



基于焓分析和生命周期评价的既有建筑围护结构节能改造

周燕^{1,2}, 龚光彩¹

1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082
2. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江宁波 315211

摘要 为了定量系统地评价既有建筑改造的节能效果, 提出了焓分析结合生命周期评价的方法。根据热力学第二定律, 将能耗转换为焓, 分析建筑生命周期中对能源、资源和环境影响较大的阶段, 即建材的生产阶段和运行阶段。运用该方法对宁波建筑节能改造实例进行分析, 结果表明, 在建筑节能改造后的生命周期内, 保温材料在生产阶段的能耗需要 15 年才能与运行阶段节约的能耗相等, CO₂ 排放量需要 16a 才能与减排的 CO₂ 量相等, 但对于保温材料, 其在生产阶段消耗的焓, 远大于其在运行阶段节约的焓。因此, 对于既有建筑节能改造, 新增保温材料在生产阶段的能耗和 CO₂ 排放量不能忽略。对于建造年代久远的建筑, 在进行围护结构节能改造时, 应当将改造后的节焓效果、节能效果和环境影响作为一个整体进行综合分析。

关键词 焓分析; 生命周期评价; 既有建筑; 节能改造

中图分类号 TK123

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)23-0099-05

Exergy Analysis of the Building Envelope Energy Efficiency Retrofit Based on the Life Cycle Assessment

ZHOU Yan^{1,2}, GONG Guangcai¹

1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China
2. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang Province, China

Abstract This paper presents an exergy analysis combined with the life cycle assessment method to systematically and quantitatively evaluate the building envelope energy efficiency retrofit. Based on the second law of thermodynamics, the building energy consumption can be transformed into exergy. The method only analyzes the production stage and the operation stage, which represent a higher impact in terms of energy consumption and environmental impact in the building life cycle. A typical case of the existing building envelope energy efficiency retrofit in Ningbo city is analyzed. The results show that it takes 15 years for the cumulative saved energy consumption in the operation stage to reach the embodied energy of the newly added insulation materials in the production stage. For CO₂ emissions, it takes 16 years. The cumulative saved exergy consumption would be difficult to reach the embodied exergy consumption in the life span after retrofit. So the embodied energy and CO₂ emissions of the newly added insulation materials in the production stage should not be neglected. For the existing old building, it should be prudent to take any retrofit measures; and the energy and exergy efficiency and environment impact of the retrofit measures should be considered as a whole in analysis.

Keywords exergy analysis; life cycle assessment; existing building; energy efficiency retrofit

0 引言

在中国的建筑总存量中, 不符合节能标准要求的既有建

筑占了绝大多数, 在全社会实际发生的建筑总能耗中, 既有建筑不可避免地成为能耗的绝对主力。因此, 要真正减少全

收稿日期: 2010-06-25; 修回日期: 2010-11-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA05Z229); 湖南省重点科技攻关计划项目(2008GK2016); 湖南省重点国际合作计划项目(S2009W2052)

作者简介: 周燕, 博士研究生, 研究方向为建筑节能与可再生能源利用, 电子信箱: zhouyan@nbu.edu.cn; 龚光彩(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E121900452), 教授, 研究方向为建筑环境模拟与建筑节能, 电子信箱: gong2000@yahoo.com.cn

社会的建筑能耗总量,实现国家“十一五”关于单位 GDP 能耗降低 20% 的目标,实现社会的可持续发展,加强既有建筑节能改造是必然选择。目前关于既有建筑节能改造效果研究的文献较多,方国昌等^[1]以某小区既有建筑节能改造为例,对比分析改造前后的节能效果,经济和环境效益。赵忠超等^[2]对采用不同的可再生能源节能改造技术方案进行对比,给出了不同节能改造技术方案的经济回收期。前人对既有建筑节能改造效果评价研究大多是对比分析改造前后的能耗,即只考虑运行阶段的能耗,未从全生命周期角度分析;而且均采用能量分析方法进行研究。本文结合建筑全生命周期评价方法,运用熵分析评价既有建筑围护结构的节能改造。

1 建筑生命周期评价

全生命周期评价(LCA)是对产品的生产、服务“从摇篮到坟墓”的整个生命过程所造成的所有环境影响的全面分析、评估。建筑的全生命周期包括原材料的开采、建材的生产、运输、建筑物的建造、运行、维护和拆除,能源、资源消耗以及伴随的污染物排放贯穿建筑的全生命周期。为了建立一个可操作性强、能对既有建筑节能改造进行指导的计算框架,本文对建筑全生命周期评价方法进行简化,忽略影响较小的阶段,只考虑对能源、资源消耗和环境影响较大的阶段,即建材生产阶段的质量含能(embodied energy)和运行阶段的空调采暖能耗^[1]。质量含能是指单位质量的产品从自然界原始材料的掘取经过运输、加工、组装直至成品出厂前的所有相关过程的能耗总和。

建筑生命周期内对环境的直接影响分为 3 类:能源消耗、资源消耗和污染物排放。污染物排放主要来自于能源的使用,包括 CO₂、SO₂、NO_x、烟尘和固体废弃物。本文以 CO₂ 的排放量进行环境影响评价,其他污染气体以全球变暖潜值(GWP)为基准折算为 CO₂ 当量^[1]。

要得到建筑材料的质量含能和 CO₂ 排放量数据,需要大量的调研工作,目前国内这方面的数据较少。本文研究用的数据主要来源于文献[3],部分数据由文献[4]、[5]推导所得,如表 1 所示。

表 1 主要保温材料单位质量含能和 CO₂ 排放量
Table 1 Per quality unit embodied energy and embodied CO₂ of the main materials

材料	单位质量含能 /(kW·h)	单位质量 CO ₂ 排放量 /kg
保温砂浆	3.44	1.67
挤塑聚苯板(XPS)	32.52	17.28
玻璃	97.21	21.81
铝合金窗框	150.45	75.52

2 建筑能源系统熵分析

能量分析法只考虑了能量在数量上的平衡,忽略了能量

有不同品质的问题,而熵分析法则从能量的量和质统一的角度分析能量的转换和利用。根据热力学第二定律^[6],能量的传递分为功和热,功不断变为热,能量也在不断贬值,因此可以用做功能力作为能量品质的量度。文献[7]中提出了能质系数 λ,表示不同能量在现有技术水平下对外所能够做的功与其总能量的比值:

$$\lambda = \frac{W}{Q} \quad (1)$$

其中, Q 为该种形式能源的总能量, GJ; W 为总能量中可以转化为功的部分, GJ。电是最高品位能源,可以完全转换为功,其能质系数为 1,其余能源形式的能质系数则根据其对外做功的能力分别确定^[8]。

2.1 天然气和煤的能质系数

常规的能源动力系统中,矿物燃料通常采用直接燃烧的方式将燃料的化学能直接转换成热能,并通过热力循环实现热功转化,其能质系数为

$$\lambda = 1 - \frac{T_0}{T_{\text{burn}} - T_0} \ln \frac{T_{\text{burn}}}{T_0} \quad (2)$$

其中, T_{burn} 为矿物燃料的理论燃烧温度; T₀ 为作为基准的环境温度。燃气轮机中天然气燃烧温度为 1300℃(1573.5K),则天然气的能质系数为

$$\lambda_{\text{gas}} = 1 - \frac{T_0}{1573.15 - T_0} \ln \frac{1573.15}{T_0} \quad (3)$$

与天然气类似,煤作为矿物燃料在目前煤电系统所采用的蒸汽动力装置的最高蒸汽温度为 550℃(823.15K),此温度是煤能质系数的实际计算温度,则煤的能质系数为

$$\lambda_{\text{ca}} = 1 - \frac{T_0}{823.15 - T_0} \ln \frac{823.15}{T_0} \quad (4)$$

2.2 耗热量和耗冷量的能质系数

冬季供暖是从温度为 T 的室内环境向温度为 T₀ 的室外环境排出冷量,室内和室外环境同样视为两个热容量为无限大的冷热源,空调耗热量的能质系数为

$$\lambda_{\text{he}} = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (5)$$

夏季制冷是从露点温度为 T_C 的室内环境(考虑室内的除湿要求,所以送风温度必须低于露点温度)向温度为 T₀ 的室外环境排出热量。室内和室外环境视为两个热容量为无限大的冷热源,空调耗冷量的能质系数为

$$\lambda_{\text{cl}} = \frac{T_0}{T_C} - 1 \quad (6)$$

由能质系数的计算公式可以看出,同一种能源在不同的环境温度下的能质系数不同。按《浙江省公共建筑节能设计标准》,一般房间空气调节系统冬季室内计算参数为 18℃(291.15K),夏季室内计算参数为 26℃,相对湿度为 40%~65%(取平均值相对湿度为 50%),对应的空气露点温度为 14.8℃(287.95K)。以宁波地区最冷月室外平均温度为 4.1℃(277.25K),最热月室外平均温度为 28.1℃(301.25K),全年室外平均温度为 16.5℃(289.65K)作为基准环境温度,则各种能

源的能质系数如表 2 所示。

表 2 能质系数表(宁波市气象参数)
Table 2 Quality coefficient of different energy sources in Ningbo area

名称	室外温度 T_o/K	室内(露点)温度 T_d/K	能质系数
耗冷量	277.25	291.15	0.048
耗热量	301.25	287.95	0.046
天然气	289.65	—	0.618
煤	289.65	—	0.433

3 研究方法

对于既有建筑节能改造,本文只讨论既有建筑围护结构节能改造新增保温材料在生产阶段的能耗和改造后在有限寿命周期内运行阶段节约的能耗,并将相应的能耗转换为能耗,对比分析改造前后的节能效果和 CO₂ 排放量。研究方法流程图见图 1。

3.1 材料生产阶段

材料的质量含能是将生产该材料所消耗的各种能源的热值进行折算,统一成标准煤或电力。但这种方法只能从“量”上对能源消耗进行分析,无法从能源的“量”和“质”上综合分析能源消耗。为了将某种材料的质量含能转换为质量含

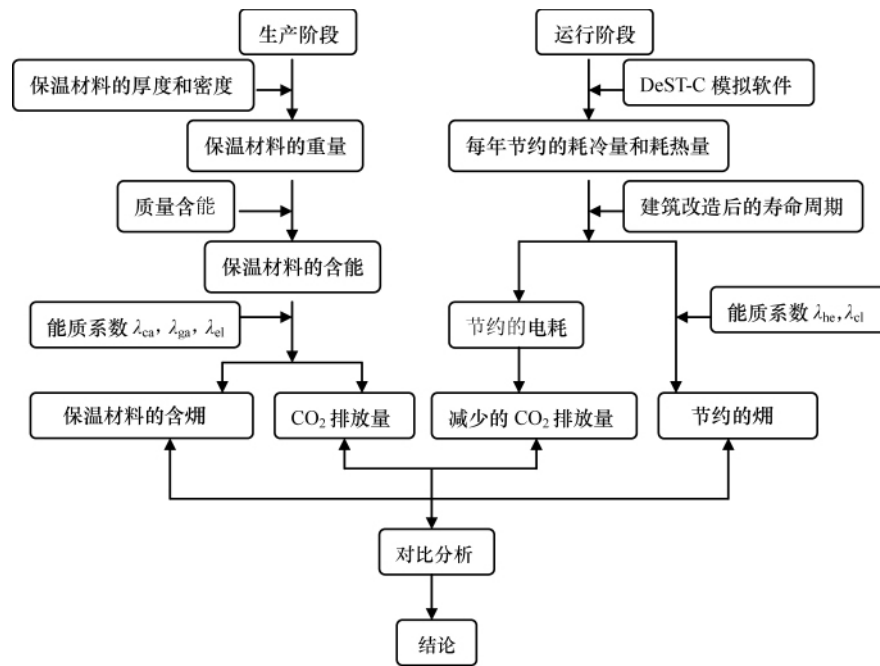


图 1 研究方法流程图

Fig. 1 Research method flowchart

焓, 需要知道生产该材料所需的能源种类及其所占的百分比。例如,生产玻璃需要消耗天然气和电能,所占比例分别为 95.5%和 4.5%^[2]。假设某种材料的单位质量含能为 E_m ,生产该材料所消耗的能源种类为煤、天然气和电能等,其能质系数分别为 $\lambda_{ca}, \lambda_{ga}, \lambda_{el}$ 等,所占比例分别为 x_{ca}, x_{ga}, x_{el} 等,则该材料的单位质量含焓 E_x 为

$$E_x = E_m \cdot (x_{ca} \cdot \lambda_{ca} + x_{ga} \cdot \lambda_{ga} + x_{el} \cdot \lambda_{el} + \dots) \quad (7)$$

根据式(7)计算出既有建筑节能改造新增保温材料的质量含焓,并计算出改造所需各种保温材料的质量,得到所有新增保温材料的质量含焓。

新增材料在生产阶段的 CO₂ 排放量是根据改造所需保温材料的重量乘以材料单位质量 CO₂ 排放量(表 1)所得。

3.2 运行阶段

建筑运行阶段的能耗是其生命周期能耗中的主要部分,本文采用动态能耗模拟软件 DeST-C 计算改造前后的全年耗

冷量和耗热量,并相应计算改造后每年节约的耗冷量 ΔQ_{cl} 和耗热量 ΔQ_{he} ,耗冷量和耗热量的能质系数分别为 λ_{cl} 和 λ_{he} ,则改造后每年节约的焓为

$$\Delta E_x = \Delta Q_{he} \cdot \lambda_{he} + \Delta Q_{cl} \cdot \lambda_{cl} \quad (8)$$

将改造后每年节约的耗冷量和耗热量转换为年节电量,根据生产每度电产生 556g 当量 CO₂ 排放量^[1],计算出每年的 CO₂ 减放量。

在改造后建筑的寿命周期内,节约的焓及 CO₂ 减排量为每年节约的焓和 CO₂ 减排量乘以改造后建筑的寿命周期。

4 案例分析

案例模型为波宁市建委培训中心,该建筑是集办公与住宿于一体的综合性大楼,建于 20 世纪 90 年代初期,围护结构保温性能较差,建筑面积约 2800m²,主楼 5 层,裙楼 2 层,模型建筑平面图如图 2 所示,改造前后照片如图 3 所示,改



图2 模型建筑平面图

Fig. 2 Floor plan of the example building



图3 模型建筑节能改造前(a)、后(b)照片

Fig. 3 Photos of the example building before (a) and after (b) retrofit

造前后围护结构性能参数如表3所示。

表3 模型建筑改造前后围护结构性能参数

Table 3 Example building envelope parameters before and after retrofit

围护结构	改造前		改造后	
	材料	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	材料	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
外墙	实心黏土砖	2.04	30mm厚保温砂浆	1.35
外窗	铝合金单玻	6.41	断热铝合金中空玻璃	2.62
屋顶	钢筋混凝土	1.56	40mm厚挤塑苯(XPS)	0.54

该系统采用分体式空调机组,运行时间为周一至周五08:00—18:00。假定模型建筑改造后的寿命周期为30a,生产阶段和运行阶段能耗计算结果如表4,表5所示。

表4 新增保温材料的质量含能(焓)耗/CO₂排放量(生产阶段)

Table 4 Embodied energy (exergy) consumption/CO₂ emissions of the newly added insulation materials in the production stage

	质量/kg	质量含能/(kW·h)	质量含焓/(kW·h)	CO ₂ 排放量/kg
保温砂浆	16936	58194	26910	28283
XPS板	946	30770	30770	16347
玻璃	9390	912708	579853	204702
铝合金窗框	1493	224637	109482	112722
汇总		1226309	747016	362054

表5 改造后节约能(焓)耗/CO₂减排量(运行阶段)

Table 5 Saved energy (exergy) consumption and reduction CO₂ emissions in the operation stage

	改造前能耗/(kW·h)	改造后能耗/(kW·h)	节约能耗/(kW·h)	节约焓耗/(kW·h)	CO ₂ 减排量/kg
空调	1602534	1587876	14658	677	3543
采暖	679969	614084	65884	3145	19280
年节约量			80543	3822	22823
30年节约量			2416275	114674	684699

保温材料在生产阶段消耗的焓/能耗与运行阶段节约的焓/能耗对比如图4所示。改造后运行阶段节约的能耗是保温材料在生产阶段能耗的1.75倍,而运行阶段节约的焓是保温材料在生产阶段消耗焓的1/7。

保温材料在生产阶段的CO₂排放量与运行阶段的CO₂减排量对比如图5所示。保温材料在生产阶段的CO₂总排放量约为362t,约为运行阶段减排量的一半。可见,在进行环境影响评价时,保温材料在生产阶段的CO₂排放量不能忽略。

如图6所示,在模型建筑节能改造后的寿命周期内,保温材料在生产阶段的能耗需要15a才能与运行阶段节约的能耗相等,CO₂排放量需要16a才能与减排的CO₂量相等,但对

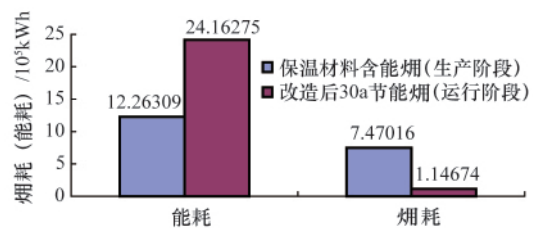


图4 保温材料在生产阶段的质量含焓/含能与运行阶段节约的焓/能耗对比

Fig. 4 Comparison between the embodied exergy/energy of the insulation materials in the production stage and the saved exergy/energy in the operation stage

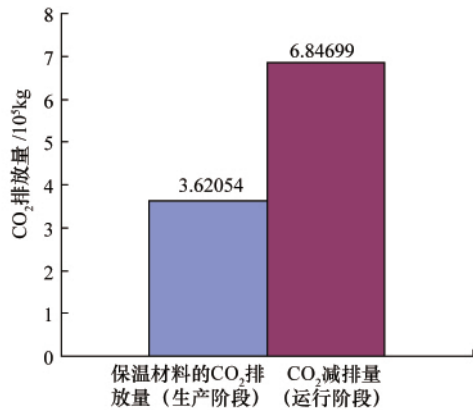


图5 保温材料在生产阶段的CO₂排放量与运行阶段的CO₂减排量对比

Fig. 5 Comparison between the embodied CO₂ emissions of the insulation materials in the production stage and the reduction CO₂ emissions in the operation stage

于保温材料在生产阶段消耗的焓,远远大于其在运行阶段节约的焓。

5 结论

提出的焓分析结合建筑生命周期评价方法可以系统、定量地评价既有建筑改造后的节能效果及CO₂排放量。运用能质系数的概念,将保温材料的质量含能转换为质量含焓,并将耗冷量和耗热量转换为耗焓量。

运用该方法对宁波建筑节能改造实例进行分析,结果表明,改造后运行阶段节约的能耗是保温材料在生产阶段能耗的1.75倍,而运行阶段节约的焓是保温材料在生产阶段消耗焓的1/7。在建筑节能改造后的生命周期内,保温材料在生产阶段的能耗需要15a才能与运行阶段节约的能耗相等,CO₂排放量需要16a才能与减排的CO₂量相等,但对于保温材料在生产阶段消耗的焓,远远大于其在运行阶段节约的焓。由此可见,对于既有建筑节能改造,新增保温材料在生产阶段的能耗和CO₂排放量不能忽略。对于建造年代久远的建筑,在进行围护结构节能改造时,应将改造后的节焓效果、节能效果和环境影响作为一个整体进行综合分析。

本文提出的分析方法需要大量准确的数据,如材料的质量含能和CO₂排放量等,数据的准确性直接影响到分析结果的正确性,目前国内还没有这方面的数据库。另外,焓的计算是以环境参考温度为基准的,因此环境温度的选取直接影响分析结果。

参考文献 (References)

[1] 方国昌, 赵冰. 唐山市既有建筑节能改造技术研究项目介绍 [J]. 暖通空调, 2008, 38(1): 95-98.
Fang Guochang, Zhao Bing. *Heating Ventilation and Air Conditioning*, 2008, 38(1): 95-98.

[2] 赵志超, Branko Simanic, 程林. 既有建筑采用可再生能源节能改造技术分析[J]. 建筑经济, 2009(2): 96-99.

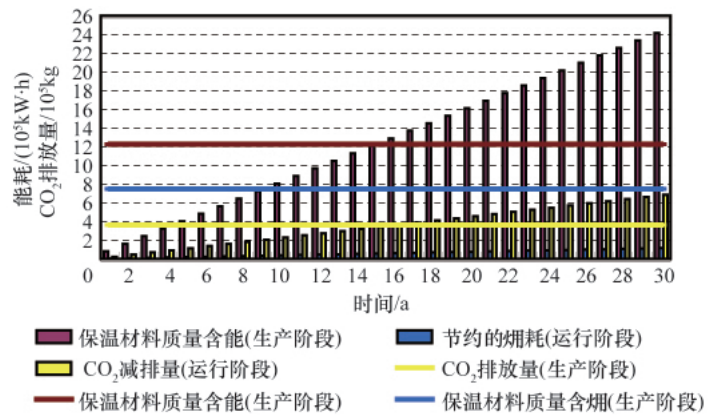


图6 在改造后的生命周期内节约的焓/能耗和CO₂减排量

Fig. 6 Cumulative saved exergy (energy) consumption and reduction CO₂ emissions during the life span of the building after retrofit

Zhao Zhongchao, Branko Simanic, Cheng Lin. *Construction Economy*, 2009(2): 96-99.

[3] Bribián I Z, Usón A A, Scarpellini S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(12): 2510-2520.

[4] 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, 2003.
Huang Zhijia. The model and case study of the life cycle assessment of building energy system[D]. Shanghai: Tongji University, 2003.

[5] 顾道金, 朱颖心, 谷立静. 中国建筑环境影响的生命周期评价[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(12): 1953-1956.
Gu Daojin, Zhu Yingxin, Gu Lijing. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition*, 2006, 46(12): 1953-1956.

[6] 朱明善, 刘颖, 林兆庄, 等. 工程热力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
Zhu Mingshan, Liu Ying, Lin Zhaozhuang, et al. *Engineering thermodynamics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.

[7] 绿色奥运建筑研究课题组. 绿色奥运建筑评估体系 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Green Olympics Building Research Group. Assessment system for green building of the Beijing Olympics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.

[8] 江亿, 刘晓华, 薛志峰, 等. 能源转换系统评价指标的研究 [J]. 中国能源, 2004, 26(3): 28-32.
Jiang Yi, Liu Xiaohua, Xue Zhifeng, et al. *Energy of China*, 2004, 26(3): 28-32.

(责任编辑 代丽)

本期好玩的数学——分盐问题答案

第一次,天平一边放 9 砝码,另一边放 9 克盐。
第二次,天平一边放 7 克砝码和刚才得到的 9 克盐,另一边放 16 克盐。
第三次,天平一边放第二次得到的 16 克盐和第一次得到的 9 克盐,另一边从剩余的盐中取出 25 克使天平平衡。
这样在三次后,我们可得到 9 克盐。自然剩下的盐是 90 克。
由此,我们将 140 克盐分成了 50 与 90 克各一份。