

DOI: 10.12164/j.issn.1003-8965.2022.04.010

典型建筑岩棉板的生命周期分析

Life cycle analysis of typical building rock wool board

邓洪勇, 刘宇*, 郑焱, 李小青

(北京工业大学材料与制造学部, 工业大数据应用技术国家工程实验室, 北京 100124)

DENG Hongyong, LIU Yu*, ZHENG Yan, LI Xiaoqing

(Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, National Engineering Laboratory for Industrial Big-data Application Technology, Beijing 100124)

摘要: 基于生命周期评价方法量化分析典型企业生产建筑岩棉板“从摇篮到大门”的资源/能源消耗、污染物排放及潜在环境影响, 辨识影响岩棉板产品环境负荷的关键过程及企业间差异性的主要因素。结果显示, 岩棉板生产过程对全球变暖的环境影响贡献最大; 原材料生产过程对矿产资源耗竭、化石能源耗竭及人体毒性的环境影响贡献显著; 能源生产过程对颗粒物形成及陆地生态系统酸化的环境影响贡献最大; 单位产品的能源消耗强度及玄武岩/树脂用量是造成不同企业岩棉产品环境影响差异的主要因素。

关键词: 建筑保温材料; 岩棉板; 生命周期评价(LCA); 环境影响

Abstract: Based on the life cycle assessment (LCA) method, this paper quantifies the resource and energy consumption, pollutant emission and potential environmental impact of typical enterprises producing rock wool board “from cradle to gate”, identifies the key processes affecting the environmental load of rock wool board products and the main factors of the difference between enterprises. The results show that the production process of rock wool board contributes the most to global warming. The process of raw material production contributes significantly to the environmental impact of mineral resource depletion, fossil energy depletion and human toxicity. The energy production process contributes the most to particulate matter formation and acidification of terrestrial ecosystem. The energy consumption intensity per unit product and the amount of basalt and resin are the main factors causing the environmental impact difference of rock wool products from different enterprises.

Key words: building insulation materials; rock wool board; life cycle assessment (LCA); environmental impact

中图分类号: TU55+1.31 文献标志码: A 文章编号: 1003-8965(2022)04-0033-05

0 引言

建筑业作为国民经济和社会发展的支柱产业之一, 其快速发展促进了我国基础设施建设的完善和国民生活水平的提高, 但同时, 我国建筑运行能耗不断上升, 约占每年全国能耗的20%^[1], 建筑节能已成为建筑领域高质量发展与碳中和目标实现的关键。建筑运行能耗包括照明、采暖、空调和各类建筑物内使用电器所消耗的能源总量, 占建筑全生命周期能源消耗的60%以上^[2-3]。在建筑运行过程中, 围护结构与外界的热交换需依靠供暖或制冷进行补偿, 是建筑运行阶段能耗的主要来源, 保温材料用于建筑外围结构, 能阻止热交换、热传递的进行, 通过减少热量损失达到稳定室温、节约能源等效果, 是实现建筑低成本高效节能的有效手段。

在建筑外墙保温材料中, 岩棉板具有保温、吸音、隔热、透气、A级不燃等性能, 被广泛应用于建筑、石油、化工、电

力、冶金、农业、交通运输等行业^[4]。其生产工艺流程如图1所示。2021年我国岩棉产量约为340万吨, 预计2023年岩棉产量达到380万吨以上。按照国家消防总局建筑防火规定, 一定高度以上的建筑必须使用燃烧性能达到A级的材料, 岩棉板作为行业标准中A级不燃的保温材料^[5-6], 未来市场潜力巨大。随着我国新建建筑面积的增长, 并考虑到尚有大量的现有建筑未进行节能改造, 岩棉市场前景广阔。据统计, 建筑领域每使用1吨岩棉制品, 一年至少节约1.4吨标准煤, 减少3.95吨CO₂排放量。以年总产能400万吨计, 使用岩棉保温材料可减少1940万吨标准煤的消耗以及5398万吨CO₂的排放量^[7]。

岩棉板虽然在使用过程中节能效果显著, 但在其生产过程中资源、能源的投入及污染物的排放也会造成潜在的环境问题, 因此, 需要从全生命周期的角度分析其环境影响。目前, 国内外在该领域开展了相关研究。Noelia Llantoy等^[8]运用生命周期评价方法分析了地中海大陆气候

基金项目: 北京工业大学“城市碳中和”科技创新基金项目(No.32)

第一作者: 邓洪勇(1997.4-), 硕士研究生, 主要从事材料生命周期评价与生态设计研究。1366554869@qq.com

通讯作者: 刘宇(1984.8-), 博士, 副教授, 主要从事生命周期评价研究。liuyu@bjut.edu.cn

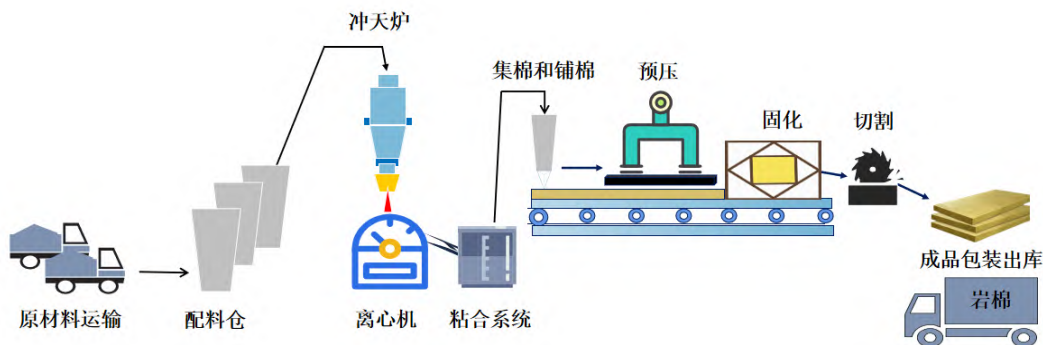


图1 岩棉板生产工艺流程

Fig.1 Production process of rock wool board

中使用不同保温材料聚氨酯板、挤塑聚苯板和岩棉板的环境影响,结果表明,环境影响最大的是聚苯板,而环境性能最好的是岩棉板。Xing Su等^[9]对EPS板、XPS板、岩棉板等8种建筑保温材料进行了生命周期评价,结果显示,泡沫玻璃全生命周期能耗和CO₂排放量上,酚醛板最小,但玻璃棉和岩棉板在全生命周期一次能源中的不确定性最大,泡沫玻璃板分析结果的不确定性较小。Gülcan Öze等^[10]运用生命周期方法研究了岩棉、玻璃棉两种保温材料使用的最佳保温厚度,通过环境影响分析确定玻璃棉和岩棉的最佳保温厚度分别为0.15m和0.064m,根据寿命周期成本分析得出玻璃棉和岩棉的最佳保温厚度分别为0.012m和0.07m。马丽萍等^[11]运用生命周期评价方法分析我国聚苯板、岩棉板、硬泡聚氨酯板3种典型建筑保温材料的潜在环境影响,结果显示,以“单位质量kg”计,岩棉板生产生命周期环境影响最小,硬泡聚氨酯板次之,聚苯板最大,而以“满足相同节能要求的单位面积m²”计,则聚苯板生产生命周期的环境影响最小,岩棉板最大。李朱^[12]利用生命周期评价方法对比相同保温效果下岩棉外保温系统和EPS外保温系统的环境负荷,在综合考虑保温性能和材料燃烧性能的情况下,岩棉板薄抹灰外墙外保温系统的环境协调性更优。

1 方法与数据

1.1 目的与范围定义

1) 目的

基于生命周期评价方法量化典型岩棉产品的生命周期环境影响,分析造成不同企业产品环境负荷差异性的主要原因,为岩棉保温材料的绿色工艺研发与建筑绿色选材提供参考。

2) 功能单位与系统边界

选取“生产1kg岩棉板”作为功能单位。系统边界选取从“摇篮到大门”,即从矿石开采到岩棉产品产出,具体包括玄武岩、白云石、树脂等原材料(含利废原料)获取,焦炭、天然气、电力等能源生产,原燃料运输及岩棉板生产等过程,如图2所示。

1.2 清单数据收集

1.2.1 现场数据

岩棉板生产过程的现场数据来源于对我国4家典型岩棉板生产企业的实地调研,包括原材料(玄武岩、白云石、矿渣、树脂、水)消耗数据、能源(焦炭、天然气、电力)消耗数据、污染物直接排放数据及运输数据(运输方式及运距)等,其中,NO_x、SO₂、PM排放数据来源于企业在线监测系统,其他污染物排放数据根据企业生产用化石能源的消耗量、低位发热量与排放因子(取自IPCC、EEA与EPA报告)估算。经数据确认与数据填补,得到4家企业生产过程的输入输出清单,见表1所示。

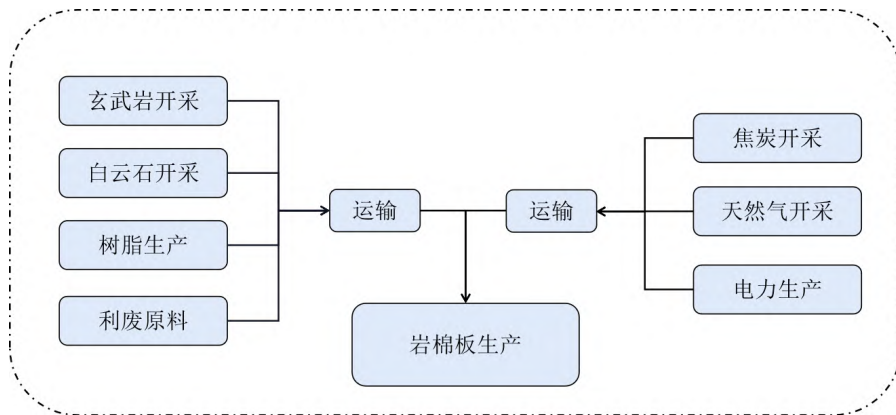


图2 岩棉板生命周期评价的系统边界

Fig.2 System boundary of life cycle assessment of rock wool board

表1 单位岩棉板产品的输入输出清单

Tab.1 Inventory of rock wool board production per functional unit

项目	名称	单位	企业 A	企业 B	企业 C	企业 D
资源能源输入	玄武岩	kg/kg	8.47E-01	6.70E-01	9.14E-01	8.19E-01
	白云石	kg/kg	3.40E-01	2.25E-01	1.45E-01	2.39E-01
	矿渣	kg/kg	1.81E-01	3.67E-01	2.76E-02	2.81E-01
	树脂	kg/kg	1.26E-01	1.19E-01	1.29E-01	1.10E-01
	水	m ³ /kg	1.92E-03	2.78E-04	2.82E-03	1.75E-03
	焦炭	kg/kg	2.48E-01	2.59E-01	2.20E-01	2.58E-01
	天然气	m ³ /kg	3.05E-02	5.07E-02	2.30E-02	3.23E-02
	电力	kWh/kg	3.49E-01	2.98E-01	3.58E-01	3.59E-01
污染物排放	CO ₂	kg/kg	8.24E-01	9.03E-01	7.18E-01	8.56E-01
	CH ₄	kg/kg	8.36E-06	9.57E-06	7.13E-06	8.59E-06
	N ₂ O	kg/kg	1.08E-05	1.15E-05	9.45E-06	1.11E-05
	NO _x	kg/kg	3.87E-04	2.02E-04	3.90E-04	2.88E-04
	CO	kg/kg	6.61E-03	6.93E-03	5.84E-03	6.87E-03
	NM VOC	kg/kg	6.55E-04	7.02E-04	5.75E-04	6.81E-04
	SO ₂	kg/kg	2.03E-04	5.20E-05	1.00E-04	1.15E-04
	PM	kg/kg	4.22E-05	4.88E-05	1.81E-05	1.08E-04
	Pb	kg/kg	9.45E-07	9.87E-07	8.36E-07	9.83E-07
	Cd	kg/kg	1.27E-08	1.33E-08	1.12E-08	1.32E-08
	Hg	kg/kg	5.64E-08	5.93E-08	4.98E-08	5.86E-08
	As	kg/kg	2.83E-08	2.97E-08	2.50E-08	2.95E-08
	Cr	kg/kg	9.53E-08	9.95E-08	8.43E-08	9.91E-08
	Cu	kg/kg	9.17E-08	1.29E-07	1.09E-07	1.28E-07
	Ni	kg/kg	1.28E-08	9.58E-08	8.11E-08	9.54E-08
	Se	kg/kg	1.23E-07	1.34E-08	1.13E-08	1.33E-08
	Zn	kg/kg	1.41E-06	1.47E-06	1.25E-06	1.47E-06
原燃料运输量		tkm	4.81E-01	6.56E-01	3.84E-01	5.69E-01

1.2.2 背景数据

背景数据指企业运营边界外与产品生产相关的原材料获取、运输及能源生产等过程的资源、能源消耗与污染物排放数据。其中,电力、天然气等能源生产与原燃料运输背景数据取自北京工业大学Sino-center数据库,原料生产背景数据来自Ecoinvent数据库。

1.3 影响评价方法体系

研究选择ReCiPe 2016 midpoint方法体系,综合考虑国内政策关注的重点,兼顾我国清单数据的可获得性、特征化模型的适用性等多重因素,选取全球变暖、颗粒物形成、化石能源耗竭、矿产资源耗竭、人体毒性、陆地生态系统酸化6项环境影响指标,见表2所示。

2 结果与讨论

2.1 环境影响贡献分析

基于选择的方法体系对功能单位岩棉板进行生命周期评价,分析4家典型企业生产岩棉板生命周期各过程对6类环境影响指标的贡献潜力,如图3所示。结果显示,岩棉板生产过程对全球变暖环境影响贡献最大,占其生命周期的40%左右,主要由生产过程中焦炭、天然气等燃料燃烧直接

表2 岩棉板生命周期评价的环境影响类型及单位

Tab.2 Environmental impact types and units of rock wool board life cycle assessment

环境影响类型	单位	物质
全球变暖 (Global warming)	kg CO ₂ eq	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ 等
颗粒物形成 (Fine particulate matter formation)	kg PM _{2.5} eq	PM, N ₂ O, NO _x , SO ₂ 等
化石能源耗竭 (Fossil resource scarcity)	kg oil eq	焦炭、天然气等
矿产资源耗竭 (Mineral resource scarcity)	kg Cu eq	玄武岩、白云石等
人体毒性 (Human toxicity)	kg 1,4-DBC eq	Pb, Cu, Ni, Hg, Cr 等
陆地生态系统酸化 (Terrestrial acidification)	kg SO ₂ eq	NO _x , SO ₂ , CH ₄ 等

排放CO₂造成,使用燃料替代技术、提高能源燃烧效率是降低岩棉板产品碳足迹的有效途径。原材料生产过程是矿产资源耗竭、化石能源耗竭及人体毒性环境影响的主要来源,分别占产品生命周期的80%、50%与60%以上,主要来自岩棉板生产所需玄武岩、白云石开采过程及使用的粘接剂树脂等石油化工辅料的生产过程。能源生产过程对颗粒物形

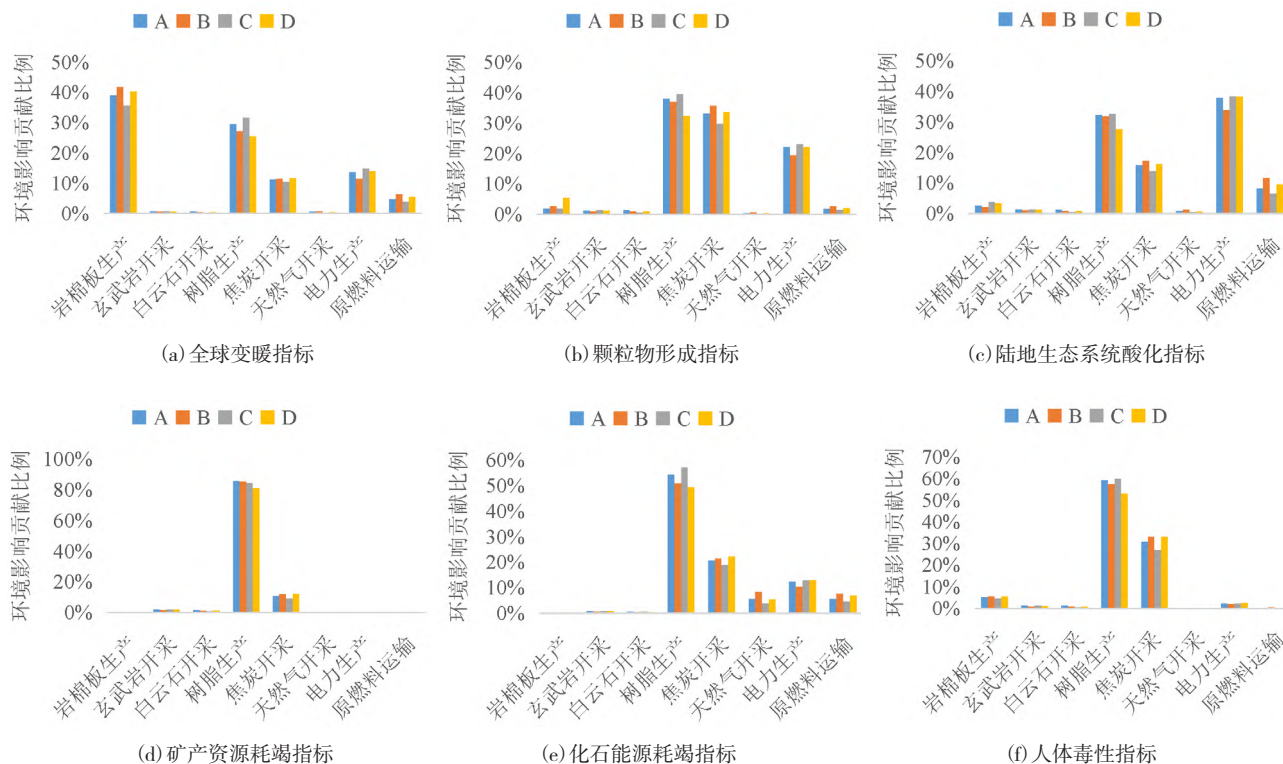


图3 岩棉板环境影响贡献潜力分析

Fig.3 Analysis on the contribution potential of rock wool board to environmental impact

成及陆地生态系统酸化环境影响的贡献最大, 均占产品生命周期的50%以上, 主要由于焦炭和天然气开采及电力生产过程造成。此外, 原燃料运输对各环境影响贡献占比不大, 但不能忽略其造成的环境影响, 对于特定的企业而言, 选择距离原材料及能源产地近的地点办厂或实行“退城入园”的方法, 对于改善企业岩棉板的生命周期环境负荷也具有积极意义。

2.2 产品环境负荷差异性分析

基于生命周期影响评价结果, 进一步对比各企业岩棉板产品的各类环境影响指标, 分析造成企业间差异性的原因, 见表3所示。结果显示, 各企业生产功能单位岩棉板的6类环境影响指标存在一定差异, 其中, 全球变暖、化石能源耗竭、颗粒物形成、陆地生态系统酸化、人体毒性、矿产资源耗竭指标的最大值与最小值差异性分别为6.9%、4.5%、5.3%、6.0%、3.8%和11.2%。结合表1分析, 焦炭/天

然气的开采及燃烧过程是全球变暖与化石能源耗竭环境影响的主要驱动因素, 造成企业间差异性的主要原因为各企业能效水平不同(单位产品焦炭与天然气用量不同)。我国当前电力结构以煤电为主, 电耗上升会使二氧化硫、氮氧化物、固体颗粒物等间接排放增加, 电耗的使用量是颗粒物形成与陆地生态系统酸化环境影响的主要驱动因素, 造成企业间差异性的主要原因为各企业用电耗强度不同。矿石开采及上游化工制品树脂生产造成大量的资源耗竭及污染物排放, 是人体毒性与矿产资源耗竭环境影响的主要驱动因素, 造成企业间差异性的主要原因为各企业生产岩棉板投入的玄武岩/树脂原材料不同。

3 结论与建议

本文选取我国4家典型岩棉板生产企业, 运用生命周

表3 各企业岩棉板生产环境影响指标对比结果

Tab.3 Comparison of environmental impact indicators of rock wool board produced by various enterprises

影响类别	单位	环境影响指标值			
		企业 A	企业 B	企业 C	企业 D
全球变暖	kg CO ₂ eq	2.12E+00	2.17E+00	2.02E+00	2.14E+00
化石能源耗竭	kg oil eq	5.94E-01	5.97E-01	5.79E-01	5.70E-01
颗粒物形成	kg PM _{2.5} eq	2.56E-03	2.48E-03	2.52E-03	2.62E-03
陆地生态系统酸化	kg SO ₂ eq	6.43E-03	6.13E-03	6.50E-03	6.52E-03
人体毒性	kg 1,4-DBC eq	2.35E+01	2.29E+01	2.37E+01	2.28E+01
矿产资源耗竭	kg Cu eq	1.46E-03	1.39E-03	1.52E-03	1.35E-03

期评价方法量化岩棉产品的生命周期环境影响,分析造成岩棉板环境影响的关键过程及不同企业产品环境负荷差异性的主要原因。

1) 环境影响贡献分析结果显示,岩棉板生产过程对全球变暖环境影响指标贡献最大,占产品生命周期的40%左右;原材料生产过程对矿产资源耗竭、化石能源耗竭及人体毒性环境影响指标贡献最大,分别占产品生命周期的80%、50%与60%以上;能源生产过程是造成颗粒物形成及陆地生态系统酸化环境影响指标的主要来源,均占产品生命周期的50%以上。

2) 产品环境负荷差异性分析结果显示,造成不同企业岩棉板全球变暖和化石能源耗竭环境影响指标差异性的主要原因为焦炭与天然气的消耗强度;造成颗粒物形成和陆地生态系统酸化环境指标差异性的主要因素为单位产品的电耗量;造成矿产资源耗竭和人体毒性环境指标差异性的主因为玄武岩/树脂资源的用量。

通过对各企业生产岩棉板的环境影响分析,调整原材料结构(降低玄武岩/树脂用量),提高化石燃料(焦炭/天然气)使用效率,是降低岩棉产品环境负荷的有效途径。此外,鼓励企业合理利用固废资源、优化原料运输半径等措施,对于降低岩棉板产生生命周期环境负荷、在碳市场提升竞争力及契合国家“双碳”战略具有重要意义。

参考文献

- [1] 中国建筑节能协会能耗统计专委会,重庆大学管理科学与房地产学院. 中国建筑能耗研究报告2020[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(02):1-6.
- [2] 黎瑶,龚先政. 膨胀聚苯和岩棉外保温系统对建筑能耗的对比分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2017,45(02):231-237.
- [3] 王云鹏,那威,田亚鹏,等. 包含制冷、空调和采暖的我国住宅建筑能耗强度特征[J]. 制冷,2021,40(04):57-62.
- [4] 蒋露,王玲,崔军,等. 岩棉保温材料低碳目标实施路径探索[J]. 中国建材,2021(12):120-122.
- [5] GB 50016-2014,建筑设计防火规范[S].
- [6] JGJ 289-2012,建筑外墙保温防火隔离带技术规程[S].
- [7] 孙诗兵,田英良,韩继先,等. 我国岩矿棉制造发展状况与生产减碳途径[J]. 北京工业大学学报,2022,48(03):306-311.
- [8] LLANTOY N, NICOLAS M C, CABEZA L F. A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate[J]. Energy and buildings, 2020,225:323-334.
- [9] SU X, LUO Z, LI Y H, et al. Life cycle inventory comparison of different building insulation materials and uncertainty analysis[J]. Journal of cleaner production, 2016,112(1):275-281.
- [10] ÖZEL G, AÇIKKALP E, GÖRGÜN B, et al. Optimum insulation thickness determination using the environmental and life cycle cost analyses based entransy

approach[J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2015,11:87-91.

[11] 马丽萍,蒋荃,赵平,等. 我国典型建筑保温材料产生生命周期评价研究[J]. 新型建筑材料,2013,40(10):41-44.

[12] 李朱. 两种不同材料外墙外保温系统生命周期评价[D]. 北京:北京工业大学,2014.