

夏热冬冷地区住宅外墙内外保温性能分析

程 飞, 张 旭, 苏 醒

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 以上海地区某卧室作为研究对象, 采用数值计算方法, 比较了两种间歇运行模式下夏热冬冷地区住宅外墙外保温和外墙内保温两种保温方式的性能. 从空调开启时刻室内温度分布来看, 外保温的性能优于内保温; 从室内热响应特性的角度出发, 采用内保温的房间夏季降温(冬季升温)速率较快; 从全年能耗的角度出发, 采用外保温房间的空调能耗低于采用内保温房间的空调能耗; 从室内热舒适的角度出发, 采用外保温的房间在空调关闭后热舒适性更好.

关键词: 外墙保温; 间歇运行; 能耗; 热舒适

中图分类号: TU111

文献标志码: A

Thermal Performance Analysis of Internal and External Insulation for Exterior Walls of Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone

CHENG Fei, ZHANG Xu, SU Xing

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A bedroom in Shanghai was used for numerical calculations and two-operation modes were assumed. The energy consumed for heating and cooling and the thermal comfort during the off-periods were measured. The results show that the temperatures are closer to the design temperatures at the air conditioner (AC) start moment when placing the insulation layers on the outside of the exterior walls. The temperature variation speeds of the bedroom are faster when placing the insulation layers on the inside of the exterior walls. Taking the energy used during the AC on-periods and the thermal comfort during the off-periods into considerations, the thermal performance is better when placing the insulation layers on the outside of the exterior walls.

Key words: insulation of exterior wall; intermittent operation; energy consumption; thermal comfort

住宅空调能耗是住宅建筑能耗的主要组成部分, 其中由外墙传热所形成的空调负荷是住宅空调负荷的主要来源. 因此, 改善建筑物外墙的热工性能是降低住宅空调能耗的主要途径之一. 空调间歇运行是我国夏热冬冷地区主要的用能方式. 目前, 传统的墙体保温路线主要是基于北方地区供暖所形成的. 对于采用间歇运行的建筑而言, 合理的墙体保温形式目前仍存在很多争议.

刘晓庆^[1]通过实测得出外墙外保温更有利于降低夏热冬冷地区的住宅空调能耗. Bojic 等^[2]基于 HTB2 能耗模拟平台计算得出, 在间歇运行模式下, 采用外墙内保温形式的香港高层住宅制冷能耗更低. 现阶段, HTB2^[3]以及 EnergyPlus 等能耗模拟软件对非透明围护结构处理的前提是墙体热力系统处于零初始条件, 而间歇运行模式下的非透明围护结构的初始状态是由上一周期空调运行-间歇阶段各影响因素决定的. 阮方等^[4]采用二维模型比较了间歇运行模式下外墙外保温、内墙不保温和所有墙体内保温两种围护结构构型建筑物的空调能耗. 结果显示, 采用所有墙体内保温的方式更有利于降低空调能耗. 然而, 对于外墙的保温形式与空调能耗的关联在该文中没有阐述. 潘黎等^[5]以外墙-空气二元系统作为研究对象, 通过实验研究得出外墙内保温的形式更有利于降低建筑物的空调能耗. Barrios 等^[6]建立了墙体的一维模型, 通过计算得出采用外墙外保温方式的建筑物空调能耗低于采用外墙内保温方式的建筑物空调能耗. 在间歇运行模式下, 房间内其他蓄热体对空调能耗的影响也是不可忽略的, 单一外墙的温变及能耗特性并不能完全反映外墙保温形式与空调能耗之间的关联.

此外, 目前已有的研究结论主要是基于典型天气所得出的, 而瞬态传热条件下, 墙体克服初始条件的影响需要 72~96 h. 此外, 典型天气并不能代表该

收稿日期: 2016-09-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0700100)

第一作者: 程 飞(1988—), 女, 博士生, 主要研究方向为建筑围护结构热湿传递. E-mail: chengfei0046@126.com

通讯作者: 张 旭(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建筑节能. E-mail: zhangxu_hvac@tongji.edu.cn

地区的气候状况,建筑物的空调能耗取决于所在地区的气候条件而非某天的气温变化.针对这种情况,本文采用数值计算的方法,以上海地区典型气象年的气象参数作为输入,计算整个供冷、供热季空调能耗随墙体保温形式的变化.

1 数值计算模型

选取上海地区某住宅的卧室 A 作为研究对象,该住宅位于建筑的中间楼层.卧室 A 的几何构型如图 1 所示,室内空间净尺寸为:4.1 m(长)×3.5 m(宽)×2.7 m(高).卧室 A 有西外墙和南外墙两面外墙.建筑物围护结构的热工参数如表 1 所示.

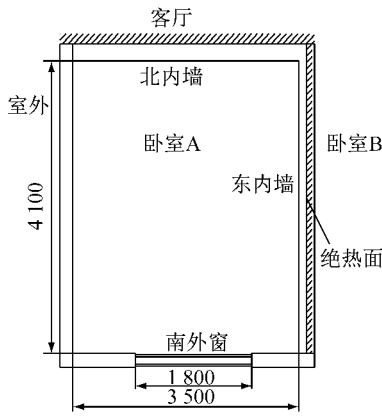


图 1 卧室 A 布局示意图(单位:mm)

Fig.1 The plan of bedroom A(unit: mm)

表 1 围护结构的热工参数

Tab.1 Thermal parameters for building envelopes

部位	材料	厚度/ mm	热导率/ (W·(m· °C) ⁻¹)	密度/ (kg· m ⁻³)	比热容/ (J·(kg· °C) ⁻¹)
外墙基层	钢筋混凝土	200	1.74	2 500	920
保温层	挤塑聚苯乙烯保温板	30	0.03	25	2 376
内墙	粉煤灰蒸养砖	200	0.62	1 600	1 051
楼板	钢筋混凝土	200	1.74	2 500	920

本文主要考虑三种不同的外墙构造,分别为外墙外保温、外墙内保温、外墙无保温.卧室 A 空调的两种运行模式^[7-8]如表 2 所示.

表 2 卧室 A 空调运行时间

Tab.2 Operation time of bedroom A for air-conditioner

季节 模式	运行时间		空调季持 续时间
	模式 1	模式 2	
夏季	22:00-24:00	22:00-次日 2:00	6 月 15 日- 9 月 15 日
冬季	22:00-24:00	22:00-次日 2:00	12 月 1 日- 3 月 20 日

为便于计算,假设如下:①楼上与楼下住户的空

调使用习惯与该住户一致;②卧室 A 与卧室 B 的空调使用场景一致;③根据相关文献^[9],假设客厅空调在卧室空调使用前开启且卧室空调与客厅空调不同时使用;④不考虑家具等构建的蓄放热特性对空调能耗的影响;⑤不考虑灯光、家用电器等形成的空调负荷;⑥建筑物的材料物性均为常数,不随温度变化;⑦不考虑湿传递的影响;⑧卧室使用时间为每天 22:00—次日 6:00.

卧室 A 外墙的换热过程可以视为多层平壁的一维瞬态导热过程,如图 2 所示,其导热微分方程为

$$\rho_{Mj} c_{Mj} \frac{\partial T_{Mj}}{\partial \tau} = \lambda_{Mj} \frac{\partial^2 T_{Mj}}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: x 为导热传递方向; T_{Mj} 为外墙 M 第 j 层墙体的温度,°C; τ 为时间,s; ρ_{Mj} 为外墙 M 第 j 层墙体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_{Mj} 为外墙 M 第 j 层墙体的比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{°C})^{-1}$; λ_{Mj} 为外墙 M 第 j 层墙体的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{°C})^{-1}$.

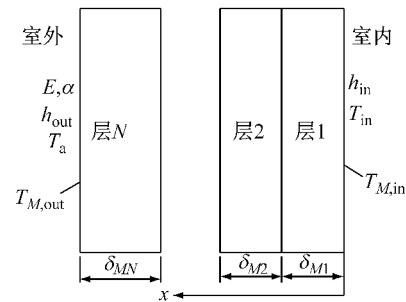


图 2 外墙导热示意图

Fig.2 Heat transfer in the exterior wall

墙体层与层之间采用温度及热流连续分布处理,即

$$T_{Mj} = T_{M(j+1)} \quad (2)$$

$$\lambda_{Mj} \frac{\partial T_{Mj}}{\partial x} = \lambda_{M(j+1)} \frac{\partial T_{M(j+1)}}{\partial x} \quad (3)$$

外墙 M 外表面与内表面均为第三类边界条件,即

$$-\lambda_{M1} \frac{\partial T_{M1}}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{in} (T_{M,in} - T_{in}) \quad (4)$$

$$-\lambda_{MN} \frac{\partial T_{MN}}{\partial x} \Big|_{x=\sum \delta_{Mj}} = h_{out} (T_{sa} - T_{M,out}) \quad (5)$$

式中: δ_{Mj} 为外墙 M 第 j 层的厚度; $T_{M,in}$ 和 $T_{M,out}$ 分别为外墙内外表面的温度,°C; h_{in} 和 h_{out} 分别为外墙内外表面传热系数, $h_{in} = 8.7 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{°C})^{-1}$, $h_{out} = 20 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{°C})^{-1}$ ^[10]; T_{sa} 为室外逐时综合温度,°C; T_{in} 为室内空气温度,°C. T_{sa} 的值可按下式计算得出^[11]:

$$T_{sa} = T_a + \frac{aE}{h_{out}} \quad (6)$$

式中: T_a 为室外逐时干球温度, $^{\circ}\text{C}$; E 为垂直面上的逐时太阳辐照度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, α 为建筑物外墙外表面的太阳辐射吸收因数, 本文中取 0.5 (黄灰色).

对于内墙、楼板等建筑物的任一非透明内壁 i , 其控制方程为

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \quad (7)$$

式中: T_i 为非透明内壁 i 的温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ_i 为非透明内壁 i 的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_i 为非透明内壁 i 的比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$; λ_i 为非透明内壁 i 的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$.

内壁 i 近卧室 A 一侧表面为第三类边界条件, 即

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{\text{in}} (T_{i,\text{so}} - T_{\text{in}}) \quad (8)$$

式中: $T_{i,\text{so}}$ 为非透明内壁 i 近卧室 A 一侧的内壁面温度, $^{\circ}\text{C}$.

假设住户与楼上、楼下相邻住户的空调使用场景相同, 且卧室 B 与卧室 A 的空调使用模式相同, 则对于楼板以及东内墙, 可得

$$x = \delta_i / 2, \quad -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=\delta_i/2} = 0 \quad (9)$$

式中: δ_i 为非透明内壁 i (北内墙除外) 的厚度, m .

假设客厅空调早于卧室空调使用, 则可以近似认为北内墙为绝热面, 则

$$-\lambda_{\text{nor}} \frac{\partial T_{\text{nor}}}{\partial x} \Big|_{x=\delta_{\text{nor}}} = 0 \quad (10)$$

式中: T_{nor} 为北内墙的温度, $^{\circ}\text{C}$; δ_{nor} 为北内墙的厚度, m ; λ_{nor} 为北内墙的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$.

根据有关研究^[12], 除射流区外, 房间内的温度场可以视为均匀的. 假设房间内温度场是均匀的, 则对于室内空气, 其导热微分方程为

$$\frac{dT_{\text{in}}}{dt} = \frac{\Phi}{\rho_{\text{in}} c_{\text{in}}} \quad (11)$$

式中: ρ_{in} 为空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; Φ 为空气内热源, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$; c_{in} 为空气的比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$.

将边界上的热交换量折算成物体的体积热源, 则

$$\Phi V = \sum h_{\text{in}} A_M (T_{M,\text{in}} - T_{\text{in}}) + \sum h_{\text{in}} A_i (T_{i,\text{so}} - T_{\text{in}}) + Q_{\text{AC}} + Q_{\text{R}} + Q_{\text{win}} + Q_{\text{le}} + Q_{\text{occ}} \quad (12)$$

式中: V 为房间的体积, m^3 ; A_M 为外墙 M 的内壁面面积, m^2 ; A_i 为房间非透明内壁 i 近卧室 A 的壁面面积, m^2 ; Q_{AC} 为分体式空调提供的显热量, W ; Q_{R} 为太阳辐射得热量, W ; Q_{le} 为由渗透引起的显热得热量, W ; Q_{win} 为玻璃窗的传热量, W ; Q_{occ} 为人员发热

量, 假设卧室内人数为 2 人, $Q_{\text{occ}} = 140 \text{ W}$.

由于玻璃窗的热容远小于墙体热容, 故通过玻璃窗的传热量

$$Q_{\text{win}} = K_{\text{win}} A_{\text{win}} (T_a - T_{\text{in}}) \quad (13)$$

式中: K_{win} 为玻璃窗传热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$; A_{win} 为玻璃窗面积, m^2 .

分体式空调提供的显热量 Q_{AC} 可以按照式(14)和(15)计算, 如下所示:

当供冷时, 显热量

$$Q_{\text{AC}} = -Q_{\text{AC,L}} K_{\text{SHR}} \quad (14)$$

式中: K_{SHR} 为空调器显热比, 考虑夏热冬冷地区夏季高湿的特点, 设备的显热比取 0.7^[13]; $Q_{\text{AC,L}}$ 为空调器额定供冷量, W .

当供热时, 显热量^[9]

$$Q_{\text{AC}} = K_2 Q_{\text{AC,H}} \quad (15)$$

式中: K_2 为除霜修正因数, 假设空调器冬季每小时除霜两次, $K_2 = 0.8$ ^[14]; $Q_{\text{AC,H}}$ 为空调器的额定供热量, W .

空调器的额定制冷量与额定制热量均取 2 500 W. 空调器为定速空调器, 室内冬季设定温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 控制死区为 19~21 $^{\circ}\text{C}$, 夏季设定温度为 26 $^{\circ}\text{C}$, 控制死区为 25~27 $^{\circ}\text{C}$.

太阳辐射得热量按照下式计算:

$$Q_{\text{R}} = K_{\text{SW}} E_{\text{sou}} \quad (16)$$

式中: K_{SW} 为外窗的综合遮阳因数, 夏季取 0.4^[15], 冬季取 0.8; E_{sou} 为南向垂直面太阳辐照度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

通过渗透引起的显热交换量 Q_{le} 按下式进行计算:

$$Q_{\text{le}} = \frac{\rho_{\text{in}} c_{\text{in}} n V}{3 600} (T_a - T_{\text{in}}) \quad (17)$$

式中: n 为房间的换气次数, 在 22:00—次日 6:00 期间取 0.35 次 $\cdot \text{h}^{-1}$ ^[16], 其余时间取 0.6 次 $\cdot \text{h}^{-1}$.

模拟中所采用的天气参数均使用 1997—2003 年期间上海典型气象年的数据^[17].

2 结果及分析

2.1 运行模式 1 下内外保温室内空调阶段的温变特性

对于间歇运行的空调系统而言, 由于空调设备需要消除房间的瞬时得热量以及在非空调时间系统的蓄热量, 因此空调开启时刻的温度分布, 空调开启后室内空气的温变特性是评价围护结构性能的一个重要指标.

图 3 为三种类型的墙体在运行模式 1 条件下开启时刻房间内的初始温度. 从图 3a 中可以看出, 在夏季空调开启时刻, 采用外保温墙体的房间初始温度普遍低于采用内保温墙体的房间温度, 整个夏季在运行模式 1 条件下, 外保温墙体的房间初始时刻温度比内保温墙体平均低 0.53 °C. 从图 3b 中可以看出, 整个冬季在运行模式 1 条件下, 采用外保温墙体房间的初始时刻温度普遍高于采用内保温墙体房间的温度, 不保温墙体的房间空调开启时刻的初始温度最低. 采用外保温墙体房间的初始温度比采用内保温墙体房间的初始温度平均高出 1 °C 左右, 而内保温比无保温房间初始温度高于约 4 °C. 从图中可以看出, 从开启时刻房间的初始温度而言, 不论冬季还是夏季, 外保温的性能均优于内保温, 并且墙体保温作用冬季比夏季明显.

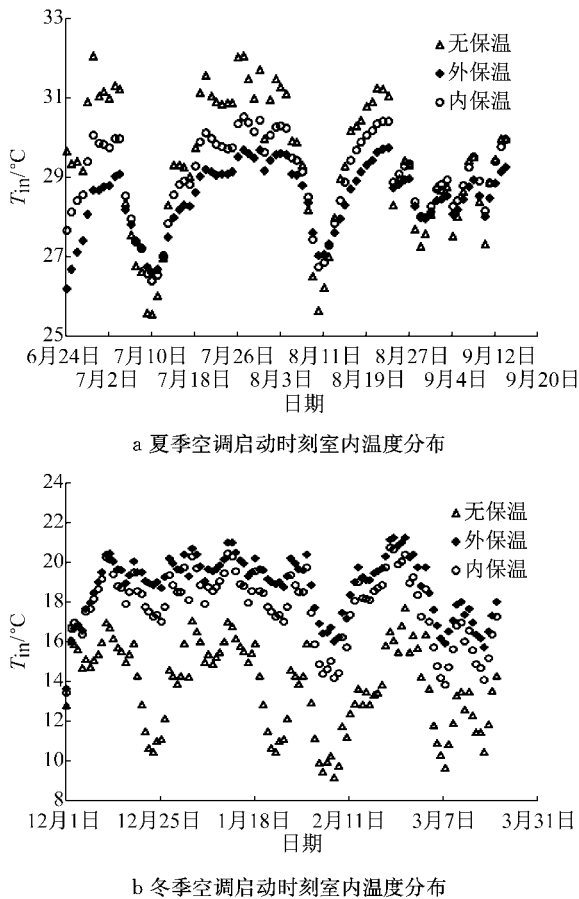


图 3 运行模式 1 下空调启动时刻室内温度分布

Fig.3 Indoor temperature distribution at the AC start moment under operation mode 1

图 4a 为采用不同类型外墙的房间在夏季最热天下、空调运行时间段内, 房间内温度的变化特性. 图 4b 为采用不同类型外墙在冬季最冷天下、空调运行时间段内, 房间内温度的变化特性. 从图 4a 中可

以看出, 相较于采用内保温墙体的房间, 采用外保温墙体的房间初始时刻温度较低, 但采用内保温墙体房间内温度的下降速率较快, 在空调开启后 10 min 内, 即能达到室内允许的温度值. 由图 4b 中可以看出, 在冬季最冷天时, 采用外保温墙体房间的初始温度明显高于采用内保温墙体房间的初始温度, 在空调开启后 5 min 内即可上升至 19 °C, 而对于采用内保温墙体的房间而言, 由于房间的升温速率较快, 在空调开启 15 min 后也可以达到 19 °C.

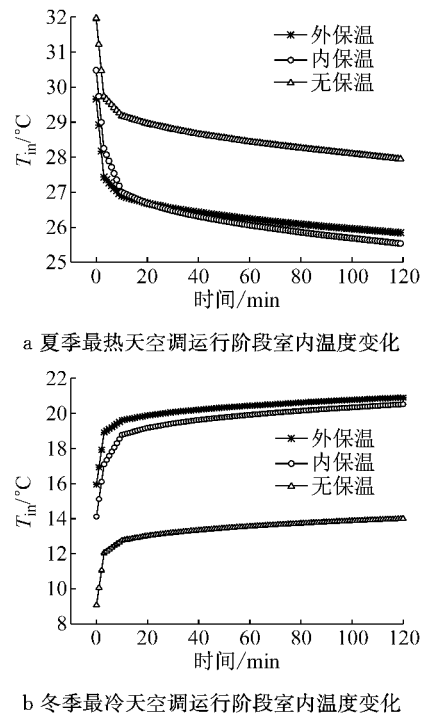


图 4 运行模式 1 下最不利工况空调运行阶段室内温变特性 Fig.4 Indoor air temperature variations during air-conditioning period in the worst conditions under operation mode 1

从图 4 中可以看出, 在夏季, 采用内保温墙体的房间降温速率更快, 在冬季, 采用内保温墙体的房间升温速率更快. 内保温墙体有着较好的响应特性, 可以快速达到房间的设定温度.

2.2 内外保温间歇运行模式下空调能耗的对比

图 5 为空调运行模式 1 下, 采用不同类型外墙房间的空调能耗. 图 6 为空调运行模式 2 下, 采用不同类型外墙房间的空调能耗. 从图 5 可以看出, 在每天空调运行 2 h 的情况下, 夏季采用外墙外保温房间的供冷能耗要高于采用外墙内保温房间的空调能耗. 当空调运行持续时间延长至 4 h 后(见图 6), 此时外墙外保温房间的供冷能耗要低于外墙内保温房间的供冷能耗. 对于冬季而言, 在两种空调运行模式下, 外墙外保温房间的供热能耗均低于外墙内保温

房间的供热能耗. 从全年总能耗的角度出发,采用外墙外保温房间的空调能耗均低于采用外墙内保温房间的空调能耗.

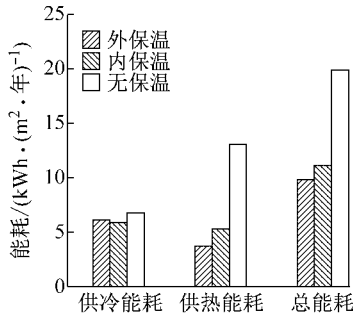


图 5 运行模式 1 下采用不同类型外墙房间的空调能耗
Fig.5 Energy consumption for different exterior walls under operation mode 1

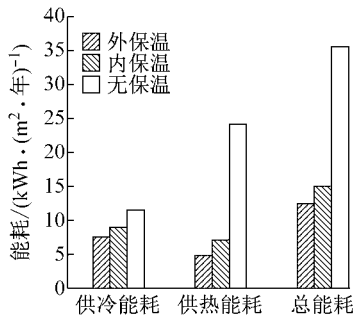


图 6 运行模式 2 下采用不同类型外墙房间的空调能耗
Fig.6 Energy consumption for different exterior walls under operation mode 2

从能耗的角度而言,外墙外保温的性能要优于外墙内保温. 此外,从图 5 和 6 均可以看出,在两种空调运行模式下,对外墙进行保温可以大幅降低冬季供热能耗,对降低夏季制冷能耗的作用不如冬季明显.

2.3 内外保温夏季以及冬季的非空调时间不保证率

对于间歇运行的空调系统而言,由于空调关闭后人员依旧停留在房间内,因此空调关闭后室内环境的热舒适度也是评价围护结构性能的一个重要指标. 为定量反映空调关闭后至人员离开时间段内室内热舒适度,定义 ΔT_s 为夏季室内热舒适偏离温差, ΔT_s 的定义式为

$$\Delta T_s = T_{in} - T_{ap} \quad (18)$$

式中: T_{ap} 为夏季非空调工况下 80% 人员可接受热舒适温度的上限值, $^{\circ}\text{C}$.

有研究指出,人体的新陈代谢率与冷热感觉并非成线性关系^[18],则 T_{ap} 可近似按下式^[19]计算:

$$T_{ap} = 0.31 \bar{T}_{pma} + 21.3 \quad (19)$$

式中: \bar{T}_{pma} 为夏季室外月平均温度.

定义 ΔT_w 为冬季室内热舒适偏离温差, ΔT_w 的定义式为

$$\Delta T_w = T_{in} - T_{lim} \quad (20)$$

式中: T_{lim} 为冬季人员热舒适温度的下限, $T_{lim} = 15^{\circ}\text{C}$.

根据 ΔT_s 和 ΔT_w 的定义式可以看出, ΔT_s 越小,夏季室内的热舒适度越好; ΔT_w 越大,冬季室内的热舒适度越好.

图 7 为空调关闭后至人员离开房间这段时间内,夏季室内环境热舒适度分布的四分位数图.

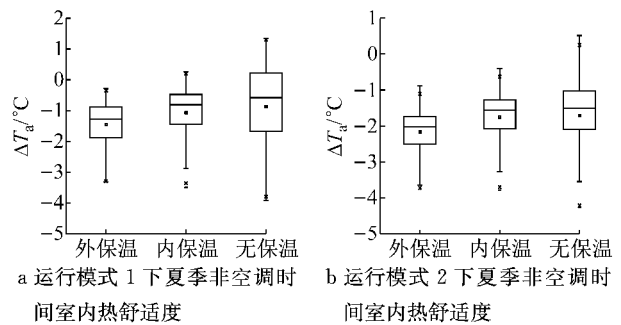


图 7 夏季非空调时间室内热舒适度四分位数图

Fig.7 Box chart of thermal comfort during the off-period of the bedroom in summer

由图 7 可以看出,在夏季,在空调关闭至人员离开时间段内,采用外墙外保温房间的室内温度更低,且该时间段内所有温度均没有超出 Ashare Standard 55 所给出的 80% 人员可接受热舒适温度的上限值,而采用外墙内保温的房间,在运行模式 1 下,部分时间室内温度超出了舒适温度的限值. 对于外墙无保温的房间,在运行模式 1 下,在空调关闭至人员离开时间段内,超过 25% 的时间室内温度超出了舒适温度的范围. 在运行模式 2 下,采用外墙外保温和外墙内保温均能保证室内热环境处于舒适温度范围内.

图 8 为空调关闭后至人员离开房间这段时间

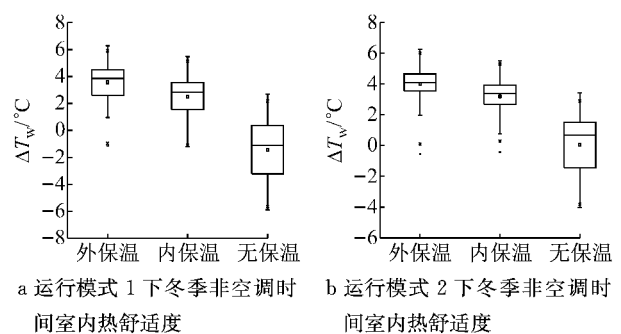


图 8 冬季非空调时间室内热舒适度四分位数图

Fig.8 Box chart of thermal comfort during the off-period of the bedroom in winter

内,冬季室内环境热舒适度分布的四分位数图。

从图 8 可以看出,在冬季采用外墙外保温的房间 ΔT_w 值的中位数及下四分位数均高于采用外墙内保温的房间。采用外墙外保温和外墙内保温的房间在两种运行模式下都能够维持较好的室内热舒适度,而对于无保温墙体,在两种运行模式下、空调关闭至人员离开时间段内,超过 30% 的时间室内温度均超出了舒适温度的范围。

因此,从非空调时间室内人员的热舒适角度来讲,采用外墙外保温和外墙内保温都能够较好地保证室内的热舒适程度。在两种运行模式下,从全年室内热舒适的角度出发,外墙外保温的性能要优于外墙内保温。

3 结论

(1) 对外墙进行保温可以有效地降低住宅建筑的空调能耗,提高室内的热舒适水平。对于卧室而言,墙体保温的作用效果冬季比夏季更明显。

(2) 从空调开启时刻室内温度分布来看,外墙外保温的性能优于外墙内保温;从室内热响应特性的角度出发,采用外墙内保温的房间夏季降温(冬季升温)速率较快。

(3) 从全年能耗的角度出发,采用外墙外保温房间的空调能耗低于采用外墙内保温房间的空调能耗。

(4) 从室内热舒适度的角度出发,采用外墙外保温的房间在空调关闭后热舒适性更好。

参考文献:

[1] 刘晓庆. 间歇空调运行模式下住宅墙体热工性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
LIU Xiaoqing. Study on the thermal performance of residential walls in intermittent air conditioning run mode [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

[2] BOJIC M, YIK F, SAT P. Influence of thermal insulation position in building envelope on the space cooling of high-rise residential buildings in Hong Kong[J]. *Energy & Buildings*, 2001, 33(6):569.

[3] 李晓俊. 基于能耗模拟的建筑节能整合设计方法研究[D]. 天津:天津大学, 2013.
LI Xiaojun. Study on integrative building energy-efficient design through thermal simulation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.

[4] 阮方, 钱晓倩, 朱耀台, 等. 分室间歇用能对墙体内外保温节能效果的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(1):1.
RUAN Fang, QIAN Xiaoqian, ZHU Yaotai, *et al.* Wall

insulation effect on building energy efficiency with the intermittent and compartmental energy consuming method[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2016, 50(1):1.

[5] 潘黎, 徐强. 上海地区外墙内保温技术的适宜性分析[J]. *建筑科学*, 2014, 30(12):71.
PAN Li, XU Qiang. Suitability analysis on interior thermal insulation technology of building exterior walls in Shanghai[J]. *Building Science*, 2014, 30(12):71.

[6] BARRIOS G, HUELSZ G, ROJAS J. Thermal performance of envelope wall/roofs of intermittent air-conditioned rooms[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 40(4):1.

[7] 何莉莎. 夏热冬冷地区内外综合保温体系节能效果分析:基于间歇式分室用能模式[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
HE Lisha. Analysis of energy savings produced by the inside and outside insulating compound system in hot summer and cold winter areas; based on intermittent and loculose energy use [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[8] 李哲. 中国住宅中人的用能行为与能耗关系的调查与研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
LI Zhe. Investigation and analysis of the relationship between residential energy use behavior and energy consumption in China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.

[9] 李子爱, 石文星, 王宝龙, 等. 我国住宅空调发生时间调查研究[C]//第十二届全国电冰箱(柜)、空调器及压缩机学术交流大会论文集. 合肥:中国制冷学会, 2014:34-39.
LI Ziai, SHI Wenxing, WANG Baolong, *et al.* Investigation of air conditioning time for residential buildings in China[C]//The 12st China Refrigerator, Air-conditioner and Compressor Conference Proceedings. Hefei:CAR, 2014:34-39.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings, GB 50736—2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.

[11] THRELKELD J L. Thermal environment engineering[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970.

[12] 李惠. 分体式空调制热运行时室内温度场流场的特性研究[D]. 天津:天津商业大学, 2013.
LI Hui. Indoor temperature and flow field characteristics of an indoor split-type air conditioner on heating [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2013.

[13] 王倩. 房间空调器除湿特性与应用基础研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
WANG Qian. Study on dehumidification characteristics and application fundamentals of room air conditioners [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 采暖通风与空气调节设计规范:GB 50019—2003[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of heating, ventilation and air conditioning, GB 50019—2003[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.