

木结构材料与其他建筑结构材料的碳排放对比

曾杰¹, 俞海勇², 张德东¹, 杨辉¹, 蔡维森³

(1. 上海建科检验有限公司, 上海 201108; 2. 上海市工程结构安全重点实验室, 上海 200032;

3. 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 上海 200032)

摘要:以生命周期理论为基础,建立木结构与其他建筑结构材料的碳排放算法模型,量化分析不同建材的碳排放量。

结果表明:木结构材料的碳排放明显少于钢结构和混凝土结构材料;四个树种的木结构材料中,东北落叶松的碳排放最小,为68 t CO₂;北美冷杉的碳排放最大,为1 175 t CO₂。合理选择木材树种及产地,将进一步降低木结构建筑的碳排放。

关键词:木结构;建筑结构;建材;碳排放

中图分类号:F205; TS66; TU366.2

文献标识码:B

文章编号:1001-8654(2018)01-0028-05

Comparison of Carbon Emissions from Structural Building Materials among Timber Construction and Other Types of Construction

ZENG Jie¹, YU Hai-yong², ZHANG De-dong¹, YANG Hui¹, CAI Wei-sen³

(1. Shanghai Jianke Technical Assessment of Construction Co., Ltd., Shanghai 201108, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai 200032, China; 3. Shanghai Research Institute of Building Sciences (Group) Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Based on life cycle analyses theory, the authors established an algorithm model for calculating carbon emissions from structural building materials used in timber construction and other constructions. The authors then quantitatively analyzed the carbon emissions from the relevant structural materials.

The results showed that carbon emissions from timber construction were significantly less than that from steel and concrete. Moreover, carbon emissions from wood varied with different wood species. Among the four species selected for the timber construction, *Larix gmelinii* timber released minimum carbon emissions with 68 tons of carbon dioxide, and *Abies grandis* timber released the maximum carbon emissions with 1 175 tons of carbon dioxide.

Key words: timber construction; building construction; structural materials; carbon emissions

相对于水泥、混凝土、钢材等高能耗传统建材,

木材是一种稳定、无污染的天然可再生材料。树木在生长过程对二氧化碳具有汇聚及固定的能力,增加木材和木制品的使用寿命,就能扩大碳储库的储量。除此之外,木材还具有保温隔热、抗震性强、施工标准化等特点。随着国内外低碳发展要求不断提高,推广木结构建筑是减缓气候变暖的有效举措之一。研究木结构的碳排放,在建设环境友好型社会方面具有重要的意义。

收稿日期:2017-06-09; 修改日期:2017-11-28

基金项目:上海市科委社会发展领域项目“基于互联网的低碳建筑材料智慧应用平台关键技术研究”(15DZ1204605);上海市科委应用技术开发项目“新型多层木结构体系关键技术研究与应用”(2015-110);上海市闵行区科委民生计划“基于互联网大数据方法的建材质量评价及智能选材技术研究”(2016MH194);上海市国资委技术创新项目“基于知识管理的大型建筑技术咨询服务企业云平台建设”(2015027)。

作者简介:曾杰(1984—),男,上海建科检验有限公司工程师。

对高能耗的传统建材,已有碳排放计算及生产过程的环境影响研究^[1-6];木材领域的碳排放研究,则主要集中在森林碳汇领域^[7-9],对木质建材及构件产品的碳排放研究相对较少,且也基本不考虑上游阶段能源的影响^[10]。

笔者以设计建造一栋地下1层、地上6层的多层建筑为例,通过分别采用木结构与传统钢结构、混凝土结构时,建材的碳排放情况比较,量化不同类型结构的碳排放结果,为绿色建筑设计的合理选材提供参考。

1 碳排放算法研究与数据收集

1.1 研究对象

建筑物设计占地面积约917 m²,建筑面积6421 m²,基础尺寸50.4 m×18.2 m,基础深6.2 m,层高3.9 m,以结构采用的主要建材为研究对象。

木结构设计选用4种木材,分别为:东北落叶松(*Larix gmelinii*)、东北冷杉(*Abies nephrolepis*)、北美花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)、北美冷杉(*Abies grandis*)。

1.2 系统边界与数据来源

由于建材是建筑的原材料,而非终端产品,同时结合本案例木材运输的特殊性,将系统边界取为“从摇篮到工程现场”,并向上追溯至能源上游阶段,边界范围如图1所示。本研究仅对建材带来的CO₂排放进行核算与研究,数据来源包括实地企业调研、国家统计数据,以及其他数据库。

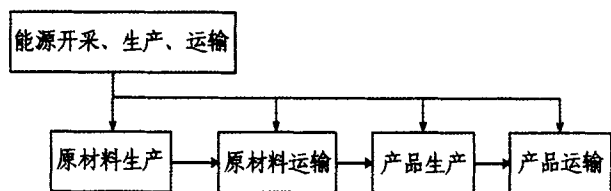


图1 建材碳排放计算系统边界

Fig.1 Calculation boundary of carbon emissions from building materials

1.3 碳排放源分析

在本研究选定的计算边界内,碳排放源主要包括提炼、生产、加工及运输过程消耗化石能源带来的直接排放,建材生产用碳酸盐分解产生的排放,以及消耗电力、热力导致的间接排放。

1.4 建材生产碳排放计算方法

计算依据PAS 2050《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》和SH/MRV-001-2012《上海市温室气体排放核算与报告指南(试行)》,在其碳排放计算方法的基础上,对其算法进行改进,将上游阶段能源的碳排放也纳入计算过程。计算方法:

1) 建材生产阶段的碳排放

木结构与传统钢结构、混凝土结构建筑使用的主要建材包括:胶合木/正交胶合木(cross-laminated timber, CLT)、混凝土、钢材等,其生产阶段的碳排放采用公式1计算。

$$C_z = -C_g + C_n + C_t \quad (1)$$

式中: C_z —建材生产过程的总碳排放; C_g —木材的固碳量,非木材为零; C_n —建材生产过程消耗能源所产生的碳排放; C_t —建材生产过程由于高温煅烧导致的碳酸盐分解碳排放,木材为零。

其中, C_g 、 C_n 与 C_t 的计算公式分别为:

$$C_g = V \times D \times C_c \times (1 - m_c) / P_c \quad (2)$$

$$C_n = \sum (QC_{ei} \times Q_{ei} \times R_{ei} \times m_{ei} / P_c + C_{ui} \times m_{ei}) \quad (3)$$

$$C_t = \sum M_i \times F_i \quad (4)$$

式2中: V —树干体积; D —树干密度; C_c —树干含碳量; m_c —树干含水率; P_c —碳元素分子量在CO₂分子量中的比例。

式3中: QC_{ei} —能源的单位热值含碳量; Q_{ei} —能源的低位热值; R_{ei} —能源氧化率; m_{ei} —能源消耗量; C_{ui} —能源的上游阶段碳排放; i —能源的种数。

式4中: M_i —资源的消耗量; F_i —资源的过程排放因子; i —资源种类数。

2) 运输阶段的碳排放

建材产品无论通过陆运还是水运,运输过程主要消耗柴油或者汽油等能源,因此该过程的碳排放 C_y 计算方法与(3)式相同。

1.5 数据来源

1) 已经公开出版的期刊文献; 2) 生产企业现场收集; 3) 其他商业数据库^[11]调取。

收集数据的范围涵盖能源相关参数、建材生产能耗结构、运输消耗等。涉及建材产品生产过程消耗的能源种类包括: 煤、柴油、天然气等; 运输消耗能源有: 汽油、柴油。能源的主要参数缺省数据列于表1。

表1 化石燃料主要参数缺省值^[12]

Tab.1 Default values of associated parameters
about fossil fuels

能源种类	单位热值含碳量/(t-C/TJ)	低位热值/(kJ·kg ⁻¹)	氧化率
煤制品	33.6	17 460	0.95
汽油	18.9	44 800	0.98
柴油	20.2	43 330	0.98
天然气	15.3	38 930	0.99

胶合木/CLT、混凝土和钢铁的生产数据，分别列于表2~4。

表2 胶合木/CLT主要参数^[13-17]

Tab.2 Main parameters of Glulam/CLT

树种	树干密度/(kg/m ³)	树干含碳量	生产能耗/(kg ce/m ³)
东北落叶松	631	0.5088	227.61
东北冷杉	437	0.5079	227.61
北美花旗松	530	0.5050	238.14
北美冷杉	430	0.4588	238.14

注：原材料运输方式为陆运；根据实际调研结果，运输距离均假设为50 km。

表3 混凝土生产主要数据

Tab.3 Main parameters of concrete

原材料	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	石	外加剂
消耗/(kg·m ⁻³)	259	77	82	759.8	1019	5.09
运输距离/km	370	10	30	550	380	30
运输方式	陆运	陆运	水运	水运	水运	水运
生产能耗/(kW·h/m ³)	3.37					

注：数据调研自上海地区混凝土企业。

表4 钢铁生产主要数据^[18-19]

Tab.4 Main parameters of steel

原材料	铁矿石	锰矿石
消耗 ^[18] /(kg/kg)	1.539	0.038
运输距离/km	350	1850
运输方式	陆运	陆运
生产能耗/(kg ce/kg) ^[19]	0.516	

表2胶合木/CLT的加工能耗，是结合文献14~17的研究和实际情况计算得出；表3混凝土生产的数据，包括原材料配比、运输方式、运输距离等，均调研自上海地区的混凝土搅拌站；表4钢材产品的原材料配比取自文献18，运输为根据实际情况的估算，生产能耗来自文献19。

表5列出最终建材产品运输距离，系根据生产企业的实际位置得出；表6中陆运、水运的单位能耗引自文献[20]。

表5 不同建材产品的运输情况

Tab.5 Transportation of building materials

建材种类	运输方式	运输距离/km
胶合木/CLT	东北落叶松/东北冷杉	陆运 800
		海运 950
	北美花旗松/北美冷杉	陆运 600
		海运 25 500
混凝土	陆运	30
钢材	陆运	40

表6 不同运输方式的单位能耗^[20]

Tab.6 Unit energy consumption of
transportation modes

运输方式	单位运输能耗/(MJ/t·km)
公路运输（汽油车）	3.038
公路运输（柴油车）	2.055
内陆水运	0.468
海运	0.216

2 建材生产及运输碳排放因子计算分析

依据改进的计算公式，结合表1~6的调研数据，计算三种结构建筑物主要建材的碳排放因子，结果列于表7；运输碳排放因子计算结果，列于表8。

表7 不同建材碳排放因子

Tab.7 Carbon emissions factor of building materials

建材种类	碳排放/(kg CO ₂ /m ³)
胶合木/CLT	东北落叶松 -374.71
	东北冷杉 -32.25
	北美花旗松 -295.75
	北美冷杉 -90.63
混凝土	323.42
钢材	3.69 kg CO ₂ /kg

表8 运输碳排放因子

Tab.8 Carbon emissions factor of transportation

运输方式	单位运输碳排放/(kg CO ₂ /kg·km)
公路运输（汽油车）	1.81×10 ⁻⁴
公路运输（柴油车）	1.22×10 ⁻⁴
内陆水运	4.11×10 ⁻⁵
海运	1.90×10 ⁻⁵

由表 7 可知,混凝土、钢材生产过程的碳排放为正值,而不同树种加工而成的胶合木/CLT 的碳排放为负值,反映了不同材料生产过程对环境的影响迥异。

不同树种胶合木/CLT 生产阶段的碳排放在一 $374.71 \sim -32.25 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ 之间,说明不同树种的固碳能力也存在较大差别。东北落叶松的固碳能力最强,其次是北美花旗松、北美冷杉,最弱的是东北冷杉。

根据表 8 结果,采用汽油车和柴油车的内陆运输碳排放相差较小,为简化运算,后续分析统一为柴油车运输。

3 木结构与传统建筑物材料碳排放的对比

3.1 碳排放阶段计算对比

根据工程量清单,3 种结构建筑物的用材量,列于表 9。

表 9 不同结构建筑建造阶段主要建材消耗数量

Tab.9 Building material consumption of different constructions

结构类型	混凝土/ m^3	钢材/t	胶合木 (CLT) / m^3
木结构	871.95	52.06	1 435.31
钢结构	583.76	637.83	—
混凝土结构	2 105.78	265.64	—

结合公式 1~公式 4,以及表 7~表 9,计算不同类型建筑的建材引入碳排放,结果见图 2。

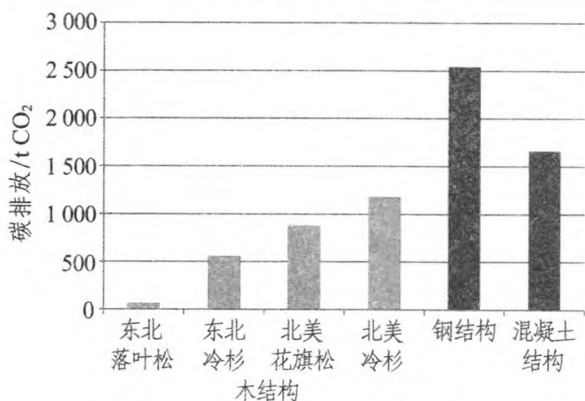


图 2 不同建筑结构材料的碳排放

Fig.2 Carbon emissions from different types of structural materials

从图 2 可见,在本案例中,钢结构建材引入的碳排放最多,为 $2\,542 \text{ t CO}_2$; 其次为混凝土结构建材,

为 $1\,661 \text{ t CO}_2$,木结构材料的碳排放小很多。显而易见,相对于传统的钢结构和混凝土结构,木结构建筑在碳排放方面具有明显的优势。

从图 2 中可见,因树种不同、产地不同,木结构建材的碳排放亦存在一定差异。以东北落叶松的碳排放最低,北美冷杉的碳排放最高。造成差异的原因,主要是不同树种的固碳能力不一样,与树干密度、含碳率等有关(式 2),关键指标是树干密度。密度越大,固碳能力越强。

另外,碳排放大小与运输距离关系很大,北美木材的运输距离长,必然导致运输过程碳排放的增大。因此,合理的选择树种及产地,是降低木结构建材碳排放的重要途径。

3.2 不确定度分析

研究在获取活动水平数据和相关参数时,不可避免存在不确定性。主要原因是部分数据缺失,及部分建材生产过程能耗计量存在误差。具体包括:

1) 缺乏建材生产所需部分辅料数据。对于此部分数据,采取“cut-off”处理方法,即当某辅料的消耗量占总质量的比例小于 5%,且数据确实不易获得时,可忽略该辅料的数据。

2) 部分建材生产线存在同时生产 2 种或者以上不同规格的产品,但是能耗统计并没有分别精准计量。笔者根据不同产品的工艺区别、产品规格特点,对能耗进行合理分摊。必要时,通过能耗实时监测,进行数据验证。

4 结语

1) 应用生命周期理论,建立木结构与传统建筑材料碳排放计算模型,并计算主要建材生产阶段的碳排放。生产阶段,4 种木材胶合木/CLT 的碳排放均为负值,混凝土、钢材的碳排放分别为 $323.42 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ 、 $3.69 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$ 。

2) 3 种结构建筑物材料碳排放结果表明:钢结构建材碳排放最高,为 $2\,542 \text{ t CO}_2$; 其次是混凝土建材, $1\,661 \text{ t}$; 木结构建材的 CO_2 排放在 $68 \sim 1\,175 \text{ t}$ 之间,明显低于传统建筑结构。

3) 4 种木结构建筑物中,以东北落叶松的碳排放最小,北美冷杉的碳排放最大。合理选择木材树种和产地,有利于降低木结构碳排放。

参考文献:

- [1] 王婧, 张旭. 基于生命周期的能源上游清单分析模型改进[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 520-524.
- [2] 曾杰, 俞海勇, 颜伟国, 张贺. 基于生命周期理论的建筑卫生陶瓷碳足迹研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(1): 54-62.
- [3] 曾杰, 颜伟国, 赫赫, 赵敏. 建筑材料碳足迹研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(S1): 321-325.
- [4] 苏醒, 张旭, 孙永强. 钢结构住宅建筑部品生命周期详单分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(12): 1784-1788.
- [5] Rosa M, Cuéllar Franca, AdisaAzapagic. Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses[J]. Building and Environment, 2012, 54: 86-99.
- [6] Paula Quinteiro, António Araújo, Bruna Oliveira, Ana Cláudia Dias, Luís Arroja. The carbon footprint and energy consumption of a commercially produced earthenware ceramic piece[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32: 2087-2094.
- [7] 马晓哲, 王铮. 中国分省区森林碳汇量的一个估计[J]. 科学通报, 2011, 56(6): 433-439.
- [8] 周健, 肖荣波, 庄长伟, 邓一荣. 城市森林碳汇及其核算方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3368-3377.
- [9] 尹少华, 周文朋, 丁扬. 湖南省森林碳汇市场供求关系及其优化研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015(1): 140-144.
- [10] 陈硕, 胡继梅, 沈乃强, 田卫国, 陈永忠, 严诚洁, 朱婵璎. 强化木地板的“碳足迹”计算分析[J]. 木材工业, 2014, 28(2): 36-38.
- [11] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 何琴, 张浩, 姜睿, 陈雪雪, 侯萍. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [12] SH/MRV-001-2012, 上海市温室气体排放核算与报告指南(试行)[S].
- [13] 于姝洋. 帽儿山地区树种碳含量研究及轻型木结构的碳汇计算[D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文, 2012: 11-15.
- [14] B Durlinger, E Crossin, J Wong. Life cycle assessment of a cross laminated timber building[M]. Victoria: Forest & Wood Products Australia Limited, 2013: 75-76.
- [15] 谢力生. 木材工业生命周期评价研究现状[J]. 木材工业, 2010, 24(5): 28-31.
- [16] Gustavsson L, Sathre R. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials[J]. Building and Environment, 2006, 41(7): 940-951.
- [17] 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.
- [18] 王腊芳, 张莉沙. 钢铁生产过程环境影响的全生命周期评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(11): 239-244.
- [19] GB 21256-2013, 粗钢生产主要工序单位产品能源消耗限额[S].
- [20] 俞海勇, 王琼, 张贺, 於林锋. 基于全寿命周期的预拌混凝土碳排放计算模型研究[J]. 粉煤灰, 2011, 23(6): 42-46.

(责任编辑 向琴)

行业简讯

木材工业分会木材保护研究会理事会召开

第五届中国林学会木材工业分会木材保护研究会第一次理事扩大会议 2017 年 11 月广州在召开。秘书长马星霞做了研究会工作规划报告。

会议承办方, 广东省林科院院长李小川致辞, 肯定研究会的工作成绩, 并提出指导意见; 行业资深专家蒋明亮、曹金珍、李兴伟和苏海涛等提出: 学术交流要常态化持续开展, 并在发挥学术优势的前提下, 紧密联系企业, 有针对性地开展机理和工艺研究; 福建漳平木村/福建众知防火科技有限公司董事长吴冬平、上海大不同木业科技有限公司总经理李惠明、扬州怡人木业总经理姚有涛等企业建议: 建立合适的渠道反映企业诉求, 得到政府更多关注和政策支持, 并希望专家学者帮助企业提升技

术创新能力。

中国林科院木材工业研究所副所长吕斌表示, 木材保护行业尽管小, 但防腐、改性、阻燃等处理可解决木材在特殊场合的使用, 且事关安全、环保和生态等重大问题, 与国家建设生态家园的号召紧密相通, 前景广阔。因此, 研究会工作要与产业接轨, 为企业服务, 协同创新发展; 同时, 有必要搭建一个产业平台, 作为“产学研”与上级部门沟通的渠道, 推动政府更多的了解、关注和支持; 打击不合格产品, 规范产业发展。

各位理事一致表示, 科学家与企业家结合, 研究与生产结合, 将推进行业健康有序协同发展。

马星霞

关注本刊微信公众号: mucaigongye

投稿请认准本刊唯一官网: mcgy.criwi.org.cn

通过微信订阅更便捷、更优惠

全国各地邮局订阅 (邮发代号: 2-311)