

增强复合岩棉条板保温系统的生命周期评价研究

罗智星^{1,2}, 于运星², 张帅帅², 仓玉洁², 卢梅³, 杨柳^{1,2}

(1. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 据统计, 我国建筑业能耗占全国总能耗的 40% 以上, 其中, 建筑围护结构热量交换产生的温度调节能耗占建筑全生命周期的 70% 以上, 而建筑保温系统作为围护结构热量交换的主要控制者, 对于建筑能耗、环境负荷有着重要影响。因此, 本研究采用生命周期评价方法, 选定保温结构一体化产物增强复合岩棉条板保温系统为研究对象, 以 1 m² 为功能单位, 划定从原辅材料开采到成品出厂(从摇篮到大门)为系统边界对其进行研究, 识别其造成环境影响的关键阶段并提出可选择的优化改进方案, 旨在降低建筑保温材料的环境负荷并为建筑外墙外保温系统的选择提供新的决策。

关键词: 建筑外墙外保温系统; 生命周期评价; 增强复合岩棉条板; 碳减排

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)03-0431-10

Study on life cycle assessment of reinforced composite rock wool board insulation system

LUO Zhixing^{1,2}, YU Yunxing², ZHANG Shuaishuai², CANG Yujie², LU Mei³, YANG Liu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China;

2. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: According to statistics, the energy consumption of China's construction industry accounts for more than 40% of the country's total energy consumption, of which the energy consumption of temperature regulation generated by heat exchange of building envelope accounts for more than 70% of the whole life cycle of buildings. As the main controller of heat exchange of building envelope, building insulation system have an important impact on building energy consumption and environmental load. Therefore, this study adopts the life cycle assessment method, selects the insulation structure integrated product—reinforced composite rock wool board insulation system as the research object, takes 1 m² as the functional unit, and delimits the system boundary from the mining of raw and auxiliary materials to the delivery of finished products (from cradle to gate), identify the key stages of its environmental impact and propose optional optimization and improvement plans, aiming to reduce the environmental load of building insulation materials and provide new decisions for the selection of external insulation system for building exterior walls.

Key words: building external thermal insulation system; life cycle assessment; reinforced composite rock wool board; carbon emission reduction

随着建筑节能标准的进一步提高, 作为建筑节能重要环节的围护结构热工性能^[1], 逐渐成为了人们关注的重点, 外墙外保温技术与形式也得到了快速发展与广泛使用。据统计, 截止到 2018 年, 建筑外墙外保温面积已达约 113.1 亿 m²^[2]。然而, 外保温系统如此快速发展的同时也产生了各种问题, 如开裂、脱落、寿命短需要二次更换等, 这

便增加了外墙外保温系统使用阶段的成本投入, 加之现阶段我国建筑外墙外保温防火技术及施工质量难以保证, 安全问题时有发生, 因此建筑外墙外保温市场迫切需要着新型保温系统的出现。

增强复合岩棉条板保温系统为本团队与当地典型建筑用岩棉制品生产厂家合作研发的新型外墙外保温系统, 其作为保温结构一体化技术的产

收稿日期: 2021-12-08

修改稿日期: 2022-05-31

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51908441); 陕西省教育厅科学研究计划服务地方专项基金项目(20JC023)

第一作者: 罗智星(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向建筑生命周期评价、建筑保温系统研发、绿色建筑。E-mail: luozhixing@xauat.edu.cn

物, 凭借可与建筑同寿命、易施工等特点, 在一定程度上弥补了传统外墙外保温系统的不足, 在当地市场已逐渐推广应用, 并建立了枫林九溪、金泰东郡等示范项目。同时, 随着《建筑外墙外保温系统的防火性能试验方法》GB/T 29416—2012^[3]、《建筑设计防火规范》GB 50016—2014^[4]等条文的发布, 人们对建筑材料的防火性能提出了更高的要求。岩棉由于其不燃性以及 A 级燃烧性能等级得到了广泛的关注^[5], 而增强复合岩棉条板保温系统作为其下游产品, 在保持了原有的防火性能的同时更优化了热工性能等, 这使其逐渐迎来了广阔的市场。但与此同时轻质砂浆、钢制螺栓等组成保温系统所必须材料的使用无疑会增加产品生产过程中造成的环境负荷, 在碳达峰、碳中和双碳目标背景下, 对建筑领域开展环境影响评价和减排策略制定显得尤为重要, 因此, 很有必要对其进行生命周期评价, 从而量化其环境友好度。

为系统化定量分析增强复合岩棉条板保温系统整个生产生命周期中各个环节的原辅材料、能源消耗以及主要环境影响, 本研究采用生命周期评价方法^[6] (Life Cycle Assessment, 以下简称 LCA)。LCA 是一种用于评价产品相关的环境因素及其整个生命周期环境影响的工具^[7], 现已被纳入 ISO14040 等环境管理标准中^[8]。因此, 对增强复合岩棉条板保温系统开展 LCA 研究是有显著意义的。

首先, 为更为科学地量化各保温构造的环境负荷, 使各材料之间可进行横向的环境友好度对比, 各学者基于 LCA 方法对建筑保温材料开展了各式各样的研究。其中, 马丽萍等^[9]通过生命周期评价法对岩棉板、聚苯板和硬泡聚氨酯板进行了计算分析, 并以单位质量为功能单位对其产生的环境影响做了比较和分析, 结果表明: 三类保温板生产阶段环境影响大小排序为岩棉板 < 聚氨酯板 < 聚苯板; Nuno Pargana 等^[10]以从摇篮到大门为系统边界、单位质量保温材料为功能单位, 通过 LCA 方法对膨胀粘土轻骨料、XPS、EPS、聚氨酯板和膨胀软木结块进行了研究, 结果表明 EPS 的环境影响较小, 且其环境影响的大多数都是在原材料开采及加工阶段产生的。他们的研究为相关材料的环境影响做出了评价, 并为节能减排等下游研究提供了可参考的具体影响数值, 但是由于材料本身容重存在的较大差异性, 导致以单位重量为功能单位时产生的环境影响结果科学性难以评定。

而另一些学者考虑到不同保温材料热工性能带来的使用影响, 以单位热阻为功能单位展开了研究。赵薇等^[11]基于生命周期评价方法, 以相同

保温效果即 $1(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 热阻为功能单位, 分析了岩棉板、EPS 板和 XPS 板环境影响的主要贡献者, 并为其关键过程的优化提出见解; Carabano, Rocio 等^[12]通过 LCA 方法, 以 $1(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 热阻为功能单位, 对比评估了 XPS 板和玻璃棉的环境影响, 结果表明玻璃棉对“酸化”指标的影响较小但是对“臭氧层恶化”指标影响较大。这些研究排除了材料本身容重的影响, 相比之下科学性有所提升, 然而由于该方式下得到的结果又会受到材料导热系数的影响, 并且在实际材料环境负荷比较与选择中需要先计算构造总传热系数, 依旧难以以最佳的功能单位反应材料实际的环境负荷, 甚至不同功能单位下的研究结论可能会有所偏差。这便制约了各材料间环境负荷的横向对比性, 因而难以以为提供科学指导。

相比之下, 以单位面积为功能单位进行的研究既能排除材料本身特性如容重、导热系数等的影响又可与建筑的计量单位相匹配, 同时也可灵活反应不同厚度下材料的环境影响, 因而使材料的环境负荷科学性得到提升。为此, 刘宇等^[13]以满足北京市 75% 节能标准的 1 m^2 EPS 薄抹灰和岩棉薄抹灰保温系统, 利用 LCA 方法对比分析了两种保温系统从矿石开采到最终废弃的全过程资源消耗与环境影响, 为绿色建筑的选材提供了有利方法; ZHU Li 等^[14]基于生命周期评价对岩棉板和 EPS 板从原材料开采到成品出厂的环境影响进行了分析, 结果表明, 岩棉板每单位平方米生命周期能耗较大且造成的环境影响比 EPS 大; Noelia Llanto^[15]运用 LCA 方法, 以保温材料聚氨酯、挤塑聚苯乙烯和矿棉为研究对象, 分析了在地中海大陆气候下的环境负荷, 结果表明, 以单位面积为功能单位计, 聚苯乙烯保温材料的环境影响最大, 矿棉的环境性能最好; SU X 等^[16]对矿棉、泡沫玻璃和酚醛树脂等保温材料进行了生命周期评价, 结果表明泡沫玻璃生命周期能耗和碳排放最大, 酚醛树脂最小。

总之, 基于 LCA 方法对建筑保温材料开展的研究已经较为丰富, 但是, 由于各研究划定的功能单位、系统边界的差别以及数据来源等不同, 导致得到的研究结果存在着一定差异, 使得各结果之间难以通过统一的标准进行对比分析, 更难以对保温材料实际的生产情况进行环境负荷的评定。因此, 本研究采用 LCA 方法, 选定科学性更高、对比性更优的单位面积为功能单位, 通过对当地典型企业的调研进行实景数据收集和取舍, 建立增强复合岩棉条板保温系统从摇篮到大门的生命周期评价模型, 识别其造成环境影响的主要

阶段和关键清单、提出可选择的优化改进方案, 为增强复合岩棉条板保温系统本土化数据库的建立和应用提供支持, 同时为建筑外墙外保温系统的选择提供新的决策.

1 增强复合岩棉条板保温系统及其生产流程简介

1.1 系统介绍

增强复合岩棉条板即通过专用设备、特殊生产工艺, 在岩棉条周围表面覆盖阻燃聚氨酯发泡剂、玻璃纤维预浸水泥基布、耐碱玻璃纤维网格布和抹面胶浆所形成的具有复合增强作用的保温板材, 如图 1(a).

以增强复合岩棉条板作为主要保温材料, 再与压入热镀锌钢丝网的抹面胶浆复合而成的抹面层结合, 使其热工、结构性能等得到提升, 便构成可参与保温结构一体化体系的外墙外保温系统. 该系统采用机械锚固为主粘接为辅的方式与基层墙体进行连接, 其中包括圆形支撑块、专用连接件和热镀锌电焊网等配件, 如图 1(b).



(a) 增强复合岩棉条板



(b) 增强复合岩棉条板保温系统

图 1 增强复合岩棉条板及其保温系统现场照片

Fig. 1 Field photos of reinforced composite rock wool board and its insulation system

1.2 生产流程简介

增强复合岩棉条板保温系统是以成品岩棉板为原材料的下游产品, 经实地调研了解后可将其具体生产工艺分为三个单元过程, 其中: 单元过程一为岩棉板生产流程, 见图 2; 单元过程二及单元过程三分别为复合岩棉条板、增强复合岩棉条板保温系统的生产流程, 见图 3、图 4.

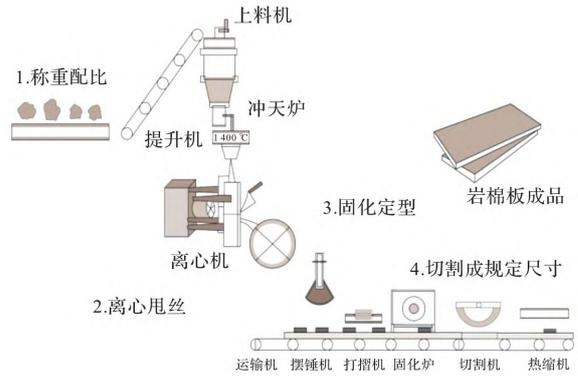


图 2 岩棉板生产流程示意图

Fig. 2 Production diagram of rock wool board production process

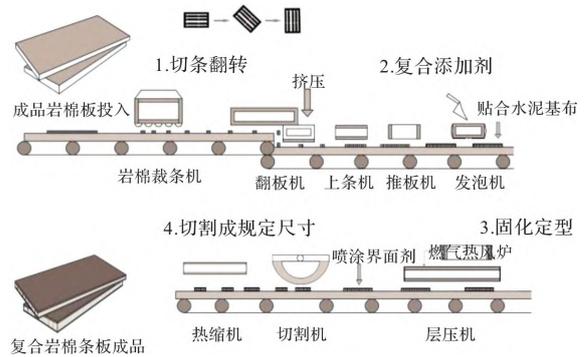


图 3 复合岩棉条板生产示意图

Fig. 3 Production diagram of composite rock wool board

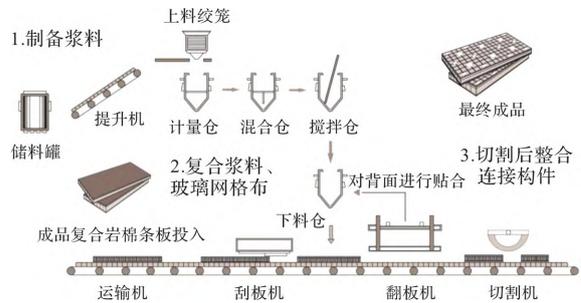


图 4 增强复合岩棉条板保温系统生产示意图

Fig. 4 Production diagram of reinforced composite rock wool board insulation system

单元过程一: 将原材料称重配比后经振动筛、提升机、上料机后投入冲天炉, 利用高温将原料制成熔体后经流槽导入(四辊)离心机, 离心甩丝后经鼓风机将絮棉喷吹至集棉机中, 并通过抽风机使纤维牵落到网带上形成原毡, 后经摆锤布棉机将其铺叠成较为均匀的状态, 再经打褶机(缝纫设备)、固化炉完成最终定型, 经冷却机降温后通过切割机进行切割, 吹渣清洁并待其温度冷却适宜即可完成包装入库;

单元过程二: 将成型岩棉板用裁条机切条后经翻板机旋转九十度, 使其成为竖向棉丝以增强其抗拉能力, 后经上条机、推板机运输并完成与

水泥基布的贴合,再经发泡机对岩棉条板进行添加剂的复合,之后通过层压机和燃气热风炉完成固化定型,喷涂界面剂并切割成需求尺寸,最后经热缩包装机完成包装入库,同时使用光氧机对油雾等废气进行处理;

单元过程三:将所需原料从储料罐中提取后经沙料提升机和上料绞笼运输至计量仓,后经混合仓、搅拌仓处理制成水泥浆料,通过下料仓和刮板机完成对复合板正面的材料复合,同时在刮板机前方将玻璃网格布铺设于板材表面,待养护稳定后经翻板机翻至背面进行相同处理,稳定后经切割机制成所需尺寸,最后将钢制螺栓等连接构件固定后即可完成增强复合岩棉条板保温系统的生产制备。

2 研究方法

依据 GB/T 24044^[7]、ISO 14040^[17] 等相关标准,本研究采用 LCA 技术框架:(1)目的和范围;(2)清单分析;(3)影响评价;(4)结果解释,对增强复合岩棉条板保温系统的 LCA 结果进行系统分析和定量评价。为对其生命周期每个具体流程的资源、能源投入与环境影响进行详细分析并识别需要优化改进的阶段,本文选用基于过程的 LCA 展开研究。另外,将增强复合岩棉条板保温系统的生命周期模型划分为背景过程即资源、能源的生产及所包含的运输过程和实景过程即研究对象的生产制备和各过程的主要排放。

2.1 目的和范围

考虑到增强复合岩棉条板保温系统生产制备过程中体积变化以及与建筑物的评价协调性等因素,研究选定单位面积即 1 m^2 为功能单位。70 mm 厚岩棉作为所调研企业生产规模、市场流通量最大且目前既有建筑中使用较为广泛的规格型号,具有很大的研究价值,因此,本研究选取 70 mm 厚岩棉芯材作为其主要保温层。以民用建筑热工设计规范 GB 50176-2016^[18] 给定的参数计算,此时该保温系统能满足大多数省市正在使用的 65% 建筑节能设计标准,构造大样如图 5。需要说明的是,钢筋混凝土剪力墙作为保温系统的重要组成部分,对其热工及力学性能均起到了一定作用,但由于剪力墙中钢筋与混凝土的配比难以确定且存在地方性差异,故不考虑此部分产生的环境影响。

选取气候变化(GWP)、初级能源消耗(PED)等 9 个常用的环境影响类别为评价指标,对增强复合岩棉条板保温系统进行生命周期评价与定量分析,识别其造成环境影响的关键阶段并提出可选

择的改进方案。另外,eq 是 equivalent 的缩写,意为当量。例如气候变化指标(GWP)是以 CO_2 为基准物质,其他各种温室气体按温室效应的强弱都有各自的 CO_2 当量因子,因此,产品生命周期的各种温室气体排放量可以各自乘以当量因子,累加得到气候变化指标总量,其单位为 $\text{kgCO}_2 \text{ eq}$,详见表 1。

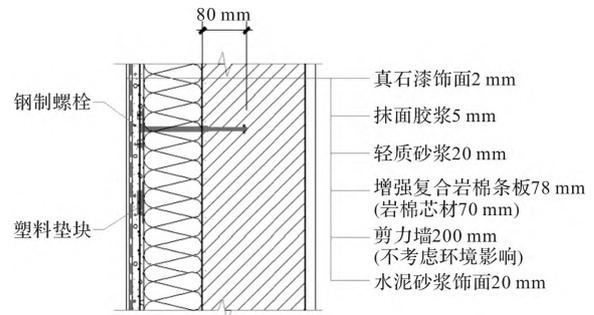


图 5 增强复合岩棉条板保温系统构造大样

Fig. 5 Reinforced composite rock wool board insulation system structure sample

表 1 环境影响类型指标选取

Tab. 1 Selection of environmental impact type indicators

环境影响类型指标	影响类型 指标单位	主要清单物质
气候变化(GWP)	$\text{kgCO}_2 \text{ eq}$	CO_2 、 CH_4 、 N_2O ...
初级能源消耗(PED)	MJ	硬煤、褐煤、天然气...
非生物资源消耗(ADP)	kgSb eq	铁、锰、铜...
水资源消耗(WU)	kg	淡水、地表水、地下水...
酸化(AP)	$\text{kgSO}_2 \text{ eq}$	SO_2 、 NO_x 、 NH_3 ...
富营养化(EP)	$\text{kgPO}_4^{3-} \text{ eq}$	NH_3 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 COD ...
可吸入无机物(RI)	$\text{kgPM}_{2.5} \text{ eq}$	CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$...
臭氧层消耗(ODP)	kgCFC-11 eq	CCl_4 、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_3$ 、 CH_3Br ...
光化学臭氧合成(POFP)	kgNMVOC eq	C_2H_6 、 C_2H_4 ...

2.2 系统边界

研究选定从原材料开采运输至增强复合岩棉条板成品出厂(从摇篮到大门)的生命周期评价模型,划定系统边界为:(1)原辅材料(玄武岩、酚醛树脂等)的生产及运输阶段;(2)电力、天然气等能源的生产及运输阶段;(3)70 mm 厚岩棉板的生产制备过程(摆锤法)即单元过程一;(4)复合岩棉条板的生产制备过程即单元过程二;(5)增强复合岩棉条板生产制备过程即单元过程三,其中包括构成该保温结构一体化系统所必需的材料,如轻质砂浆等造成的环境负荷,具体如图 6。

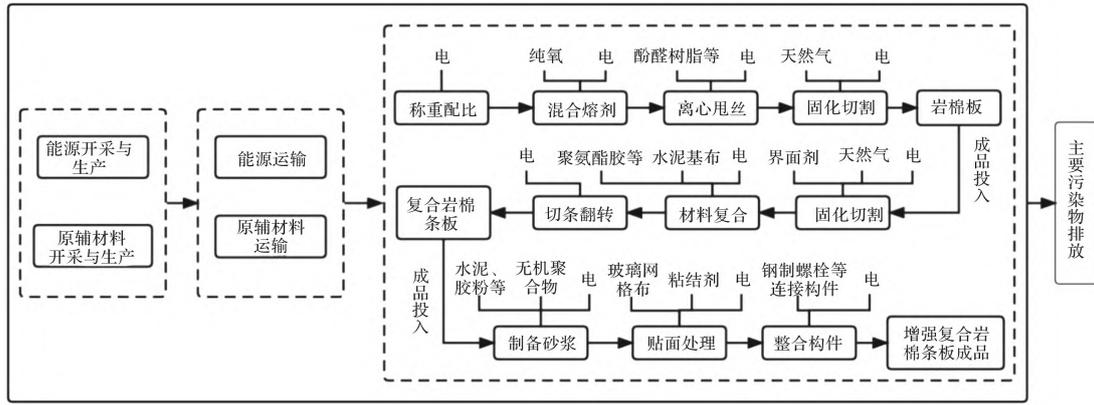


图 6 系统边界

Fig. 6 System boundary

2.3 取舍准则

以 ISO 14044^[19] 标准为准则, 参考中国 CLCD 数据库引介的相关研究^[20-21], 本文的取舍准则以各项材料投入占产品重量或过程总投入的重量比为依据, 即对于重量 < 1% 产品重量的普通物料以及低价值废物原料(秸秆等), 可忽略其上游生产数据, 且总共忽略的物料重量不超过 5%。

2.4 清单分析

2.4.1 背景数据

背景数据来源于国内外公开数据库, 对于部分材料如酚醛树脂、聚氨酯胶等, 由于国内基础数据库的缺乏, 本研究酌情采用欧洲数据库进行

匹配。详见表 2:

2.4.2 实景数据

陕西华远尚润新型建材有限公司是当地典型的建筑用岩棉制品生产厂家, 其生产产品广泛销售到全国各处, 并与本研究团队共同开发了增强复合岩棉条板保温系统等专利产品, 因此, 本研究以功能单位 1 m² 增强复合岩棉条板保温系统, 通过对该企业实地调研收集生产过程中的实景数据, 其中, 运输距离为所调研企业至周边典型原辅料生产厂家的行驶距离, 主要排放数据由企业环评报告获得。具体见表 3~5。

表 2 背景数据库

Tab. 2 Background database

生产过程	数据库
电力、天然气、水、纯氧、焦炭、白云石、丙烯酸共聚物、水泥、砂浆、热镀锌钢丝网、钢制螺栓、轻型柴油货车运输(2 t)、中型柴油货车运输(8 t)、重型柴油货车运输(10 t)	CLCD-China-ECER 0.8
玄武岩、矿渣、酚醛树脂、异氰酸酯、聚氨酯胶、界面剂、粘剂、玻璃纤维机织物、耐碱高分子乳液、膨胀型玻化微珠、粉煤灰、可溶性胶粉、锚栓圆盘、SR 垫块	Ecoinvent 3.1

表 3 岩棉板生产消耗与主要排放

Tab. 3 Production consumption and main emissions of rock wool board

项目	岩棉板生产(70 mm 厚)		
	使用量	运输距离 /km	运输工具
原材料消耗	玄武岩	5.6 kg	220 重型柴油货车运输(10 t)
	白云石	0.47 kg	648 重型柴油货车运输(10 t)
	焦炭	2.1 kg	372 重型柴油货车运输(10 t)
	矿渣	4.9 kg	329 重型柴油货车运输(10 t)
	酚醛树脂	0.7 kg	194 中型柴油货车运输(8 t)
	粘剂	0.26 kg	194 中型柴油货车运输(8 t)
能源消耗	电力	3.02 kWh	—
	水	0.22 kg	—
	纯氧	0.02 m ³	—
主要排放	烟尘	3 532.03 mg	
	粉尘	2514.10 mg	
	二氧化硫	245.28 mg	

表4 复合岩棉条板生产消耗与主要排放

Tab. 4 Production consumption and main emissions of composite rock wool board

项目	复合岩棉条板生产		
	使用量	运输距离 /km	运输工具
岩棉板	1.04 m ²	—	—
水泥基布	水泥	911	轻型柴油货车运输(2 t)
	玻璃纤维布		
异氰酸酯	0.14 kg	1 307	中型柴油货车运输(8 t)
聚氨酯胶	0.21 kg	1 408	中型柴油货车运输(8 t)
界面剂	0.09 kg	1 058	轻型柴油货车运输(2t)
电力	0.24 kWh	—	—
天然气	0.03 m ³	—	—
主要排放	粉尘	1 009.32 mg	
	二氧化碳	54 860.30 mg	

表5 增强复合岩棉条板生产消耗与主要排放

Tab. 5 Production consumption and main emissions of reinforced composite rock wool board

原材料 /能源消耗	增强复合岩棉条板保温系统生产		
	使用量	运输距离 /km	运输工具
复合岩棉条板	1 m ²	—	—
抹面胶浆	水泥	974	重型柴油货车运输(10 t)
	砂浆		
	粉煤灰		
	可溶性胶粉		
轻质砂浆	水泥	974	重型柴油货车运输(10 t)
	膨胀型玻化微珠		
	粉煤灰		
	可溶性胶粉		
玻璃网格布	玻璃纤维机织物	959	轻型柴油货车运输(2 t)
	丙烯酸共聚物		
	耐碱高分子乳液		
粘结剂	0.68 kg	194	中型柴油货车运输(8 t)
热镀锌钢丝网	1.04 kg	652	重型柴油货车运输(10 t)
钢制螺栓	0.95 kg	652	重型柴油货车运输(10 t)
锚栓圆盘	0.17 kg	977	轻型柴油货车运输(2 t)
SR垫块	0.11 kg	977	中型柴油货车运输(8 t)
电力	1.84 kWh	—	—
主要排放	粉尘	825.24 mg	

3 影响评价与结果解释

3.1 生命周期影响评价

eFootprint 软件是由亿科环境科技有限公司研发的在线 LCA 分析软件,支持全生命周期过程分析,并内置了中国生命周期基础数据库(CLCD)、欧盟 ELCD 数据库和瑞士的 Ecoinvent 数据库^[22],本研究采用 eFootprint 软件,建立了 1 m² 增强复合岩棉条板保温系统生产阶段的生命周期模型并计算得到其 LCA 结果,详见表 6:

表6 整体 LCA 结果

Tab. 6 Overall LCA results

环境影响类型指标	指标单位	LCA 结果
气候变化(GWP)	kgCO ₂ eq	3.03E+01
初级能源消耗(PED)	MJ	3.66E+02
非生物资源消耗(ADP)	kgantimony eq	2.16E-03
水资源消耗(WU)	kg	3.45E+01
酸化(AP)	kgSO ₂ eq	1.50E-01
富营养化(EP)	kgPO ₄ ³⁻ eq	0.30E-01
可吸入无机物(RI)	kgPM _{2.5} eq	0.40E-01
臭氧层消耗(ODP)	kgCFC-11 eq	1.32E-06
光化学臭氧合成(POFP)	kgNMVOC eq	0.70E-01

3.2 各单元过程结果解释

进一步对主要单元过程进行分析, 可以看出在整个产品的生产生命周期中岩棉板生产过程和复合岩棉条板的增强过程对各项指标的贡献较大, 结合其具体生产工艺和生产投入可得:

(1)对于 AP、EP、RI、ODP、POFP 五类环境影响指标, 三个单元过程数值均较小, 分析可知在增强复合岩棉条板保温系统的生产过程中基本不涉及此类指标的主要清单物质, 其中单元过程二由于复合岩棉条板生产过程相比较为简单、能源和原料消耗较少, 因而环境影响更小;

(2)对于单元过程一即岩棉板生产流程, 由于生产线上较多的运行设备以及冲天炉熔融效率、

摆锤布棉机集棉效率的有限性, 造成此过程的电力消耗最多, 同时由于环境友好度较差的粘结剂——酚醛树脂等材料的使用, 最终导致此单元过程非生物资源消耗较多, 因而 PED、ADP 影响指标较大;

(3)对于复合岩棉条板的增强过程, 较多的生产原材料投入如轻质砂浆、抹面胶浆等的使用, 导致该过程对于 PED、ADP 指标的贡献较大, 加之热镀锌钢丝网和钢制螺栓等连接构件生产过程中产生的碳排放等环境影响, 使该过程相比之下对 GWP 指标产生了最多的贡献, 具体结果见表 7.

表 7 各单元过程 LCA 结果
Tab. 7 LCA results of each unit process

环境影响类型指标	指标单位	岩棉板生产过程 LCA 结果	岩棉板复合过程 LCA 结果	复合岩棉条板增强过程 LCA 结果
GWP	kgCO ₂ eq	8.32E+00	3.40E+00	1.86E+01
PED	MJ	1.72E+02	5.66E+01	1.38E+02
ADP	kgantimony eq	1.09E-03	3.79E-04	6.93E-04
WU	kg	9.93E+00	1.32E+00	2.33E+01
AP	kgSO ₂ eq	5.45E-02	1.78E-02	8.12E-02
EP	kgPO ₄ ³⁻ eq	1.13E-02	4.90E-03	1.47E-02
RI	kgPM _{2.5} eq	1.26E-02	3.78E-03	2.03E-02
ODP	kgCFC-11 eq	5.68E-07	2.92E-07	4.61E-07
POFP	kgNMVOC eq	2.87E-02	1.16E-02	3.35E-02

4 基于 GWP 指标的单元过程关键清单识别与改进

由人类活动引起的气候变化带来的挑战已逐渐引起了全球性的关注^[23], 而气候变化指标 (GWP)作为评价环境影响的关键参数, 对于材料环境友好度的评测有着重要意义. 因此选定该指标对产品的整个生产流程进行关键清单即碳排放主要贡献者的识别, 并提出可选择的优化改进方案, 旨在降低生产过程碳排放, 改善其环境友好度.

4.1 单元过程一的关键清单识别

岩棉板生产过程中产生 8.32 kgCO₂ eq, 占总体碳排放贡献的 27.44%; 其中酚醛树脂、电力清单分别产生了 3.50 和 3.07 kgCO₂ eq 碳排放, 在该单元过程的 GWP 贡献分别为 42.07% 和 36.90%, 为此过程主要贡献者, 具体如图 7.

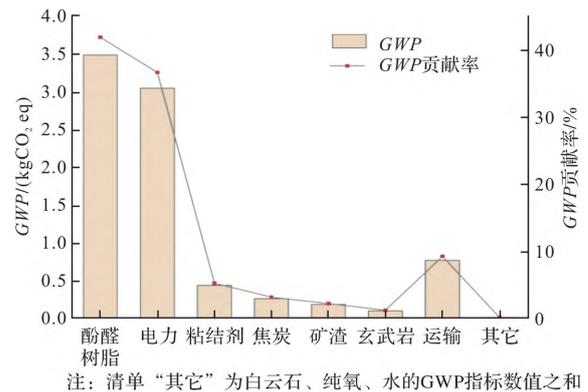


图 7 单元过程一 GWP 贡献图

Fig. 7 GWP contribution diagram of unit process 1

4.2 单元过程二的关键清单识别

复合岩棉条板的生产过程即以岩棉板作为主要原材料的复合过程, 该过程共产生 3.40 kgCO₂ eq 碳排放, 占总体贡献的 11.21%. 可见复合过程对于整个生产过程的 GWP 指标贡献较小. 其中聚氨酯胶、异氰酸酯分别产生 1.09、1.07 kgCO₂ eq,

在该单元占比为 32.06% 和 31.47%，为此过程的主要贡献者，如图 8。

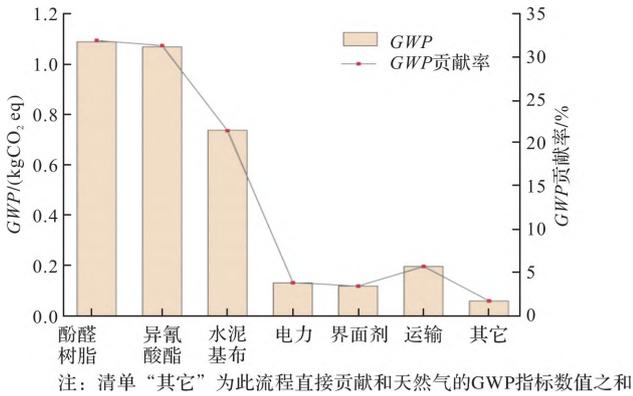


图 8 单元过程二 GWP 贡献图

Fig. 8 GWP contribution diagram of unit process 2

4.3 单元过程三的关键清单识别

增强复合岩棉条板保温系统生产过程产生 18.60 kgCO₂ eq，占总体贡献的 61.35%。其中轻质砂浆、抹面胶浆及该过程材料的运输在此单元过程的贡献分别为 26.02%、23.28% 及 22.27%，各自产生 4.84、4.33 及 4.14 kgCO₂ eq 碳排放，为该过程的较大贡献者即关键清单，如图 9。

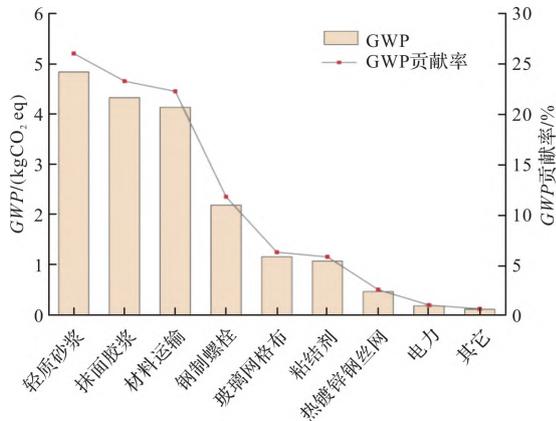


图 9 单元过程三 GWP 贡献图

Fig. 9 GWP contribution diagram of unit process 3

由于轻质砂浆、抹面胶浆生产配料及工艺相近，故以轻质砂浆为例进行进一步追溯和分析：该过程中共产生 4.84 kgCO₂ eq 碳排放，其中，水泥作为该制备流程的主要参与者，碳排放贡献达 3.74 kgCO₂ eq，占比 77.27%，为此流程最大贡献者即关键清单，如图 10。

4.4 可选择的改进方案

基于 GWP 指标对增强复合岩棉条板保温系统生产流程进行分析可以得出：岩棉板的生产过程及复合岩棉条板的增强过程为 GWP 指标的主要贡献阶段，分别贡献 27.46%、61.30% 的碳排放，也是为降低其环境影响可选择的主要改进流程。

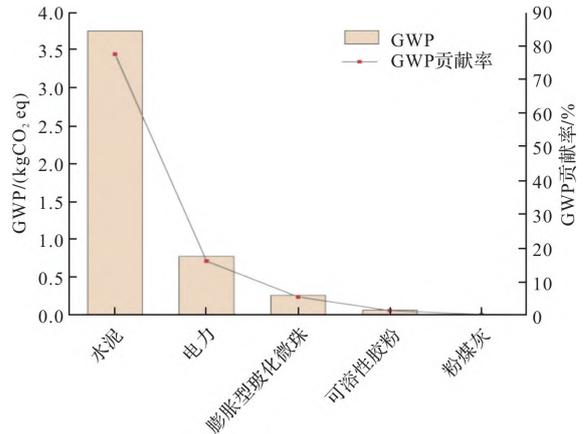


图 10 抹面胶浆生产过程 GWP 贡献图

Fig. 10 GWP contribution diagram of plaster production process

因此，对于该企业或相似生产工艺下的其他岩棉制品企业，若想减少其生产过程碳排放，优化其环境影响，可选择以下改进方案：

1. 对于岩棉板的生产过程可考虑使用更高效的酚醛树脂种类，减少其用量进而减少碳排放，或采用有相同功能的环境友好度更高的粘结剂进行替代；
2. 改进岩棉板的生产工艺，如采用更高效的“三维法”替代“摆锤法”，以提高车间生产效率，从而减少设备用电；
3. 对于增强过程中由轻质砂浆、抹面胶浆产生的碳排放，应考虑选用更高强的浆料或选用采用更先进水泥生产工艺，以减少其在生产制备过程中产生的影响；
4. 对于由于运输产生的碳排放，可考虑就近购买原材料，或者采用排量较小的货车进行运输；
5. 改进车间用电来源如使用太阳能光伏发电等，进而减少电力生产造成的碳排放。

5 结论

基于过程 LCA 方法，对增强复合岩棉条板保温系统进行了分析研究，得到了其整体及各主要生产流程的环境负荷，并以 GWP 指标为关键参数对各单元过程进行了清单识别，主要结论如下：

- (1) 以从摇篮到大门为系统边界、1 m² 为功能单位计，运用 eFootprint 软件得到了增强复合岩棉条板保温系统生产流程所产生的 LCA 结果：气候变化 3.03E+01 kgCO₂ eq、初级能源消耗 3.66E+02 MJ、非生物资源消耗潜值 2.16E-03 kgantimony eq、水资源消耗 3.45E+01 kg、酸化 1.50E-01 kgSO₂ eq、富营养化潜值 0.30E-01 kgPO₄₃-eq、可吸入无机物 0.40E-01 kgPM_{2.5} eq、臭氧层消耗

1. 32E-06 kgCFC-11 eq、光化学臭氧合成 0.70E-01 kgNMVOC eq;

(2)基于 GWP 指标对增强复合岩棉条板保温系统生产过程进行分析可以得出:单元过程一岩棉板的生产过程及单元过程三即复合岩棉条板的增强过程为 GWP 指标的主要贡献阶段和改进流程;

(3)酚醛树脂、电力(岩棉板生产阶段)、水泥及材料运输清单为整个生产生命周期环境影响的关键清单,为改善产品的环境友好度,可考虑将对应材料更换为具有相同功能的更高效的材料,或改进车间生产工艺,提高生产效率等。

参考文献 References

- [1] 杨增科,黄炜,张敏.基于不同保温形式装配式复合墙抗震性能试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(1):51-56.
YANG Zengke, HUANG Wei, ZHANG Min, Experimental study on aseismic performance of assembly type composite wall based on different heat preservation forms[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(1): 51-56.
- [2] 董建锴,伍经纬,徐先港,等.我国外墙外保温脱落原因及检测技术介绍[J].低温建筑技术,2020,42(7):31-35.
DONG Jiankai, WU Jingwei, XU Xiangang, et al. Introduction to the cause and detection technology of exterior wall shedding in China[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(7): 31-35.
- [3] 中华人民共和国公安部.建筑外墙外保温系统的防火性能试验方法:GB/T29416-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
The Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Test method for fire-resistant performance of external wall insulation systems applied to building façade: GB/T29416-2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑设计防火规范:GB/T50016-2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for fire protection design of buildings: GB/T50016-2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [5] 孙立新,闫增峰,冯驰.抹面层湿特性对岩棉外保温系统含湿量的影响[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(1):72-77.
SUN Lixin, YAN Zengfeng, FENG Chi. Research on

HAM model simulation of moisture content of stone wool ETICS with different base coat moisture performance[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(1): 72-77.

- [6] 全国环境管理标准化技术委员会.环境管理生命周期评价要求与指南:GB/T 24044-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
SAC/TC207. Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines:GB/T 24044-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [7] 曹力强,何更新.建筑围护用无机轻质墙板生命周期环境友好性评价指标的研究[J].建筑节能,2015,43(2):45-49.
CAO Liqiang, HE Gengxin. Evaluation index about environmental friendliness across life cycle of inorganic light wallboards used building enclosure[J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(2): 45-49.
- [8] 张楠,杨柳,罗智星.建筑全生命周期碳足迹评价标准发展历程及趋势研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(4):569-577.
ZHANG Nan, YANG Liu, LUO Zhixing. Carbon emission assessment standards for building life cycle: research status, development and potential trends[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 569-577.
- [9] 马丽萍,蒋荃,赵平,等.我国典型建筑保温材料生产生命周期评价研究[J].新型建筑材料,2013,40(10):41-44.
MA Liping, JIANG Quan, ZHAO Ping, et al. Life cycle assessment of typical building thermal insulation materials in China[J]. New Building Materials, 2013, 40(10): 41-44.
- [10] Nuno Pargana, Manuel Duarte Pinheiro, José Dinis Silvestre, et al. Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings[J]. Energy & Buildings, 2014, 82: 466-481.
- [11] 赵薇,于杭,张贻羽.建筑用保温材料的生命周期环境影响对比分析[J].新型建筑材料,2017,44(11):101-105.
ZHAO Wei, YU Hang, ZHANG Zengyu. A comparative study on life cycle environmental impacts of building insulation materials[J]. New Building Materials, 2017, 44(11): 101-105.
- [12] Carabano Rocio, Ma Hernando Susana, Ruiz Diego, et al. Life cycle assessment (LCA) of building materials for the evaluation of building sustainability: the case of thermal insulation materials[J]. Revista de la Construcción 2017, 16(1): 22-32.

- [13] 刘宇,张宇峰,孙燕琼,等. 基于生命周期评价的绿色建筑选材研究[J]. 中国材料展, 2016, 35(10): 769-775,790.
LIU Yu, ZHANG Yufeng, SUN Yanqiong, et al. Materials Selection for Green Building Based on Life Cycle Assessment[J]. Materials China, 2016, 35(10): 769-775,790.
- [14] LI Z, GONG X Z, WANG Z H, et al. Life cycle assessment of rock wool board and EPS board [J]. Materials-Science Forum, 2014, 87:106-110.
- [15] Llantoy N, Châfer M, Cabeza L F. A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental mediterranean climate [J]. Energy and Buildings, 2020: 110323.
- [16] SU X, LUO Z, LI Y, et al. Life cycle inventory comparison of different building insulation materials and uncertainty analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 275-281.
- [17] International Organisation for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. ISO 14040[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范:GB/T50176-2016[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2016.
The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for thermal design of civil building:GB/T50176-2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [19] International Organisation for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. ISO 14044[S]. Geneva, Switzerland:ISO, 2006.
- [20] 李畅. 江西省某铜尾矿资源化过程生命周期评价研究[D]. 南昌:江西理工大学, 2020.
LI Chang. Life cycle assessment of copper tailings resource recycling Process in Jiangxi province[D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2020.
- [21] 闫菲. 活性干酵母生产全生命周期评价的研究[D]. 天津:天津科技大学, 2020.
YAN Fei. Study on the life cycle assessment of active dry yeast production[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020.
- [22] 亿科环境科技有限公司, 数据库各版本对照表[EB/OL]. <http://www.ike-global.com/#/products-2/chinese-lca-database-clcd.html>, 2022.
Integrated knowledge for our Environment. Comparison table of database version[EB/OL]. <http://www.ike-global.com/#/products-2/chinese-lca-database-clcd.html>, 2022.
- [23] 韩晓莉, 宋功明. 黄土沟壑地区典型窑洞建筑全生命周期碳排放计算方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(2):242-246.
HAN Xiaoli, SONG Gongming. Calculation method of whole life cycle carbon emissions of Yaodong in ravine of loess plateau[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., (Natural Science Edition), 2017, 49(2): 242-246.

(编辑 吴海西 沈波)