

北方村镇屋面保温材料生命周期分析

刘军¹, 陈晨², 齐玮³, 左宗哲⁴

(1. 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
2. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 沈阳建筑大学材料科学与
工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 4. 华润建筑有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 运用生命周期方法, 以等价热为折算系数, 考虑屋面保温材料在运营维护阶段由于保温而降低能耗的影响因素, 对4种典型北方村镇屋面保温材料 EPS、膨胀珍珠岩、岩棉板、保温砂浆进行了资源开采、产品生产、施工安装、运营维护、拆除回收5个阶段清单分析。通过生命周期资源、能源消耗和环境影响评价, 提出 EPS 材料生命周期能耗最低, 但大气和水体污染物输出远高于另外3种材料; 膨胀珍珠岩的能耗和碳排放量最大。

关键词: 村镇屋面; 保温材料; 生命周期评价; 清单分析

中图分类号: F406.5

文献标志码: A

随着村镇建筑行业的发展和建筑节能的推进, 作为主要得热、散热构件——村镇建筑用屋面保温材料得到了巨大的发展。屋面保温材料在生产过程中, 需要消耗大量的资源和能源, 同时产生大量温室气体和污染物, 危害环境。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA) 是涉及产品从原材料采集到废弃整个生命循环周期的一种有效的环境管理工具^[1], 是目前较为广泛应用的环境评价技术。生命周期评价发展了一个“原材料—生产—产品”模型, 也就是现在的清单分析阶段^[2]。笔者以北方典型的村镇屋面保温材料为研究对象, 对保温材料的生命周期环境影响进行生命周期评价, 研究不同屋面保温材料的保温效果和环境影响, 为建材领域提供数据支撑。

一、生命周期评价的基本流程

生命周期分析于1990年由“国际环境毒理学与化学学会(SETAC)”首次系统提出, 通过识别、量化生产、服务活动的能量和物质消耗以及由此产生的废弃物对环境的影响, 系统分析产品

“从摇篮到坟墓”的环境影响, 寻求改善其环境表现的方法和机会^[3]。ISO14040《环境管理—生命周期分析—原则与框架》, 以国际标准的形式提出了生命周期分析的原则与框架。它将生命周期分析定义为对某一产品系统生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[4]。其基本流程包括目的和范围的确定, 清单分析, 影响评价和结果解释四个不断循环的步骤^[5], 其技术框架如图1所示。

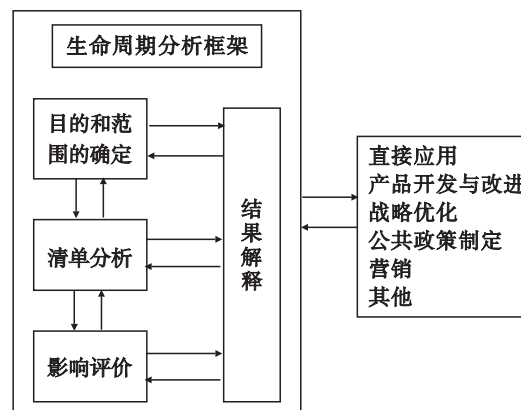


图1 生命周期分析技术框架

收稿日期: 2013-09-20

基金项目: 国家十二五科技支撑计划重大项目(2012BAJ20B03)

作者简介: 刘军(1963—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 博士研究生导师。

二、北方村镇保温材料生命周期分析评价

1. 生命周期的目的和范围

生命周期分析首先要确定研究目的和范围。确定研究目标就是要说明该生命周期分析开展的意图,研究结果的应用领域,研究结果的接受对象等内容。界定研究范围,就是要在保证研究的深度、广度以及与研究目的保持一致的基础上,合理确定研究的外延和假设条件。

生命周期分析是针对某一产品或服务的环境负荷进行评价的,不涉及其经济、社会属性。然而在实际操作中,经济和社会因素在产品选择中也是无法回避的因素。如建筑材料的选取就是一个多属性决策问题^[5-7]。我国北方村镇典型屋面保温材料主要有板状保温材料、颗粒状保温材料、纤维保温材料、保温浆料等。笔者选取模塑聚苯乙烯泡沫塑料板(EPS)、膨胀珍珠岩、岩棉板、保温砂浆 4 种典型屋面保温材料,按照市场上材料的一般物理性能和行业平均数据,对这 4 种保温材料进行生命周期评价。①该评价目的为通过资源、能源消耗和污染物排放量研究 4 种材料对环境的影响。②研究范围包括时间范畴、产品系统和系统功能、系统边界、功能单元、影响类型、数据类型、基本假设。其中时间范畴包括资源开采阶段、产品生产阶段、施工安装阶段、运营维护阶段、拆除回收阶段。③笔者在此评价中主要研究村镇屋面保温材料的矿产资源输入,能源消耗和对环境的影响。资源输入主要考虑矿产资源的消耗;能源消耗主要考虑电力和化石燃料的消耗;环境影响主要考虑 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体排放,大气污染物输出、水

体污染物输出和固体废弃物输出。

2. 清单分析

清单分析是生命周期分析中最为重要的一个环节。通过清单分析,完成对研究对象生命周期基础数据的收集和量化分析,基础数据包括产品系统内每一单元过程在整个生命周期的输入和输出,即产品系统生命周期总的环境负荷。这一阶段的核心内容是数据的收集和建立数据的数学分析模型。

根据第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册以及 2006 年气候变化专门委员会(IPCC)国家温室气体清单和 2007 年年鉴。定义功能单元为 1m² 屋面保温层 50 年内能满足其保温隔热功能,定义保温材料厚度为 50mm。将 4 种材料的基本物理性能整理如表 1 所示。

表 1 单位材料基本物理性能

材料类别	厚度/ mm	密度/ (kg · m ⁻³)	质量/ kg	导热系数/ (W · (m · K) ⁻¹)
EPS	50	15	0.75	0.041
膨胀珍珠岩	50	70	3.5	0.051
岩棉	50	40	2	0.06
保温砂浆	50	240	12	0.085

(1) 基础数据收集。部分屋面保温材料从原材料开采到产品形成经过多道工序,如 EPS 板典型的原材料生命周期上游为:石油→苯乙烯→聚苯乙烯→EPS 板,为简便起见,将产品形成之前的清单数据都归于原材料开采阶段,即 EPS 板原材料开采阶段的清单数据包含石油→苯乙烯→聚苯乙烯三阶段的影响数据。整理生命周期各阶段村镇屋面保温材料清单如表 2、表 3、表 4 所示。

表 2 开采阶段清单

类别	输入量						输出量										
	资源				能源		大气污染物			温室气体	水体污染物					土壤污染物	
	石油	玄武岩	珍珠岩矿	石灰石	煤炭类	油气类	工业废气	SO _x	氟化物	CO ₂	工业废水	化学需氧	氨氮	石油类	挥发酚	固体废弃物	
	消耗量/ kg	消耗量/ kg	消耗量/ kg	消耗量/ kg	消耗量/ (GJ · t ⁻¹)	消耗量/ kg	排放量/ m ³	排放量/ kg	排放量/ kg	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ kg	
EPS	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	193.34	0.12	0.00	0.82	146.80	305.24	162.79	90.41	2.44	0.00	
膨胀珍珠岩	0.00	0.00	4.20	0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	
岩棉	0.00	2.8	0.00	0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.188	
保温砂浆	0.00	0.00	0.00	15.60	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	

表3 生产阶段清单

类别	输入量		输出量										
	能源		大气污染物						温室气体			水体污染物	
	煤炭类 消耗量/ ($\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$)	电消 耗量/ ($\text{kW} \cdot \text{h}^{-1}$)	工业废气 排放量/ m^3	烟尘 排放量/ kg	粉尘 排放量/ kg	SO_x 排放量/ kg	氟化物 排放量/ kg	NO_x 排放量/ kg	CO_2 排放量/ kg	CH_4 排放量/ kg	N_2O 排放量/ kg	工业废水 排放量/ m^3	化学 需氧量/ g
EPS	1.243 3	0.447 6	4 560.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.270 0	0.000 0	0.000 0	4 305.000 0	2 684.250 0
膨胀珍珠岩	119.640 7	0.026 8	0.756 0	0.003 2	0.000 0	0.000 2	0.000 0	0.000 1	11.329 6	0.001	0.000 2	0.000 0	0.000 0
岩棉	9.956 1	0.291 4	18.728 0	0.051 7	0.000 0	0.033 2	0.000 0	0.005 9	1.041 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
保温砂浆	36.566 4	1.080 0	20.292 0	0.003 0	0.001 1	0.000 2	0.030 6	0.019 0	3.827 9	0.000 0	0.000 1	0.000 0	0.001 4

表4 运输阶段清单

类别	输入量		输出量			
	能源		大气污染物			温室气体
	汽油消耗量/L		烟尘排放量/g	SO_x 排放量/g	HC 排放量/g	NO_x 排放量/g
EPS	0.000 1		0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.001 4
膨胀珍珠岩	0.000 3		0.001	0.000 2	0.000 4	0.006 5
岩棉	0.000 2		0.000 1	0.000 1	0.000 3	0.003 7
保温砂浆	0.000 9		0.000 4	0.000 7	0.001 5	0.022 1

运输阶段假设均采用公路运输方式,且货车载重一致,能源输入为汽油。运行维护阶段清单如表5所示,表中能源输入表示功能单元公路运输每公里能耗^[8]。

表5 运行维护阶段清单

类别	保温隔热性能	能源输入降低值	
	相对增热 (RHG) / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	煤消耗量/ ($\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$)	电消耗量/ ($\text{kW} \cdot \text{h}^{-1}$)
EPS	1.201 3	0.012 0	14.220 0
膨胀珍珠岩	1.494 3	0.010 4	12.420 0
岩棉	1.757 8	0.009 1	10.800 0
保温砂浆	2.490 5	0.005 3	6.300 0

运行阶段主要考虑由于材料保温性能优越所节省的建筑运行阶段能耗,以导热系数为 $0.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 为基准,假设在北方地区使用,北方地区气候属夏热冬冷,最冷月气温为 $0 \sim 10^\circ\text{C}$,最热月气温为 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 。在此气候下测算单位屋面保温材料在生命周期中所减少的采暖、制冷能耗。由于村镇没有集中供暖条件,采暖考虑自家烧煤取暖,制冷考虑采用空调,采暖、制冷周期均为180 d。冬季24 h采暖,室内温度为 18°C ,燃烧效率为60%;夏季制冷为8 h/d,室内温度为 26°C 。 RHG 为相对增热^[8],考虑屋面保

温材料的保温性对其在运营阶段的影响 RHG 为

$$RHG = K \times \Delta T \times h$$

其中: K 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; ΔT 为室内外温差, $^\circ\text{C}$; h 表示作用时间。

屋面保温材料生命周期能耗^[14] E_c 为

$$E_c = RHG/1000$$

村镇自建房拆除所用机械较少,该阶段仅考虑屋面保温材料可循环利用率的影响。其中EPS板和岩棉回收率约为30%,膨胀珍珠岩和保温砂浆按没有回收考虑(见表6)。循环利用阶段数据计算方法为

$(1 - \text{回收率}) \times \text{生产阶段能耗} + \text{回收率} \times \text{废旧材料回收污染物排放系数}$

(2) 建立数据分析模型。数据收集完成后,按照之前确定的系统边界所划分生命周期各个阶段,在各阶段内按照资源输入、能源消耗输入、环境影响输出,按照环境影响类型将数据划归不同类别。

需要将材料生命周期不同阶段的环境影响和能源消耗归结于同一环境影响或能耗指标,从而得到其生命周期环境影响和能耗的总和。可以用公式分别表示为

$$EI_j = \sum (EI_{j(i)} \times Q_{j(i)})$$

表 6 拆除回收阶段清单

类别	回收率/ %	输入量								输入量							
		资源				能源		大气污染物		温室气体		水体污染物				土壤污染物	
		石油	玄武岩	珍珠岩矿	石灰石	煤炭类	油气类	工业废气	SO _x	CO ₂	CH ₄	工业废水	化学需氧	氨氮	石油类	挥发酚	固体废弃物
		消耗量/ kg	消耗量/ kg	消耗量/ kg	消耗量/ kg	消耗量/ (GJ · t ⁻¹)	消耗量/ kg	排放量/ m ³	排放量/ kg	排放量/ kg	排放量/ kg	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ kg
EPS	30.00	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	135.34	0.08	0.57	0.00	408.80	71.06	113.95	63.29	1.71	0.00
膨胀珍珠岩	0.00	0.00	0.00	2.94	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29
岩棉	30.00	0.00	1.96	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.31
保温砂浆	0.00	0.00	0.00	0.00	10.92	0.41	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42

其中: EI_j 表示材料第 j 种环境影响因素影响值; $EI_{j(i)}$ 表示在第 i 阶段,材料第 j 种环境影响因素影响值; $Q_{j(i)}$ 表示在第 i 阶段,材料第 j 种环境影响因素物质排放量。

$$EC_j = \sum (EC_{j(i)} \times Q_{j(i)})$$

其中: EC_j 表示材料第 j 种资源/能源消耗值; $EC_{j(i)}$ 表示在第 i 阶段,材料第 j 种资源/能源消耗值; $Q_{j(i)}$ 表示在第 i 阶段,材料第 j 种资源/能源消耗量。

3. 生命周期分析结果影响评价

影响评价就是根据清单分析的结果对潜在的环境影响程度进行评价。影响评价应同生命

周期其他各阶段相互协调,并能够满足生命周期分析的目的和范围。

笔者利用统计数据和计算程序,对村镇屋面保温材料生命周期资源、能源消耗和环境影响进行计算。由于 4 种村镇屋面保温材料资源输入的替代性较强,对资源的消耗并不显著,故不考虑资源耗竭的影响。对于 4 种屋面保温材料生命周期能耗,以等价热为折算系数,将生命周期所有类型能源折算为标准煤^[11-12]。生命周期村镇屋面保温材料资源、能源输入和环境影响输出计算如表 7 所示。

表 7 屋面保温材料生命周期输入、输出清单

类别	输入量					输入量														
	资源				能源	大气污染物					温室气体				水体污染物					土壤污染物
	石油	玄武岩	珍珠岩矿	石灰石	标准煤	工业废气	烟尘	粉尘	SO _x	氟化物	NO _x	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	工业废水	化学需氧	氨氮	石油类	挥发酚	固体废弃物
	消耗量/ kg	消耗量/ kg	消耗量/ kg	消耗量/ kg	消耗量/ (GJ · t ⁻¹)	排放量/ m ³	排放量/ kg	排放量/ kg	排放量/ kg	排放量/ kg	排放量/ kg	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ g	排放量/ kg
EPS	2.47	0.00	0.00	0.00	-34.08	4888.69	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	1.66	0.00	0.00	4860.60	3060.54	276.75	153.69	4.15	0.00
膨胀珍珠岩	0.00	0.00	7.14	0.00	75.68	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71
岩棉	0.00	4.76	0.00	0.00	-27.18	18.73	0.05	0.00	0.03	0.00	0.01	1.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.19
保温砂浆	0.00	0.00	0.00	26.52	18.63	20.29	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	3.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02

从表 7 数据可知,4 种屋面保温材料生命周期能源输入由大到小依次为膨胀珍珠岩 75.68 GJ/t,保温砂浆 18.63 GJ/t,岩棉 -27.18GJ/t, EPS -34.08 GJ/t。得知 EPS 材料生命周期总能耗最小,作为屋面保温材料,保温效果最好。但是 EPS 材料在生命周期大气和水体污染物排

放量较大,工业废气、硫化物以及多种水体污染物的排放量都大大高于另外 3 种保温材料。

三、结 论

北方村镇屋面保温材料的主要功能是尽可能减少室内热量通过屋面散失,实现屋面节能,

同时降低其生命周期对环境的影响。生命周期分析作为一个动态的过程,较一般静态分析材料性能和环境影响的方法更科学。生命周期清单分析通过特征化模型和综合评价方法,量化经济性、节能性、环保性等指标,综合评估保温材料的节能效果和环境影响,是屋面保温材料今后的研究方向。

参考文献:

- [1] Wallhage M, Glaumann M, Malmqvist M. Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change – Case study on an office building in Sweden [J]. Building and Environment, 2011, 46(10): 1863 – 1871.
- [2] Crawford R H. Validation of a hybrid life – cycle inventory analysis method [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(3): 496 – 506.
- [3] Ny H, MacDonald J P, Broman G, et al. Sustainability Constraints as System Boundaries: An Approach to Making Life – Cycle Management Strategic [J]. Journal of Industrial Ecology, 2006, 10(1/2): 61 – 77.
- [4] Guinée J B, Heijungs R. Life cycle assessment [M]. [S. l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [5] Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044 [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2): 80 – 85.
- [6] Zavadskas E K, Antucheviciene J. Multiple criteria evaluation of rural building's regeneration alternatives [J]. Building and Environment, 2007, 42(1): 436 – 451.
- [7] Chan J W K, Tong T K L. Multi – criteria material selections and end – of – life product strategy: Grey relational analysis approach [J]. Materials & Design, 2007, 28(5): 1539 – 1546.
- [8] 杨倩苗. 建筑产品的全生命周期环境影响定量评价 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [9] 王文明, 王子齐, 张建华. 节能窗的性能评价体系研究 [J]. 建筑节能, 2009(9): 32 – 34.
- [10] 曹小琳, 屈婷. 低碳建筑全寿命周期费用估算模型研究 [J]. 建筑经济, 2011(6): 92 – 95.
- [11] 王婧, 张旭, 黄志甲. 基于 LCA 的建材生产能耗及污染物排放清单分析 [J]. 环境科学研究, 2008, 20(6): 149 – 153.
- [12] Huberman N, Pearlmutter D. A life – cycle energy analysis of building materials in the Negev desert [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(5): 837 – 848.

Life Cycle Analysis on Insulation Materials for Village Roof in Northern China

LIU Jun¹, CHEN Chen², QI Wei³, ZUO Zongzhe⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 4. China Resources Construction Corporation, Shenzhen 518001, China.)

Abstract: Inventory analysis on resources of life cycle of insulation materials was carried out using the method of life cycle, as well as energy consumption and environmental impact. The related insulation materials are typically used for village roof in northern China, which include EPS, expanded perlite, asbestos board and thermal insulation mortar. The inventory analysis includes exploitation of resources, production, construction and installation, operation and maintenance, dismantling and recycling. The energy consumption of insulation materials for roof was comprehensively considered due to the reduction of insulation performance in the process of operation and maintenance while making equivalent heat as conversion coefficient. The results showed that the life-cycle energy consumption of EPS was the lowest, and air and water pollutant output were far higher than the other 3 materials, and energy consumption and carbon emissions of expanded perlite were the largest one.

Key words: village roof; insulation materials life cycle assessment; inventory analysis