

OPTIMIZATION OF GREEN BUILDING MATERIAL SELECTION BASED ON LCA:

A RESIDENTIAL CASE STUDY IN COLD AREA

基于生命周期评价的绿色建筑选材 优化研究

——以寒冷地区住宅建筑为例

彭渤 林波荣 / PENG Bo, LIN Borong

摘要：在绿色建筑大力发展的情况下，目前建材产品的选材优化缺乏量化的研究。本文以某寒冷地区住宅建筑为例，研究了设计阶段基于生命周期评价的绿色建筑选材优化方法。基于该住宅的原始设计方案，从窗户选型以及窗墙比两个方面设计了两个优化方案。利用 BELES 计算了各个方案的建材含能，利用能耗模拟软件 DeST 计算了各个方案的运行阶段采暖能耗。根据计算结果，通过方案优化使得建筑的单位面积建材含能略有降低，运行阶段采暖能耗降低了约 21.4%，生命周期能耗降低了约 10.8%，验证了设计阶段利用生命周期的评价方法对选材优化的可行性。

Abstract: As the green building industry has a vigorously development in China recently, there is relatively lack of the quantitative research on optimization of building material selection. The optimization method for building material selection based on life cycle assessment was studied and a residential case study in cold area was performed in the paper presented. Based on the original design scheme, the optimization was performed from two factors which are outside window selection and window to wall ratio. The building material embodied energy was calculated by BELES and the heating energy in operation stage of each case was calculated by energy simulation with DeST. According to the results, compared to the original scheme, the building material embodied energy of the optimized scheme has a little reduction and the heating energy consumption decreased by about 21.4%. The total life cycle energy consumption of the optimized scheme decreased by about 10.8% and the feasibility of the optimization method for building material selection based on life cycle assessment was verified.

关键词：生命周期评价 选材优化 能耗模拟 建材含能

Key Words: Life Cycle Assessment, Material Selection Optimization, Energy Simulation, Building Material Embodied Energy

1 引言

绿色建筑是建筑行业实现节能减排的一项重要工作，在一系列相关政策法规的推动下，近几年，我国的绿色建筑数量始终保持着强劲的增长态势，截止到 2013 年底，全国共评出了 1 446 项绿色建筑评价标识项目，总建筑面积达到 16 270.7 万 m²，其中，设计标识项目 1 342 项，占总数的 92.8%，建筑面积为 14 995.1 万 m²；运行标识项目 104 项，占总数的 7.2%，建筑面积 1 275.6 万 m²（中国绿色建筑，2014）。

而对于绿色建筑的综合评价，需要从建筑的全生命周期角度来考虑。建材的使用直接关系到绿色建筑的环境性能。首先，建材的生产过程会带来资源、能源的消耗及环境污染，其中还包括生产所需能源的生产过程污染；其次，建筑材料的周转过程带来的运输能耗也是能源消耗中重要的一部分，特别是在我国资源分布不均匀的国情下，运输耗能较大，经估算占建筑材料本身制造能耗的 5% ~ 10%；而在运行阶段，建筑的能源消耗也与相关建材（如保温、门窗等）的热工性能直接相关。同时，在建筑的维护更新过程中消耗的建材，也是影响建筑生命周期的环境负荷的一个组成部分；在建筑的拆除废弃阶段，建材的回收和再利用也会极大地影响建筑生命周期的环境负荷。因此，在设计阶段，建材选择优化是影响绿色建筑综合环境性能的一个重要方面。

2 研究现状综述

作为建筑上游产业的建材行业，在建材生产和使用中的环境负荷对实现建筑物的可持续发展起到举足轻重的作用。长期以来，我国绿色建筑和绿色建材之间没有形成有机的联系，导致绿色建筑选材难和绿色建材应用难，一定程度上阻碍了建材及建筑行业的发展。

目前国内针对绿色建筑选材的定量研究相对较少，周滨北（1994）对严寒地区高层建筑围护结构的选材的相关原则进行了探讨，并从围护结构热工性能、经济性指标等方面对 490mm 空心砖墙体、岩棉、加气混凝土、PG 板等 4 种不同类型的复合墙体的应用效果进行了评价；肖丽萍（2009）对门窗选材对门窗节能效果的影响进行了分析；刘冀等（2012）对绿色建筑及其选材技术对建筑遮阳的要求进行了研究。提出在选用绿色建筑遮阳产品时，应按照其使用性能、环境安全性、功能性和环境负荷等综合因素进行考虑。魏爱武（2011）对绿色建筑生产过程中的选材进行了讨论；杨勇等（2006）对某生态建筑办公示范楼的选材评估进行了介绍，通过严格的程序化选材控制，能够营造良好的室内环境质量的综合效应。可以看到，目前国内针对建筑选材方面的研究，从能耗角度进行定量分析的相对较少，尤其是缺乏从生命周期角度分析选材对建筑生命周期能耗的影响。

3 研究方法

3.1 研究思路

本研究以建筑生命周期能耗为指标对典型案例的设计优化进行评价。目前，不同的建筑生命周期能耗研究所包含的能耗计算范围不尽相同。能够精确计算建筑生命周期的所有阶段的能耗是一项非常艰巨的任务，其中涉及的过程非常多，不同阶段的数据可获得性也不相同。因此在研究中会对建筑的生命周期范畴做简化，通常应用的是“从摇篮到坟墓”的研究范围，即从建材生产阶段开始，包含建造施工，运行维护到建筑废弃拆除这段范围作为研究对象。其中，对于建材生产阶段的能耗通常包括了从原材料的开采、加工，建材产品生产以及运输到场地的所有相关过程的能耗总和，即建材含能(Embodied Energy)，是一种基于生命周期的能耗统计数据(T. Ramesh et al, 2010; 顾道金, 2006)。

在建筑方案阶段，建筑材料的选择是影响建筑生命周期能耗的一个重要因素。首先，建材的选择(建材的种类、用量、产地等)会直接影响建筑的建材含能；其次，典型建材的选择，还会影响建筑在运行阶段的使用情况，从而影响建筑运行阶段的能耗。例如不同门窗、保温材料的选择，首先会影响围护结构材料本身的能耗，同时其热工性能的差异会影响建筑运行阶段的能耗，从而影响建筑生命周期的能耗情况。因此，在设计阶段，如何通过合理地选择建筑材料及相关的建筑方案设计优化(如窗墙比、保温构造、体形系数等)，使得建筑

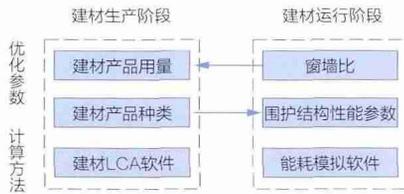


图 1 基于选材的典型案例生命周期优化研究思路



图 2 住宅楼案例各向立面设计

表 1 各方案优化参数对比

	窗墙比		窗户选型
	南	北	
原始方案	南 0.3	北 0.3	断桥铝合金窗, k 值 2.2W/m ² · k
优化方案 1	南 0.3	北 0.3	塑钢窗, k 值 1.8W/m ² · k
优化方案 2	南 0.5	北 0.2	塑钢窗, k 值 1.8W/m ² · k

表 2 不同方案的窗墙比及窗户面积计算

		南	北	东	西	总面积 (m ²)	单位建筑面积用量
		原始方案	优化方案 2	原始方案	优化方案 2		
窗墙比	原始方案	0.3	0.3	0.22	0.22		
	优化方案 2	0.5	0.2	0.22	0.22		
窗户面积 (m ²)	原始方案	477	594	169	169	1410	0.2169
	优化方案 2	795	396	169	169	1530	0.2353

在全生命周期中降低能耗显得尤为重要。目前这方面的研究相对较少，本研究选择了位于寒冷地区的大连某住宅项目，主要以外窗的选型以及窗墙比的优化为例进行基于建筑生命周期评价的选材优化研究，研究思路如图 1 所示。

基于以上分析，本案例研究中，涉及的优化参数包括窗墙比以及窗户的选型。首先窗墙比一方面影响不同材料的用量，从而影响建材含能的大小；另一方面，窗墙比会影响建筑运行阶段的负荷，从而影响运行能耗的大小。而不同窗户类型，由于本身含能存在差异，也会因为热工性能而影响运行能耗。

3.2 计算方法

建筑生命周期能耗的主要组成包括两个部分，建材含能和运行能耗，由于其他阶段的能耗所占的比例相对较小，且数据较难获得，因此本研究中主要考虑这两个阶段的能耗。

对于建材含能，按照如下公式进行计算。

$$E_m = \sum_{i=1}^n EM_i \cdot m_i / A + E_t \quad (式 1)$$

其中， EM_i ：第 i 中建材的单位生产能耗 (MJ/单位)

E_t ：建材运输阶段的能耗 (MJ/m²)

m_i ：第 i 种建材的用量

A ：建筑面积 (m²)

建材运输阶段的能耗 E_t 指建材从生产厂家运送到施工现场过程中的能耗。该阶段的能耗主要来自运输工具的能源消耗，由运输距离、交通工具的燃料消耗种类和运送的建材重量来确定。

$$E_t = \sum_{i=1}^n ET_i \cdot m_i \cdot l_i / A \quad (式 2)$$

其中， ET_i ：第 i 中建材的单位重量运输能耗 (MJ/t · km)

m_i ：第 i 种建材的用量

l_i ：第 i 种建材的运输距离 (km)

A ：建筑面积 (m²)

基于以上建材含能计算模型，本研究采用清华大学建筑技术科学系开发的建筑环境负荷评价体系 (Building Environment Load Evaluation System, BELES) 计算平台的能耗计算模块以及建材基础数据库来进行计算。建材生产过程的能源消耗统计包括原煤、原油和天然气 3 种一次能源，按照其热值统一转化为能量 (kWh/m²)。

对于运行阶段的能耗，将利用清华大学建筑技术科学系开发的建筑环境及暖通 (Heating, Ventilation and Air Conditioning HVAC) 系统模拟的软件 DeSt (Designer's Simulation Toolkit)，建立不同方案的模型，进行模拟并计算运行阶段的能耗。通过以上两个阶段的能耗计算，来分析和比较不同方案选材的相关优化对建筑生命周期能耗的影响。

3.3 案例设定

本次研究选择位于寒冷地区的大连某住宅项目进行选材优化设计研究。该方案的楼层总数为 18 层，总建筑面积为 6 502m²。方案的各向立面如图 2 所示。

原始方案设计相关参数如下：

(1) 窗墙比：南 0.3，北 0.3；

(2) 窗户选型：断桥铝合金窗，传热系数 k 值 2.2W/m² · k。

基于原始方案的设计，首先对方案的窗户选型进行优化，即将原本的断桥铝合金窗改为塑钢窗，得到优化方案 1。在优化方案 1 的基础上，再对方案的窗墙比进行优化，考虑到南北两个方向的性能差异，将窗墙比改为南向 0.5，北向 0.2。3 个方案的参数对比见表 1，基于以上参数设定，对各个方案的单位面积建材含能以及运行能耗进行计算，对原始方案与优化方案的生命周期能耗进行对比和分析。

4 建材含能计算

根据公式 1、2，计算单位面积建材含能，需要统计单位面积各类建材用量，以及单位建材的能耗因子以及建材的运输方式和运输距离等参数。首先，由于优化方案 2 改动了窗墙比的设计，因此根

据不同方案的窗墙比设定,计算了不同方案的窗户面积,统计单位建筑面积窗户用量,结果见表2。优化方案2单位建筑面积窗户用量增加了约8.5%。

同时,根据实际项目的工程概算书,统计得到各类基础建材的用量清单,建材种类包括钢材、混凝土、石材、面砖、涂料、保温材料等。由于优化方案2对建筑的窗墙比进行了优化,会影响外立面相关材料的用量,因此根据外墙面积变化对优化方案2的相关材料用量进行修订,具体各方案单位建筑面积建材用量统计见表3。

对于建材的运输距离,由于缺乏具体材料的供应商信息,按照郊区到市区的平均运输距离取为50km来进行估算,运输方式为公路

运输。利用 BELES 软件的建材含能计算模块,计算得到各个方案的单位面积建材含能,结果见图3。

根据计算结果,原始方案单位面积建材含能为1328.1 kWh/m²,优化方案1的单位面积建材含能为1293.7 kWh/m²,优化方案2的单位面积建材含能为1301.8 kWh/m²。从原始方案与优化方案的对比可以看到,在建材阶段的能耗,优化方案1在窗户部分的相对节能量约为27%,优化方案2由于窗户总面积增加,窗户部分的相对节能量约为21%。但由于建材阶段能耗的主要组成部分为钢材和混凝土,约占了76%,使得门窗优化对建材部分总能耗影响相对较小。

5 运行能耗及生命周期能耗计算

本研究中,根据建筑的平面图以及设定的窗墙比,在 DeSt 中建立模型,图4和图5分别是原始方案以及优化方案的标准层模型。

相关模拟参数设定如下:

(1) 气象参数:寒冷地区,大连

(2) 采暖季:11月15日~3月15日

(3) 围护结构渗风:0.5次/h

(4) 传热系数设定:外墙K值0.6 W/m²·K,屋顶K值0.15 W/m²·K,窗户K值根据表1设定。

(5) 主要房间参数设定见表4~6。

对于寒冷地区的住宅建筑,运行能耗中采暖能耗与建筑围护结构热工性能相关性较高,而除采暖外能耗(包括夏季空调、照明、电器、炊事、生活热水等)与用户的使用模式相关性较高,不同用户的差异相对较大。本研究中,对于方案的优化通过对采暖能耗部分进行模拟计算考虑来自围护结构热工性能的影响,同时为了研究各方案建材含能以及采暖能耗变化对建筑生命周期能耗的影响程度,也需要考虑除采暖外的能耗,对这部分能耗根据相关统计数据估算。根据以上设定的模拟参数,模拟计算该住宅的全年累计采暖负

表3 各方案单位建筑面积建材用量统计结果

	单位	原始方案	优化方案1 (窗户选型)	优化方案2 (窗墙比)
钢材	kg	71.439 0	71.439 0	71.439 0
混凝土	m ³	0.649 8	0.649 8	0.647 7
立面石材	m ²	0.111 1	0.111 1	0.107 5
立面涂料	m ²	0.402 6	0.402 6	0.389 5
立面面砖	m ²	0.411 3	0.411 3	0.397 9
保温材料(苯板)	m ³	0.045 5	0.045 5	0.044 5
窗户	m ²	0.216 9 (断桥铝合金窗)	0.216 9 (塑钢窗)	0.235 3 (塑钢窗)

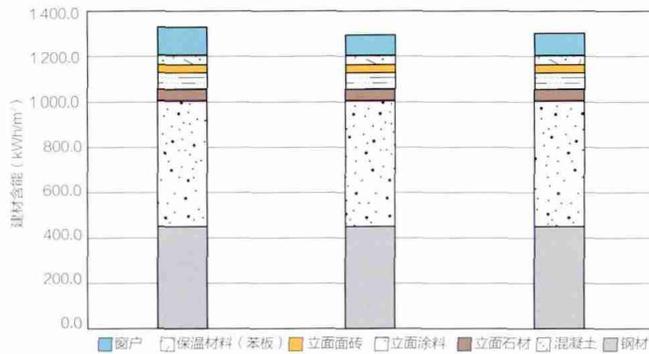


图3 各方案建材阶段能耗计算结果

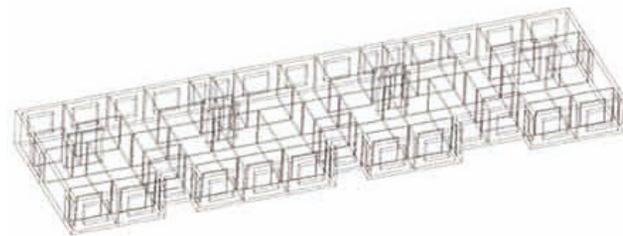


图4 原始方案模型

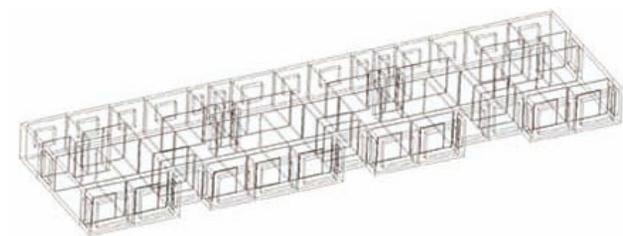


图5 优化方案模型

表4 主要房间室内参数设定

房间类型	人员(人)	设备(W/m ²)	温度设定(°C)
主卧室	2	12.7	18
次卧室	1	12.7	18
起居室	3	9.3	18
厨房	1	48.2	18
卫生间	0	0.0	18
阳台	0	0.0	18
楼梯间	0	0.0	18

表5 室内人员逐时在室率(%)

时间段	0~6	7	8	9~16	17	18	19~21	22	23
主卧室	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	100.0
次卧室	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0
起居室	0.0	33.3	33.3	0.0	33.3	33.3	100.0	33.3	0.0
厨房	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0

表6 电气设备逐时使用率(%)

时间段	0~9	10~11	12~13	14~16	17~18	19	20~22	23
主卧室	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.0	100.0	100.0
次卧室	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.0	100.0	100.0
起居室	22.6	22.6	68.8	22.6	22.6	100.0	100.0	22.6
厨房	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0

表 7 各方案的运行能耗计算结果

项目统计	单位	原始方案	优化方案 1 (窗户选型)	优化方案 2 (窗墙比)
全年累计热负荷指标	kWh/m ²	32.58	27.54	25.61
采暖能耗 (COP 0.9 计算)	kWh/m ²	36.2	30.6	28.5
50 年采暖能耗(一次能源)	kWh/m ²	2 715	2 295	2 134
50 年用电量(一次能源)	kWh/m ²	2 175	2 175	2 175

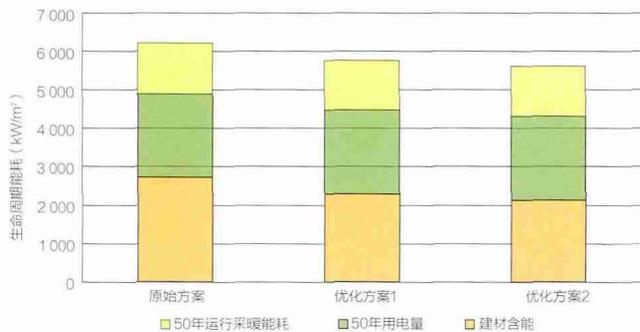


图 6 各方案生命周期能耗比较

荷,按照 0.9 的采暖系统综合能效比 (Coefficient of Performance, COP) 计算得到各个方案的年采暖能耗结果。同时,根据《建筑节能年度发展研究报告》中对北方地区住宅建筑除采暖外能耗的统计数据,按照 15 kWh/m² 来估算全年的除采暖外用能耗(清华大学建筑节能研究中心,2009),按照 50 年的寿命计算各个方案的运行阶段能耗情况,按照用电和供热的能源形势,利用 BELES 统一换算成一次能源消耗,单位 kWh/m²,结果见表 7。

根据对 3 个方案的建材含能和运行能耗计算,得到各个方案的单位面积生命周期一次能源消耗结果(图 6)。

6 总结与结论

根据对各个案例的生命周期能耗计算结果,可以看出通过对设计方案的窗户选型以及窗墙比的优化,达到了降低了建筑生命周期能耗的效果。原始方案生命周期能耗为 6 218 kWh/m²,优化方案 1 的生命周期能耗为 5 764 kWh/m²,相比原始方案降低了约 7.3%;优化方案 2 的生命周期能耗为 5 611 kWh/m²,相比原始方案降低了约 10.8%。

从分项能耗的比较上可以看出,优化方案 1 由于优化了窗户选型,一方面建材含能降低了约 2.5%,同时由于热工性能的改善,运行阶段采暖能耗降低了约 15.5%;优化方案 2 在优化方案 1 窗户选型优化的基础上,进一步对南北朝向的窗墙比进行优化,虽然建材含能相比优化方案 1 略有增加,但是也低于原始方案,而运行阶段采暖能耗进一步得到了降低,相比原始方案降低了约 21.4%,从而使生命周期能耗得降低。

通过以上典型案例的研究得知,在设计阶段,利用生命周期评价的方法,有目的的对典型建材产品的选型和相关设计参数进行优化,是一种控制建筑生命周期环境影响,提高环境性能的有效方法。

基金项目

本研究受到“十二五”国家科技支撑计划课题“典型地区建筑工程用建筑材料全生命周期评价技术研究与应用”(编号:2011BAJ04B06-3)的支持。

参考文献

- [1] 中国城市科学研究会. 中国绿色建筑(2014)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 周滨北. 严寒地区高层建筑围护结构的选材[J]. 新型建筑材料, 1994(11).
- [3] 肖丽萍. 对建筑节能与门窗选材问题的比较[J]. 科技信息, 2009(14).
- [4] 刘翼, 戚建强, 蒋莹. 绿色建筑及其选材技术对建筑遮阳的要求[J]. 建设科技, 2012(15).
- [5] 魏爱武. 绿色建筑生产过程中的选材[J]. 内蒙古科技与经济, 2011(16).
- [6] 杨勇, 沈彩萍, 汤砚卿. 生态建筑办公示范楼选材评估[J]. 新型建筑材料, 2006(10).
- [7] T. Ramesh, Ravi Prakash, K.K.Shukla. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. Energy and Buildings, 2010(9).
- [8] 顾道金. 建筑环境负荷的生命周期评价[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [9] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

作者简介

彭勃, 硕士, 清华大学建筑学院科研助理
林波荣, 博士后, 清华大学建筑学院建筑技术研究所副所长, 教授

注释

按照一次能源法将各终端能耗转换成一次能源消耗量进行统计。

收稿日期

2014-9-19