运营阶段,保温墙板全生命周期碳排放量如图7所示。图中数据表明:使用新型材料的夹芯保温墙板全生命周期碳排放减少;复合夹芯保温墙板减排效果较好,但保温性能下降。虽然采用相同保温材料 XPS 板,但夹芯保温墙板的减排效果明显优于外保温墙体;对比不同构造的夹芯保温墙板,在物化阶段内外叶墙板采用普通混凝土的减排效果优于预制清水混凝土和轻骨料混凝土,同时墙体厚度小的优势增加了住房使用面积,但增加了运营阶段的碳排放;预制清水混凝土与轻骨料混凝土夹芯保温墙板物化阶段减排效果差异不大,由于其保温性能的提升,大大降低了降低建筑物运营能耗,从而使得全生命周期碳排放减少。

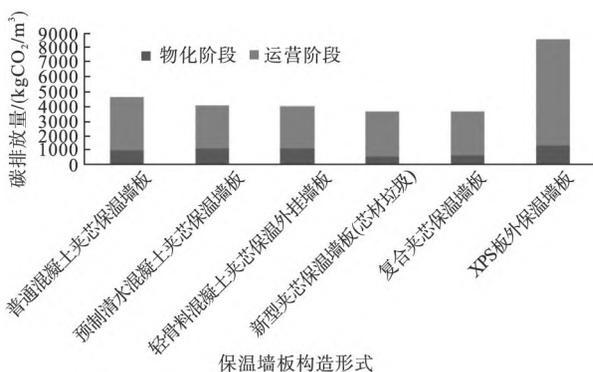


图7 全生命周期各保温墙板 CO₂ 排放量

参考文献:

[1] 中国建筑能耗研究报告 2021 [J]. 建筑节能(中英文), 2022, 49(2): 1-6.

[2] 仓玉洁, 罗智星, 杨柳, 等. 城市住宅建筑物化阶段建材碳排放研究[J]. 城市建筑, 2018, (17): 17-21.

[3] 曹静, 沈志明, 王晓玉, 等. 混凝土装配式与现浇住宅建筑碳排放分析与研究[J]. 建设科技, 2020, (S1): 69-73.

[4] 鞠颖, 陈易. 建筑运营阶段的碳排放计算——基于碳排放因子的排放系数法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(3): 175-179.

[5] 毛潘, 杨柳, 罗智星. 建筑构造生命周期碳排放评价方法研究——以西安地区住宅建筑墙体构造为例[J]. 华中建筑, 2019, 37(12): 32-37.

[6] 马丽萍, 蒋荃, 赵平, 等. 我国典型外墙外保温系统生命周期碳排放比较研究[C]//中国建筑材料联合会. 北京: 中国建筑材料联合会, 2014.

[7] 覃文秋, 梁艳仙, 李会敏. 建筑外墙外保温材料性能、造价与碳排放量分析[J]. 价值工程, 2021, 40(32): 131-133.

[8] 纪颖波, 张祺, 朱发东. 基于 Process-Based LCA 方法的我国装配式住宅物化阶段碳排放计算模型研究[J]. 工程管理学报, 2017, 31(4): 23-28.

[9] Monahan J, Powell J C. An Embodied Carbon and Energy Analysis of Modern Methods of Construction in Housing: A Case Study using a Lifecycle Assessment Framework[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(1): 179-188.

[10] 郑艳丹, 赖茂宇, 吴淑艺, 等. 基于工程量清单的建筑碳排放实证与减排策略研究——以福建省为例[J]. 工程管理学报, 2018, 32(1): 12-17.

[11] Guan J, Zhang Z, Chu C. Quantification of Building Embodied Energy in China Using an Input-output-based Hybrid LCA Model[J]. Energy and Buildings, 2016, 110(1): 443-452.

[12] 王悦, 郭森, 郭权, 等. 基于 IO-LCA 方法的我国风电产业全生命周期碳排放核算[J]. 可再生能源, 2016, 34(7): 1032-1039.

[13] 许奕奕, 马树才, 付云鹏. 基于投入产出法的辽宁省水足迹和虚拟水核算[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2018, 36(1): 58-62.

[14] 赵巧芝, 闫庆友. 基于投入产出的中国行业碳排放及减排效果模拟[J]. 自然资源学报, 2017, 32(9): 1528-1541.

[15] Pomponi F, Lenzen M. Hybrid Life Cycle Assessment (LCA) will Likely Yield More Accurate Results than Process-based LCA[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176(1): 210-215.

[16] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1242.

[17] R H Crawford, P A Bontinck, A Stephan, et al. Hybrid Life Cycle Inventory Methods-A Review[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172(20): 1273-1288.

[18] 王宇, 吴杰, 朱敏涛. 钢结构住宅用预制夹芯保温外挂墙板的设计与应用研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020, (11): 40-43.

[19] 沈开豪. 预制清水混凝土墙板与预制装饰混凝土夹芯保温墙板的研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.

[20] 管文. 高层装配式建筑预制轻骨料混凝土夹芯保温外挂墙板研究[J]. 施工技术, 2018, 47(12): 100-104.

[21] 王果. 泡沫混凝土与全轻集料混凝土复合夹芯保温墙体材料的性能优化及界面增强[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.

[22] 周越. 浙江省建筑外墙保温体系物化过程 CO₂ 排放研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

作者简介: 王怡萍(1999), 女, 四川绵阳人, 土木水利专业, 硕士研究生, 研究方向为工程管理(707269027@qq.com)。

△指导教师(通讯作者): 杨莉琼(1980), 女, 甘肃人, 毕业于重庆大学, 管理科学与工程专业, 博士, 副教授, 研究方向为工程管理(yliq@ustc.edu.cn)。