

引用格式:Wu Yongcheng, He Wentao. Simulation Study on the Indoor Thermal Environment in Winter of Passive Solar House in Rural Areas in Lanzhou Based on ECOTECH and Optimization Strategy[J]. Journal of Gansu Sciences, 2020, 32(4): 56-63. [吴永诚, 贺文涛. 基于 ECOTECH 兰州乡村民居被动式太阳房冬季室内热环境模拟研究及优化策略[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(4): 56-63.]
doi:10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2020.04.011.

基于 ECOTECH 兰州乡村民居被动式太阳房 冬季室内热环境模拟研究及优化策略

吴永诚, 贺文涛

(兰州理工大学设计艺术学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要 近几年被动式太阳能技术在乡村民居上的应用成为了我国乡村民居供暖技术研究的主流。被动式太阳房通过建筑物朝向和周围环境的合理布置, 内部空间及外部形体的巧妙设计, 建筑材料、结构的恰当选择等技术措施, 在不消耗或少消耗一次能源的前提下, 利用太阳热能解决建筑物采暖问题, 因此具有环境污染少、能源消耗低、结构简单、造价较低的应用效果。研究基于 ECOTECH 数值模拟技术, 以兰州地区气象、民居形式、村民生活习惯为条件, 针对乡村集热蓄热墙式被动房的传热过程建立了集热蓄热墙传热过程数学模型, 模拟了冬季室内热环境, 并传统砖混乡村民居冬季室内热环境进行了对比, 得出集热蓄热墙一定程度上可以改善乡村农宅的室内热环境, 但是还不足以满足人体热舒适的要求, 即使在加设外保温的情况下, 围护结构的失热量依然很高。针对分析结果, 研究提出了通过改进围护墙体材料、增加集热面积、增加辅助热源的方法进一步改善乡村民居的室内热环境。

关键词 兰州乡村民居; 集热蓄热墙; 被动式太阳房; 室内热环境

中图分类号: TU111.4⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2020)04-0056-08

随着 2017 年 10 月习近平同志在我国“十九大”会议上提出“实施乡村振兴战略”, 乡村的发展得到了极大地关注。实施乡村振兴战略是建设美丽中国的关键举措, 其中农村居民居住环境的改善, 是振兴乡村的关键。在我国北方, 大部分农村地区距离城市遥远, 没有配套的集中供暖管网, 导致农户多采用燃烧煤炭、秸秆等高能耗或高污染的采暖方式。为了解决北方农村冬季供暖能耗高、环境污染严重的问题, 我国许多学者研究并探讨了利用太阳能采暖的技术, 其中被动式太阳能采暖技术因具有技术成本低、可行性高、无需消耗一次能源等优点, 近年来成为我国建筑节能技术的重点研究对象以及推广对象。

孙丹等^[1]首先介绍了集热蓄热墙式被动太阳能建筑的工作原理, 并从理论和技术 2 个方面阐述其

理论研究进展; 其次总结了百叶式、多孔式等类型集热蓄热墙式被动太阳能建筑的技术研究现状; 最后分析了在应用上存在不能同时满足冬季供暖、夏季制冷以及集热蓄热墙式被动太阳房受环境因素影响明显等问题, 并且展望了未来的发展趋势。王登甲等^[2-4]对青藏高原地区的集热蓄热墙式被动房的室内外空气温度、水平面和南立面太阳直射辐射强度、集热蓄热墙夹层空气温度等参数进行测试, 通过测试对比发现, 集热蓄热墙式被动太阳房具有较好的集热和蓄热性能。陈晨等^[5]将集热蓄热墙物理模型简化, 采用数值模拟和实测验证相结合的方法研究了不同保温构造形式下墙体的动态集热供热特性, 发现外保温构造的集热蓄热墙, 其对流供热量受太阳辐照变化敏感, 昼间瞬时供热量大, 集热效率最高; 而采用内保温、无保温时, 二者规律相似, 墙体蓄

收稿日期: 2019-01-03; 修回日期: 2019-08-03

基金项目: 甘肃绿色科技攻关项目(JK2017-31)

作者简介: 吴永诚(1956-), 男, 甘肃景泰人, 教授, 研究方向为绿色建筑及建筑节能技术。E-mail: 790514577@qq.com

热能力强,供热量在时间上分布更为均匀。郭龙^[6]对山东菏泽地区已建新农村住宅的冬季能耗及室内热舒适情况进行问卷调查,并对当地典型的两户新农宅的冬季和夏季的室内热环境进行测试,得出建筑形式、围护结构材料、建筑布局会影响建筑能耗的结论,并且发现这种差异性是由农民经济水平以及能源获取形式直接影响的。许兰广等^[7]根据兰州地区太阳辐射的特点,利用 Fluent 软件对相变集热蓄热墙进行了数值模拟,通过与传统集热蓄热墙的对比较,证明了相变集热蓄热墙在兰州地区具有应用的可行性及舒适性。

国内众多学者针对乡村民居室内热环境及被动式太阳房做了大量研究,并且针对不同气候分区的地区做了相应的优化设计及研究,许多被动式太阳能建筑项目已在各地开展实施,但是兰州地区的农村被动式太阳能住宅普及率较低,针对兰州气候条件下的被动式太阳房的室内热环境研究较少,本地农户对于被动式太阳能技术了解度不高。集热蓄热墙作为被动式太阳房主要形式之一,具有集热、蓄热、保温等功能,且构造简单、热稳定性佳,因而被广泛应用。因此,针对兰州地区气候特点,利用 ECOTECT 软件分别对采用集热蓄热墙供暖技术和普通砖混结构的民居的冬季室内热环境进行了数值模拟研究,探究了集热蓄热墙式被动房相比于传统砖混民居的优越性及其优化策略。

1 物理模型

集热蓄热墙式被动房也称作“Trombe墙式”被

动房,主要是利用南向的重质墙体吸收太阳辐射,将太阳能转变为热能,通过对流、辐射和导热的方式再将热能传递到室内。集热蓄热墙结构如图 1 所示。

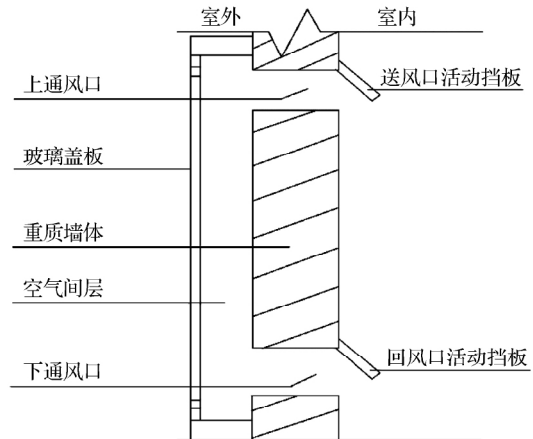


图 1 集热蓄热墙结构(来源:被动式太阳能建筑设计图集)

Fig.1 Structure of thermal storage walls

研究模拟的集热蓄热墙式被动房及对比房均以兰州地区乡村常见的一层平顶民居为原型,建立如图 2 所示模型,房间尺寸如表 1 所列。

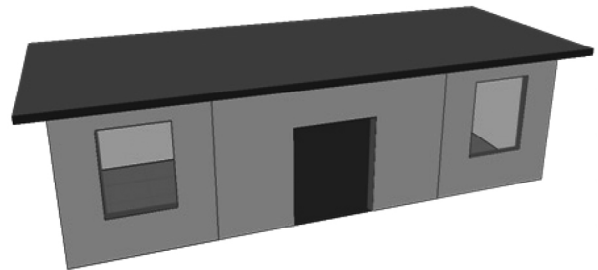


图 2 房屋模型

Fig.2 Building model

表 1 房屋基本信息

Table 1 The basic information of houses

结构类型	建筑朝向	平面尺寸	层高	体形系数	外门	外窗
砖混结构	南	12 m×4.5 m	3.2 m	0.57	1.6 m×2.1 m	2.1 m×1.8 m

被动房的南墙采用集热蓄热墙体,其结构由外至内分别为 4 mm 厚玻璃盖板+100 mm 厚空气间层+240 mm 厚烧结黏土砖;其他外墙及对比房的围护结构采用砖结构外保温墙体;内墙采用 240 mm 厚烧结黏土砖+2 mm 石灰抹灰;地面为石灰和土按体积比 3:7 混合的 150 mm 厚夯实地基+40 mm 挤塑型聚苯板+300 mm 厚卵石垫层+100 mm 厚混凝土地面;屋面采用 20 mm 厚 APP 改性沥青防水层+20 mm 水泥砂浆找平层+50 mm 水泥膨胀珍珠岩保温层+125 mm 预制钢筋混凝土板+内粉刷;外窗采用双玻中空外开窗,窗户尺寸为

2.1 m×1.8 m,玻璃垂直入射太阳辐射总透射率为 0.748,反射率为 0.137;垂直入射可见光的透射率为 0.825,反射率为 0.84;入户门采用 1050 型中空铝合金门。被动房和对比房各构件物性参数如表 2 所列。

2 数学模型

在集热蓄热墙式被动房中,建筑的主要得热量一般来源于太阳辐射,失热量主要由室内外温差引起。影响被动房室内热环境的构件主要是南窗及集热蓄热墙,且被动房与对比房北墙、东墙及西墙均

表2 房屋构件物性参数

Table 2 Physical parameters of buildings

围护结构	构造层 (由外向内)	厚度 /mm	密度 /(kg·m ⁻³)	比热 /(J·(kg·K) ⁻¹)	导热系数 /(W·(m ² ·K) ⁻¹)
集热蓄热墙	玻璃盖板	4.0	2 500.0	0.840	0.760
	空气间层	100.0	1.3	1.005	0.025
	烧结黏土砖	240.0	1 800.0	1.050	0.810
外墙	烧结黏土砖	240.0	1 800.0	1.050	0.810
	聚苯板	50.0	30.0	1.380	0.042
	石灰膏抹灰	5.0	1 500.0	1.050	0.760
内墙	烧结黏土砖	240.0	1 800.0	1.050	0.810
	石灰膏抹灰	3.0	1 500.0	1.050	0.760
屋顶	APP 改性沥青防水卷材	20.0	1 050.0	1.620	0.230
	水泥砂浆	20.0	1 800.0	1.050	0.930
	水泥膨胀珍珠岩	50.0	600.0	1.170	0.210
	预制钢筋混凝土	125.0	2 500.0	0.920	1.740
地面	素土夯实地基	1 500.0	2 000.0	1.010	1.160
	聚苯板	40.0	30.0	1.380	0.042
	大理石垫面	300.0	2 800.0	0.920	2.910
	混凝土地面	100.0	2 300.0	0.920	1.510
外窗	平板玻璃	6.0	2 500.0	0.840	0.760
	空气间层	12.0	1.3	1.005	0.025
	平板玻璃	6.0	2 500.0	0.840	0.760
门	1050型铝合金	5.0	825.0	900.000	209.000
	空气间层	10.0	1.3	1.005	0.025
	1050型铝合金	5.0	825.0	900.000	209.000

采用相同的结构和材料,对室内环境影响程度几乎一样,因此仅对南窗及集热蓄热墙构建如下计算模型。

2.1 窗户计算模型

窗玻璃为薄壁结构,蓄热系数很小,因此,可以认为窗玻璃吸收的太阳辐射全部传向室内和室外,玻璃内部的温度并没有发生明显的变化。南窗玻璃的热平衡方程^[8]可表示为

$$q_a(\tau) = q_n(\tau) + q_w(\tau) = h_n[t_{g,n}(\tau) - t_g(\tau)] + h_w[t_{g,w}(\tau) - t_g(\tau)], \quad (1)$$

其中: $q_n(\tau)$ 、 $q_w(\tau)$ 分别为玻璃传向室内、室外的热量(W/m²); $q_a(\tau)$ 为玻璃吸收的热量(W/m²); h_n 、 h_w 分别为窗户内、外表面换热系数[W/(m²·K)]; $t_{g,n}(\tau)$ 、 $t_{g,w}(\tau)$ 分别为窗户玻璃内外表面空气温度(°C); $t_g(\tau)$ 为玻璃温度(°C)。

通过转化式(1)得

$$q_n(\tau) = \frac{h_n}{h_n + h_w} q_a(\tau), \quad (2)$$

$$q_w(\tau) = \frac{h_w}{h_n + h_w} q_a(\tau). \quad (3)$$

通过单层玻璃进入室内的太阳辐射热量可表述为

$$\text{SHG}_g = [\tau_{sbi} I_{bi}(\tau) + \tau_{sd} I_d(\tau)] + \frac{h_n}{h_n + h_w} [\alpha_{sbi} I_{bi}(\tau) + \alpha_{sd} I_d(\tau)], \quad (4)$$

其中: τ_{sbi} 、 α_{sbi} 为单层玻璃对入射角为*i*的太阳直射辐射的透过率、吸收率; τ_{sd} 、 α_{sd} 分别为单层玻璃对太阳散射辐射的透过率、吸收率; $I_{bi}(\tau)$ 为投射到玻璃表面上的太阳直射辐射强度(W/m²),*i*为入射角; $I_d(\tau)$ 为投射到玻璃上的太阳散射辐射强度(W/m²)。

根据单层玻璃得热计算式,推导出双层玻璃窗太阳辐射总得热量为

$$\text{SHG}_{gg} = [\tau_{dbi} I_{bi}(\tau) + \tau_{dd} I_d(\tau)] + \frac{h_n}{h_n + h_w} \{N_1 [\alpha_{db1,i} I_{bi}(\tau) + \alpha_{dd1} I_d(\tau)] + N_2 [\alpha_{db2,i} I_{bi}(\tau) + \alpha_{dd2} I_d(\tau)]\}, \quad (5)$$

其中: SHG_{gg} 为双层玻璃窗的太阳辐射得热(W); τ_{dbi} 为双层玻璃窗对入射角为*i*的太阳直射辐射总透过率; τ_{dd} 为双层玻璃对太阳散射辐射总透过率;

$\alpha_{db1,i}$ 、 $\alpha_{db2,i}$ 分别为双层玻璃窗内侧、外侧玻璃对入射角为 i 的太阳直射辐射吸收率; α_{dd1} 、 α_{dd2} 分别为双层玻璃窗内侧、外侧玻璃对太阳散射辐射的吸收率; N_1 为双层玻璃窗内侧玻璃吸收的太阳辐射热量中向室内换热的比例, $N_1 = \frac{R_w}{R}$; N_2 为双层玻璃窗外侧玻璃吸收的太阳辐射热量中向室内换热的比例, $N_2 = \frac{(R_a + R_w)}{R}$; R 为双层玻璃窗的总热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), $R = R_n + R_a + R_w$; R_n 为双层玻璃窗内侧玻璃热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), $R_n = \frac{1}{h_n}$; R_w 为双层玻璃窗外侧玻璃热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), $R_w = \frac{1}{h_w}$; R_a 为双层玻璃窗空气间层热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)。

2.2 集热蓄热墙计算模型

集热蓄热墙的传热过程是一个集导热、辐射和对流为一体的复杂过程,为了简化计算过程,需要假设条件,通过此次计算,基本假设条件有:重质蓄热墙、玻璃盖板及其他墙体表面温度均匀,并视其为灰体;重质墙的导热视为一维常物性导热;湿度对热平衡的影响忽略不计,集热蓄热墙空气间层内无其他热源。

(1) 玻璃盖板热平衡方程为

$$q_{sg}(\tau) + q_{r,o}(\tau) - q_{c,go}(\tau) - q_{c,ga}(\tau) = 0, \quad (6)$$

其中: $q_{sg}(\tau)$ 为 τ 时刻玻璃盖板吸收太阳辐射及蓄热体外表面反射的太阳辐射 (W/m^2); $q_{r,o}(\tau)$ 为蓄热体外表面与玻璃盖板的辐射换热量 (W/m^2); $q_{c,go}(\tau)$ 为玻璃盖板与室外空气的对流换热量 (W/m^2); $q_{c,ga}(\tau)$ 为玻璃盖板与空气间层的对流换热量 (W/m^2)。

式(6)中:

$$\begin{cases} q_{sg}(\tau) = I_s(\tau)\alpha_g + I_s(\tau)\tau_g\rho_w\alpha_g, \\ q_{r,wo}(\tau) = h_{rwo}(\tau)[T_{wo}(\tau) - T_g(\tau)], \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: $I_s(\tau)$ 为入射到蓄热墙外表面的太阳辐射量 (W/m^2); α_g 为玻璃盖板吸收率; τ_g 为玻璃盖板透射率; ρ_w 为蓄热墙外表面反射率。 $T_{wo}(\tau)$ 为蓄热墙外表面的温度 (K); $T_g(\tau)$ 为玻璃盖板的温度 (K); $h_{rwo}(\tau)$ 为蓄热墙外表面向玻璃盖板的长波辐射换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$], 其值可表示为

$$\begin{cases} h_{rwo} = \frac{\sigma_b(T_{wo}^4 - T_g^4)}{(T_{wo} - T_g)\left(\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_{wo}} - 1\right)}, \\ q_{c,go}(\tau) = h_{cgo}(\tau)[T_g(\tau) - T_w(\tau)], \\ q_{c,ga}(\tau) = h_{ca}(\tau)[T_g(\tau) - T_a(\tau)], \end{cases} \quad (8)$$

其中: σ_b 为斯蒂芬-玻尔兹曼常量, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ϵ_g 、 ϵ_{wo} 分别为玻璃盖板表面和蓄热墙外表面的长波发射率; $h_{cgo}(\tau)$ 为玻璃盖板与室外空气对流换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]; $T_w(\tau)$ 为室外空气温度 (K); $h_{ca}(\tau)$ 为玻璃盖板与空气间层空气的对流换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]; $T_a(\tau)$ 为空气间层空气温度 (K)。

(2) 空气间层热平衡方程为

$$\rho_m c_p s \frac{dT_a(\tau)}{d\tau} = q_{c,ga}(\tau) + q_{c,o}(\tau) - q_{c,ra}(\tau) - q_{om}(\tau), \quad (9)$$

其中: $q_{c,o}(\tau)$ 为间层空气与蓄热墙外表面的对流换热量 (W/m^2); $q_{c,ra}(\tau)$ 为间层空气通过上通风口向室内的对流供热量 (W/m^2); $q_{om}(\tau)$ 为通过南向玻璃盖板的冷风渗透换热量 (W/m^2); s 为空气间层的厚度 (m); c_p 为间层空气定压比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]; ρ_m 为间层空气密度 (kg/m^3)。

式(9)中:

$$\begin{cases} q_{c,o}(\tau) = h_{co}(\tau)[T_{wo}(\tau) - T_a(\tau)], \\ q_{c,ra}(\tau) = m_a(\tau)c_m[T_u(\tau) - T_d(\tau)], \\ m_a(\tau) = 3600\bar{v}(\tau)\bar{\rho}(\tau)A_m, \\ \bar{v}(\tau) = \sqrt{\frac{2gh_v}{8\left(\frac{A_m}{A_v}\right)^2 + 2}} \cdot \frac{T_m(\tau) - T_r(\tau)}{T_m(\tau)}, \end{cases} \quad (10)$$

其中: $T_{wo}(\tau)$ 为蓄热墙外表面平均温度 (K); $h_{co}(\tau)$ 为蓄热墙外表面与空气间层的对流换热系数; $m_a(\tau)$ 为空气间层的空气质量流率 (kg/s); $T_u(\tau)$ 、 $T_d(\tau)$ 分别为上下通风口空气温度 (K); $\bar{v}(\tau)$ 为空气间层空气在横断面上的平均流速 (m/s); $\bar{\rho}(\tau)$ 为空气间层空气的平均密度 (kg/m^3); A_m 为空气间层的横断面积 (m^2); g 为重力加速度 (kg/s^2); h_v 为上下通风口中心处的垂直间距 (m); A_v 为集热蓄热墙通风口面积 (m^2); $T_m(\tau)$ 为房间内表面平均辐射温度 (K); $T_r(\tau)$ 为室内空气平均温度 (K)。

(3) 蓄热墙外表面热平衡方程为

$$q_{s,o}(\tau) - q_{c,o}(\tau) - q_{r,o}(\tau) - q_{\lambda,o}(\tau) = 0, \quad (11)$$

其中: $q_{s,o}(\tau)$ 为蓄热墙外表面的太阳辐射得热量 (W/m^2); $q_{\lambda,o}(\tau)$ 为蓄热墙外表面向内部的传热量 (W/m^2)。

式(11)中:

$$\begin{cases} q_{s,o}(\tau) = I_s(\tau)\beta_g\alpha_w, \\ q_{\lambda,o} = \sum_{n=0}^n X_C^*(n)T_o(\tau - n) - \sum_{n=0}^n Y_C^*(n)T_1(\tau - n), \end{cases} \quad (12)$$

其中: α_w 为蓄热墙外表面吸收率; $T_o(\tau-n)$ 、 $T_1(\tau-n)$ 分别为蓄热墙外表面和内表面($\tau-n$) 时刻的温度(K); $X_c^*(n)$ 、 $Y_c^*(n)$ 分别为蓄热墙外表面周期吸收反应系数和蓄热构件周期传热反应系数。

(4) 蓄热墙内表面热平衡方程为

$$q_{\lambda,i}(\tau) - q_{c,i}(\tau) - q_{r,i}(\tau) = 0, \quad (13)$$

其中: $q_{\lambda,i}(\tau)$ 为蓄热墙内表面接收到的传热量(W/m^2); $q_{c,i}(\tau)$ 为蓄热墙内表面与室内空气的对流换热量(W/m^2); $q_{r,i}(\tau)$ 为蓄热墙体内表面与房间其他围护结构内表面的辐射换热量(W/m^2)。

式(13)中:

$$\begin{cases} q_{\lambda,i} = \sum_{n=0}^{23} Y_c^*(n) T_o(\tau-n) - \sum_{n=0}^{23} Z_c^*(n) T_1(\tau-n), \\ q_{c,i}(\tau) = h_{ci}(\tau) [T_{wi}(\tau) - T_j(\tau)], \\ q_{r,i}(\tau) = \sum_{j=1}^n h_{ri}(\tau) [T_{wi}(\tau) - T_j(\tau)], \\ h_{ri} = \frac{4\sigma_b T_m(\tau)^3}{\left[\frac{1}{F_k} + \frac{(1-\epsilon_k)}{\epsilon_k} \right]}, \end{cases} \quad (14)$$

其中: $Z_c^*(n)$ 、 $Y_c^*(n)$ 分别为蓄热构件的内表面周期吸收反应系数和蓄热墙体的周期传热反应系数; $h_{ci}(\tau)$ 为蓄热墙体内表面与室内空气的对流换热系数; $T_{wi}(\tau)$ 为蓄热墙体内表面温度(K); $h_{ri}(\tau)$ 为蓄热墙内表面的长波辐射换热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]; $T_j(\tau)$ 为房间其他围护结构内表面的温度(K); ϵ_k 为围护结构内表面 k 的发射率; F_k 为围护结构内表面 k 的面积(m^2)。

3 数值模拟

3.1 模拟条件设定

研究采用 Weather tool 提供的 CTYW 典型气象数据,是气象站多年的实测气象数据通过插补法获得的逐时气象参数。地理位置设定为兰州,北纬 36° ,东经 103.9° ,冬季供暖期为 11 月—3 月。将模拟对象物性参数按照 ECOTECT 数值模拟需求输入软件中进行计算,同时为了消除 ECOTECT 软件模拟计算过程中对于有空气间层构件的计算误差,模拟借助 ECOMAT 插件对具有空气间层构件的计算过程进行修正。

据调研了解,兰州地区农民家庭常住人口大多为每户 3~4 人,通常以两位老人、一位女人、一位小

孩为主,因此设定室内总人员为 4 人,其中卧室人员最大值设定为 2 人,客厅人员最大值设定为 4 人。村民生活作息时间较为规律,冬季处于农闲时段,一般早上 8:00 以后老人和女人在室内做家务或看电视,小孩去学校上学;晚上 10:00 以后准备进入睡眠状态。

因此,参考村民的作息规律设定卧室、客厅人员在室率及作息时间,如图 3、图 4 所示。设定人体衣着量为 1.98 clo。设定模型空调温度的下限为 $14^\circ C$ 。由于农宅的密封性普遍不良,因此设定模型空气交换率为 0.5,环境附加换气率为 0.25,室内风速设定为 0.3 m/s,气象条件选取最冷日平均值。

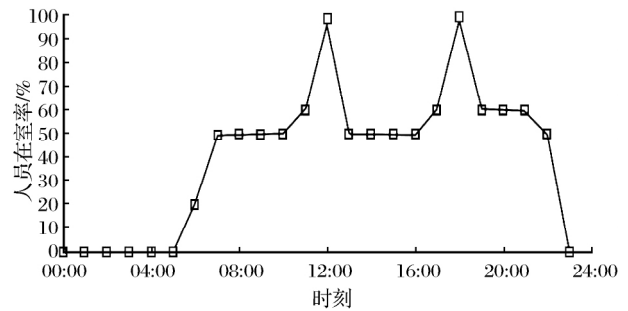


图 3 客厅人员在室率及作息时间

Fig.3 In-building ratio and timetable of people in living room

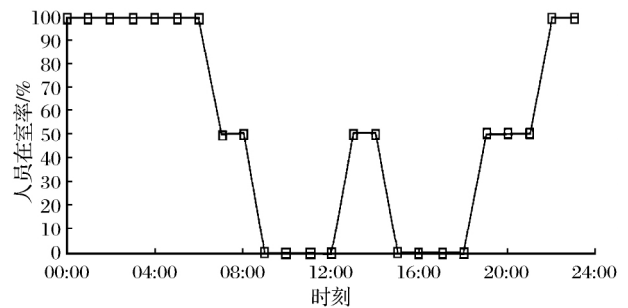


图 4 卧室人员在室率及作息时间

Fig.4 In-building ratio and timetable of people in bedroom

3.2 模拟结果及分析

通过软件模拟计算,集热蓄热墙被动式太阳房客厅的室内最高温度为 $12^\circ C$,最低温度为 $4^\circ C$,卧室的最高温度为 $5^\circ C$,最低温度为 $-5^\circ C$,如图 5 所示;对比房客厅最高温度为 $7^\circ C$,最低温度为 $1^\circ C$,卧室的最高温度为 $-2^\circ C$,最低温度为 $-7^\circ C$,如图 6 所示。

被动式得热量包括的内容有:来自太阳的直射、室外综合温度等,这一部分热量可以通过建筑的被动式设计进行调节改善。据模拟计算显示,被动房最冷月平均围护结构失热贡献率为 89.8%,失热量为 $760 Wh/m^2$,通过太阳辐射得热率为 29%,得热量为

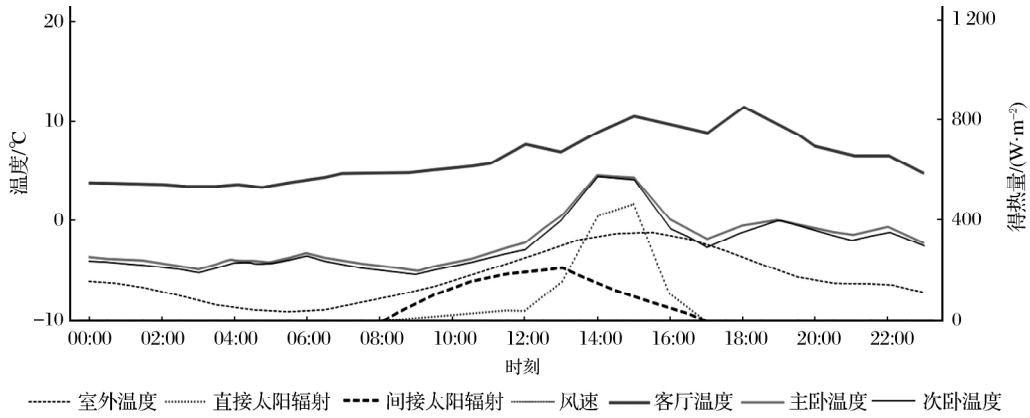


图 5 被动房最冷日室内逐时温度 (来源:依据软件模拟自绘)

Fig.5 The indoor hourly temperature of the passive solar house in the coldest day

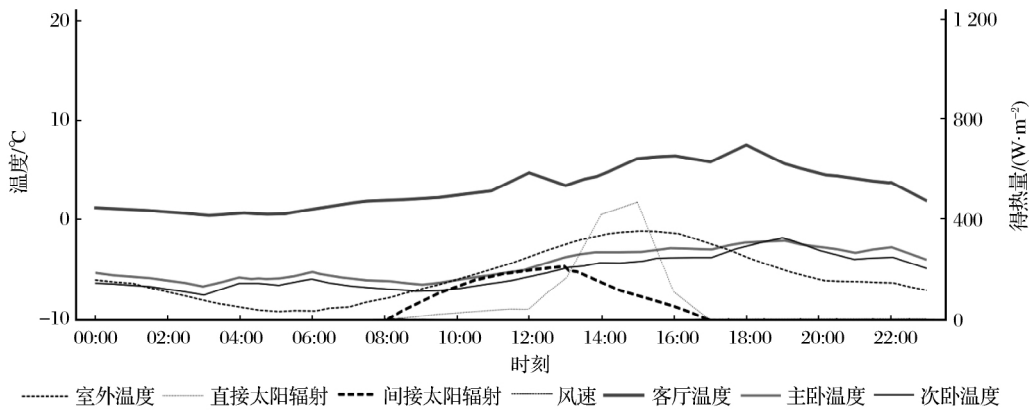


图 6 对比房最冷日室内逐时温度

Fig.6 The indoor hourly temperature of the contrast house in the coldest day

240 Wh/m²,如图 7 所示;对比房最冷月平均围护结构失热贡献率为 91.2%,失热量为 880 Wh/m²,通过太阳辐射得热率为 4.9%,得热量为 110 Wh/m²,

如图 8 所示。

由图 7、图 8 可以发现,被动房与对比房的失热主要由围护结构的导热作用引起,但是被动房通过

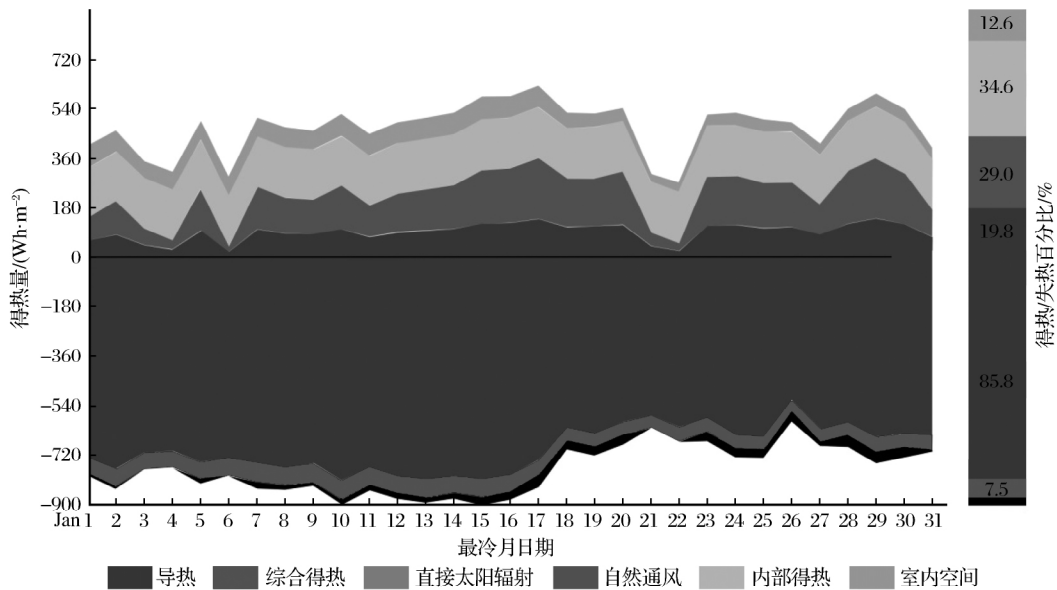


图 7 被动房被动式得热组分

Fig.7 The passive heat gain component of passive solar house

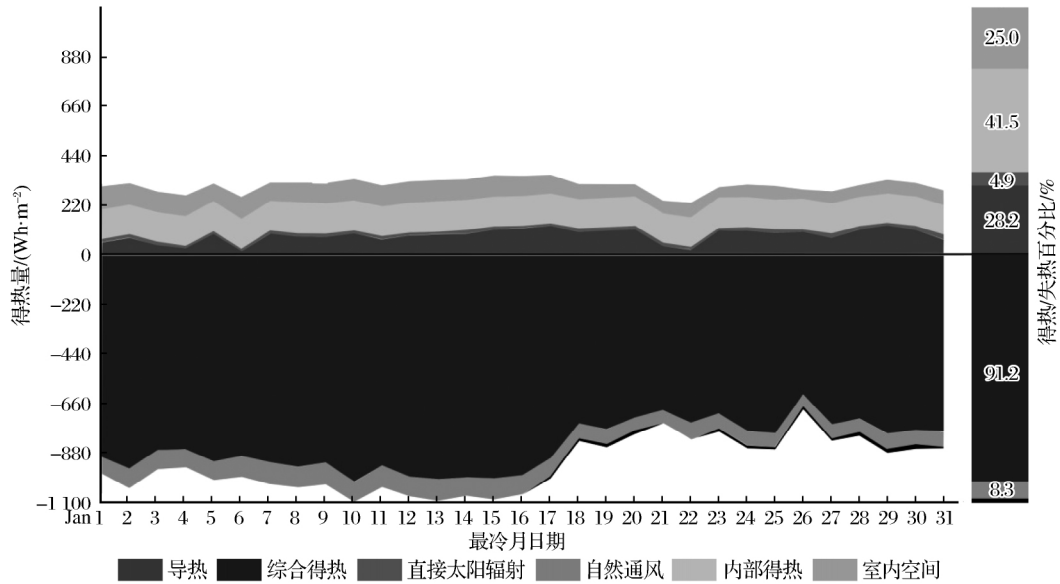


图8 对比房被动式得热组分

Fig.8 The passive heat gain component of contrast house

导热的失热量小于对比房,其主要原因是被动房的集热蓄热墙较对比房的砖混墙多了空气间层,白天空气间层的空气被太阳辐射加热向室内供热,夜间空气间层的温度高于室外温度,减少了导热失热量。由于集热蓄热墙对太阳辐射的吸收转化能力强于普通砖墙,因此被动房通过太阳辐射得热量远高于对比房。在夜间,随着室外温度的降低,被动房和对比房的室内温度均出现降低,但是被动房的集热蓄热墙开始将白天贮存的热量缓慢的释放,因此被动房室内夜间温度也高于对比房。

综合分析发现,采用集热蓄热墙可以在一定程度上改善兰州气候条件下的农村民居冬季的室内热环境。但是根据我国《农村居住建筑节能设计标准》GB50824-2013 规定寒冷地区农村居住建筑的主要功能房间室内温度不得低于 14°C ,发现仅依靠集热蓄热墙还远远达不到冬季室内人体热舒适标准。因此,在采用集热蓄热墙技术的基础上,还需要通过其他方式提高兰州农村民居冬季的室内温度。

4 优化策略

4.1 围护墙体材料优化

兰州乡村地区农宅外围护结构多采用烧结黏土砖+聚苯板保温结构,甚至大部分农宅外围护结构仅使用烧结黏土砖砌筑而成,通过上述模拟分析发现,即使加设外保温,围护结构的失热仍是导致房屋冬季热量散失的最主要因素之一。因此选用导热系数更低的材料取代烧结黏土砖可以有效降低围护结

构的传热系数。生土材料是一种导热系数低,蓄热能力强且无污染,便于取材的优良建材。通过利用一系列改性措施,可以增强生土的力学性能使其达到农村民居营建受力要求。将改性后的生土材料,压制成一定规格的生土砖块,可以在不改变施工工艺的基础上提升围护墙体的热工性能,结合外保温技术,可以有效提高墙体蓄热保温能力,降低围护结构的失热量。

4.2 增加集热面积

对于农村民居来说,其层高低,所以屋顶所占房屋整体表面积相对较大,且直接受到太阳辐射,因此,结合蓄热屋顶技术可以增加房屋集热面积,提高冬季室内温度。将平屋顶改为蓄热坡屋顶,其向阳面既可以增加房屋的集热面,同时坡屋顶又可以防止雨雪天气积水对墙体及屋顶保温层造成的破坏。据研究表明,集热蓄热坡屋顶供热效果优于集热蓄热平屋顶。蓄热屋顶可以采用碎石混凝土材料,屋顶坡度以 45° 为宜。

4.3 增加辅助热源

辅助热源的作用是当连续光照不足或被动式太阳能技术供暖量不足时,为室内间接性补热,以保证不同天气下室内温度恒定。常见的辅助热源有燃料锅炉、电锅炉、空气源热泵、地源热泵等。由于兰州地区邻近西北最大的火力发电厂,电网覆盖全面,且近距离输电能耗较低,在国家推行的电网改革和电价下调的政策下,宜采用电锅炉作为辅助热源。使用电锅炉作为辅助热源有以下几点优势:(1)电锅炉

占地面积小、舒适健康、安全度高;(2)电锅炉可以分户安装,适用分散的农村建筑;(3)电锅炉安装简单,安装使用后无需大量繁琐的后期维护和保护,减轻了居民的使用压力;(4)电锅炉可根据需求自主调节室内温度,有利节能,采暖费用更经济。

5 结论

(1) 被动房在最冷日的最高气温及最低气温均高于普通砖混房屋,集热蓄热墙可以在一定程度上提高房屋的室内温度;

(2) 围护结构造成的失热是房屋冬季过冷的主要因素之一;

(3) 无辅助热源的情况下,仅依靠集热蓄热墙将太阳辐射转化的热量并不足以满足冬季兰州地区农村民居的室内温度需求,无法满足人体热舒适的要求。

针对上述结论,研究提出了通过改进围护墙体材料、增加集热面积、增加辅助热源的方法,在尽可

能减少化石燃料燃烧、一次能源消耗的基础上,提高兰州地区乡村民居的室内热环境水平。

参考文献:

- [1] 孙丹,王立久.集热蓄热墙式被动太阳能建筑的研究现状[J].太阳能,2016,(2):65-68,31.
- [2] 王登甲,刘艳峰,刘加平,等.青藏高原地区 Trombe 墙式太阳房供暖性能测试分析[J].太阳能学报,2013,34(10):1823-1828.
- [3] 王登甲,刘艳峰,刘加平.青藏高原被动太阳能建筑供暖性能实验研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(2):269-274.
- [4] 王登甲,王晗旭,刘艳峰,等.青海乡域中小学教室内学生冬季的热舒适性[J].土木建筑与环境工程,2017,39(1):32-37.
- [5] 陈晨,刘艳峰,王登甲,等.集热蓄热墙保温构造形式优化及适应性分析[J].太阳能学报,2016,37(11):2889-2895.
- [6] 郭龙.山东菏泽地区新农宅室内热环境优化设计研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [7] 许兰广,厚彩琴,王刚,等.兰州地区太阳能相变集热蓄热墙系统热特性分析[J].甘肃科学学报,2017,29(4):85-91.
- [8] 刘艳峰,王登甲.太阳能采暖设计原理与技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.

Simulation Study on the Indoor Thermal Environment in Winter of Passive Solar House in Rural Areas in Lanzhou Based on ECOTECT and Optimization Strategy

Wu Yongcheng, He Wentao

(School of Design and Art, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract In recent years, the application of passive solar on rural area has become the main trend of study on rural heating supply technology in China. Under the condition of consuming little or less primary energy source, the passive solar house uses solar energy to provide heat for the architecture, by means of the reasonable arrangement of building orientation and surroundings, clever design of interior space and exterior appearance, and appropriate choice of building materials and structure, in order to produce less pollution and low energy consumption, with simple structure and low cost. On condition of the climate, resident form, and habits and customs of villagers in Lanzhou, based on ECOTECT numerical simulation technique, this study established the mathematical model of heat transfer process of thermal storage walls in accordance with the same process of thermal storage walls in passive solar house in rural area, to simulate the indoor thermal environment in Winter and compare with the indoor thermal environment in Winter of traditional brick-concrete buildings in rural area. It showed that the thermal storage walls could improve the indoor thermal environment of architectures in rural area to some extent but still failed to meet the requirement of heat comfort of human body, even though the exterior heat preservation measures were taken, the heat loss of the building envelope was still very high. On the basis of the analysis results, it's proposed to improve the wall materials of the envelope, increase the thermal storage area, and add auxiliary heat resources so as to refine the indoor thermal environment in rural areas.

Key words Rural areas in Lanzhou; Thermal storage walls; Passive solar house; Indoor thermal environment

(本文责编:毛鸿艳)