

钢结构住宅建筑部品生命周期详单分析

苏 醒^{1,2}, 张 旭¹, 孙永强¹

(1. 同济大学 暖通空调及燃气研究所, 上海 200092; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 对某钢结构住宅小区内 3 幢不同层数建筑施工过程的建材耗量、建材来源进行调研统计, 并结合 BESLCI 软件计算建筑结构、围护结构的生命周期能耗及环境排放。结果表明, 钢构件、混凝土和水泥的生命周期能耗共占钢结构住宅建筑部品生命周期能耗的 60% 以上, 钢结构住宅施工生命周期能耗仅为常规结构住宅的 50% 左右, 建筑体量对钢结构住宅建筑部品生命周期清单影响不大。同国内外其他学者的钢结构建筑生命周期清单分析结果进行了比较, 差异较大, 分析发现数据获取的精确性、研究边界划分的合理性及缺少标准的清单分析数据库是造成差异的主要原因。

关键词: 钢结构住宅; 生命周期评价; 清单分析; 物化能耗
中图分类号: TU 241 **文献标识码:** A

Detailed Life Cycle Inventory Analysis of Building Components in Steel-construction Residential Buildings

SU Xing^{1,2}, ZHANG Xu¹, SUN Yongqiang¹

(1. HVAC & Gas Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An in-situ research was made to investigate the building material consumption and source of three steel-construction residential buildings with different volumes. Then a comparative study was made of the life cycle energy consumption and environmental emissions of building structures and envelopes with the BESLCI software. Results show that the steel component, concrete and cement consume more than 60% of the total life cycle energy; the life cycle energy consumption of steel construction residential building during construction stage is only 50% of that of conventional structure. The building volumes have little impact on inventory analysis results per building area unit. The results are different from the former research results because of the accuracy of inventory data, rationality of research boundary

partition and the shortage of inventory analysis data base.

Key words: steel-construction residential buildings; life cycle assessment; inventory analysis; embodied energy

钢结构住宅具有产业化程度高、施工周期短、投资回收快等几大优点, 在我国得到了较快的发展。但是, 多层、高层钢结构住宅究竟孰优孰劣, 行业内始终没有达成共识。一方面, 高层钢结构住宅能够提供更多的居住面积, 减少占地面积; 另一方面, 层数越多的建筑必然对建筑桩基及结构设计的要求更为严格, 建材耗量也会相应增加。目前国内外几乎没有对建筑体量与生命周期能耗间关系的研究。已有的建筑生命周期评价研究中, 建筑材料消耗量一般都是根据建筑图纸进行估算, 所得到的结果可能会受到统计数据精确度的影响。

本文以都江堰某钢结构住宅小区内 3 幢不同层数的钢结构住宅为研究对象, 跟踪调研各幢建筑建造过程中的建材消耗量以及建材上游来源, 利用建筑生命周期清单分析软件分析建筑结构、围护结构、施工过程的物化能耗以及生命周期环境排放, 比较不同建筑体量对建筑生命周期环境性能的影响。

1 清单模型

1.1 研究对象

本文以都江堰某钢结构住宅小区内 3 幢不同层数建筑为研究对象, 研究分析不同体量钢结构住宅建筑的结构和围护结构的生命周期能耗及环境排放。相关参数如表 1 所示。

1.2 研究边界

建筑生命周期可以解耦为外围护结构、结构和

收稿日期: 2010-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(50578113); 住房和城乡建设部科学技术计划(2011-R1-23)

第一作者: 苏 醒(1982—), 男, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为建筑生命周期评价及有效性分析. E-mail: cc8801314@163.com

建筑使用阶段 3 个部分,每个部分都是一个存在单独生命周期的产品,都包含着能源和材料两条分析主线. 本文将主要分析建筑部品的生命周期能耗和环境排放. 建筑结构和围护结构是由各类建筑材料及建筑构件通过现场施工拼装而成,因此建筑部品的生命周期是由建筑材料或建筑构件生产、运输、现场施工、拆除回收等过程组成,其生命周期流程如图 1 所示. 各个部分的能源消耗及环境排放加上能源上游的能源消耗及环境排放即为建筑部品的生命周期能耗及环境排放^[1].

表 1 住宅相关参数

Tab.1 Parameters of residential buildings

住宅编号	层数/层	建筑面积/m ²	建筑外表面积/m ²
1	6	5 524	3 768
2	11	5 544	4 720
3	18	9 574	6 408

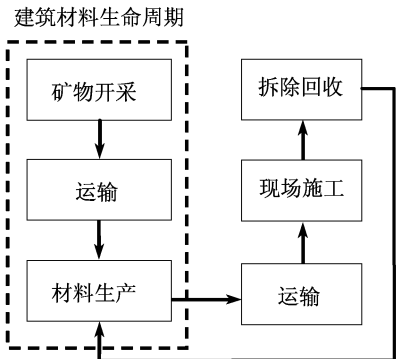


图 1 建筑部品的生命周期流程

Fig.1 Building component life cycle

表 2 不同体量钢结构住宅结构部分材料耗量

Tab.2 Structure materials consumption of buildings with different volumes

住宅编号	材料耗量/t						
	钢筋	钢柱	钢梁	钢板	混凝土	防火漆	防腐漆
1	158.036	167.712	189.382	17.198	1 923.963	56.261	345.162
2	151.755	177.487	214.125	52.585	2 087.929	113.179	385.369
3	270.556	415.528	471.844		2 839.706	216.876	864.458

表 3 不同体量钢结构住宅围护结构部分材料耗量

Tab.3 Envelope materials consumption of buildings with different volumes

住宅编号	材料耗量/t				玻璃耗量/m ²	加气混凝土砌块耗量/m ³
	砂	碎石	水泥	石灰		
1	1 320	1 372	1 398	776	583	1 246
2	1 165	1 377	1 233	685	662	1 099
3	2 207	2 378	2 337	1 298	2 122	2 082

注:玻璃为双层中空玻璃(5 mm+9 mm+5 mm)。

1.3 功能单位及分析参数

建筑物的生命周期清单模型分析参数包括能源消耗、资源消耗、温室气体排放和主要污染物排放. 温室气体由 CO₂, CH₄, N₂O 和 CFC 组成; 主要污染物包括 CO, NO_x, PM₁₀ 和 SO_x^[2]. 功能单位为 1 m² 建筑面积.

2 清单分析数据来源及处理方法

2.1 数据来源

建筑生命周期清单分析需要收集两大类数据, 一类是能源系统清单分析数据库数据, 包括能源上游阶段中能源生产、能源转换、能源运输等过程中的能耗及排放相关数据. 这类数据种类繁多, 很难针对具体的建筑去追溯调查其所用能源在上游阶段的相关数据, 一般都采用国家层面的平均数据进行替代, 本文中这类数据来自最近几年的权威文献^[3-5].

另一类是与具体研究对象密切相关的参数, 如建筑建造过程中各部品的原材料消耗量以及这些建材生产、运输过程中涉及到的能耗类型、能耗大小、运输方式、运输距离、施工过程能耗等数据. 这类数据大部分是结合实地调研与现场施工部门提供的统计数据整理得到, 部分数据如建材生产阶段、运输工具的能耗等数据难以全部通过调研获得, 则采用相关文献中行业统计数据^[6-7]替代.

2.2 调研统计结果

通过实地调研, 得到了不同体量钢结构住宅结构、围护结构的建材耗量及各自的施工量, 如表 2~4 所示.

表 4 3 种体量钢结构住宅的施工量

Tab.4 Engineering quantities of steel construction buildings with three kinds of volumes

住宅编号	预制混凝土/t	开挖土方/m ³	平整土方/m ³	起重机搬运/t	施工场地照明/m ²
1	4 809.9	4 828.2	4 097.1	6 425.0	5 524
2	5 216.1	3 797.6	3 254.9	6 106.4	5 544
3	7 093.9	4 467.8	1 963.7	11 502.1	9 870

2.3 一些数据假设及数据处理方法

从表 2 可以看出,钢结构建筑工程里所用的钢材产品主要为钢筋、钢梁、钢柱和钢板 4 大类,其中钢筋来源于当地轧钢厂,而后 3 类则是将钢板从外地某大型钢厂运输到都江堰当地,然后通过冷弯、焊接、钻孔等方式加工成钢构件,最后运输到施工现场进行装配,其生命周期流程如图 2 所示.与钢筋相比,增加了加工过程和从炼钢厂运到加工厂的运输过程,因此这两部分的能耗要单独计算.钢板生产及其上游开采、运输的能耗数据采用大型钢厂提供的数据,部分无法获得的数据用国家层面的数据代替.

钢铁相关产品的回收率较高,尤其是型钢类构件,实际工程里建筑用钢构件里的钢材可能是矿石经高炉转炉生产得到,也可能是废钢经电炉^[8]生产而成.为了能为业界提供数据支撑,在本研究中考虑平均水平,原钢和回收钢的比例按照宏观数据计算,在生命周期清单分析中参照文献[1]中的方法进行处理.施工阶段的能源消耗参考文献[9]中的计算方

法进行计算,最终再通过 BESLCI 计算出生命周期物化能耗和环境排放数据.

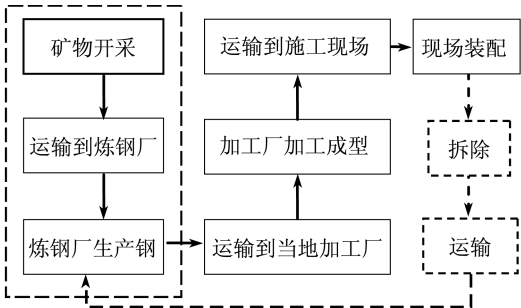


图 2 钢构件生命周期流程

Fig.2 Research flow of building steel member life cycle

3 清单分析结果

将调研数据及查阅的相关文献数据代到 BESLCI 软件里进行计算,得到建筑结构、围护结构、施工阶段的生命周期能耗及环境排放.如表 5 所示.

表 5 建筑结构、围护结构单位建筑面积生命周期能耗及排放清单
Tab.5 Life cycle inventory of frame and envelope of different buildings

类别	住宅编号	能耗总量/ (GJ·m ⁻²)	排放总量/(g·m ⁻²)							
			PM ₁₀	SO _x	NO _x	CO	NMHC	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
结构	1	3.332	985	1 301	856	1 129	13.5	4.1	3.1	385 232
	2	3.699	1 068	1 435	952	1 227	15.0	4.6	3.5	424 224
	3	3.732	883	1 383	974	1 022	15.4	4.7	3.5	402 071
围护结构	1	2.590	1 468	1 356	581	1 533	6.5	2.6	2.2	524 548
	2	2.300	1 291	1 198	517	1 349	5.8	2.3	2.0	463 109
	3	2.554	1 418	1 319	569	1 480	6.4	2.6	2.2	510 352
施工阶段	1	0.398	14	199	142	25.6	0.5	0.3	0.4	37 373
	2	0.324	12	161	114	20.8	0.4	0.2	0.3	30 280
	3	0.400	15	199	142	25.8	0.5	0.3	0.4	37 574

4 结果讨论

图 3 为 3 类住宅建筑里各类建材以及施工过程中的生命周期物化能耗,可以看出,钢构件、混凝土、水泥、钢筋是钢结构建筑部品生命周期中能耗最大的 4 个部分,仅钢构件、混凝土和水泥的生命周期能耗就占到钢结构住宅建筑部品生命周期能耗的 60% 以上.因此,优化这几类建材生产工艺,降低其生产能耗是降低建筑部品生命周期能耗的关键.

对于不同体量的住宅来说,其各部分能耗比例又有所差异.比较 3 类不同体量住宅,随着建筑层数的增加,钢构件(型钢)的能耗份额逐渐增加,由 17%

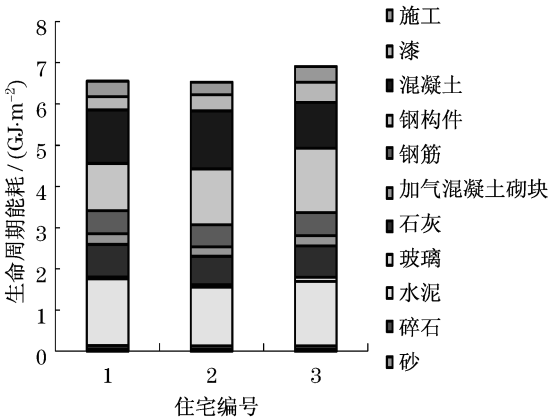


图 3 3类住宅生命周期能耗详细清单

Fig.3 Detailed life cycle energy consumption of three residential buildings

增长到 23%,而水泥与混凝土的总能耗份额则相应减少,由 6 层建筑的 45%降低为 18 层建筑的 39%.究其原因是因为钢结构住宅承重结构主要为钢梁、钢柱等型钢构件,楼层数越高,对承重结构的要求越严格,因此钢构件耗量越大.

钢结构建筑施工阶段能耗仅占整个建筑部品生命周期能耗的 5%左右,施工阶段 CO₂ 排放所占份额则更少,仅占到整个建筑部品生命周期的 3%左右.而建筑使用阶段的能耗及排放一般占整个建筑生命周期能耗的 70%左右,因此施工阶段的能耗和排放在整个建筑生命周期里所占比例将更低,约为 1%左右,远低于传统混凝土住宅的 2.5%^[9],体现了钢结构住宅施工能耗小的优势.

通过比较还可发现,3 类住宅结构部分的能耗高于围护结构的能耗,1 号,2 号,3 号分别高出 12%,23%和 18%;而结构部分 CO₂ 排放要低于相应的围护结构,分别低 14%,5%和 12%.说明在同样能耗条件下,钢铁产品的碳排放量要低于水泥,这也从侧面反映了钢结构建筑在低碳方面的优越性.

比较 3 类住宅建筑部品单位面积生命周期能耗和 CO₂ 排放,分摊到单位建筑面积,高层钢结构建筑部品单位建筑面积的生命周期能耗仅高于多层和中高层建筑的 5%,18 层的 3 号楼的单位建筑面积生命周期 CO₂ 排放与 6 层的 1 号楼相当,如果考虑减少了占地面积这一显著优点,高层钢结构建筑还是具有较广的发展空间.

5 研究结果比较

在与国内外学者的研究结果进行比较时,由于各学者研究对象所处气候区差异较大,围护结构热

工设计要求各异,因此只对结构部分生命周期能耗、生命周期 CO₂ 排放及结构部分生命周期能耗占建筑部品生命周期能耗的比例进行分析比较.

图 4 是本文研究结果与文献[10]瑞典钢结构住宅案例的比较.可以看出,瑞典钢结构案例住宅单位建筑面积结构生命周期能耗仅为 1 号住宅的 52%,而生命周期 CO₂ 排放更仅为 1 号住宅的 21%.分析原因,本文较文献[10]多考虑了能源上游阶段的能耗及排放,并且瑞典的能源结构、能源污染物排放强度、住宅设计及建造流程与国内有一定差别.

国内外关于钢结构住宅建筑生命周期评价的案例分析较少,挑选国内外几个学者所研究的钢结构办公建筑生命周期能耗分析结果进行比较,结果如表 6 所示.从单位建筑面积结构生命周期能耗结果来看,各学者研究结果差异较大,尤其文献[12]中的研究结果小于其他国家,原因在于各研究学者的生命周期研究边界不同,许多研究中并未考虑能源开采、生产、运输等上游阶段的间接能耗,另外各国能源生产、建筑材料生产、运输水平不同,也会导致整个生命周期能耗产生较大差异.

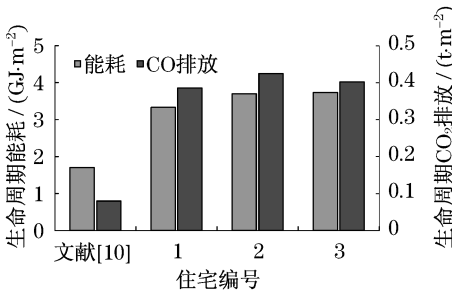


图 4 与瑞典钢结构案例住宅的比较
Fig.4 Comparison with a steel-construction residential building in Sweden

表 6 不同学者钢结构建筑生命周期能耗研究结果对比

Tab.6 Comparison of life cycle energy consumption among different researches

建筑面积/m ²	层数	国家	结构生命周期能耗/(GJ·m ⁻²)	结构占建筑部品比例/%	来源	备注
22 861	18	日本	3.75	32	文献[11]	
88 049	25		3.34	42		
216 000	31		3.60	34		
4 620	3	加拿大	1.48	48	文献[12]	有地下停车场
4 620	3		1.22	43		无地下停车场
5 524	6	中国	3.33	53	本文	
5 544	11		3.70	59		
9 574	18		3.73	56		
46 240	21	中国	1.96		文献[13]	
8 568	5	新西兰	5.00	65	文献[14]	
	3~8	新西兰	4.40	67	文献[15]	多幢建筑平均值

文献[13]的研究对象为上海某钢结构办公建筑,研究边界定义与本研究相同,但其单位建筑面积生命周期能耗仅是 1 号住宅的 59%,主要原因归纳如下:①本文是基于建筑耗材详单进行分析的,而文献[13]仅考虑了主要耗材;②钢结构住宅单位建筑面积的钢耗量要大于钢结构办公建筑,文献[13]统计数据为 $61.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,而本文 1 号、2 号、3 号住宅分别为 $96.3, 107.5, 120.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

从结构部分占建筑部品生命周期能耗的比例来看,本文研究对象由于属于地震灾后重建项目,结构部分设计相对保守,结构所消耗建材较多,因此这部分的能耗比例均高于 50%,而文献[14-15]所研究的新西兰地区气候温和,围护结构热工性能要求较低,因此围护结构部分耗材较少,相应结构部分的能耗比例较大。从表 6 中文献[11]对 3 类不同层数的钢结构建筑生命周期研究结果亦可看出,与本文研究结果类似,同一气候区建筑的结构部分能耗比例与建筑体量大小并无明显的线性规律可循,而且不同体量建筑的结构部分能耗比例波动也不大,因此可认为建筑体量对结构和围护结构部分能耗的比例影响不大,影响整个建筑部品生命周期能耗和 CO_2 排放的主要参数是由气候区所决定的围护结构类型。

6 结论

(1) 钢构件、混凝土和水泥的生命周期能耗占钢结构住宅建筑部品生命周期能耗的 60% 以上,层数增加,钢构件能耗比例上升,混凝土和水泥的能耗比例下降。

(2) 由于钢结构建筑施工过程简单,施工生命周期能耗仅为常规结构住宅的 50% 左右。

(3) 体量对钢结构住宅建筑部品的生命周期环境影响不大。

(4) 建筑是一个包含多个子系统的复杂系统,划定合理的研究边界是提高建筑生命周期评价结果可靠度与可比性的重要条件。

参考文献:

[1] 苏醒,张旭. 基于 LCA 的上海典型办公建筑窗墙比及窗户材料优化配置[J]. 建筑科学, 2008, 24(6): 66.
SU Xing, ZHANG Xu. LCA-based optimization of window-wall ratio and window materials of typical office building in Shanghai [J]. Building Science, 2008, 24(6): 66.

[2] 黄志甲. 建筑物能量系统生命周期评价模型与案例研究[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2003.
HUANG Zhijia. The model and case study of the life cycle assessment of building energy system [D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2003.

[3] 中国建筑材料联合会. 中国建筑材料工业年鉴 2009 [M]. 北京: 中国建筑材料工业年鉴社, 2010.
China Building Material Council. Yearbook of China building material industry 2009 [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2010.

[4] 中国电力年鉴编委会. 2009 中国电力年鉴 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
China Electric Power Yearbook Editorial Committee. China electric power yearbook 2009 [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.

[5] 中国能源年鉴编委会. 中国能源年鉴 2005/2006 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
China Energy Statistical Yearbook Editorial Committee. China energy statistical yearbook 2005/2006 [M]. Beijing: Science Press, 2007.

[6] 陈文娟, 聂祚仁, 王志宏. 中国平板玻璃生命周期清单与特征化[J]. 中国建材科技, 2006, 25(3): 54.
CHEN Wenjuan, NIE Zuoren, WANG Zhihong. Life cycle inventory and characterization of flat glass in China [J]. China Building Materials Science & Technology, 2006, 25(3): 54.

[7] 王超, 丁光辉. 粉煤灰混凝土生命周期评价初步研究[J]. 工业安全与环保, 2007, 33(1): 39.
WANG Chao, DING Guanghui. Preliminary study on life cycle assessment of concrete containing fly ash [J]. Industrial Safety And Environmental Protection, 2007, 33(1): 39.

[8] 刘江龙. 环境材料导论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
LIU Jianglong. Introduction to environmental material [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1999.

[9] 仲平. 建筑生命周期能源消耗及其环境影响研究 [D]. 成都: 四川大学环境科学与工程学院, 2005.
ZHONG Ping. Study of building life-cycle energy use and relevant environmental impacts [D]. Chengdu: Sichuan University. College of Environmental Science and Engineering, 2005.

[10] Asa Jonsson, Thomas Bjorklund, Anne - Marie Tillman. LCA of concrete and steel building frames [J]. International Journal of LCA, 1998 (4): 216.

[11] Oka T, Suzuki M, Konnya T. The estimation of energy consumption and amounts of pollutants due to the construction of buildings [J]. Energy and Buildings, 1993(19): 303.

[12] Cole R J, Kernan P C. Life-cycle energy use in office buildings [J]. Building and Environment, 1996(34): 307.

[13] SU Xing, ZHANG Xu, GAO Jun. Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings [J]. Energy and Buildings, 2008(40): 1188.

[14] Honey B G, Buchanan A H. Environmental impacts of the new zealand building [R]. Canterbury: University of Canterbury, 1992.

[15] Buchanan A H, Honey B G. Energy and carbon dioxide implications of building construction [J]. Energy and Buildings, 1994(20): 205.