

北方村镇被动式太阳房夏季降温数值模拟及试验*

王明康¹, 李洁¹, 陆红梅¹, 蔡永斌²

1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003

2. 石河子大学科研处, 新疆 石河子 832003

摘要: 针对被动式太阳房普遍存在的夏季室内温度过高的问题, 提出 4 种不同的降温措施。以新疆石河子市农村地区的一栋既有被动式太阳房为研究对象, 采用数值模拟结合试验测试的研究方法, 对比分析这 4 种措施的降温效果。结果表明: 被动式太阳房在自然状态或采用各降温措施时, 其室内温度的模拟值与实测值之间的偏差的平均值为 2 °C, 但温度变化趋势一致, 具有较好的吻合性, 证实了数值模拟的可行性; 根据实测结果, 被动式太阳房在采用遮阳、关闭南窗结合遮阳及热压通风的降温措施时, 分别有 46%、50% 和 50% 的时间可以达到热舒适性要求; 将热压通风与遮阳结合使用, 有 92% 的时间可以达到热舒适性要求。

关键词: 被动式太阳房; 降温; 数值模拟; 通风; 遮阳

中图分类号: TU834.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)03-0079-10

Numerical simulation and experimental of summer cooling of passive solar houses in northern villages

WANG Mingkang¹, LI Jie¹, LU Hongmei¹, CAI Yongbin²

1. College of Water Conservancy & Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2. Science and Technology Department, Shihezi University, Shihezi 832003, China

Abstract: Four different cooling measures were proposed to aim at the excessive indoor temperature problem of passive solar house in summer. A passive solar house in the Shihezi area of Xinjiang was taken as the study object. The method of numerical simulation combined with an experimental test was used to compare and analyze the cooling effect of the four cooling measures. The results show that: comparing the numerical simulation results with the experimental results, the average value of the indoor temperature deviation under each cooling measure is 2 °C, but the temperature change trend is consistent and has good conformity, which confirms the feasibility of the numerical simulation. Compared with the passive solar house in the natural state, thermal comfort requirements can be met 46%, 50% and 50% of the time, respectively. Using shading, closing the south window combined with shading or thermal pressure ventilation, thermal pressure ventilation combined with shading achieves thermal comfort requirements 92% of the time.

Key words: passive solar houses; cooling; numerical simulation; ventilation; shading

* 收稿日期: 2022-08-20

录用日期: 2022-12-15

网络首发日期: 2023-01-30

基金项目: 新疆生产建设兵团南疆重点产业支撑计划项目(2019DB007); 石河子大学创新发展专项(CXFZ202010); 新疆生产建设兵团重点领域科技攻关计划(2021AB027)

作者简介: 王明康(1998年生), 男; 研究方向: 建筑节能; E-mail: 20212010005@stu.shzu.edu.cn

通信作者: 李洁(1982年生), 女; 研究方向: 绿色建筑与节能; E-mail: lijie_shzu@shzu.edu.cn

被动式太阳房在冬季具有良好的采暖保温效果,但在夏季由于空气间层以及集热蓄热墙外表面温度过高,进而导致室内温度过高(周鑫等,2011),难以满足人们对热舒适性的要求,这一问题能否有效解决,对被动式太阳房推广具有重大影响。针对该问题,国内外学者提出大量的降温措施。Vettorazzi et al.(2021)通过分析发现在巴西南部生物气候区在夜间打开窗户进行冷却通风是值得推荐的,且通过自然通风增加通风量有助于满足被动式建筑标准的要求。董浩等(2017)建立适用于西安地区的热舒适性评价模型,依据西安近30年的气象数据对室内通风模拟分析,结果表明自然通风可减少西安市居住建筑约40%的夏季空调开启时间。孙鹏(2006)采用试验与数值模拟的研究方法,研究被动式太阳房在不同气候条件下的室内热湿环境的动态变化规律,结果发现白天通风可调节室内湿度,提高热舒适度,夜间通风可降低室内温度并对集热蓄热墙进行蓄冷。徐鑫等(2019)采用热压通风结合夜间通风的降温模式,基本实现夏季降温目标。王臣臣等(2013)搭建了带有百叶型集热墙的实验平台并进行测试,研究表明该种集热墙能够显著地改善室内环境温度,降低室内制冷负荷。针对新疆农村地区特点,杨婷婷等(2017)提出一种浅层地热能联合太阳能集热器系统并开展试验测试,结果发现该系统能有效降低室内温湿度,为人们提供更舒适的室内环境。Santamouris et al.(1996)将地下热交换系统应用于玻璃温室可以有效降低室内温度和湿度,为人们提供更舒适的室内环境。王辉等(2017)对近年来的被动式太阳房降温方面的研究做了总结,并对地-新风换热预冷降温技术发表了见解:该系统能有效降低室内温度,但是埋地管道在地下湿热环境易滋生霉菌孢子,会对人体带来危害。Rincón et al.(2001)通过试验和数值模拟评估了太阳能被动冷却系统在炎热潮湿气候下的热性能,结果证明在炎热潮湿的气候下,使用屋顶水池的被动冷却技术可以将室内温度保持在室外温度以下,但是这种屋面会造成严重的漏水问题,被限制使用(Cheikh et al.,2004)。Cheng et al.(2010)在某公园安装8个垂直绿化装置来估算建筑侧面墙面温度和环境温度的热影响,实验显示垂直绿化可以大幅降低建筑表面温度。张雯蕾等(2011)通过实验设计和实测,验证外遮阳设施的降温效果,结果表明采用外遮阳设施后可有效降低室温。这些降温措施的提出,为被动式太阳房夏季降温提

供了参考,其中对通风以及遮阳的研究较多,但对于遮阳与热压通风结合使用的试验研究较少。

计算流体动力学(CFD)软件,最初是被应用于航空航天、汽车等行业中用于模拟气体流动(周子芥,2020),随着计算机技术的发展,将其应用到建筑的设计、优化阶段逐渐成为研究的主流(高玉欣,2019;白笑天,2021;Cui et al.,2022)。被动式太阳房优化设计问题进行研究成为热点。李云涛等(2022)利用Fluent软件进行数值模拟,研究太阳能地板辐射供暖对室内热环境的影响,结果表明,该地板辐射供暖完全可以满足室内热舒适要求。王丹等(2019)利用Fluent软件对太阳能-地源热泵系统进行模拟分析,通过对该系统供热制冷的换热情况进行分析,为该系统的设计、施工提供理论参考。马坤茹等(2019)利用Fluent软件进行模拟,研究不同半径和数量的通风口对室内热环境的影响。顾祥红等(2019)利用Fluent软件进行模拟,结果表明当通风口直径取0.83 mm左右时,太阳能墙板集热效率最大。Barozzi et al.(1992)建立实验模型,采用CFD模拟与实测相结合的方法,并考虑自然对流的紊流特性,发现模拟结果与实测结果较为吻合。以往的数值模拟研究,主要是针对被动式太阳房集热蓄热墙的优化方面进行的,对被动式太阳房整体以及夏季降温方面的模拟分析较少。

基于以上分析,本文以新疆石河子市农村地区的一栋既有被动式太阳房为研究对象,根据太阳房的构造以及石河子地区的气候特点,提出4种降温措施,并通过利用Fluent软件进行数值模拟结合试验测试的研究方式,探讨该被动式太阳房在应用不同措施时的降温效果,并对房间热舒适性进行评价,分析各降温措施的有效性,从而为解决农村地区被动式太阳房夏季室内温度过高的问题提供可靠的解决方案。

1 试验概况

1.1 试验房介绍

本文的研究对象是新疆石河子市北泉镇的一栋既有被动式太阳房。该建筑朝南,地上一层,建筑面积为94.5 m²,层高3 m。试验房的南墙为集热蓄热墙,集热墙上、下各有两个直径为150 mm的通风口,通风口垂直方向的中心距为2 m。距离集热蓄热墙墙面100 mm处安装玻璃盖板,玻璃盖板与集热墙形成空气间层,空气间层高度为2.4 m。玻璃盖板上开300 mm×400 mm的小窗作为外通风

口。围护结构组成详细情况为, 集热蓄热墙(南墙): 20 mm厚水泥砂浆、240 mm厚黏土多孔砖、100 mm厚EPS聚苯板、6 mm厚挂网抹灰、集热铝板、空气层和双层玻璃塑钢窗; 外墙(东、西、北): 20 mm厚水泥砂浆、240 mm厚黏土多孔砖、100 mm厚EPS聚苯板和6 mm厚挂网抹灰; 屋顶: 20 mm厚水泥砂浆、120 mm厚钢筋混凝土面板、

150 mm厚EPS板、加气混凝土找坡(最薄处30 mm)、30 mm厚细石混凝土找平和6 mm厚防水层; 地面: 30 mm厚水泥砂浆找平、地暖盘管、40 mm厚EPS板和100 mm厚C15混凝土垫层; 窗: 钢、铝窗框和75系列Low-E玻璃; 门: 保温外门和夹芯板木门。试验房平面布置图及外景图如图1所示。

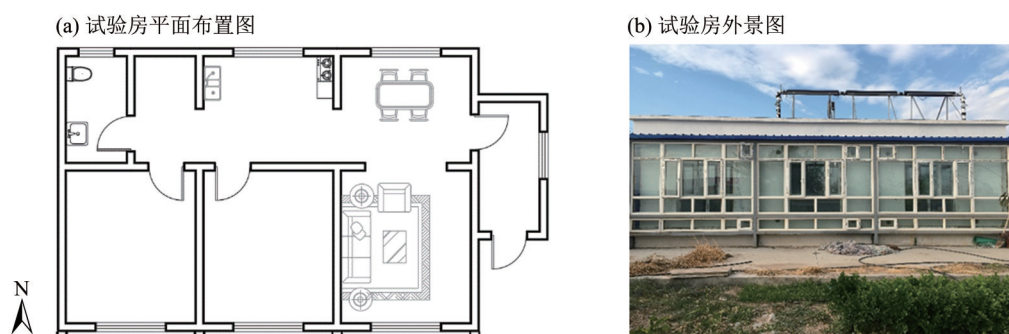


图1 试验房

Fig. 1 Experimental room

1.2 模拟与测试方案

本研究对被动式太阳房在自然状态下以及采用4种降温措施下的室内温度进行研究, 其中: 自然状态为被动式太阳房南、北窗户均打开, 集热墙的上、下通风口关闭, 外通风口开启; 措施1为被动式太阳房自然状态下在房间南侧附加遮阳板

进行遮阳; 措施2为被动式太阳房关闭南向窗户结合遮阳; 措施3为被动式太阳房采取热压通风; 措施4为被动式太阳房采取热压通风结合遮阳。4种降温措施的具体控制模式如表1所示, 其中通风口与遮阳板的开闭时间与是否有太阳光直射到集热蓄热墙有关。各控制点位置详见图2。

表1 试验房降温措施

Table 1 Experimental house cooling measures

措施	白天(08:00~20:00)					
	外通风口	上通风口	下通风口	房间南窗	房间北窗	遮阳板
1	开启	关闭	关闭	开启	开启	开启
2	开启	关闭	关闭	关闭	开启	开启
3	开启	关闭	开启	关闭	开启	关闭
4	开启	关闭	开启	关闭	开启	开启
措施	夜间(20:00~08:00)					
	外通风口	上通风口	下通风口	房间南窗	房间北窗	遮阳板
1	开启	关闭	关闭	开启	开启	开启
2	开启	关闭	关闭	关闭	开启	开启
3	开启	关闭	开启	关闭	开启	关闭
4	开启	关闭	开启	关闭	开启	开启

1.3 测试方法

采用短期连续的测试方法从2021年7月1日至2021年7月20日进行测试, 测试内容为: 试验房在自然状态下以及采取4种降温措施下的室内以及

墙体温度。具体操作如下: 利用JTR08多通道温湿度测试仪每隔10 min对室内温度进行记录; 采用JTDL-80温度与热流动态数据采集系统每隔10 min对室、内外壁面温度以及空气间层温度进行测试。

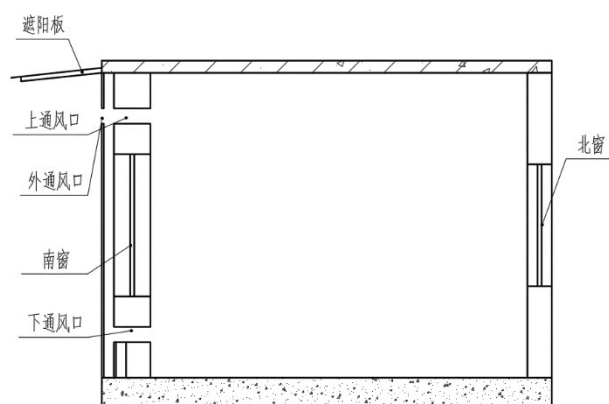


图2 试验房控制点位置

Fig. 2 Control point of experimental house

试验房测试期间为无人居住的状态,测点布置图见图3。

2 数值模拟

2.1 几何模型的建立及网格划分

根据试验房的实际尺寸,利用Creo软件建立等比例模型。由于3个房间大致相似,取中间的房间尺寸来建立模型。由于部分细节对室内环境的变化影响不大,对试验房的局部进行简化(翟小昫,2013)。简化的内容有:1)房间未安装内门,将内门简化为门洞;2)去除床、沙发等家具以及内部装饰品。简化后的模型如图4所示。

将建立好的几何模型导入ICEM软件后进行非结构化网格划分。检查网格质量,进一步对网格

进行优化,提高网格质量。试验房几何模型的网格划分如图5,网格总体质量良好,符合计算的精度需求。

2.2 求解计算

本文利用Fluent软件模拟室内温度场的分布,Fluent软件是通用的CFD软件包,用来模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动(朱红钧,2015)。其具有以下特点:适用面广,适用于各种物理模型;可以和其他CFD软件间进行数值交换,可以省却科研工作者在前后处理等方面投入的低效的劳动;用户可对不同的问题选择适合的数值解法,以期在计算速度、稳定性以及精确度等方面达到最佳。

利用Fluent软件进行稳态计算分析,模拟过程中主要满足连续性方程、动量方程、能量方程(Teodosiu et al., 2003)。选择标准 k -epsilon 湍流模型进行室内温度的数值模拟。

为了便于模拟,作出如下假设:

- 1) 重力加速度取 -9.8 m/s^2 。
- 2) 不考虑壁面辐射及内热源对温度场的影响(Campobasso, 2014)。
- 3) 采用 Boussinesq 假设(Conceição António et al., 2011)。

2.3 材料物性及边界条件

该模拟主要针对空气及墙体组成材料的材料物性进行设定。具体参数详见表2。

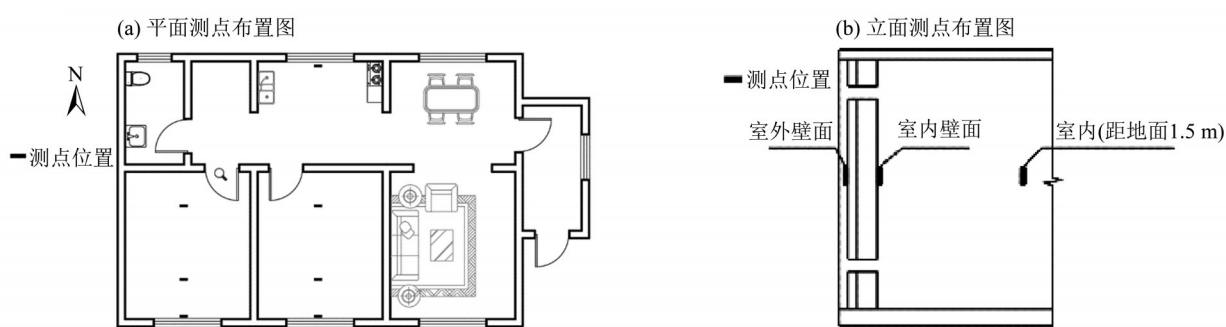


图3 测点布置图

Fig. 3 Measuring point

对于边界条件的设定,需要针对不同模式对集热蓄热墙外表面以及北面墙体温度进行定义,各接触面设定为耦合边界条件,其他墙体表面设定为绝热边界条件。设置好边界后,设置最大残差值与迭代次数,将计算模型进行迭代直至计算完成。

3 结果分析

3.1 模型验证

为验证所建模型的可靠性,将试验房在自然状态下的实测数据与模拟结果进行对比,以7月3日的数据为例,绘制如图6所示室内温度对比图,其中实测温度为多个测点平均值,模拟温度为室

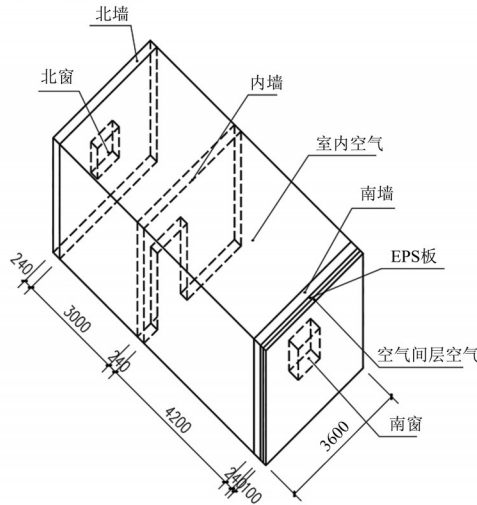


图4 简化后的试验房模型
Fig. 4 Simplified test room model

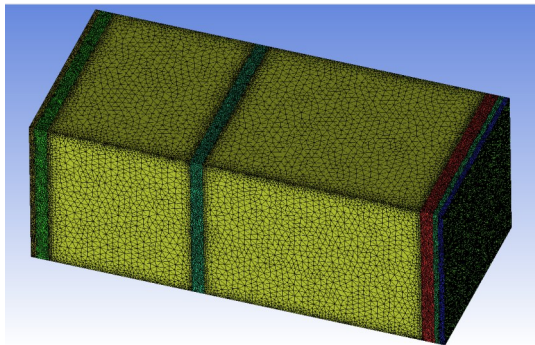


图5 网格划分图
Fig. 5 Meshing diagram

室内空气温度的平均值。当日晴, 室外最高温度 38 °C, 最低温度 23 °C。

根据图6, 对比房间由 Fluent 软件模拟所得的室内温度与实测所得的室内温度, 发现模拟值相对于实测值平均高 2 °C, 但呈现出相同的变化趋势。

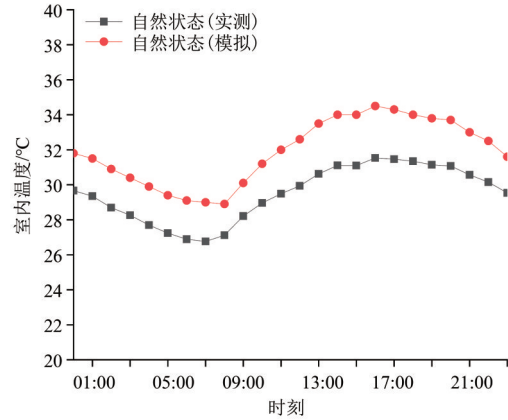


图6 自然状态下室内温度
Fig. 6 Indoor temperature in natural state

势。应用相对误差分析方法 RME 对模拟值进行验证。RME 的定义为

$$RME = \max \left\{ \left| \frac{x_{sim} - x_{exm}}{x_{exm}} \right| \times 100 \right\}, \quad (1)$$

式中 x_{sim} 为数值模拟结果; x_{exm} 为实测结果。以实测值为基准点, 计算模拟值与实测值的偏差, 最大偏差小于 10%, 能满足计算精度和准确性的要求。可以验证所建模型的准确性和精度, 其中设置的模型类型、边界条件和离散方法较为合理(许萍等, 2021)。

3.2 措施1的降温效果

据研究, 使用遮阳可以减少墙体得热量(陈星, 2006), 因而考虑采用遮阳措施来达到降低室内温度的效果。图7为试验房在采取遮阳措施, 通过上述数学模型模拟在 $X=0$ m 处的 YOZ 平面上的温度分布图, 即从试验房西侧观测各时间段房间内温度场分布规律。

表2 计算中采用的材料物性

Table 2 Material properties used in the calculation

材料	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	定压比热 $C_p /$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数 $\lambda /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	粘性系数 $\mu /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	热膨胀系数 $\gamma /$ K^{-1}
空气	1.161 4	1 007	0.028 3	1.96×10^{-5}	0.003 031
普通黏土砖	1 269	1 050	0.81	—	—
EPS	20	1 380	0.039	—	—

从 00:00~10:00 以及 21:00~23:00, 集热蓄热墙处为房间温度最高的部位, 温度维持在 31~34 °C 之间, 由此可以看出集热蓄热墙的蓄热能力以及保温隔热能力; 其余时间空气间层处温度最高, 其内温度受环境温度以及太阳辐射影响; 室内温

度相对稳定, 距离南墙及北墙近的地方相对中间部分温度高, 屋顶处温度相对地面温度高。

以 7 月 6 日的数据为例, 绘制如图 8 所示室内温度对比图, 当天天气晴, 最高温度 38 °C, 最低温度 21 °C。由图 8 可得, 采用遮阳时, 房间的温

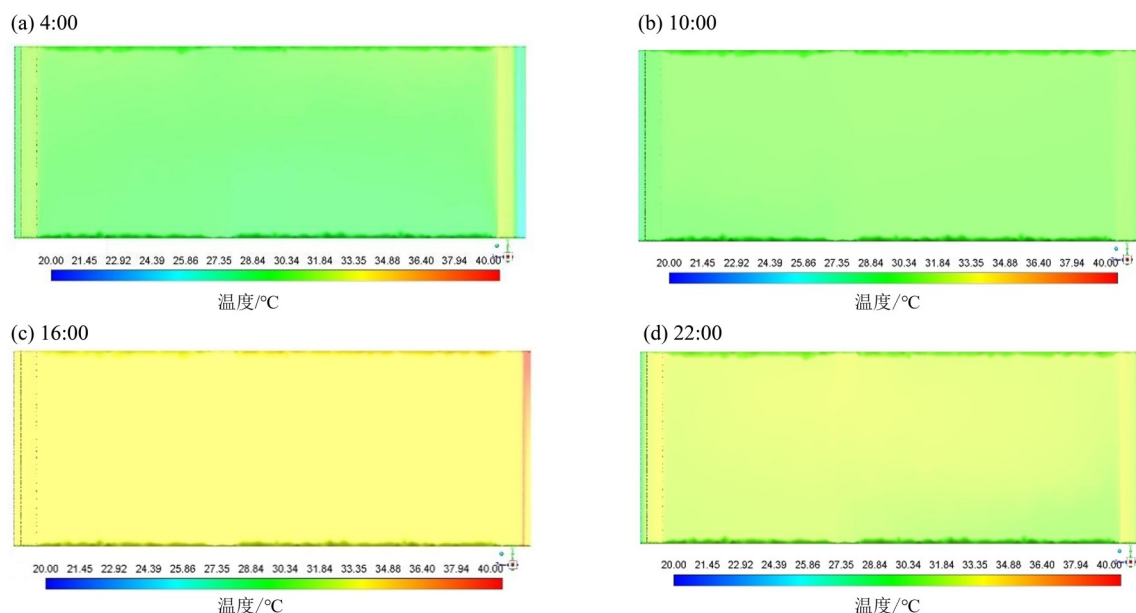


图7 采取遮阳时室内温度场分布图

Fig. 7 Distribution of indoor temperature field under shading state

度变化趋势与自然状态下的一致,在 06:00 温度达到最低值,在 16:00 温度达到最高。与自然状态相比,房间在采用遮阳时的室内温度有所降低,但降温效果不明显。由实测所得数据,采用遮阳时的室内温度相对自然状态下平均降低 $0.76\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大温差仅 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;根据模拟所得结果,采用遮阳时的室内温度相对自然状态下平均降低 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大温差仅为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,与实测结果相近。采用遮阳的降温效果未达到预期,其原因是集热蓄热墙具有良好的隔热性能,减少空气间层温度对室内温度的影响,因而即使采用遮阳措施使得空气间层温度大幅降低,室内温度没有大幅降低,保持相对稳定。

3.3 措施2的降温效果

开启南窗会使得空气间层内的热空气在沿着集热墙上升的过程中进入房间,使得房间温度升高,抵消部分因遮阳减少的房间得热,因而考虑采用关闭南窗情况下采用遮阳的降温措施。以 7 月 10 日的数据为代表,绘制如图 9 所示的室内温度对比图,当日天气晴,室外最高温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

采用关闭南窗结合遮阳的降温措施时,室内温度相对稳定,实测所得室内温度波动在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,模拟所得室内温度波动在 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,最低温度出现在 07:00 左右,最高温度出现在 20:00 左右。与自然状态相比,关闭了南窗,减少了空气间层内空气进入到室内,降低了室外因素对室内

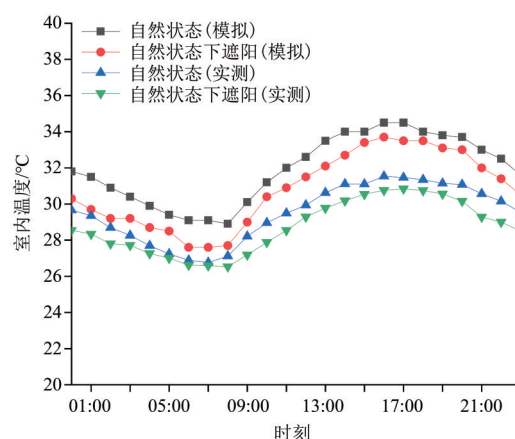


图8 自然状态与自然状态下采取遮阳的室内温度对比图

Fig. 8 Comparison of the indoor temperature between natural state and natural state with shading

温度的影响,室内温度相对稳定。此外,采用遮阳,减少了墙体得热,进一步降低室内温度。分析所得实测及模拟结果,采用该种降温措施,在白天,室内温度最高可分别降低室内温度 2.9 和 $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,降温效果较好,但是在夜间,降温效果不明显,甚至室内温度会高于自然状态下的室内温度,究其原因:房间处于自然状态时,在夜间,相对较冷的室外空气通过南窗进入房间降低室内空气温度的同时进行蓄冷,因而室内温度较低。

3.4 措施3的降温效果

考虑被动式太阳房的构造,利用集热蓄热墙的集热能力在空气间层形成热压通风来进行降温,其工作原理如图 10 所示。

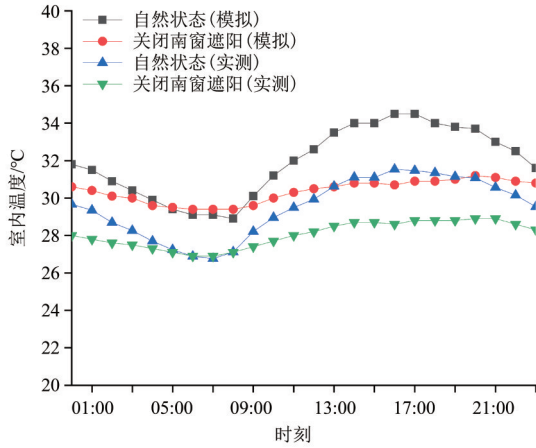


图 9 自然状态与关闭南窗结合遮阳的室内温度对比图
Fig. 9 Comparison of the indoor temperature between natural state and closing south window combined with shading

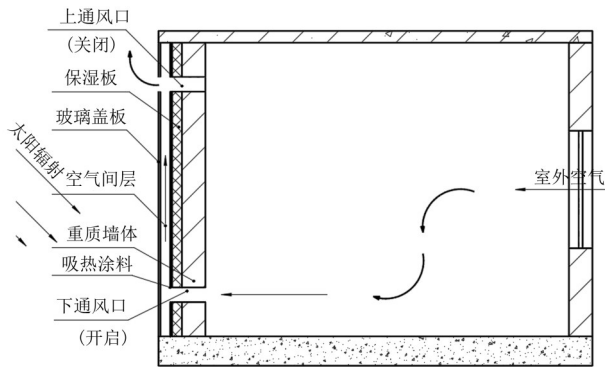


图 10 热压通风原理图

Fig. 10 Schematic diagram of thermal pressure ventilation

其具体运行情况为: 玻璃盖板和南向集热墙吸收太阳辐射, 空气间层的空气被加热, 密度降低而上升至空气间层上方, 由于与室外空气存在密度差, 从而通过玻璃盖板上侧窗口排出, 驱动空气间层的空气流动, 同时引导室内空气从室内流进空气间层加热排出, 而相对较冷的空气, 从开启的北面窗户进入室内, 补充新鲜空气并达到降低室内温度的效果。

图 11(a)从试验房南侧(Z=0 m 处的 XOY 立面)观测到的 7 月 14 日 16:00 空气间层温度随高度的变化图, 当日天气晴, 室外最高温度 38 °C, 最低温度 22 °C。如图所示, 空气间层内的温度随高度的升高而增高, 最高可达到 67.7 °C, 在通风口处温度最低, 也有 55 °C, 这也印证了上述热压通风工作原理。图 11(b)为采用热压通风与自然状态下室内温度对比图, 在 03:00~08:00 期间, 采用热压通风的室内温度与自然状态下温度相近, 降温效果不明显; 在其他时间段, 有明显的降温效果。据实测所得数据, 采用热压通风与房间自然状态下的温差在 1.3 °C 左右, 温差最大值出现在 17:00, 达到 2.3 °C; 根据模拟结果, 采用热压通风与房间自然状态下的平均温差为 1.6 °C, 在 17:00 温差出现最大值, 达到了 3.0 °C, 与实测结果相比误差较小。

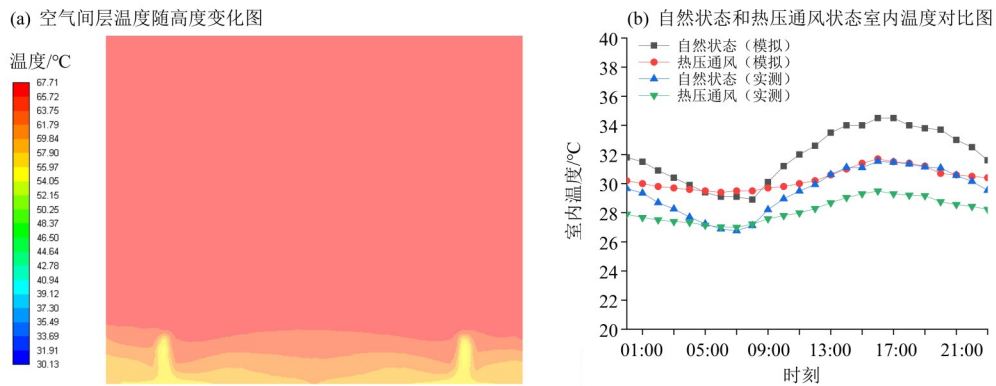


图 11 空气间层温度变化图及室内温度对比图

Fig. 11 Air interlayer temperature change and indoor temperature comparison of different modes

3.5 措施 4 的降温效果

采用遮阳或热压通风均有一定的降温效果, 将两种降温模式同时使用, 可达到更好的降温效果。将 7 月 18 日试验房在采取热压通风结合遮阳措施下的实测与模拟结果与自然状态下的结果对比, 绘制如图 12 所示室内温度对比图, 当日天气

晴, 室外最高温度为 36 °C, 最低温度 19 °C。

由图 12 可得, 在遮阳和热压通风两种降温措施同时使用的情况下, 全天的室内温度始终低于自然状态下的室内温度, 由模拟数据所绘温度曲线可以看出, 试验房在采取两种降温措施时的室内温度与试验房在自然状态下的室内温度相比,

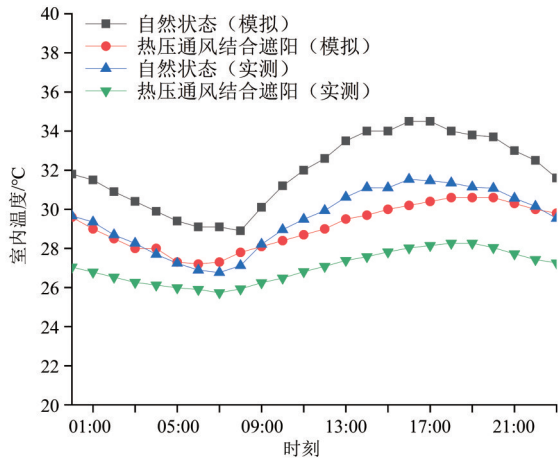


图 12 热压通风结合遮阳与自然状态的室内温度对比图
Fig. 12 Comparison of the indoor temperature between thermal pressure ventilation combined with shading and natural state

在 08:00 出现最小温差为 1.1 °C, 在 16:00 温差达最大值为 4.3 °C, 日平均温差为 2.8 °C; 由实测结果所绘温度曲线可得, 试验房在两个状态下的温差在 06:00 出现最小值为 1.0 °C, 在 16:00 达最大值为 3.5 °C, 日平均温差也有 2.5 °C。由此可见, 两种降温措施结合使用的降温效果良好。

3.6 各降温措施对墙体温度的影响

在试验过程中, 南墙内、外两侧壁面均贴有热电偶, 用以测量墙体各壁面温度。根据测得数据绘制如图 13 所示的墙体壁面温度对比图。

图 13(a)为试验房在自然状态及各降温模式下的南墙外壁面温度对比图, 由图 13 看出试验房在自然状态及模式 1、2、4 下的南墙外壁面温度相近, 且变化趋势一致, 而措施 3 下的南墙外壁面温度波动较大, 最大值可达 67.7 °C。分析其原因: 措施 3 为试验房采取热压通风, 在该措施下, 集热墙吸收大量太阳辐射加热间层内空气, 驱动空气向外

排出, 而此时玻璃盖板只开启上部的外通风口, 空气间层近似于一个封闭的空间, 空气流动较慢, 通过热压通风散失的热量小于墙体吸收的热量, 因而温度很高。措施 4 在措施 3 的基础上添加遮阳, 降低集热墙吸收的热量, 再加上热压通风散失的热量, 因而该措施下的壁面温度最低。房间在自然状态下, 开启南窗、北窗及玻璃盖板上的窗户, 通过对流散失空气间层内热量, 因而壁面温度相比采用措施 3 低。措施 1 是在自然状态下添加遮阳, 降低太阳辐射对墙体壁面温度的影响。措施 2 在措施 1 的基础上关闭南向窗户, 缺少空气对流来降低空气间层温度, 因而采用措施 2 下墙体壁面温度会高于采用措施 1。

由图 13(b)看出试验房在采用措施 2、3、4 时墙体内壁面温度波动相对小, 而处在自然状态下与采用措施 1 时的墙体内壁面温度波动相对较大。究其原因: 试验房在自然状态下与采用措施 1 时, 南窗打开, 空气间层内的热空气进入到室内, 从而使得墙体内壁面温度较高, 措施 1 相比自然状态下添加了遮阳板, 减少了太阳辐射的影响, 因而墙体内壁面温度较低。措施 2、3、4 均关闭了南窗, 隔绝了空气间层内空气向室内流动, 减少了对墙体内壁面温度的影响, 壁面温度波动较小。对比两图, 发现墙体内壁面温度峰值出现的时间相对于墙体外壁面均有不同程度的延迟, 其中试验房在自然状态下以及采取措施 1、2 时, 温度峰值延迟 3 h 左右。措施 3 因空气间层内温度过高, 内外壁面温度差大, 热传导较快, 因而延迟时间仅为 2 h 左右。采用措施 4 时的温度延迟最大, 有 4 h。

3.7 房间热舒适评价

Dear 和 Brage 利用近几十年的调研结果, 提出适应性模型 (Dear et al., 2002), 并建立室外平均温

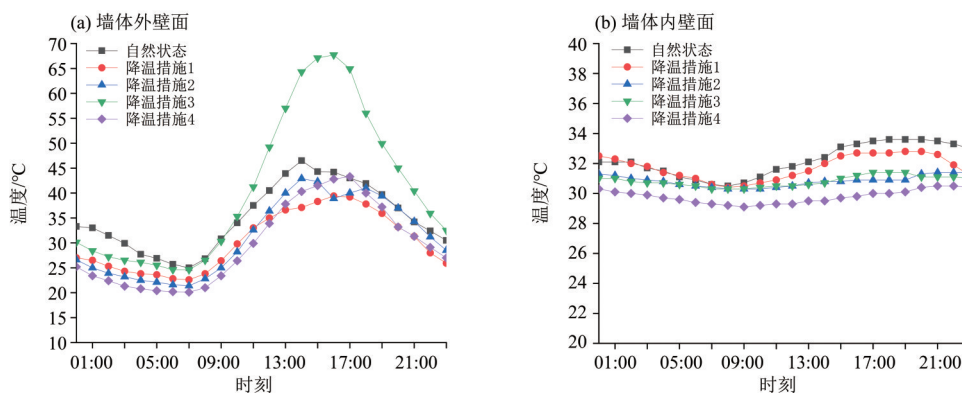


图 13 南面墙体壁面温度
Fig. 13 The temperature of the south wall

度与室内最优温度的回归方程

$$T_{\text{conf}} = 0.31 T_{\text{a, out}} + 17.8 \quad (2)$$

式中 T_{conf} 为室内舒适温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{a, out}}$ 为室外月平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。石河子地区7月室外月平均温度为 25.5°C (徐鑫等, 2019), 代入上式得出室内最优温度为 25.7°C 。研究表明, 室内温度达到80%可接受舒适度时可用以表征室内温度的热舒适区, 严寒地区夏季80%城市住户的满意的空气温度范围为 $22.3 \sim 28.2^{\circ}\text{C}$ (杨柳等, 2012), 以此为评价标准来评析房间在各降温措施下的室内温度能否达到住户要求。

如图14所示, 房间在自然状态下, 共有21%的时间温度能够使得住户满意, 其中白天仅8%的时间能够满足热舒适要求, 夜间有33%的时间能够满足要求。采用措施1与措施3时, 降温效果相近, 分别有46%和50%的时间可以达到舒适性要求, 较自然状态下有很大的提升, 其中白天大约有1/3的时间, 夜间有2/3的时间能够满足热舒适要求。在采用措施2的状态下, 有50%的时间能够满足热舒适性要求, 白天及夜间均有50%及以上的时间能满足要求。在采用措施4的状态下, 有92%的时间房间温度适宜, 其中白天有83%的时间能够满足热舒适要求, 在夜间, 房间完全处于舒适的状态, 满足了大部分住户的热舒适要求。

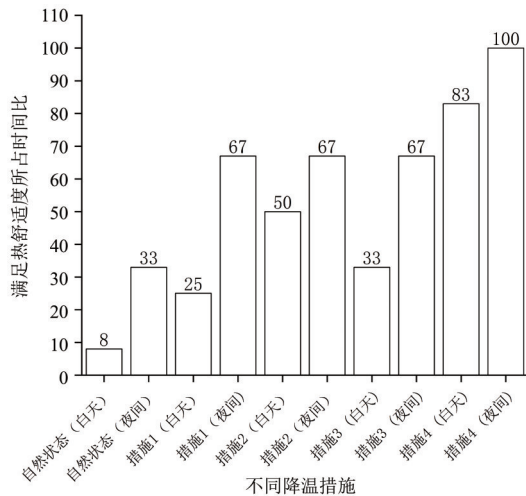


图14 各状态下室内温度满足热舒适性的时间比

Fig. 14 The time ratio of indoor temperature meeting thermal comfort in each state

4 结论

本研究对新疆石河子农村地区一座被动式太阳房在采取不同降温措施时的室内温度进行测试, 分析各降温措施的降温效果。此外还利用Fluent软件分别模拟了试验房在采用不同降温措施时的温度场并对不同降温措施进行对比分析, 得出以下结论:

1) 通过对比试验结果, 发现通过Fluent所得模拟结果相较实测结果平均高 2.0°C , 偏差在10%以内, 但室内温度变化趋势一致, 具有较高的吻合性, 因而在实地测试难以实现时, 可以通过模拟的方法来研究。

2) 基于Fluent数值模拟, 发现当仅采用遮阳措施时, 相对于自然状态室内温度平均降低 1.1°C , 最高也仅降低 1.8°C , 室内温度降低效果不明显; 采用关闭南窗结合遮阳时, 室内温度平均降低 1.6°C , 室内温度最高可降低 3.8°C , 但是在夜间降温效果较差; 采用热压通风时, 室内温度最高可降 3.0°C , 平均降温也有 1.6°C , 降温效果良好; 将热压通风和遮阳结合使用时, 室内温度最高可降 4.3°C , 平均降低温度 2.8°C 。实测所得数据, 在上述4种模式下, 室内温度分别平均降低 0.76 、 1.5 、 1.3 和 2.5°C , 最高可分别降低 1.3 、 2.9 、 2.3 和 3.5°C , 略低于模拟所得结果, 在可接受范围内, 可见模拟结果的可靠性。

3) 根据实测所得结果对室内热舒适适应性进行评价, 结果显示, 房间在自然状态下, 1天内仅有21%的时间可到热舒适要求, 并且大部分是夜间或凌晨; 当房间采用遮阳时, 1天内有46%的时间可以满足要求, 其中白天约有1/3的时间, 夜间约有2/3的时间室内温度较为舒适; 当采用关闭南窗结合遮阳时, 白天与夜间分别有50%和67%的时间达到热舒适性要求; 当采用热压通风进行降温时, 其热舒适性与房间采用遮阳时相似, 约一半的时间室内温度处于舒适温度的范围内; 将热压通风与遮阳相结合, 满足要求的时间占比达到92%, 只有白天17%的时间室内温度较高, 可基本实现夏季降温的目标。

参考文献:

- 白笑天, 2021. CFD 数值模拟在钢框架结构设计中的应用研究[D]. 河北: 河北建筑工程学院.
- 陈星, 2006. 带内置卷帘特朗贝墙的热性能研究[D]. 大连: 大连理工大学.
- 董浩, 刘加平, 杨柳, 等, 2017. 西安市居住建筑通风降温时效性分析[J]. 暖通空调, 47(4): 65-67.
- 高玉欣, 2019. 基于 Fluent 软件模拟围合式建筑形式对建筑能耗影响研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学.
- 顾祥红, 王良煜, 2019. 利用 FLUENT 软件对太阳能墙热性能分析研究[J]. 大连大学学报, 40(3): 33-36.
- 李云涛, 罗会龙, 2022. 温和地区太阳能地板辐射供暖房间数值模拟[J]. 工业安全与环保, 48(3): 102-106.
- 马坤茹, 李雅欣, 颜丽娟, 2019. 被动式太阳房阳光间通风口优化设计[J]. 河北工业科技, 36(2): 107-114.
- 孙鹏, 2006. 被动式采暖降温技术对室内热湿环境调节作用的研究[D]. 大连: 大连理工大学.
- 王臣臣, 何伟, 2013. 百叶型太阳能集热墙集热效率实验研究[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 21(5): 117-121.
- 王丹, 陈科, 2019. Fluent 软件对太阳能-地源热泵系统模拟分析[J]. 价值工程, 38(26): 164-165.
- 王辉, 高文峰, 刘滔, 等, 2017. 被动式太阳房降温方法综述[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 37(1): 12-21.
- 徐鑫, 李洁, 姜曙光, 等, 2019. 新疆农村被动式太阳房夏季不同降温控制模式的降温效果[J]. 农业工程学报, 35(14): 198-204.
- 许萍, 刘壮壮, 秦嘉琦, 等, 2021. 基于 Fluent 模拟降雨对木结构古建筑室内温湿度的影响[J]. 林产工业, 58(8): 85-89+92.
- 杨柳, 周书兵, 闫海燕, 等, 2012. 包头住宅建筑夏季室内热舒适实地调查与分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 44(3): 369-375.
- 杨婷婷, 姜曙光, 2017. 浅层地热能联合太阳能集热墙系统夏季降温试验研究[J]. 太阳能学报, 38(8): 2271-2277.
- 翟小昀, 2013. 借鉴国外经验研究探讨我国古建筑保护及维护[D]. 青岛: 青岛理工大学.
- 张雯蕾, 金健, 2011. 外遮阳设施的降温效果实测[J]. 浙江建筑, 28(6): 63-64.
- 周鑫, 徐浩, 2011. 被动式太阳房降温措施研究[J]. 住宅科技, 31(11): 33-35.
- 周子芥, 2020. 高层建筑通风模拟验证 Fluent 软件可信度[J]. 绿色环保建材, (12): 164-165.
- 朱红钧, 2015. FLUENT 15.0 流场分析实战指南[M]. 北京: 人民邮电出版社: 518.
- BAROZZI G S, IMBABI M S E, NOBILE E, et al, 1992. Physical and numerical modelling of a solar chimney-based ventilation system for buildings[J]. Build Environ, 27(4): 433-445.
- CHEIKH H, BOUCHAIR A, 2004. Passive cooling by evaporative-reflective roof for hot dry climates [J]. Renew Energy, 29(11): 1877-1886.
- CAMPOBASSO M S, 2014. Computational Fluid Dynamics for Engineers [J]. Aeronaut, 118(1208): 1215-1216.
- CHENG C Y, CHEUNG K K S, CHU L M, 2010. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls[J]. Build Environ, 45(8): 1779-1787.
- CONCEIÇÃO ANTÓNIO C, AFONSO C F, 2011. Air temperature fields inside refrigeration cabins: A comparison of results from CFD and ANN modelling [J]. Appl Therm Eng, 31(6/7): 1244-1251.
- CUI Y Q, ZHANG C X, 2022. Indoor natural ventilation simulation of college dormitory based on CFD in summer: Taking the dormitory building of a university in Jinan as an example [J]. Build Energy Effic, 50(2): 86-92.
- de DEAR R J, BRAGER G S, 2002. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55 [J]. Energy Build, 34(6): 549-561.
- RINCÓN J, ALMAO N, GONZÁLEZ E, 2001. Experimental and numerical evaluation of a solar passive cooling system under hot and humid climatic conditions [J]. Sol Energy, 71(1): 71-80.
- SANTAMOURIS M, MIHALAKAKOU G, BALARAS C A, et al, 1996. Energy conservation in greenhouses with buried pipes [J]. Energy, 21(5): 353-360.
- TEODOSIU C, HOHOTA R, RUSAOUEËN G, et al, 2003. Numerical prediction of indoor air humidity and its effect on indoor environment [J]. Building Environ, 38(5): 655-664.
- VETTORAZZI E, FIGUEIRWSO A, REBELO F, et al, 2021. Optimization of the passive house concept for residential buildings in the South-Brazilian region [J]. Energy Build, 240: 110871.

(责任编辑 张冰)