

夏热冬冷地区绿色建筑外墙节能特性的 LBM 模拟及效益分析

邵必林¹, 杜星璇¹, 任秦龙², 徐洪涛³, 罗祝清³

(1. 西安建筑科技大学 管理学院, 西安 710055; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049; 3. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对夏热冬冷地区绿色建筑中外墙的典型保温方式和常见保温材料, 采用多松弛时间格子玻尔兹曼方法建立瞬态共轭传热数值模型, 分析间歇耗能条件下墙体的瞬态热传导过程, 进而得出不同类型保温外墙的节能特性。在此基础上, 发展保温墙体增量综合效益的计算方法, 分析绿色建筑外墙的增量成本及其增量效益, 进而建立外墙增量综合效益评价模型, 获取保温外墙最优设计方案。研究数据表明, 采取内保温方式的外墙在该地区具有最佳的节能特性, 尽管采用不同保温方式和保温材料的外墙均具有一定的节能特性, 然而, 在其全生命周期内, 使用外保温方式以及增量成本较高的保温材料的墙体的增量综合效益出现负值, 因此, 不适宜在工程实践中应用。此外, 研究结果显示, 尽管增加保温层厚度可以在一定程度上强化外墙的保温性能, 然而, 增加保温层厚度会产生额外的增量成本, 因此, 绿色建筑项目实践中应综合考虑墙体节能特性及其增量成本进而选取适宜的保温层厚度, 从而实现其全生命周期内增量综合效益的最大化。

关键词: 绿色建筑; 保温外墙; 增量综合效益; 瞬态共轭传热; 格子玻尔兹曼法

中图分类号: TK 018 **文献标志码:** A

Numerical Study of the Energy Saving Characteristic of Green Building's Insulated External Walls in Hot Summer and Cold Winter Areas Using LBM and the Benefit Analysis

SHAO Bilin¹, DU Xingxuan¹, Ren Qinlong², XU Hongtao³, LUO Zhuqing³

(1. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To investigate the green building's typical insulated external walls with common insulating materials in hot summer and cold winter areas, a multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method (MRT-LBM) was developed for solving the conjugate heat transfer problem. The transient heat transfer process in the wall was analyzed under an intermittent energy consumption condition, and the energy

收稿日期: 2018-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51776145); 住房和城乡建设部软科学项目 (2016-R3-014); 上海市科技创新行动计划 (18160743600)

第一作者: 邵必林 (1965-), 男, 教授。研究方向: 生态视角下的绿色建筑评价方法。E-mail: shaobilinn@163.com

saving characteristics of different insulated external walls were studied. Based on this, a computational approach for the incremental comprehensive benefit of the insulated wall was developed to analyze its incremental cost and incremental benefit. Under this circumstance, an evaluation model for the incremental comprehensive benefit was constructed to obtain the optimum design of insulated external walls. The results indicate that the walls with interior insulating layer have the best energy saving characteristic in this specific region. The whole lifetime incremental comprehensive benefit of the walls with exterior insulating layer or using expensive insulating materials is negative even though they could still save energy during the energy consumption period. Due to this reason, the walls with exterior insulating layer and expensive insulating materials should not be used in the real engineering applications. In addition, it is found that the energy saving amount of insulated external walls increases with the increment of the insulating layer thickness. However, the increased insulating layer could generate extra incremental cost. Hence, the optimum insulating layer thickness of external walls should be determined with fully considering their energy saving characteristic and incremental cost to achieve a maximum incremental comprehensive benefit during the whole lifetime.

Keywords: *green building; insulated external wall; incremental comprehensive benefit; transient conjugate heat transfer; lattice Boltzmann method*

近年来随着世界范围内石油、煤炭、天然气这三种传统能源日趋枯竭,我国所面临的能源环境问题也日趋严重。据国家统计局数据显示,2016年我国建筑总能耗已达全国能源总消耗的45%,随着可持续发展观念的提出,建筑节能开始向绿色建筑转型。此外,从建筑气候分区来看,我国的夏热冬冷地区共涉及16个省、市、自治区,人口占全国总人口的三分之一。该地区夏季闷热多雨,冬季阴冷潮湿,居民常采用空调制冷和制热方式对室内热环境进行调控和改善。然而,家用小型空调的能耗巨大。因此,发展绿色节能建筑已经成为调控能源消耗结构、改善人民生活居住环境、实现社会经济可持续发展的重要国家战略。

采用保温外墙是绿色建筑节能最有效的途径之一,国内外学者针对保温外墙的隔热性能开展了广泛的研究。Comakli等^[1]针对土耳其寒冷地区的保温墙体厚度进行了优化研究,结果表明,通过选取合理的墙体厚度可以实现可观的节能效益。Cabeza等^[2]研究了地中海地区气候条件下挤塑聚苯板、矿物棉、喷雾泡沫聚氨酯等几种常见材料的保温隔热性能,并发现保温外墙可以使建筑物节能率大于28%。文献[3]探索了环境因素对保温墙体最佳厚度的影响,研究发现,通过采用保温材料,墙体能耗可以减小46.6%,同时二氧化碳

和二氧化硫的排量会相应减少41.53%。另外,采用动态方法研究外墙朝向对其最佳保温节能厚度的影响规律,Ozel^[4]得出了不同朝向的保温外墙具有不同的最佳保温墙体厚度的结论。Zhu等^[5]研究了我国不同气候区域保温外墙的适宜厚度以及节能潜力,研究数据显示,增加墙体保温层厚度并且使用性能更好的保温材料可以有效减少制冷和制热所需的能耗。Pan等^[6]研究了我国不同气候区域保温外墙厚度对全年建筑能耗的影响机制,并提出采用能量增益比值以及实际变化率对节能性进行评估。针对我国夏热冬冷地区所特有的气候特点,绿色建筑外墙节能相关研究也已经广泛进行。Feng^[7]考虑了夏日光照、冬季热量损失以及季节变化期的自然通风等因素对冬冷夏热地区的建筑能耗进行了优化设计,研究证明,墙体的换热系数是影响建筑节能的最主要因素。汤莉等^[8]采用计算流体力学和数值传热学的方法对灰沙砖实体墙、带有外封闭空气间层的墙体以及带有外通风空气间层的墙体开展了研究,结果表明,外挂式封闭间层墙体的夏季隔热和冬季保温性能均较好,适宜在夏热冬冷地区推广使用。Yu等^[9]选取上海、长沙、韶关、成都作为夏热冬冷地区的典型城市研究了5种不同保温材料的节能特性,发现发泡聚苯乙烯具有最佳效益。王厚华等^[10]利用Fluent软件模拟对比分析了不同构造墙体的热工性能,发现

热惰性指标和传热系数并不能完全用来综合评价保温效果,温度衰减倍数大的材料节能性更好。钱晓倩等^[11]考虑到夏热冬冷地区的实际气候和用能特点,指出开展间歇式用能条件下建筑外墙能耗的研究对于指导该地区的工程实践意义重大。尽管有关夏热冬冷地区绿色建筑外墙热工性能的研究已经被广泛开展,但当前该地区绿色建筑围护结构实际节能率远低于理论节能率。因此,需要进一步探索该地区绿色建筑外墙节能特性,分析增量成本以及所产生的经济效益、环境效益和社会效益间的内在联系。

计算机技术的高速发展以及数值方法的不断完善使得建筑能耗的模拟日趋成熟,为开展绿色建筑全生命周期经济效益的分析提供了有效手段。由于增量成本和增量效益是绿色建筑节能经济性分析的关键,为了让开发商准确认识绿色建筑项目的成本和效益并作出科学评价,国内外学者基于全生命周期理论,建立了多种有效的经济效益评估模型。文献^[12]提出混合整数优化模型,在考虑预算和设计的约束下,使得建筑项目在进行LEED(leadership in energy and environmental design)评价时得分最大化。Tatari等^[13]将ANN(artificial netural network)运用到成本预测中,并通过多元回归分析验证了该模型的可行性。Tsai等^[14]聚焦于碳排放费用和低碳技术,提出了0-1混合整数规划法,并以此构建了绿色建筑的成本决策模型。马素贞等^[15]通过明确绿色建筑增量成本的定义及计算方法,提出了两种不同的基准方案成本,为合理确定绿色建筑技术增量成本提供了依据。李静等^[16]在层次分析法的基础上,结合模糊综合评价法对增量间接收益进行了量化,并通过实例验证了模型的可行性。王建廷等^[17]从消费者角度对绿色建筑的增量成本与效益进行了研究,构建了给予消费者的贡献决策模型。柴宏祥等^[18]通过分析绿色建筑节水项目全生命周期的综合效益要素,采用净现值作为综合效益的评价和衡量指标,构建出其综合效益经济模型,并在示范项目中得以应用。与此同时,王庭阳等^[19]认为绿色建筑实施现状分为:绿色技术落实情况,运行时效和经济效益分析,并通过对30个已实施绿色建筑现状的调研,发现绿色建筑具有增量成本回收期较长的特点。针对目前夏热冬冷地区绿色建筑外墙仍存在的技术堆砌现象严重、成本过高、推广

性差等相关问题,需要在考虑绿色建筑增量成本的基础上,对其投产后的节能特性以及增量效益进行分析,从而获取增量综合效益最优的绿色建筑外墙方案,进而对建筑行业决策实现科学指导。

此外,格子玻尔兹曼法(lattice Boltzmann method, LBM)经过近30年的发展,已经成为解决计算流体力学和数值传热学复杂问题的重要手段^[20-21]。采用多松弛时间(multiple-relaxation-time)的格子玻尔兹曼模型因其良好的数值稳定性已经被成功地应用到瞬态共轭传热问题的计算中^[22];通过合理选取松弛时间,格子玻尔兹曼法可以直接满足不同材料界面间的狄利克雷-纽曼耦合边界条件,进而免去了传统数值方法中所需的迭代过程,使得计算效率大幅提高。同时由于格子玻尔兹曼法的高度并行特性,可以通过高性能计算显卡(GPU)进行加速运算^[23-24],从而进一步提高了该方法的时效性。本文采用基于GPU加速的多松弛时间格子玻尔兹曼算法对绿色建筑保温外墙内的瞬态共轭热传导过程进行数值求解,进而对比研究3种常见保温形式(内保温、外保温以及内外组合保温)、8种典型保温材料构造下外墙的节能特性。在此基础上,建立保温墙体全生命周期的增量综合效益模型,探索增量综合效益最优的外墙构造,并对保温层厚度进行优化,从而对夏热冬冷地区绿色建筑外墙设计提供准确有效的指导。

1 共轭传热数学模型

结合现有夏热冬冷地区绿色建筑围护结构的设计特点和相关政策,对4种常见形式的保温外墙以及传统红砖墙体的节能特性开展对比研究,其结构分别为:a.红砖基准墙体,其由外侧(建筑外环境)到内侧(室内)分别为20 mm水泥砂浆,240 mm红砖墙体以及20 mm石灰砂浆;b.内保温墙体,其由外侧到内侧分别为20 mm水泥砂浆,240 mm红砖墙体,30 mm保温层以及20 mm石灰砂浆;c.外保温墙体,20 mm水泥砂浆,30 mm保温层,240 mm红砖墙体以及20 mm石灰砂浆;d.内外组合保温墙体,20 mm水泥砂浆,15 mm外保温层,240 mm红砖墙体,15 mm内保温层以及20 mm石灰砂浆。为了简化保温外墙的数学模型,进行以下合理假设:a.忽略墙体上下楼层间

的热量传输；b. 保温外墙各层为均质材料且其热物性参数为常数；c. 不考虑太阳辐射以及其他辐射的影响；d. 假设外墙各层材料间接触良好并忽略接触热阻；e. 忽略房间内部家具、人员、灯光以及其他热源的影响，并假设房间内部温度均匀分布。基于以上假设，保温外墙内部的热量传递过程可由一维瞬态共轭导热偏微分方程组描述。

$$\rho_i c_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = k_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} \quad (1)$$

式中： ρ 为密度； c_p 为比定压热容； k 为热导率； T 为温度； x 为距离外墙的厚度； t 为时间； i 代表保温外墙中的第 i 层材料 $i=1\sim n$ 。

当 $i=1$ 时，保温外墙外侧边界($x_1=0\text{ mm}$)的水泥砂浆与外界环境间只考虑对流换热，因而采用第三类边界条件：

$$-k_1 A \frac{\partial T_1}{\partial x_1} = h_{\text{out}} A (T_1 - T_e) \quad (2)$$

式中： h_{out} 为外墙外表面对流换热系数，按规范取 $h_{\text{out}} = 19\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (夏季)， $h_{\text{out}} = 23.3\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (冬季)^[25]； A 为墙体面积； T_e 为室外环境温度。

当 $i=n$ 时，保温外墙内侧边界($x_n=L$, L 为保温外墙厚度)的石灰砂浆与室内环境间只考虑对流换热，同样采用第三类边界条件：

$$-k_n A \frac{\partial T_n}{\partial x_n} = h_{\text{in}} A (T_n - T_{\text{in}}) \quad (3)$$

式中： h_{in} 为外墙内表面对流换热系数，取 $h_{\text{in}} = 8.7\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ； T_{in} 为室内环境温度。

外墙内不同材料层间应满足热流与温度分布的连续性，因而采用狄利克雷-纽曼耦合边界条件：

$$T_i = T_{i+1} \quad (4)$$

$$-k_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i} = -k_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x_{i+1}} \quad (5)$$

通过格子玻尔兹曼法求解以上偏微分方程组，进而获取任意时刻墙体温度分布，关于GPU加速多松弛时间LBM程序的验证详见文献[23]。此外，用能时刻每平方米墙体能耗 Q 的计算式为

$$Q(t) = h_{\text{in}} (T_n(t) - T_{\text{in}}) \quad (6)$$

选取红砖墙体用能时刻的能耗 Q_H 作为参照数值，则保温墙体一天内的节能量

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} [Q_H(t) - Q_B(t)] dt \quad (7)$$

式中： Q_B 为保温墙体用能时刻的能耗； t_1 , t_2 为用

能时刻区间的上限、下限。

本文研究夏热冬冷地区间歇用能条件下保温墙体的增量综合效益，选取 t_1 为晚上22:00， t_2 为早晨6:00，其余时间为开窗通风的非用能时刻，因而每天采用空调制热或者制冷的时间为8 h。

2 绿色建筑保温外墙增量综合效益评价模型

绿色建筑保温外墙与传统建筑相比，在建设阶段会增加一定的成本，然而，由于保温外墙较好的节能特性，在其项目移交后的全生命周期内会产生较大的经济效益、环境效益和社会效益。因此，需要对不同保温形式以及保温材料的绿色建筑外墙进行增量综合效益对比研究，进而确定最佳的工程实施方案。增量综合效益是指绿色建筑的增量效益与增量成本的差值，其中，增量成本是指绿色建筑与基准建筑(采用红砖墙体的建筑)相比所产生的额外投资，而增量效益是指绿色建筑在运营阶段因其节能特性而产生的直接或间接效益^[15]。绿色建筑保温外墙的增量综合效益的计算式为

$$\Delta E = \Delta S - \Delta C \quad (8)$$

式中： ΔE 为增量综合效益； ΔS 为增量效益； ΔC 为增量成本。

$$\Delta C = \Delta C_i + \Delta C_p \quad (9)$$

$$\Delta C_i = (C_u + C_o + C_l) L H D \quad (10)$$

式中： ΔC_i 为使用保温材料所产生的额外费用； C_u 为保温材料的价格(见表1)； C_o 为其他材料的费用25元/ m^3 ； C_l 为人工费用15元/ m^3 ； L 为保温外墙宽度(选取10 m)， H 为保温外墙高度(选取3 m)； D 为保温层的厚度(除保温层厚度优化研究部分外选取30 mm)； ΔC_p 为绿色建筑设计阶段的数值能耗模拟以及咨询所产生的相关费用，通常为造价的0.1%^[15]，本文选取 $\Delta C_p=0.1\% \Delta C_i$ 进行计算。

$$\Delta S = \Delta S_y P (\Delta S_y, i_0, n_y) \quad (11)$$

$$P = 1/i_0 - 1/[i_0(1+i_0)^{n_y}] \quad (12)$$

式中： P 表示年收益折现系数； n_y 为绿色建筑的计算年限，本文依据国家标准选取 $n_y=50\text{ a}$ ^[26]； i_0 为基准折现率，通常在10%~12%的区间取值^[27]，本文选取了位于夏热冬冷地区的陕西省汉中市进行案例分析，陕西省属于经济中等发达地区，因

表 1 夏热冬冷地区保温材料热物理参数及价格

Tab.1 Thermophysical parameters and prices of thermal insulating materials in hot summer and cold winter areas

编号	材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比定压热容 $c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率 $k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	材料价格 $C_u/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$
1	挤塑聚苯乙烯	35	1 380	0.036	440
2	膨胀聚苯乙烯	25	1 380	0.050	280
3	珍珠岩	400	1 170	0.140	350
4	聚氨酯	30	1 380	0.033	675
5	聚氯乙烯	130	1 380	0.048	1 070
6	岩棉板	150	1 220	0.045	2 600
7	玻璃棉板	100	1 220	0.048	2 800
8	泡沫玻璃板	140	1 200	0.064	2 820
9	红砖	1 923	920	0.440	—

注: 数据来源为中国化工网

此, 选取 $i_0=11\%$ 进行计算; ΔS_y 为年收益。
将 ΔS_y 分解为经济效益、环境效益和社会效益三方面计算。

$$\Delta S_y = \Delta S_e + \Delta S_h + \Delta S_s \tag{13}$$

$$\Delta S_e = \frac{(70\Delta W_s + 70\Delta W_w)LH}{3\,600\eta} P_u \tag{14}$$

式中: ΔS_e 为保温外墙的年经济效益; ΔW_s 为夏季绿色建筑保温外墙每日节能量, kJ/m^2 ; ΔW_w 为冬季保温外墙每日节能量, kJ/m^2 ; η 为夏季制冷和冬季制热所用空调的能效比, 选 $\eta=3.3$; ΔS_h 为保温外墙的年环境效益; ΔS_s 为保温外墙的年社会效益; P_u 为陕西汉中地区的电价, $P_u=0.498\,3\text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

需要指出的是夏冬两季每日的节能量 ΔW_s 和 ΔW_w 为夜间 8 h 用能时刻保温外墙的节能量, 在非用能时刻保温墙体无任何节能效益。本文选取 70 天作为冬夏两季用能天数进行计算, 并将节能量单位转化为 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ($1\text{kW} \cdot \text{h}=3\,600\text{kJ}$);

ΔS_h 主要包括由于节能所产生的 CO_2 , SO_2 等污染物排放量的减少, 采用等效替换法可以对环境效益进行计算; 保温外墙所节省的电能转换为标准煤的系数为 $0.000\,4\text{t}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 其中, CO_2 , SO_2 , NO_x , 以及烟粉尘的排放系数分别为 2.456 7, 0.016 5, 0.015 6, 0.09 6; 污染物 CO_2 , SO_2 , NO_x , 以及烟粉尘的减排价值分别为 390, 4 344.93, 632, 275 元/ $\text{t}^{[28-30]}$ 。因而保温外墙的年环境效益

$$\Delta S_h = \frac{(70\Delta W_s + 70\Delta W_w)LH}{3\,600 \times \eta} \times 0.000\,4 \times (2.456\,7 \times 390 + 0.016\,5 \times 4\,344.93 + 0.015\,6 \times 632 + 0.096 \times 275) \tag{15}$$

ΔS_s 包括由于建筑节能所引起的电力投资的减少

以及用能高峰期电荒所引起的经济损失。研究表明, 每减少 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 的用电需求, 相关的电力投资可以节约 $0.2\text{kW} \cdot \text{h}$, 同时由于节能所避免的经济损失约为 $0.22\text{kW} \cdot \text{h}^{[31]}$ 。因此, 保温外墙的年社会效益

$$\Delta S_s = \frac{(70\Delta W_s + 70\Delta W_w)LH}{3\,600\eta} \times (0.2 + 0.22) \tag{15}$$

基于以上分析, 通过构建绿色建筑保温外墙全生命周期的增量综合效益模型, 在获取不同保温方式和保温材料外墙节能性的基础上, 对其增量综合效益进行对比优化研究, 从而更加有效地指导工程实践。

3 计算结果与分析

选取处于我国夏热冬冷地区北部的陕西省汉中市作为研究对象, 其 2017 年 7 月平均最高气温为 33.97℃ , 平均最低气温为 24.13℃ ; 2018 年 1 月平均最高气温为 6.26℃ , 平均最低气温为 -0.67℃ ; 假设一天内环境气温 T_e 随时间按正弦函数变化^[32], 下午 14:00 时气温最高, 凌晨 2:00 时气温最低, 则环境气温可以表达为

$$T_e = -\sin\left[\frac{2\pi(t + 7\,200)}{86\,400}\right] \cdot \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}\right) + \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}\right) \tag{16}$$

式中: $T_{\max}$ 为一天内的最高气温; $T_{\min}$ 为一天内的最低气温。

研究间歇性用能条件下的绿色建筑保温外墙效益, 选取每天晚上 22:00 至早上 6:00 为用能时

刻,通过空调对房间内进行制冷和制热,设定用能时刻房间内温度为冬季 $T_{in}=18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及夏季 $T_{in}=26\text{ }^{\circ}\text{C}$;一天中的其他时刻为非用能时刻,假设非用能时刻下房间温度与环境温度相同,即 $T_{in}=T_e$ 。为了消除保温外墙温度所设初值对计算结果的影响,首先将计算进行多日迭代直至保温外墙内外表面温度变化不再受墙体初值的影响;以挤塑聚苯乙烯内保温墙体为例,经过10个昼夜(240 h)的计算迭代,其冬季和夏季的内外表面温度出现周期性“稳态”变化;因此,选取第11日的计算结果作为绿色建筑保温外墙节能特性和增量综合效益分析的数据依据。

针对内保温、外保温以及内外组合保温形式下8种常见保温材料(材料编号见表1)的节能特性开展了研究。对墙体能耗 Q 在用能时刻区间内进行积分得出(非用能时刻墙体能耗为0),传统红砖墙体夏季制冷期一昼夜的能耗为 493.73 kJ/m^2 ,冬季制热期一昼夜的能耗为 $1\text{ }465\text{ kJ/m}^2$ 。图1给出了夏季制冷和冬季制热条件下内保温墙体的能耗曲线图,结果显示,夏季制冷期间8种材料的内保温墙体节能性由好至坏的排序为:聚氨酯,挤塑聚苯乙烯,岩棉板,玻璃棉板,膨胀聚苯乙烯,聚氯乙烯,泡沫玻璃板,珍珠岩。通过表1可以得出各种材料的热导率由小到大的排序为:聚氨

酯,挤塑聚苯乙烯,岩棉板,玻璃棉板(聚氯乙烯),膨胀聚苯乙烯,泡沫玻璃板,珍珠岩。经过对比可以发现,内保温墙体夏季制冷期间的节能特性基本随着保温材料热导率的减小而加强,保温材料的热导率是决定墙体保温性能的最重要因素。然而,需要指出的是,玻璃棉板和聚氯乙烯的热导率相同(均为 $0.048\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$),但是,由于聚氯乙烯具有更强的储热能力(密度 ρ 与比定压热容 c_p 的乘积较大),使得其在空调启动后的一段时间中墙体内部的温度对室内温度变化的响应较慢,从而造成了更大的能量损失。膨胀聚苯乙烯的热导率甚至略大于聚氯乙烯的热导率,然而由于膨胀聚苯乙烯的储热能力仅仅是聚氯乙烯的19.2%,使得膨胀聚苯乙烯内保温墙体相比聚氯乙烯内保温墙体具有了更好的节能特性,但是,与热导率相比,材料储热能力对于保温墙体的节能特性影响较小,因此,使用热导率较低的材料是提高墙体保温性能的关键。与此同时,冬季制热期8种材料的内保温墙体节能性能由好至坏的排序依然为:聚氨酯,挤塑聚苯乙烯,岩棉板,玻璃棉板,膨胀聚苯乙烯,聚氯乙烯,泡沫玻璃板,珍珠岩,由此说明不同保温材料的节能特性强弱对比与用能季节无关。

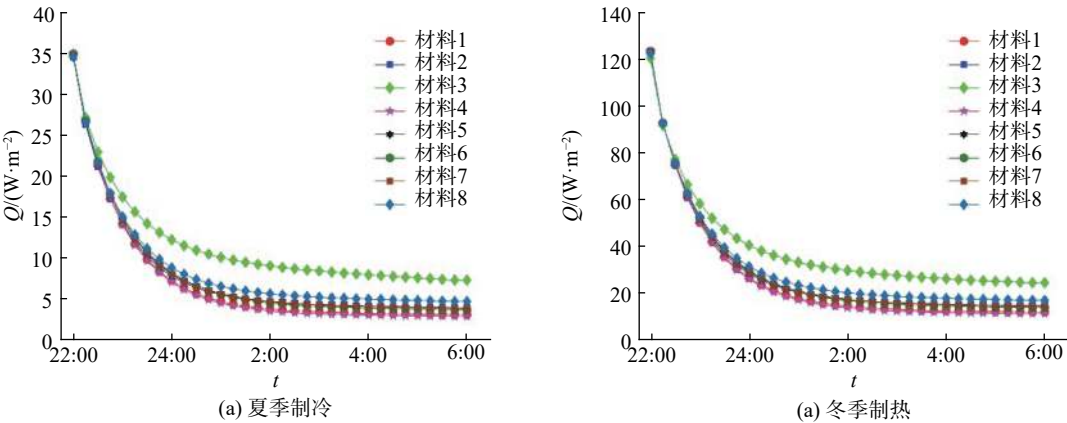


图1 内保温墙体夏季制冷和冬季制热墙体能耗图

Fig.1 Energy consumption of internal insulated walls for cooling in summer and heating in winter

为了更加清晰地对比研究夏热冬冷地区不同保温方式下采用多种保温材料的绿色建筑外墙的节能特性,图2给出了保温墙体相对于红砖墙体一昼夜的节能量 ΔW (由式(7)计算得出)。由图2可以看出,对于所有不同的保温材料,外保温墙体的节能性较差,而内保温墙体的节能性最优,

内外组合保温墙体的节能特性介于外保温墙体和内保温墙体之间。在内保温、外保温和内外组合保温方式下,节能性最优的材料均为聚氨酯,而节能性最差的材料均为珍珠岩,这说明保温材料节能性优劣的排序与采用的墙体保温方式无直接关系。现以挤塑聚苯乙烯(30 mm厚保温层)为例,

其外保温墙体、内保温墙体和内外组合保温墙体相比于传统红砖墙体夏季制冷期一昼夜的节能量分别为 24.11, 250.6, 290.3 kJ/m^2 , 冬季制热期一昼夜的节能量分别为 140.5, 626, 735 kJ/m^2 。相比于外保温墙体, 内保温墙体在夏季制冷期和冬季制热期的节能量分别提高了 1 104% 和 423%, 可见内保温墙体应是绿色建筑外墙的首选方式; 此外, 与冬季制热期相比, 外保温墙体在夏季制冷期的节能特性更差, 甚至会出现“反节能”现象。为

了进一步说明外保温墙体在夏季制冷期比冬季制热期节能性更差的原因, 图 3 描述了挤塑聚苯乙烯外保温墙体在夏季制冷和冬季制热用能时刻的墙体内部温度分布图。X 为墙体厚度方向的坐标 0 与冬季制热期相比, 在夏季制冷的用能时刻, 外保温墙体的温度最大值出现在墙体内部; 在这种情况下, 由于保温层的热导率较低, 保温层处于承重墙外侧的外保温方式会阻碍热量由房间内部向室外环境中扩散, 进而导致室内空调制冷用能量的增加。

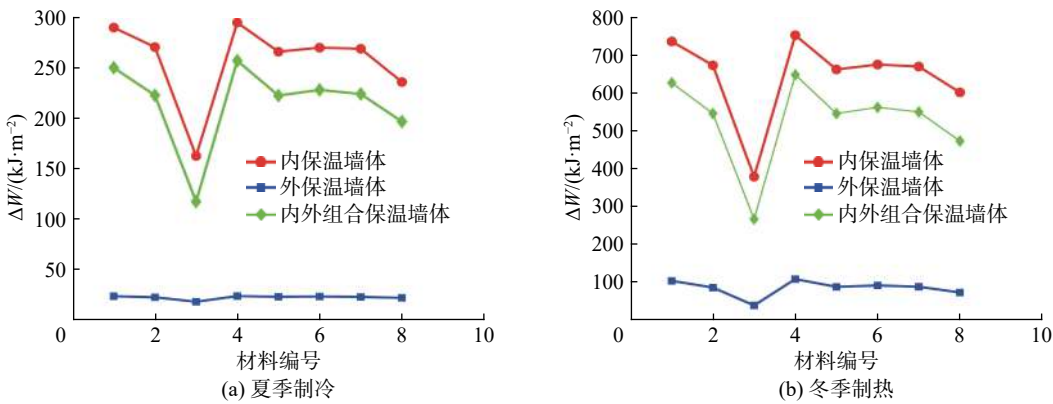


图 2 保温墙体夏季制冷和冬季制热一昼夜节能量

Fig.2 Energy saving of insulated walls within day and night for cooling in summer and heating in winter

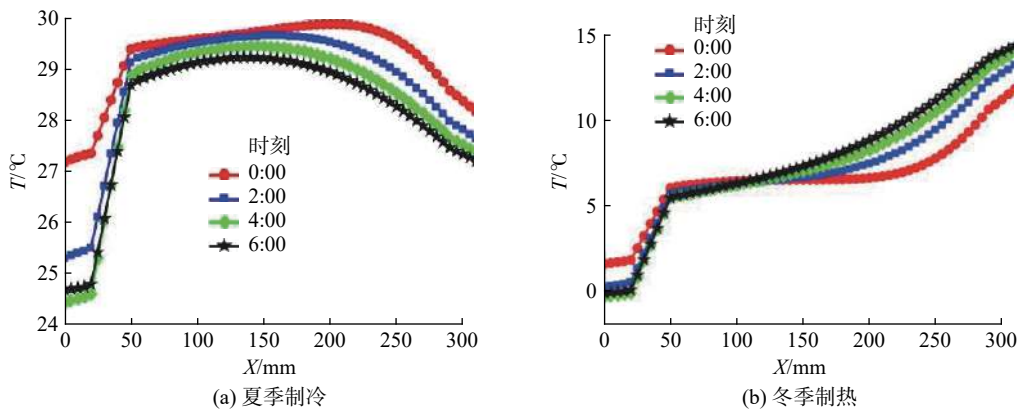


图 3 外保温挤塑聚苯乙烯墙体用能时刻温度分布

Fig.3 Temperature distribution of the external thermal insulated extruded polystyrene wall during energy consumption time

综上所述, 内保温方式墙体在夏季制冷和冬季制热用能季节的节能性均最好, 而聚氨酯是节能特性最好的保温材料。在工程实践应用中, 除了考虑保温材料的保温性能, 还应该充分考虑其成本, 进而在全生命周期内实现绿色建筑综合效益的最大化, 因此, 针对不同保温方式下多种保温材料墙体的增量综合效益展开讨论。图 4 为不同保温方式和 8 种保温材料墙体的全生命周期增量综合效益, 由于外保温墙体较差的节能特性,

其增量综合效益均为负值, 因此, 不建议在工程实践中采纳。当内保温墙体采用岩棉板、玻璃棉板和泡沫玻璃板作为保温层材料时, 尽管其具有较好的节能特性(见图 2), 但由于其材料价格较高, 因而产生了较大的增量成本, 从而使得采用这 3 种保温材料的内保温墙体增量综合效益分别为 -680.7, -872.2, -1 072 元。相比之下, 采用挤塑聚苯乙烯的内保温墙体具有全生命周期内最高的增量综合效益 1 410 元, 因此, 挤塑聚苯乙烯成

为绿色建筑工程实践中最常用的保温材料。尽管珍珠岩的节能特性远低于聚氯乙烯(见图2),由于其材料成本价格亦低于聚氯乙烯(见表1),使得这两种材料的增量综合效益接近,分别为662元和667.5元。然而作为无机保温材料,珍珠岩具有较好的耐火性能,因而更加值得在工程应用中使用。综上所述,选取夏热冬冷地区绿色建筑保温材料时应综合考虑其节能特性以及材料成本价格,采用8种常见保温材料的内保温墙体全生命周期内增量综合效益由大到小的排序为:挤塑聚苯乙烯,膨胀聚苯乙烯,聚氨酯,聚氯乙烯,珍珠岩,岩棉板,玻璃棉板,泡沫玻璃板。

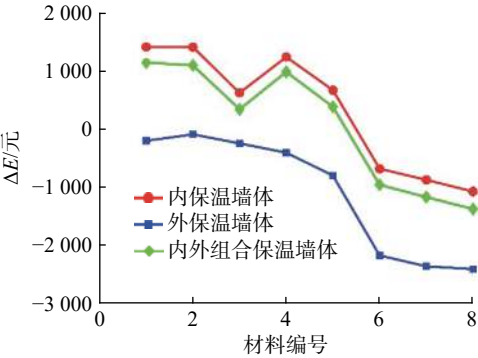


图4 保温墙体全生命周期增量综合效益

Fig.4 Comprehensive benefit of the increment during the whole life cycle of thermal insulated walls

以上的研究均是在30 mm保温层厚度的条件下进行的,随着保温层厚度的改变,一方面绿色建筑保温外墙的节能特性会发生变化,另一方面使用不同体积的保温材料会改变保温外墙的增量成本,进而影响其全生命周期的增量综合效益。基于以上研究,挤塑聚苯乙烯内保温外墙(30 mm

保温层厚度)的增量综合效益最佳,而珍珠岩内保温外墙由于其良好的耐火性和耐久性同样具有较大的工程应用价值,因此,针对挤塑聚苯乙烯内保温墙体和珍珠岩内保温墙体的最佳保温层厚度开展研究,从而实现对其增量综合效益的优化。图5展示了夏季制冷期和冬季制热期采用挤塑聚苯乙烯和珍珠岩作为保温层材料的内保温墙体的一昼夜的节能量随保温层厚度的变化趋势,可以看出,绿色建筑保温外墙的节能量随着保温层厚度的增加而增加。例如,夏季制冷期20 mm保温层厚度的珍珠岩内保温墙体的一昼夜的节能量为131.6 kJ/m²,当保温层厚度增加到60 mm时,该保温墙体一昼夜的节能量为204.8 kJ/m²。经过分析不难发现,在保温材料厚度(增量成本)增加200%的情况下,其节能量仅仅增加了55.62%。因此,绿色建筑保温外墙应当具有最佳的保温厚度使其增量效益和增量成本达到平衡,从而实现最佳的增量综合效益。图6描述了挤塑聚苯乙烯内保温墙体和珍珠岩内保温墙体增量综合效益和保温层厚度的关系曲线。当保温层厚度从20 mm增加到30 mm时,挤塑聚苯乙烯内保温墙体的增量综合效益从1368元增加到了1410元;当保温层厚度进一步增加时,其增量综合效益开始迅速下降,采用60 mm保温层厚度的挤塑聚苯乙烯内保温墙体增量综合效益仅为1206元。因此,采用30 mm保温层厚度的挤塑聚苯乙烯内保温墙体具有全生命周期内的最佳增量综合效益。同时,珍珠岩内保温墙体的最佳保温层厚度为40 mm,此时其增量综合效益为635.6元。由此可见,采用不同保温材料的内保温墙体具有不同的最佳保温层厚度,

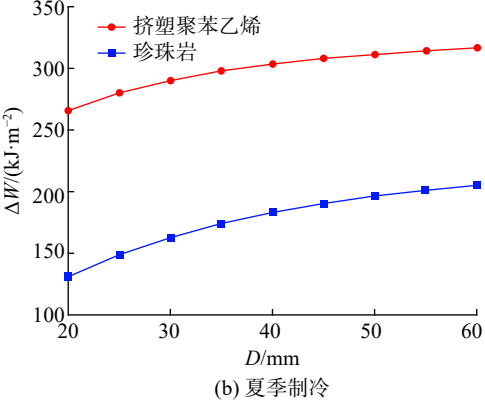
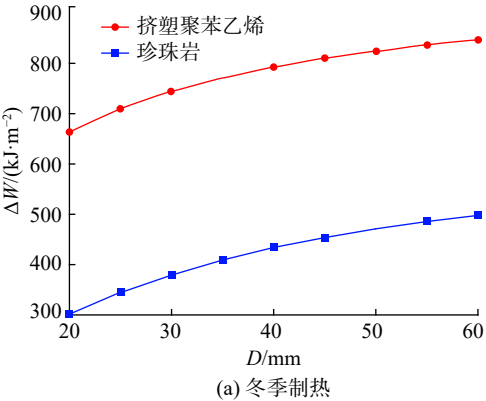


图5 不同厚度内保温墙体夏季制冷和冬季制热一昼夜节能量

Fig.5 Energy saving of internal insulated walls with different thicknesses within day and night for cooling in summer and heating in winter

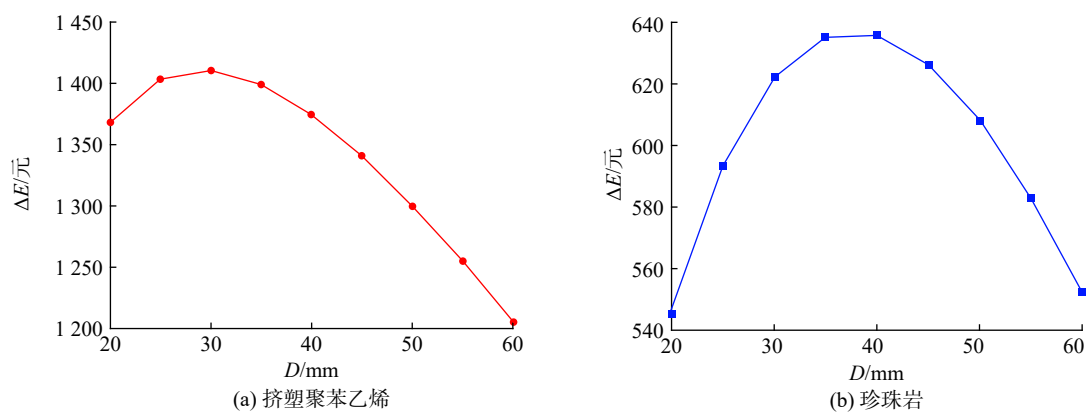


图 6 不同厚度内保温墙体增量综合效益

Fig.6 Comprehensive benefit of the increment of internal insulated walls with different thicknesses

因此，在绿色建筑项目设计时需要通过数值模拟的方法对不同保温材料墙体的节能量和增量成本进行计算，从而优化出具有最大全生命周期增量综合效益的外墙保温层厚度。

4 结 论

通过基于 GPU 加速的多松弛时间格子玻尔兹曼法求解夏热冬冷地区绿色建筑保温外墙内部的瞬态共轭传热过程，对比研究了 3 种典型绿色建筑外墙保温方式以及 8 种常见保温材料的节能特性，并对其全生命周期内的增量综合效益进行了优化，得出结论：

a. 夏热冬冷地区绿色建筑保温外墙能耗在冬季制热期大于夏季制冷期，其中，采用内保温方式的外墙节能性最佳，而外保温墙体的节能性相对较差；各种常见保温材料的节能性排序与绿色建筑所采用的保温方式(内保温、外保温以及内外组合保温)无直接关联，本文所选取的 8 种保温材料保温特性由强至弱的排序为：聚氨酯，挤塑聚苯乙烯，岩棉板，玻璃棉板，膨胀聚苯乙烯，聚氯乙烯，泡沫玻璃板，珍珠岩。

b. 绿色建筑保温外墙全生命周期的增量综合效益是决定其工程应用价值的最重要指标，研究发现，采用常见保温材料的外保温墙体的增量综合效益均为负值，不具有工程应用中的经济价值；当选取挤塑聚苯乙烯、膨胀聚苯乙烯、珍珠岩、聚氨酯以及聚氯乙烯等价格相对较低的保温材料时，内保温墙体具有一定的增量综合效益，可在绿色建筑项目中投产使用；相反，岩棉板、玻璃棉板和泡沫玻璃板的增量成本较大，在全生

命周期内不具有经济效益。

c. 绿色建筑保温外墙的保温层厚度是影响其节能特性的重要因素，数据表明，绿色建筑相比于传统建筑在夏季制冷期和冬季制热期一昼夜的节能量随着其保温层厚度的增加而加强。然而保温层厚度的增加会引起绿色建筑增量成本的加大，因此，保温层的最佳节能厚度并不是其最佳增量综合效益厚度。为了达到绿色建筑全生命周期增量综合效益的最大化，在设计阶段需要通过数值模拟等方法获得特定保温方式和保温材料下绿色建筑外墙保温层的最优厚度，进而为工程实践提供科学指导。

参考文献：

[1] ÇOMAKLI K, YÜKSEL B. Optimum insulation thickness of external walls for energy saving[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(4): 473–479.

[2] CABEZA L F, CASTELL A, MEDRANO M, et al. Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 42(5): 630–636.

[3] ALTAN DOMBAYCI O. The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(11): 3855–3859.

[4] OZEL M. Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(7): 2429–2435.

[5] ZHU P Y, HUCKEMANN V, FISCH M N. The optimum thickness and energy saving potential of external wall insulation in different climate zones of China[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 21: 608–616.

[6] PAN D M, CHAN M Y, DENG S M, et al. The effects of

- external wall insulation thickness on annual cooling and heating energy uses under different climates[J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 313–318.
- [7] FENG Y. Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36(12): 1309–1312.
- [8] 汤莉, 汤广发. 三种墙体保温隔热性能的数值分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 31–34.
- [9] YU J H, YANG C Z, TAN L W, 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: 2520–2529.
- [10] 王厚华, 庄燕燕, 吴伟伟, 等. 几种复合墙体构造的热工性能数值分析[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 126–132.
- [11] 钱晓倩, 朱耀台. 基于间歇式、分室用能特点下建筑耗能的基础研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 392–399.
- [12] CASTRO-LACOUTURE D, SEFAIR J A, FLÓREZ L, et al. Optimization model for the selection of materials using a LEED-based green building rating system in Colombia[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(6): 1162–1170.
- [13] TATARI O, KUCUKVAR M. Cost premium prediction of certified green buildings: a neural network approach[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(5): 1081–1086.
- [14] TSAI W H, YANG C H, CHANG J H, et al. An activity-based costing decision model for life cycle assessment in green building projects[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 238(2): 607–619.
- [15] 马素贞, 孙大明, 邵文晔. 绿色建筑技术增量成本分析[J]. *建筑科学*, 2010, 26(6): 91–94, 100.
- [16] 李静, 田哲. 绿色建筑全生命周期增量成本与效益研究[J]. *工程管理学报*, 2011, 25(5): 487–492.
- [17] 王建廷, 王茂智. 基于消费者需求视角的绿色建筑增量成本效益分析[J]. *工程管理学报*, 2015, 29(5): 6–11.
- [18] 柴宏祥, 胡学斌, 彭述娟. 绿色建筑节水项目全生命周期综合效益经济模型[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(9): 113–117.
- [19] 王庭阳, 汤民, 乐园. 当前绿色建筑实施现状调研分析[C]// 第九届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集. 北京: 中国城市科学研究会, 2013.
- [20] CHEN S Y, DOOLEN G D. Lattice Boltzmann method for fluid flows[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1998, 30: 329–364.
- [21] AIDUN C K, CLAUSEN J R. Lattice-Boltzmann method for complex flows[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, 42: 439–472.
- [22] HUANG R Z, WU H Y. Phase interface effects in the total enthalpy-based lattice Boltzmann model for solid-liquid phase change[J]. *Journal of Computational Physics*, 2015, 294: 346–362.
- [23] REN Q L, CHAN C L. GPU accelerated numerical study of PCM melting process in an enclosure with internal fins using lattice Boltzmann method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 100: 522–535.
- [24] REN Q L, CHAN C L. Numerical study of double-diffusive convection in a vertical cavity with Soret and Dufour effects by lattice Boltzmann method on GPU[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93: 538–553.
- [25] 阮方, 钱晓倩, 朱耀台, 等. 分室间歇用能对墙体内保温节能效果的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(1): 1–7.
- [26] 中国建筑科学研究院. GB 50368–2005, 住宅建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [27] 张秦, 路新瀛. 建筑工程全寿命周期成本分析中基准折现率分区域取值[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(6): 579–584.
- [28] 张建府. 碳捕集与封存技术 (CCS) 成本及政策分析[J]. *中外能源*, 2011, 16(3): 21–25.
- [29] 李红祥, 王金南, 葛察忠. 中国“十一五”期间污染减排费用-效益分析[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(8): 2270–2276.
- [30] 刘秀杰. 基于全寿命周期成本理论的绿色建筑环境效益分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 26–27.
- [31] 陈雪. 电力投资需求侧管理的经济价值和社会价值[J]. *商场现代化*, 2012(8): 179–181.
- [32] BALLIM Y. A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26(6): 695–703.

(编辑: 石 瑛)