

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160307

井干式木结构墙体产品物化环境影响评价

胡家航 姬晓迪 李凤龙 郭明辉

(东北林业大学生物质材料与技术教育部重点实验室)

摘要:基于生命周期评价法,根据工厂搜集的基础数据清单,采用 GaBi6.0 软件分析了 1 m³井干式木结构墙体产品物化过程(从原材料开采到产品出厂的生命周期)的原材料消耗、能源消耗和环境负荷,并利用软件提供的 CML2001 评价方法和数据库评价了墙体产品生命周期范围内造成的环境影响。结果表明:1)生产 1 m³墙体产品,全球变暖潜值、人体毒性、环境酸化、富营养化、光化学臭氧生成潜力和非生物资源耗竭的加权后结果(绝对值)依次为 3.50 × 10⁻⁹、2.11 × 10⁻⁹、1.38 × 10⁻¹⁰、1.38 × 10⁻¹⁰、2.33 × 10⁻¹¹、1.30 × 10⁻¹²,其中全球变暖潜值和人体毒性是墙体产品环境影响的主要类型,分别占环境影响总值的 59.2% 和 35.7%;2)墙体产品从原材料获取到产品出厂可分为原材料获取、集成材制造、墙体制造和油漆与包装这 4 个阶段,4 个阶段的环境影响结果(绝对值)分别为 2.40 × 10⁻⁹、7.32 × 10⁻¹⁰、4.25 × 10⁻¹⁰、7.20 × 10⁻¹¹,原材料获取阶段为环境影响的主要阶段;3)除去原材料获取阶段木材固定大量 CO₂对环境的积极影响,在环境污染方面,人体毒性占总环境影响的 35.7%,占污染的绝大部分,人体毒性主要由原材料获取、集成材制造和墙体制造这 3 个阶段贡献,且主要由这 3 个阶段的木材加工粉尘和电能使用造成。

关键词:井干式木结构墙体产品;物化;生命周期评价;环境影响

中图分类号:TU366.2;X828 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2017)06-0116-07

HU Jia-hang; JI Xiao-di; LI Feng-long; GUO Ming-hui. **Assessment of embodied environmental impact on log wooden wall member.** *Journal of Beijing Forestry University* (2017) **39**(6) 116-122 [Ch, 18 ref.] Key Laboratory of Bio-Based Material Science and Technology of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China.

Life cycle assessment (LCA) based on the cradle-to-gate inventories from factory was used to examine the raw material, energy consumption and environment load of embodied process on the functional unit of 1 m³ wall product. Moreover, CML-2001 method and database provided by GaBi were used to evaluate environment impact of wall product in the life circle scope. The results were as follows: 1) six impact categories had been assessed in detail in the LCA study: global warming potential (GWP), human toxic potential (HTP), acidification (AP), eutrophication (EP), photochemical ozone creation potential (POCP), abiotic depletion (ADP) and the absolute values were 3.50 × 10⁻⁹, 2.11 × 10⁻⁹, 1.38 × 10⁻¹⁰, 1.38 × 10⁻¹⁰, 2.33 × 10⁻¹¹, 1.30 × 10⁻¹², respectively. GWP and HTP were mainly responsible for the preparation of wall product, accounted for 59.2% and 35.7% of total environmental impacts, respectively. 2) To carry out this analysis, a wood factory was assessed in detail and the process was divided into four stages: the raw material obtaining stage, the glued laminated timber preparation stage, the wood wall preparation stage, the painting and packing stage and the absolute values of each stage were 2.40 × 10⁻⁹, 7.32 × 10⁻¹⁰, 4.25 × 10⁻¹⁰, 7.20 × 10⁻¹¹, respectively. Raw material obtaining stage was the main stage of environment impacting. 3) Excluding the positive impact of

收稿日期: 2016-09-28 修回日期: 2017-04-04

基金项目: “十二五”国家科技计划支撑课题(2015BAD14B0501)。

第一作者: 胡家航。主要研究方向: 木质生态环境材料学、建筑环境与结构工程。Email: jiahang_hu@163.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学生物质材料与技术教育部重点实验室。

责任作者: 郭明辉, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 木质复合材料、木材功能性改良、建筑环境与结构工程。Email: gmh1964@126.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学材料科学与工程学院。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

the photosynthesis, HTP was mainly responsible for the environmental deterioration and accounted for 35.7% of total environmental impact. Raw material obtaining, glulam preparation and wall preparation caused the most of HTP. The detailed analysis of each stage identified the most important environmental hot spots of HTP: the wood dust and electricity usage.

Key words wall product of log structure; embodied; life cycle assessment (LCA); environmental impact

从产品与材料的生命周期评价角度来看,建筑业属于重污染行业^[1],是温室气体排放的前三大行业之一^[2]。目前,国内主要使用的建筑材料有水泥、砖、钢材和玻璃等,都属于能耗较高的材料,不符合当今的节能环保大势。在我国乃至全球面临的环境压力下,减排、降耗的环境友好型材料成为建筑材料研究的热点。木材作为一种环保型绿色建筑材料越来越受广大人民的喜爱。

目前,国内外对于生命周期评价法在绿色建筑材料方面的应用已进行了相关研究,并取得了一定的成果。黄东梅等^[3]界定资源采掘到安装建造过程为生命周期范围,并对竹结构建筑进行了相关生命周期评价,研究表明:4个不同阶段的环境影响比例分别为资源采掘过程30.82%、运输过程3.43%、建材生产过程52.17%、现场建造过程13.57%。燕鹏飞等^[4]将生命周期评价法与工厂生产数据相结合,得到胶合木、规格材和定向刨花板3种木结构产品生命周期范围内的环境影响情况,结果表明:在一定功能单位情况下,3种不同的木结构产品的在生命周期范围内环境影响负荷分别为定向刨花板(1.096)最大,胶合木(0.886)居中,规格材(0.662)最小。Li等^[5]通过对结构用胶合竹集成材生产过程的生命周期评价发现:结构用胶合竹的制备过程对全球变暖潜值、环境酸化、富营养化以及资源消耗有很大影响,其中使用脲醛树脂胶产生的环境影响占总环境影响67%以上。González-García等^[6]对英国通风木质墙体做了生命周期评价,发现原材料获取阶段环境影响最大,达到57%~87%,主要原因是墙体中定向刨花板和中密度纤维板的使用较多,都

属于高污染产品,并且有部分原材料来自遥远的巴西,运输带来的环境影响比例较大。

目前,关于我国木结构墙体产品的生命周期评价比较少。墙体作为木结构中的重要构件,耗材量超过整栋木建筑耗材量的50%,预制墙体产品的能源消耗和环境污染是木结构是否符合节能环保的关键。因此,本研究对常见的井干式木结构墙体产品物化过程(从原材料到产品的过程)进行生命周期评价,比较分析生产阶段中的非生物资源耗竭、全球变暖潜值、环境酸化、富营养化、人体毒性及光化学臭氧生产潜力等主要环境影响,确定影响环境的主要类别和关键环节,为我国木结构墙体产品生产的节能、减排提供理论基础。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

选用东北地区常见的井干式木结构墙体产品(图1a)为研究对象。井干式木结构(图1b)是中国传统木结构民居中的一种,它采用方形、圆形或六角形基本构件,将构件水平向上层层叠加形成预制墙体(图1c),产品原材料为落叶松(*Larix gmelinii*)。工厂预制墙体有多种规格,本研究以123 mm(宽)×134 mm(高)×6 200 mm(长)规格的预制墙体产品(即120墙体)为例,功能单位确定为1 m³ 120井干式木结构墙体产品。

1.2 研究方法

基于GB/T 24044—2008中介绍的生命周期评价理论^[7],采用由德国PE-INTERNATIONAL开发的针对产品可持续发展的生命周期评价软件



a 墙体产品 Wall product b 井干式木结构 Log structure c 墙体模型 Wall model

图1 预制墙体
Fig. 1 Prefabricated wall

GaBi6.0 进行评价。GaBi6.0 软件所包括的评价方法有 CML2001/96、EI95/99、EDIP1997/2003 和 UPB 等^[8]。

1.2.1 环境影响分类

采用 CML2001 评价方法。CML2001 模型把环境影响分为:资源消耗、环境酸化、富营养化、全球变

暖潜值、臭氧层破坏、光化学臭氧生成潜力、人类毒性、淡水生态毒性、海水生态毒性、放射性辐射等。本研究选取最重要的 6 类指标进行计算,即:非生物资源耗竭、环境酸化、富营养化、全球变暖潜值、人体毒性、光化学臭氧生成潜力^[9]。GaBi6.0 中 CML2001 的分类、特征化、归一化和权重因子见表 1^[10]。

表 1 CML2001 方法的分类、特征化、归一化和权重因子

Tab. 1 Classification, characterization, normalization and weighting factors in the CML2001 method

环境影响类别 Classification of environmental impact	当量单位 Equivalent unit/kg	归一化基准 Normalization benchmark/kg	权重因子 Weighting factor
非生物资源耗竭 Abiotic depletion (ADP)	锑 Sb	1.83×10^{11}	1.5
全球变暖潜值 Global warming potential (GWP)	二氧化碳 CO ₂	4.18×10^{13}	10.0
富营养化 Eutrophication (EP)	磷酸根 PO ₄ ³⁻	1.58×10^{11}	7.0
环境酸化 Acidification (AP)	二氧化硫 SO ₂	2.39×10^{11}	2.0
人体毒性 Human toxic potential (HTP)	二氯苯 C ₆ H ₄ Cl ₂	3.63×10^{13}	8.0
光化学臭氧生成潜力 Photochemical ozone creation potential (POCP)	乙烯 C ₂ H ₄	4.04×10^{10}	3.0

1.2.2 生命周期评价范围

采用 CML2001 评价方法对井干式木结构墙体产品进行评价。在进行数据收集和评价前需要界定评价的范围。评价范围为我国井干式木结构行业普遍采用的墙体产品从原材料获取到产品出厂的所有工艺流程^[11-12],其中包括原木采伐、锯材干燥、指接等,并依其所属划分为原材料获取、集成材制造、墙体制造、油漆与包装这 4 个阶段^[13]。以界定的原材料获取到墙体产品的生命周期系统边界为基础,对各个工艺单元进行清单分析(在生命周期软件中建立工艺单元过程的输入、输出表),墙体产品生命周期系统边界如图 2 所示。

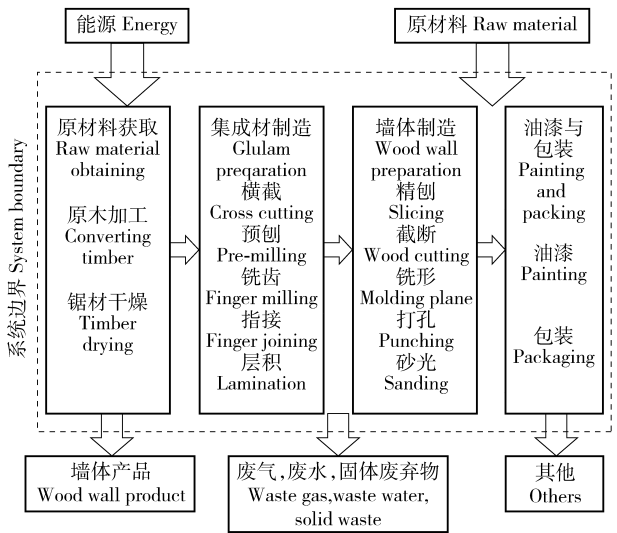


图 2 墙体产品生命周期系统边界

Fig. 2 Life circle boundaries of wall product

1.3 数据搜集

调研了东北地区某木结构建筑生产加工企业,

它是国内最大的木结构建筑企业之一,拥有国内领先的设备,其木结构生产数据基本能反映我国井干式木结构墙体生产的普遍情况。调研获得该公司生产单位墙体产品所需原材料和能源消耗的相关数据。本研究主要考虑系统边界内消耗量较大的原材料和能源,对于用量较小,环境影响较低的不予考虑^[14]。

1 m³ 井干式木结构墙体产品,输入的主要原材料(见表 2)为木材、水、白乳胶、水性漆(主要用于解决木材的耐久性问题)、瓦楞纸,主要能源消耗(见表 3)为电能、原油、天然气和无烟煤。这些输入均为工厂搜集的原始数据或由其统计数据计算而得,数据质量较高。

2 结果与分析

2.1 环境影响评价

墙体产品的生产主要分为原材料获取、集成材制造、墙体制造和油漆与包装这 4 个阶段,在工厂中这 4 个阶段相对独立。为了获得更全面的数据,不仅需要对 4 个阶段进行环境影响评价,还需要对于每个阶段的工艺流程进行系统连接。用 Gabi6.0 软件得出所有工艺的生命周期评价物质流,通过了解每个工艺流程的环境影响,可以为木结构制造业节能减排提出建议。

评价过程中,依次通过特征化、归一化和加权对数据进行处理,其中特征化过程也就是依据污染物相对于等效物的当量数进行标准化过程,归一化和加权处理是通过比较分析数据,综合国际上的通用环境影响权重值实现不同影响类型的特征化结果的比较。

表 2 1 m³墙体产品原材料消耗清单

Tab.2 Raw material consumption inventory of 1 m³ wall product					kg
原材料	落叶松	白乳胶	水	水性漆	瓦楞纸
Raw material	<i>Larix gmelinii</i>	White latex	Water	Water-based paint	Corrugate board
消耗量 Consumption	1 890	4. 26	23	4. 05	22

注:落叶松、白乳胶、水、水性漆和瓦楞纸数据用 GaBi 6.0 Professional + Extension 数据库换算^[15],单位统一转化成 kg。Notes: data of *Larix gmelinii*, white latex, water, water-based paint and corrugate board have been converted to the unit of MJ.

表 3 1 m³墙体产品能源消耗清单

Tab.3 Energy consumption inventory of 1 m³ wall product					MJ
生产阶段	电能	原油	天然气	无烟煤	
Manufacture stage	Electric energy	Crude oil	Natural gas	Anthracite coal	
原材料获取 Raw material obtaining	458. 00	1 906. 55	144. 15	52. 87	
集成材制造 Glulam preparation	193. 18	81. 88	5. 41	5. 09	
墙体制造 Wood wall preparation	184. 61	88. 18	5. 41	2. 98	
油漆和包装 Painting and packing		115. 43	68. 45		
合计 Total	835. 79	2 192. 04	223. 42	60. 94	

注:电能、原油、天然气和无烟煤数据用 GaBi 6.0 Professional + Extension 数据库换算^[15],单位统一转化成 MJ。Notes: data of electric energy, crude oil, natural gas and anthracite coal have been converted to the unit of MJ.

2. 1. 1 特征化

利用 GaBi 6.0 软件,采用 CML2001 特征化模型,分为 4 个阶段对墙体产品生命周期进行环境影

响特征化分析,将清单分析结果进行计算分析,转换成同一单位的环境影响类型参数,墙体产品环境特征化计算结果见表 4。

表 4 1 m³墙体产品生命周期环境影响特征化结果

Tab.4 Characterization of life circle impact assessment							kg
生产阶段 Manufacture stage	ADP	AP	EP	GWP	HTP	POCP	
原材料获取 Raw material obtaining	1. 06(38%)	1. 83(68%)	0. 33(70%)	- 1 667. 31(94%)	55. 22(58%)	-0. 21(75%)	
集成材制造 Glulam preparation	0. 49(17%)	0. 52(19%)	0. 09(19%)	60. 34(3%)	23. 79(25%)	0. 04(14%)	
墙体制造 Wood wall preparation	0. 12(4%)	0. 26(10%)	0. 03(6%)	37. 60(2%)	13. 99(14%)	0. 02(7%)	
油漆与包装 Painting and packing	1. 14(41%)	0. 09(3%)	0. 02(5%)	- 4. 12(1%)	2. 90(3%)	0. 01(4%)	
合计 Total	2. 81(100%)	2. 70(100%)	0. 47(100%)	- 1 537. 49(100%)	95. 90(100%)	-0. 14(100%)	

注:括号内为环境影响比例。Note: values in brackets are the proportion of environmental impact.

假定每一种环境影响类型比例总值(绝对值)为 100%,每个阶段对于各种环境影响类型的不同结果见表 4。针对不同的环境影响类型,不同的阶段贡献是不一样的。非生物资源耗竭的主要影响阶段为原材料获取阶段和油漆与包装阶段,分别占到了总非生物资源耗竭的 38% 和 41%,主要原因这两个阶段消耗了较多的化石能源,如原材料运输涉及的原油和油漆产品的化石能源耗竭直接影响了非生物资源耗竭这一指标。环境酸化的主要影响来自于原材料获取阶段和集成材制造阶段,分别占到总环境酸化的 68% 和 19%,主要原因是这两个阶段会使用大量的电能,我国主要采用煤发电,会产生较多的 SO₂,直接对环境的酸化造成影响。富营养化的主要影响来自于原材料获取阶段和集成材制造阶段,分别占到总富营养化的 70% 和 19%,主要原因是原材料获取阶段的木材干燥过程及这两个阶段复杂的

木材加工过程会产生大量的富含氮磷元素的工业废水,直接造成了环境的富营养化。全球变暖潜值的主要影响来自于原材料获取阶段,占总全球变暖潜值的 94%(绝对值),这个阶段的全球变暖潜值呈现出负值,原因是这个阶段获取了大量原木,木材具有固碳能力,吸收了大量的环境中的 CO₂。人体毒性的主要环境影响来自于原材料获取阶段和集成材制造阶段,占到总人体毒性的 58% 和 25%,主要原因是这两个阶段的木材加工工艺会产生大量粉尘,对人体造成直接损害。光化学臭氧生成潜力的主要环境影响来自于原材料获取阶段,占总光化学臭氧生成潜力的 75%(绝对值),其值为负值,对环境有积极影响,这个阶段使用了卡车运输,此种卡车运输消耗有机燃料,根据光化学臭氧生成潜力的概念^[16],消耗有机燃料使其不直接排放到大气中对于光化学臭氧生成潜力有积极作用,因此对环境影响为负值,

对环境有积极影响也是合理的。

2.1.2 归一化和加权处理

各环境影响类型参数结果的归一化的意义就是按照表 1 中的归一化基准和权重因子使研究对象所产生的各阶段不同环境影响类型值进行统一计算,增加对研究对象各参数结果相对重要性的认识,使不同影响类型所造成的环境影响具有可比性^[17-18],得到最终的环境影响结果。

根据加权计算得出井干式木结构墙体产品生产过程的环境影响评价结果(表 5),总体上来看,墙体产品生命周期范围内对环境的影响总值为 -1.18×10^{-9} ,结果为负值表明从原材料获取到墙体产品出厂过程对环境是有积极影响的。其原因是原木的获取阶段固定了大量的 CO₂,原木在生长过程中吸收的大量 CO₂对环境造成的积极影响远远多于产品制备过程中造成污染的消极影响。《京都议定书》指

出:森林所吸收的 CO₂对环境是有积极影响的。而木结构墙体产品可以实现 CO₂的长时间封存,因此墙体产品的物化过程对环境有积极影响是合理的。

由于不同环境影响类型结果有正负值区别(表示对环境有利或有害),因此对其生命周期归一化和加权结果做绝对值处理,更清楚地比较墙体产品物化过程中不同环境影响类型的相对比例(表 5)。墙体产品物化过程中,环境影响类型大小依次为全球变暖潜值、人体毒性、环境酸化、富营养化、光化学臭氧生成潜力和非生物资源耗竭。全球变暖潜值的绝对值最大,表明它是墙体产品物化过程中最关键的环境影响类型,占总环境影响的 59.2%,负值表示其对环境有积极作用;人体毒性占总环境影响的 35.7%,影响次之;环境酸化、富营养化、光化学臭氧生成潜力和非生物资源消耗的环境影响分别占总值的 2.3%、2.3%、0.4%和 0.1%。

表 5 1 m³墙体产品生命周期环境影响加权结果
Tab. 5 Weighing results of life cycle impact assessment

生产阶段 Manufacture stage	ADP	AP	EP	GWP	HTP	POCP	合计 Total
原材料获取 Raw material obtaining	4.91×10^{-13}	9.32×10^{-11}	9.73×10^{-11}	-3.71×10^{-9}	1.22×10^{-9}	-1.10×10^{-10}	-2.40×10^{-9}
集成材制造 Glulam preparation	2.25×10^{-13}	2.66×10^{-11}	2.63×10^{-11}	1.34×10^{-10}	5.24×10^{-10}	2.11×10^{-11}	7.32×10^{-10}
墙体制造 Wood wall preparation	5.70×10^{-14}	1.32×10^{-11}	8.82×10^{-12}	8.36×10^{-11}	3.08×10^{-10}	1.11×10^{-11}	4.25×10^{-10}
油漆与包装 Painting and packing	5.30×10^{-13}	4.72×10^{-12}	5.51×10^{-12}	-9.15×10^{-12}	6.38×10^{-11}	6.57×10^{-12}	7.20×10^{-11}
合计 Total	1.30×10^{-12} (0.1%)	1.38×10^{-10} (2.3%)	1.38×10^{-10} (2.3%)	-3.50×10^{-9} (59.2%)	2.11×10^{-9} (35.7%)	-2.33×10^{-11} (0.4%)	-1.18×10^{-9} (100%)

注:括号内为环境影响比例。Note: values in brackets are the proportion of environmental impact.

2.2 改善建议

从环境影响角度考虑,墙体产品生命周期范围内对环境的影响总值为 -1.18×10^{-9} ,结果为负值表示从原材料获取到墙体产品出厂过程对环境是有积极影响的。除了固定 CO₂对环境的积极影响,在环境污染方面,人体毒性占总环境影响的 35.7%,占污染的绝大部分。从表 4 可知人体毒性主要由原材料获取、集成材制造、墙体制造阶段贡献,根据生命周期评价软件导出的前 3 个阶段每个工艺的人体毒性特征化结果及比例见表 6。由表 6 可知:这 3 个阶段中,人体毒性主要由加工粉尘和电能使用造成的,原木加工、锯材干燥和铣齿 3 个工艺所造成的人体毒性比例超过 60%,这 3 个工艺主要的能耗为电能,主要的污染为加工产生的粉尘。

根据生命周期评价结果,针对企业实现井干式墙体产品制备的节能和减排目标,可从以下两个方面给出建议:

1) 建议企业的生产车间引进先进的除尘设备,对工厂的粉尘和加工废料进行搜集和清理,这样

可以减少粉尘对人体的直接伤害。并且由于工厂处于寒冷地区,约有 8 个月需要集中供暖,而目前该企业的供暖主要靠煤炭,先进的除尘设备可以将粉尘回收利用,给工厂供暖,可以间接地实现能源的节约。

2) 可以从减少电能的角度实现减少污染和节约能源。从表 3 能源消耗清单可知:制备 1 m³墙体产品电能总耗为 835.79 MJ。结合表 7 墙体产品生命周期系统边界内每个阶段的每个工序的电能使用情况,电能消耗最大的 3 个工艺分别为原材料获取阶段的原木加工和锯材干燥、集成材制造阶段的铣齿,电能消耗分别占到总电能的 24.4%、30.4%和 12.2%。因此建议企业重点针对原木加工、锯材干燥和铣齿这 3 个工序来优化工艺,在不影响产能的情况下减少电能使用。原木加工制材工序,建议企业引入欧美制材企业采用的高张紧带锯机,用计算机选择合理下锯方式,可有效提高锯材出材率,节省电能;锯材干燥工序,建议企业使用设备回收干燥室排气余热,在条件允许的情况下采用先进的联合干

燥;鉴于工厂现状,铣齿工序设备处于半自动化,跟不上指接工艺的生产速度,建议企业在铣齿机后加

入全自动连续式输送平台,提高铣齿工序的效率,节省电能。

表 6 1 m³ 墙体产品各工艺人体毒性特征化结果

Tab. 6 Human toxic potential characterization of different processes

阶段 Stage	工艺 Process	人体毒性特征化结果 Characterization of HTP/kg	比例 Percentage/%
原材料获取 Raw material obtaining	原木加工 Converting timber	29. 62	30. 9
	锯材干燥 Timber drying	25. 60	26. 7
集成材制造 Glulam preparation	横截 Cross cutting	0. 89	0. 9
	预刨 Pre-milling	8. 83	9. 2
	铣齿 Finger milling	10. 24	10. 7
	指接 Finger joining	1. 05	1. 1
	层积 Laminating	2. 78	2. 9
	精刨 Slicing	3. 82	4. 0
墙体制造 Wood wall preparation	截断 Wood cutting	0. 88	0. 9
	铣形 Molding plane	2. 83	3. 0
	打孔 Punching	0. 77	0. 8
	砂光 Sanding	5. 69	5. 9
油漆与包装 Painting and packing	油漆 Painting	2. 5	2. 6
	包装 Packing	0. 4	0. 4
合计 Total		95. 90	100

表 7 各工艺电能使用情况

Tab. 7 Electricity usage of different processes

阶段 Stage	工艺 Process	电能 Electric energy/MJ	比例 Percentage/%
原材料获取 Raw material obtaining	原木加工 Converting timber	204. 00	24. 4
	锯材干燥 Timber drying	254. 00	30. 4
集成材制造 Glulam preparation	横截 Cross cutting	8. 78	1. 1
	预刨 Pre-milling	48. 00	5. 7
	铣齿 Finger milling	102. 00	12. 2
	指接 Finger joining	10. 40	1. 3
	层积 Laminating	24. 00	2. 9
	精刨 Slicing	47. 90	5. 7
墙体制造 Wood wall preparation	截断 Wood cutting	8. 78	1. 1
	铣形 Molding plane	48. 00	5. 7
	打孔 Punching	3. 53	0. 4
	砂光 Sanding	76. 40	9. 1
合计 Total		835. 79	100

3 结论与讨论

井干式木结构墙体产品生产生命周期范围内的环境影响结果表明:生产 1 m³ 墙体产品全球变暖潜值、人体毒性、环境酸化、富营养化、光化学臭氧生成潜力和非生物资源耗竭的加权后结果(绝对值)依次为 3. 50 × 10⁻⁹、2. 11 × 10⁻⁹、1. 38 × 10⁻¹⁰、1. 38 ×

10⁻¹⁰、2. 33 × 10⁻¹¹、1. 30 × 10⁻¹²。可见,全球变暖潜值和人体毒性是墙体产品环境影响的主要类型,分别占总的环境影响的 59. 2% 和 35. 7%。

井干式木结构墙体产品物化过程的环境影响总值为 -1. 18 × 10⁻⁹,负值表示墙体产品的获得这个阶段内对环境是有积极影响的。4 个阶段的环境影响结果(绝对值)分别为:原材料获取 2. 40 × 10⁻⁹,

集成材制造 7.32×10^{-10} , 墙体制造 4.25×10^{-10} , 油漆与包装 7.20×10^{-11} 。其中, 原材料获取阶段是环境影响的最重要环节。

井干式木结构墙体产品作为井干式木结构建筑主要的构件之一, 根据研究结果可知墙体产品物化过程环境影响为负值, 表明墙体在界定的生命周期范围内对环境是有积极作用的, 从侧面反映了木结构的绿色环保性以及其作为民宅在我国推行的可行性。同时, 从节能减排的角度, 根据生命周期评价的结果, 给木结构建筑企业的节能减排提出两条实质性改善建议, 希望能对企业的节能减排工作带来实质性的改进。

参 考 文 献

- [1] LI X, ZHU Y, ZHANG Z. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes [J]. *Building & Environment*, 2010, 45(3):766-775.
- [2] ACQUAYE A A, DUFFY A P. Input-output analysis of Irish construction sector greenhouse gas emissions [J]. *Building & Environment*, 2010, 45(3):784-791.
- [3] 黄东梅, 周培国, 张齐生. 竹结构民宅的生命周期评价[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(5):148-152.
- HUANG D M, ZHOU P G, ZHANG Q S. Life cycle assessment of bamboo-constructed house [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(5):148-152.
- [4] 燕鹏飞, 杨军. 木结构产品物化环境影响的定量评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, 48(9):1395-1398.
- YAN P F, YANG J. Quantitative assessment of the embodied environmental impact of wood products[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008, 48(9):1395-1398.
- [5] LI J, YUAN Y, GUAN X. Assessing the environmental impacts of glued-laminated bamboo based on a life cycle assessment [J]. *BioResources*, 2016, 11(1):1941-1950.
- [6] GONZÁLEZ-GARCÍA S, LOZANO R G, ESTÉVEZ J C, et al. Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DfE perspective [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(4):432-443.
- [7] 环境管理生命周期评价要求与指南: GB/T 24044—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Environmental management-life circle assessment-requirements and guidelines: GB/T24044—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [8] 李兴福, 徐鹤. 基于 GaBi 软件的钢材生命周期评价[J]. *环境保护与循环经济*, 2009, 29(6):15-18.
- LI X F, XU H. Life circle assessment of steel based on GaBi[J]. *Environmental Protection & Re-Cycling Economy*, 2009, 29(6):15-18.
- [9] 袁媛. 基于改性木质素的环保型木质材料研制及其生命周期评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- YUAN Y. Preparation and life cycle assessment of environment-friendly wooden composites based on modified industrial lignins [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [10] 徐小宁. 中国水泥工业的生命周期评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- XU X N. Life cycle assessment of cement in China[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [11] ROBERTSON A B, LAM F C F, COLE R J. A Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete [J]. *Buildings*, 2012, 2(4):245-270.
- [12] MAHALLE L, ALENDAR A, MIHAI M, et al. A cradle-to-gate life cycle assessment of wood fibre-reinforced polylactic acid (PLA) and polylactic acid/thermoplastic starch (PLA/TPS) biocomposites[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(6):1305-1315.
- [13] PUETTMANN M E, BERGMAN R, HUBBARD S, et al. Cradle-to-gate life-cycle inventory of US wood products production: CORRIM Phase I and Phase II products [J]. *Wood & Fiber Science*, 2010, 42(3):15-28.
- [14] LIU J, HU H, XU J, et al. Optimizing enzymatic pretreatment of recycled fiber to improve its draining ability using response surface methodology[J]. *BioResources*, 2012, 7(2):2121-2140.
- [15] 丁宁, 杨建新. 中国化石能源生命周期清单分析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(5):1592-1600.
- DING N, YANG J X. Life cycle inventory analysis of fossil energy in China[J]. *China Environmental Science*, 2012, 35(5):1592-1600.
- [16] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- DENG N S, WANG X B. Life circle assessment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [17] 袁宝荣, 聂祚仁, 狄向华, 等. 乙烯生产的生命周期评价影响评价与结果解释[J]. *化工进展*, 2006, 25(4):432-435.
- YUAN B Y, NIE Z R, DI X H, et al. Life cycle inventories of fossil fuels in China final life cycle inventories [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2006, 25(4):432-435.
- [18] 徐小宁, 陈郁, 张树深, 等. 复合硅酸盐水泥的生命周期评价[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(9):2632-2638.
- XU X N, CHEN Y, ZHANG S S, et al. Life cycle assessment of composite portland cement [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(9):2632-2638.

(责任编辑 吴 娟
责任编辑委 赵广杰)