

建筑外墙最佳保温厚度及环境影响研究*

刘向伟¹, 郭兴国¹, 陈国杰^{2,3}, 陈友明^{2†}, 罗娜¹

(1.南昌大学 建筑工程学院,江西 南昌 330031; 2.湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;

3.南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:建筑外墙保温能有效地减少建筑能耗,从而减少因能源消耗而引起的环境污染问题.本文用多层墙体非稳态传热模型进行能耗计算,并用 P_1-P_2 经济性模型分析居住建筑外墙的生命周期成本,预测4个朝向2种常用保温材料最佳保温层厚度和节能效益.同时,提出等价燃煤量方法,分别计算最佳保温层厚度和不保温情况下的 CO_2 和 SO_2 排放量,并分析应用最佳保温层厚度的减排潜力.以长沙地区为例,结果表明,保温层最佳厚度范围为0.08~0.13 m,生命周期最大净现值为116.26~133.45元/ m^2 ,投资回收年限为3.1~3.5年.根据性价比指标,膨胀聚苯乙烯比挤塑聚苯乙烯更具经济优越性.当采用最佳保温层厚度时, CO_2 的排放量减少了17.4~19.51 kg/($\text{m}^2 \text{ a}$), SO_2 的排放量减少了0.036~0.04 kg/($\text{m}^2 \text{ a}$),污染气体的排放量能减少了75.8%~78.6%.

关键词:建筑外墙;保温层最佳厚度;生命周期成本;现值因子;环境影响

中图分类号:TU111.4

文献标志码:A

Optimum Insulation Thickness of Exterior Wall and Its Environment Impacts

LIU Xiangwei¹, GUO Xingguo¹, CHEN Guojie^{2,3}, CHEN Youming^{2†}, LUO Na¹

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3.College of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Thermal insulation is an effective way to reduce the energy consumption of buildings. And it is friendly for environment because the reduction of energy consumption means less emission. In this paper, the transient heat transfer model was used to calculate the energy consumption caused by the heat transmission cross the exterior wall into room. $P_1 - P_2$ economic model was used to analyze the life cycle total cost of exterior wall of residential building. The optimum thickness of the commonly used insulation materials including extruded polystyrene and expanded polystyrene was calculated with respect to East, South, West and North. The life cycle savings and payback periods were analyzed. The equivalent coal was calculated according to electricity consumption which is generated by the coal-fired power. Then the emission of CO_2 and SO_2 was estimated. The reduction potential of emissions was calculated when optimum insulation thickness was applied in comparison to un-insulated situation. Taking Changsha for example, the results

* 收稿日期:2016-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208247, 51408294, 51078127), National Natural Science Foundation of China(51208247, 51408294, 51078127)

作者简介:刘向伟(1987—),男,湖南宁乡人,南昌大学讲师,博士

† 通讯联系人, E-mail: ymchen@hnu.edu.cn

show that the optimum insulation thickness is between 0.08 and 0.13m. The maximum life cycle saving varies from 116.26 to 133.45 yuan/m². The payback period ranges from 3.1 to 3.5 years. The economic performance of expanded polystyrene is better than that of extruded polystyrene according to the economic indexes. The emission of CO₂ can be reduced by 17.4~19.51 kg/m² year, and the emission of SO₂ can be reduced by 0.036~0.04 kg/m² year. The emissions can be reduced by 74.5~78.6%.

Key words: exterior wall; optimum insulation thickness; life cycle cost; present worth factor; environment impact

目前中国正处在一个建筑业飞速发展的阶段,人们生活从生存型向舒适型转变,建筑能耗占全社会总能耗的比例持续上升^[1],预计至2020年建筑能耗将占社会总能耗的35%^[2-3].建筑节能问题受到政府和全社会的高度关注.空调能耗占建筑能耗的50%~60%^[4].随着生活水平的提高,空调能耗将继续增加^[5].降低空调能耗是实现建筑节能的关键环节之一.建筑外墙保温能有效地减少建筑外墙传热引起的空调负荷,是实现建筑节能的重要措施^[5-8],尤其在夏热冬冷地区.夏热冬冷地区过去是非采暖地区,建筑设计不考虑采暖要求,也谈不上夏季空调降温.建筑围护结构热工性能差,能源利用效率较低^[9].而建筑外墙保温会增加建设成本.从工程的角度出发,应使建筑生命周期总成本最低,即保温层投资和建筑生命周期内空调采暖费用之和最小使建筑生命周期总成本最低的保温层厚度即为最佳保温层厚度.能源消耗涉及到环境污染问题,其中最受关注的是温室效应问题.能源消耗引起的CO₂排放量占到人为因素产生的CO₂总量的80%^[10].建筑节能也意味着有效的减少污染物排放,保护和改善环境.

目前最佳保温层厚度研究主要采用度日法进行能耗计算^[11-14],通过建立建筑外墙生命周期经济性模型,预测最佳保温层厚度和节能效益.少量研究采用多层围护结构非稳态热传递模型进行能耗计算^[15].因为建筑外墙保温能减少建筑能耗,这也意味着保温能减少污染物排放.一部分研究者^[10,15-17]已开始研究最佳保温层厚度对减少CO₂,SO₂及其它温室气体排放的影响.在中国,对最佳保温层厚度的研究较少,而且都采用度日法进行能耗计算.度日法是静态计算方法,在温度剧烈变化的气候条件下其计算结果有较大误差.而外墙保温层对环境方面的研究尚未涉及.故本文采用多层墙体非稳态传热模型进行能耗计算,并用P₁-P₂经济性模型来分析居住建筑外墙的生命周期成本,预测最佳保温

层厚度和节能效益.提出等价燃煤量方法,分别计算最佳保温层厚度和不保温情况下的CO₂和SO₂排放量,并预测应用最佳保温层厚度时的减排潜力.

1 建筑外墙空调及采暖能耗费用计算

1.1 多层墙体非稳态传热模型

假设建筑墙体内无内热源,一维非稳态热传递方程可表示为^[15]:

$$\rho_j c_j \frac{\partial T_j}{\partial t} = k_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2}, \quad j=1,2,3,\dots,N \quad (1)$$

式中: x 和 t 分别为空间坐标和时间坐标, T_j , ρ_j , c_j 和 k_j 分别为第 j 层的温度、密度、比热容和导热系数.

交界面处的热传递可表示为:

$$T_j = T_{j+1}, \quad j=1,2,3,\dots,N \quad (2)$$

$$k_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} = k_{j+1} \frac{\partial^2 T_{j+1}}{\partial x^2}, \quad j=1,2,3,\dots,N \quad (3)$$

假设坐标由室外指向室内侧,相应的边界条件表示为:

$$q_{n,e} = h_e (T_e - T_{s,e}) + \alpha I \quad (4)$$

$$q_{n,i} = h_i (T_{s,i} - T_i) \quad (5)$$

式中: $q_{n,e}$ 和 $q_{n,i}$ 分别为通过建筑墙体外表面和内表面的热流密度; h_e 和 h_i 分别为室外侧和室内侧的对流换热系数, $h_e = 23.26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $h_i = 8.72 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ^[18]; T_e 和 T_i 分别为室外和室内空气温度,制冷工况下 T_i 为26℃,供热工况下 T_i 为18℃^[9], T_e 取自典型年气象参数^[19]; $T_{s,e}$ 和 $T_{s,i}$ 分别为建筑墙体外表面和内表面温度; α 为建筑墙体外表面太阳辐射吸收系数; I 为垂直照射到建筑墙体外表面的太阳辐射.

1.2 建筑外墙空调和采暖能耗费用计算

单位面积建筑外墙的瞬时热损失为:

$$q_j = h_j (T_i - T_{s,i}) \quad (6)$$

式中: q_j 为单位面积瞬时热损失,W/m².

供冷季单位面积外墙损失的热量 Q_c 为:

$$Q_c = 3\ 600 \sum_{j=1}^{24 \cdot N_c} q_j, \quad q_j < 0 \quad (7)$$

式中: N_c 为供冷天数.

供暖季单位面积外墙损失的热量 Q_h 为:

$$Q_h = 3\ 600 \sum_{j=1}^{24 \cdot N_h} q_j, \quad q_j > 0 \quad (8)$$

式中: N_h 为采暖天数.

$$E_c = C_E \frac{Q_c}{3.6 \times 10^6 EER} \quad (9)$$

式中: E_c 为单位面积外墙空调能耗费用, 元/m²; C_E 为电的单价, 元/kWh; EER 为空调额定能效比.

单位面积建筑外墙采暖能耗费用为:

$$E_h = C_E \frac{Q_h}{3.6 \times 10^6 \eta} \quad (10)$$

式中: E_h 为单位面积外墙采暖能耗费用, 元/m²; η 为采暖额定能效比.

2 生命周期经济性分析模型

本文考虑资金的现值, 采用 Duffie 提出的 P_1 - P_2 经济性模型分析方法^[20], 分析不同保温层厚度下的生命周期成本, 以获得最佳保温层厚度. P_1 - P_2 经济性模型的表达式为:

$$P_1 = PWF(N_c, i, d) = \sum_{j=1}^{N_c} \frac{(1+i)^{j-1}}{(1+d)^j} = \begin{cases} \frac{1}{d-i} \left[1 - \frac{1+i}{1+d} \right]^{N_c} & i \neq d \\ \frac{n_c}{1+i} & i = d \end{cases} \quad (11)$$

$$P_2 = D + (1+D) \frac{PWF(N_{\min}, 0, d)}{PEF(N_L, 0, m)} + M_s PWF(N_c, i, d) - \frac{R_v}{(1+d)^N} \quad (12)$$

式中: P_1 为能耗费用在经济分析年限 N_c 内总支出的现值因数, 即经济分析年限内总能耗费用与首年的比例; d 为市场贴现率; PWF 为现值因数; i 为燃料价格的年增长率; P_2 为分析年限 N_c 内保温层投资总额与初投资之比; D 为首付百分比; M_s 为年维修费与初投资之比; R_v 为再售价与初投资之比; N_L 为贷款期限; $N_{\min} = \min(N_c, N_L)$; m 为贷款利率.

单位面积保温层的成本可表示为:

$$C_{\text{ins}} = C_i x_{\text{ins}} + C_p \quad (13)$$

式中: C_{ins} 为保温层成本, 元/m²; C_i 为保温层单价元/m³; x_{ins} 为保温层厚度, m; C_p 为其它综合费用

元/m²; 包括人工费和不可预见费等.

生命周期内总投资现值 LCT 为空调供暖能耗费用与保温层投资现值之和, 其表达式为:

$$LCT = P_1(E_c + E_h) + P_2 C_{\text{ins}} x_{\text{ins}} \quad (14)$$

生命周期内净现值 LCS 为空调采暖所节能费用现值与保温层投资现值之差, 即:

$$LCS = LCT_{\text{un}} - LCT_{\text{ins}} = P_1(\Delta E_c + \Delta E_h) - P_2 C_{\text{ins}} x_{\text{ins}} \quad (15)$$

式中: LCT_{un} 为不保温情况下生命周期内总投资现值, LCT_{ins} 为保温情况下生命周期内总投资现值, ΔE_c 和 ΔE_h 分别为与不保温情况相比, 保温情况下空调和采暖所节能费用.

从工程的角度出发, 生命周期内总投资现值 LCT 最小或生命周期内净现值 LCS 最大时, 保温层厚度最佳.

生命周期内净现值 LCS 为零时, 表示空调采暖所节能费用现值与保温层投资现值相等, 此时对应的分析年限即为投资回收年限 N_p , 可表示为:

$$N_p = \begin{cases} \frac{\ln \left[1 - \frac{P_2 C_{\text{ins}} x_{\text{ins}} (d-i)}{\Delta E_c + \Delta E_h} \right]}{\ln \left(\frac{1+i}{1+d} \right)}, & i \neq d \\ \frac{P_2 C_{\text{ins}} x_{\text{ins}} (1+i)}{\Delta E_c + \Delta E_h}, & i = d \end{cases} \quad (16)$$

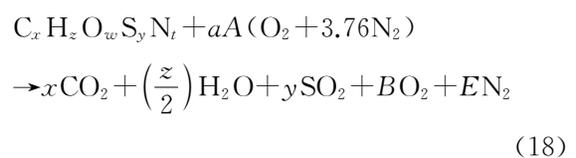
3 燃烧计算

中国目前火电依然占重要市场份额, 而煤等燃料的燃烧会排放大量的污染气体, 加重中国当前面临的严峻环境污染问题. 等价燃煤量可以表示为:

$$M_{\text{coal}} = \frac{\frac{Q_c}{EER} + \frac{Q_h}{\eta}}{LHV \eta_{\text{ef}} (1-\beta)} \quad (17)$$

式中: M_{coal} 为等价燃煤量, kg; LHV 为煤的低热燃烧值, $LHV = 29.295 \times 10^6$, J/kg^[21]; η_{ef} 为火电机组的发电效率; β 为电网损耗率; $\eta_{\text{ef}} = 0.45$, $\beta = 0.067$ ^[22].

燃料燃烧的一般过程可表示为^[15-16, 21]:



式中: A, B, E 为常数, 可由氧原子平衡方程得到.

CO_2 和 SO_2 的排放量可表示为:

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{44x}{M_{\text{coal}}}, \text{kg CO}_2 / (\text{m}^2 \text{ a}) \quad (19)$$

$$M_{\text{SO}_2} = \frac{64y}{M_{\text{coal}}}, \text{kg SO}_2 / (\text{m}^2 \text{ a}) \quad (20)$$

式中: M 为燃料的摩尔分子量, g/mol .

煤的分子式为 $\text{C}_{7.074} \text{H}_{5.149} \text{O}_{0.521} \text{S}_{0.01} \text{N}_{0.086}$ [21].

4 结果与讨论

4.1 外墙最佳保温层厚度

本文以长沙地区为例,取该地区典型墙体(水泥砂浆 20 mm+红砖 240 mm+石灰砂浆 20 mm),对 2 种常用保温材料厚度进行优化.材料参数见表 1,经济性参数见表 2,取第一档电价 0.588 (元/kWh),空调额定能效比取 2.3,采暖额定能效比取 1.9 [9].

表 1 外墙材料参数

| Materials | $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $K / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | $c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | $C_{\text{ins}} / (\text{元} \cdot \text{m}^{-2})$ |
|-----------|--|--|---|---|
| 水泥砂浆 | 1 800 | 0.93 | 1 050 | — |
| 红砖 | 1 700 | 0.5 | 989.3 | — |
| 石灰砂浆 | 1 600 | 0.81 | 1 050 | — |
| 挤塑聚苯乙烯 | 35 | 0.036 | 1 380 | 440 |
| 膨胀聚苯乙烯 | 25 | 0.05 | 1 380 | 280 |

表 2 经济性参数

| N_e/a | i | d | P_1 | D | M_s | R_v | P_2 |
|---------|-----|-----|--------|-----|-------|-------|-------|
| 20 [12] | 1% | 5% | 13.503 | 1 | 0 | 0 | 1 |

生命周期内总投资现值 LCT 随保温层厚度变化的曲线如图 1 所示.从图 1 可以看出,生命周期内总投资现值先随保温层厚度的增加而减小,当保温层厚度达到某一值后,生命周期内总投资现值随保温层厚度的增加而增加.生命周期内总投资现值最小时所对应的保温层厚度即为最佳保温层厚度 x_{op} .图 2 为长沙地区 4 个朝向 2 种常用保温材料的最佳厚度.膨胀聚苯乙烯的最佳厚度大于挤塑聚苯乙烯的最佳厚度.保温层最佳厚度的范围为 0.08 ~ 0.13 m.不同朝向的墙体中南向保温层最佳厚度最小,其次是东向,西向和北向.

图 3 和图 4 分别显示了生命周期内保温层最佳厚度对应的总投资现值 LCT_{op} 和净现值 LCS_{op} .

从图 3 可看出,膨胀聚苯乙烯的 LCT_{op} 比挤塑聚苯乙烯的 LCT_{op} 小,从图 4 是可以看出,膨胀聚苯乙烯的 LCS_{op} 比挤塑聚苯乙烯的 LCS_{op} 大,这表明

膨胀聚苯乙烯比挤塑聚苯乙烯更具经济优越性.不同朝向的 LCT_{op} 和 LCS_{op} 依次为南向 < 北向 < 东向 < 西向.

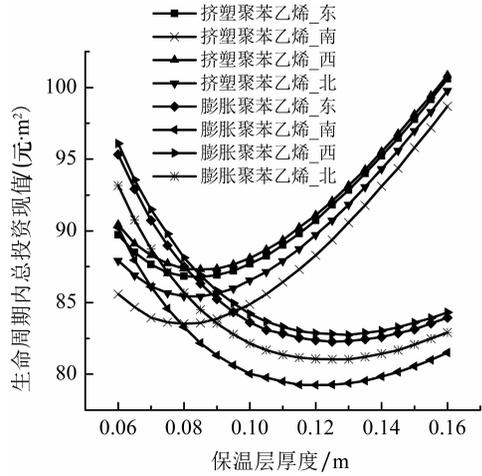


图 1 保温外墙生命周期内总投资现值

Fig.1 Lifecycle cost of an insulated wall

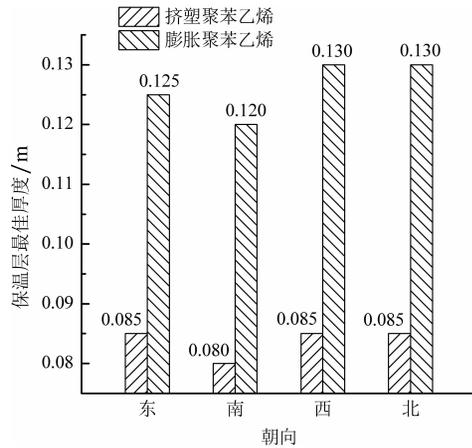


图 2 保温层最佳厚度

Fig.2 Optimum wall insulation thickness

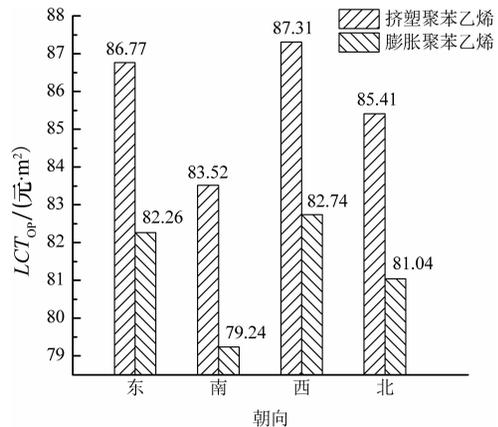
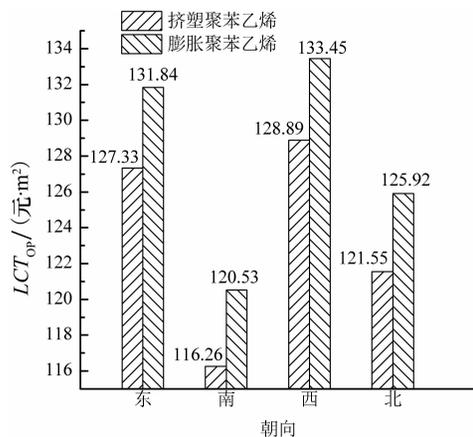


图 3 不同材料和朝向的 LCT_{op}

Fig.3 LCT_{op} achieved with different insulations in different orientations

图4 不同材料和朝向的LCS_{op}Fig.4 LCS_{op} achieved with different insulations in different orientations

投资回收年限 N_p 如表3所示,回收年限为3.1~3.5 a.

表3 投资回收年限 N_p

Tab.3 Payback period

a

| 朝向 | 东 | 南 | 西 | 北 |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| 挤塑聚苯乙烯 | 3.4 | 3.5 | 3.3 | 3.5 |
| 膨胀聚苯乙烯 | 3.1 | 3.2 | 3.2 | 3.3 |

4.2 外墙保温的环境收益

长沙地区电能供应主要为火电,煤燃烧会排放大量污染气体,破坏生态环境.外墙保温能减少电能消耗从而减少燃煤量,减少污染物排放.本文通过等价燃煤量来评估外墙保温的环境影响.最佳保温层厚度情况下CO₂和SO₂的排放量如表4所示.不保温情况下CO₂和SO₂的排放量如表5所示.当采用最佳保温层厚度时,CO₂和SO₂的排放量分别减少了17.4~19.51 kg/(m² a)和0.036~0.04 kg/(m² a);CO₂和SO₂等污染气体的排放量减少了75.8%~78.6%.这表明采用最佳保温层厚度时能大幅度减少CO₂和SO₂等污染气体的排放量.

表4 最佳保温层厚度情况下CO₂和SO₂的排放量Tab.4 Annual emissions of CO₂ and SO₂ when the optimum

| 污染气体 | 朝向 | insulation thickness is applied | |
|-----------------|----|---------------------------------|--------|
| | | 挤塑聚苯乙烯 | 膨胀聚苯乙烯 |
| CO ₂ | 东 | 5.67 | 5.43 |
| | 南 | 5.55 | 5.24 |
| | 西 | 5.73 | 5.32 |
| | 北 | 5.52 | 5.13 |
| SO ₂ | 东 | 0.0117 | 0.0112 |
| | 南 | 0.0114 | 0.0108 |
| | 西 | 0.0118 | 0.0109 |
| | 北 | 0.0113 | 0.0105 |

表5 不保温情况下CO₂和SO₂的排放量Tab.5 Annual emissions of CO₂ and SO₂ for

| 朝向 | un-insulated wall | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|
| | 东 | 南 | 西 | 北 |
| CO ₂ | 24.60 | 22.95 | 24.84 | 23.78 |
| SO ₂ | 0.051 | 0.047 | 0.051 | 0.049 |

5 结论

本文采用多层墙体非稳态传热模型进行能耗计算,并用P₁-P₂经济性模型分析居住建筑外墙的生命周期成本,预测4个朝向2种常用保温材料的最佳保温层厚度和节能效益,并提出等价燃煤量方法,计算采用最佳保温层厚度时,CO₂和SO₂等污染气体排放的减少量.文中以夏热冬冷地区长沙为例进行案例分析,结果表明,膨胀聚苯乙烯的最佳厚度大于挤塑聚苯乙烯的最佳厚度.保温层最佳厚度的范围为0.08~0.13 m.生命周期最大净现值为116.26~133.45元/m².投资回收年限为3.1~3.5 a.根据性价比指标,膨胀聚苯乙烯比挤塑聚苯乙烯更具经济优越性.当采用最佳保温层厚度时,CO₂和SO₂等污染气体的排放量能减少75.8~78.6%.虽然文中仅以长沙地区为例进行案例分析,但本文主要从方法上来论述如何确定建筑外墙保温层厚度及其对环境的影响,文中所提出的研究方法可推广应用到全国不同气候区域,对提高居住建筑外墙保温性能,减少能耗及污染气体排放有重要的指导意义.

参考文献

- [1] JIANG Y. Chinese building energy consumption situation and energy efficiency strategy[J]. *New Architecture*, 2008, 24(2): 4-7.
- [2] LANG S. Progress in energy-efficiency standards for residential buildings in China[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36(12): 1191-1196.
- [3] LIU Y, LAM J C, LIU J P, et al. Building energy simulation using multi-years and typical meteorological years in different climates[J]. *Energy Conservation and Management*, 2008, 49(1): 113-124.
- [4] CHEN S Q, LI N P, GUAN J, et al. A statistical method to investigate national energy consumption in the residential building sector of China[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(4): 654-665.
- [5] YU J, YANG C, HU J, et al. Effects of envelope energy saving strategies on energy consumption in residential building[C]// *Proceeding of the 5th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning*. Beijing: Tsinghua University

- Press, 2007; 849—857.
- [6] WANG Y, HUANG Z, HENG L. Cost-effectiveness assessment of insulated exterior walls of residential buildings in cold climate [J]. *International Journal of Project Management*, 2007, 25(2): 143—149.
- [7] GHRAB-MORCOS N. CHEOPS; a simplified tool for thermal assessment of mediterranean residential buildings in hot and cold seasons [J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(6): 651—662.
- [8] MOHSEN M S, AKASH B A. Some prospects of energy savings in buildings [J]. *Energy Conservation and Management*, 2001, 42(11): 1307—1315.
- [9] JGJ 134-2010 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社, 2010; 25—26.
JGJ 134-2010 Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer and cold winter zone[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010; 25—26. (In Chinese)
- [10] COMAKLI K, YUKSEL B. Environment impact of thermal insulation thickness in buildings [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(5/6): 933—940.
- [11] 于靖华, 杨昌智, 田利伟, 等. 长沙地区居住建筑外墙保温层最佳厚度的研究 [J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(9): 16—21.
YU Jinghua, YANG Cangzhi, TIAN Liwei, *et al.* Research on the optimum insulation thickness of external wall for residential buildings in Changsha region [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2009, 36(9): 16—21. (In Chinese)
- [12] YU J, YANG C, TIAN L, *et al.* A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(11): 2520—2529.
- [13] BOLATTÜRK A. Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in warmest zone of Turkey [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(6): 1055—1064.
- [14] UCAR A, BALO F. Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(1): 88—94.
- [15] OZEL M. Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 49(2): 552—559.
- [16] MAHLIA T M I, IQBAL A. Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in Maldives [J]. *Energy*, 2010, 35(5): 2242—2250.
- [17] DOMBAYCI O A. The environment impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(11): 3855—3859.
- [18] 刘向伟, 陈国杰, 陈友明. 墙体热、湿及空气耦合传递非稳态模型及验证 [J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2016, 43(1): 152—156.
LIU Xiangwei, CHEN Guojie, CHEN Youming. Modeling of the transient heat, air and moisture transfer in building walls [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2016, 43(1): 152—156. (In Chinese)
- [19] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005; 75—89.
Climate Data Office, Climate Information Center, China Meteorological Bureau, Department of Building Science and Technology, Tsinghua University. China standard weather data for analyzing building thermal conditions [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005; 75—89. (In Chinese)
- [20] DUFFIE J A, BECKMAN W A. *Solar energy and thermal process* [M]. New York: Wiley, 1991; 475—478.
- [21] ÇAY Y, GÜREL A E. Determination of optimum insulation thickness, energy savings, and environment impacts for different climate region of turkey [J]. *Environment Progress & Sustainable Energy*, 2013, 32(2): 365—372.
- [22] 魏一鸣, 廖华. 中国能源报告: 能源效率研究 [R]. 北京: 科学出版社, 2010; 144—147.
WEI Yiming, LIAO Hua. China energy report: energy efficiency research [R]. Beijing: Science Press, 2010; 144—147. (In Chinese)