

文章编号: 1671-6612 (2025) 06-860-08

新疆地区活动板房 围护结构节能改造对室内热环境改善研究

张志昌¹ 赵娟¹ 刘蕊¹ 周波涛² 汪明聪³

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;

2. 深圳市英维克科技股份有限公司 深圳 518110;

3. 昆明煤气(集团)控股有限公司 昆明 650041)

【摘要】 活动板房多用于临时居住场所,在严寒地区活动板房室内环境恶劣,特别是缺乏电力的情况下室内温度过低会严重威胁到人的身体健康。针对该问题,对新疆哈密某工地活动板房设计了3种围护结构方案(方案1为常规活动板房,方案2为在方案1的基础上对北向外墙增加一块相同材质的备用墙板,方案3为优化板房,即在方案1的基础上对东南西北四面墙分别增加两块墙板),通过实验测试探究围护结构节能改造对活动板房室内热环境的改善情况。实验结果显示,冬季方案1常规活动板房室内最低温度低至-10.02℃,供暖能耗最高达80.08kWh,方案3室内最低温度为-5.08℃,较方案1提升了4.94℃,供暖能耗为42.66kWh,较方案1节省了46.73%;过渡季方案1室内最低温度为-2.9℃,供暖能耗为34.2kWh,在过渡季节方案3室内最低温度为0.4℃,较方案1提升了3.3℃,供暖能耗为24.3kWh,较方案1节省了28.95%。通过经济性分析可知冬季方案3的动态运行费用日值较方案1节省了23.60%,对围护结构进行节能改造能有效改善活动板房室内热环境同时降低供暖能耗,特别是在极端寒冷情况下对保障人体基本生理健康有重要意义。

【关键词】 围护结构; 节能改造; 供暖能耗; 活动板房; 室内热环境

中图分类号 TU111.4 文献标志码 A

Study on the Improvement of Indoor Thermal Environment by Energy-Saving Renovation of Prefabricated Houses Building Envelope in Xinjiang

Zhang Zhichang¹ Zhao Juan¹ Liu Rui¹ Zhou Botao² Wang Mingcong³

(1.School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;

2.Shenzhen Envicool Technology Co., Ltd, Shenzhen, 518110;

3.Kunming Gas Co., Ltd, Kunming, 650041)

【Abstract】 Prefabricated houses are commonly used as temporary living places. In extremely cold regions, the indoor environment of prefabricated houses is often harsh, particularly in areas without electricity where low indoor temperatures can pose a serious threat to the human health. To address this issue, this paper proposes three enclosure structure schemes for prefabricated houses at a construction site in Hami, Xinjiang. (Scheme 1 is a conventional prefabricated house; Scheme 2 adds an additional wall panel of the same material to the north-facing exterior wall based on Scheme 1; Scheme 3 is an optimized housing, which adds two

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52208125)

作者简介: 张志昌(2000-),男,在读硕士研究生, E-mail: 15333122973@163.com

通讯作者: 赵娟(1984-),女,博士,副教授, E-mail: juanzhao@xpu.edu.cn

收稿日期: 2025-05-12

wall panels to each of the four walls-north, south, east, and west-based on Scheme 1).Experimental testing was conducted to investigate the impact of energy-saving modifications to the enclosure structure on improving the indoor thermal environment of prefabricated houses. The experimental results show that in winter, the minimum indoor temperature of the conventional prefabricated house in Scheme 1 is as low as -10.02°C , with highest heating energy consumption reaching 80.08 kWh, while the lowest indoor temperature of Scheme 3 is -5.08°C , which is 4.94°C higher than that of Scheme 1, and the heating energy consumption is 42.66 kWh, which is 46.73% less than that of Scheme 1. In the transition season, the minimum indoor temperature of Scheme 1 is -2.9°C , and the heating energy consumption is 34.2 kWh, and in the transition season scheme 3 the lowest indoor temperature is 0.4°C , which is 3.3°C higher than Scheme 1, and the heating energy consumption is 24.3 kWh, which is a saving of 28.95% compared with Scheme 1. Through the economic analysis, it can be seen that the daily value of the dynamic operating cost in winter in Scheme 3 saves 23.60% compared with Scheme 1. Energy-saving modifications to the enclosure structure can effectively improve the indoor thermal environment of the prefabricated houses while reducing the heating energy consumption, which is of great significance to safeguard the basic physiological health of human beings, especially in extremely cold conditions.

【Keywords】 Enclosure; Energy efficiency retrofit; Heating energy consumption; Prefabricated houses; Indoor thermal environment

0 引言

由于活动板房具有易搭建、造价低的特点,所以经常被用在建筑工地给人们提供临时办公场地^[1]。赵伟^[2]和王曼^[3]等发现活动板房的室内环境较差,不适宜居住^[4,5]。这是因为建造活动板房围护结构采用的材料热阻和热惰性较小,室内环境容易受外部环境的影响^[6]。

为改善室内热环境,刘盼盼等^[7]研究了不同围护结构厚度对活动板房室内热环境的改善情况;齐全等^[8]发现在围护结构外侧复合回归反射材料可使活动板房室内温度最大下降 8°C ; Meng X 等^[9]证实在活动板房围护结构外侧覆盖逆向反射材料,室内空气温度可降低 7°C 以上; Wang C 等^[10]发现围护结构中加入 PCM 可使室内平均气温降低 $3.2\sim 3.6^{\circ}\text{C}$ 。Moran F 等^[11]对沙漠中的避难所围护结构进行改造,结果表明室温最高可改善 6°C 。以上研究结果表明在自然条件下对临时建筑进行围护结构改造可以提高室内环境的热舒适。

然而在双碳目标的背景下,活动板房等临时建筑不仅要提高室内环境的热舒适,更要降低其运行能耗^[12]。寒冷气候下临时建筑的热舒适受围护结构性能、遮阳和渗透的影响^[13],Liu G^[14]和王宏伟等^[15]发现围护结构对能耗的影响最大。为了降低活动板房建筑运行能耗, Song Y 等^[16]发现临时住房采用轻钢结构全生命周期能耗可以减少 244.45GJ; Atmaca A 等^[17]证实了预制式住宅的全生命周期能耗降低 25.1%; Jiang W 等^[18]发现顶棚式屋顶节能

率可达到 19.38%。以上研究结果表明针对围护结构做节能改造可以降低能耗。

新疆地区冬季最低气温低至 -20°C 以下,且昼夜温差大,这会给人带来严重的健康风险,增加心血管疾病和冻伤的发生率^[19-21]。因此提高室内最低温度已经成为保证室内人员身体健康的基本问题,但是目前针对严寒地区活动板房围护结构节能改造的研究较少^[22],本文基于新疆地区独特的气候特点,设计了 3 种围护结构方案,通过实验测试不同方案在冬季和过渡季的室内温度及围护结构内外壁面温度,分析不同方案对室内环境温度的提升能力,并对 3 种方案进行经济性评估。

1 实验设计

根据现有研究可知,围护结构(外墙、屋顶、地板等)的传热系数对室内热环境及建筑能耗均有显著影响,寒冷地区及严寒地区影响更大。为探究活动板房围护结构节能改造潜力,本研究在新疆地区搭建了活动板房,如图 1 所示。围护结构材料如下,常规活动板房为方案 1:外墙为 1 块由 0.4mm 镀铝锌彩钢板+75mm 玄武岩棉+0.4mm 镀铝锌彩钢板组成的墙板;屋顶为 1 块由 0.4mm 镀铝锌彩钢板+75mm 玻璃棉毡+0.4mm 镀铝锌彩钢板组成的楼板;地板为 1 块由 1.6mmPVC 地板+18mm 水泥纤维板+75mm 玻璃棉毡+0.4mm 镀铝锌彩钢板组成的地板;考虑到新疆地区冬季气候寒冷,在方案 1 的基础上对围护结构进行不同厚度的保温,方

案 2 对北向外墙增加一块相同材质的备用墙板；方案 3 对东西南北四面外墙分别加了两块墙板，地板为 1 块由 1.6mmPVC 地板+18mm 水泥纤维板+225mm 玻璃棉毡+0.4mm 镀锌彩钢板组成的地板。方案设计及围护结构传热系数如表 1 所示。板房内部尺寸为 5795×2730×2590mm³；东西向外墙分别设有尺寸为 1150×1100mm² 的外窗，且东向外墙还装有尺寸为 840×2035mm² 的钢质门。板房内部除实验设备外无任何照明或其他散热设备。



图 1 活动板房现场拍摄图

Fig.1 Prefabricated houses scene shooting picture

表 1 方案设计

Table 1 Scheme design

方案	围护结构类型	板材数量	传热系数/(W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)
方案 1	外墙	1	0.543
	屋顶	1	0.595
	地板	1	0.578
方案 2	东/南/西向外墙	1	0.543
	北向外墙	2	0.285
	屋顶	1	0.595
	地板	1	0.578
	外墙	3	0.193
方案 3	屋顶	3	0.213
	地板	1	0.211

2 实验测试

本次实验测试时间分为冬季（2023 年 11 月至 2023 年 12 月）与过渡季（2024 年 4 月至 2024 年 5 月），测试内容如下：（1）温度测试，测试表 1 所示的 3 个围护结构设计方案下活动板房的室内温度、围护结构内外壁面温度；（2）能耗测试，冬季工况测试 3 种围护结构设计方案下分别使用

两台功率均为 3kW 的电加热器供暖，供暖温度设置恒定 20℃ 的活动板房供暖能耗；过渡季工况使用一台电加热器进行供暖，记录其采暖耗电量。

测试对象为东南西北四个方向外墙的内外壁面温度和室内外温湿度。壁面温度采用热电偶进行测试，为保证数据准确，测试之前将所有热电偶探头进行恒温水浴标定；室内温度采用温湿度自记仪进行测量，将其悬挂于房间中心距地面 1.5m 处。测点布置和仪器布置如图 2 所示，测试所用仪器如表 2 所示。

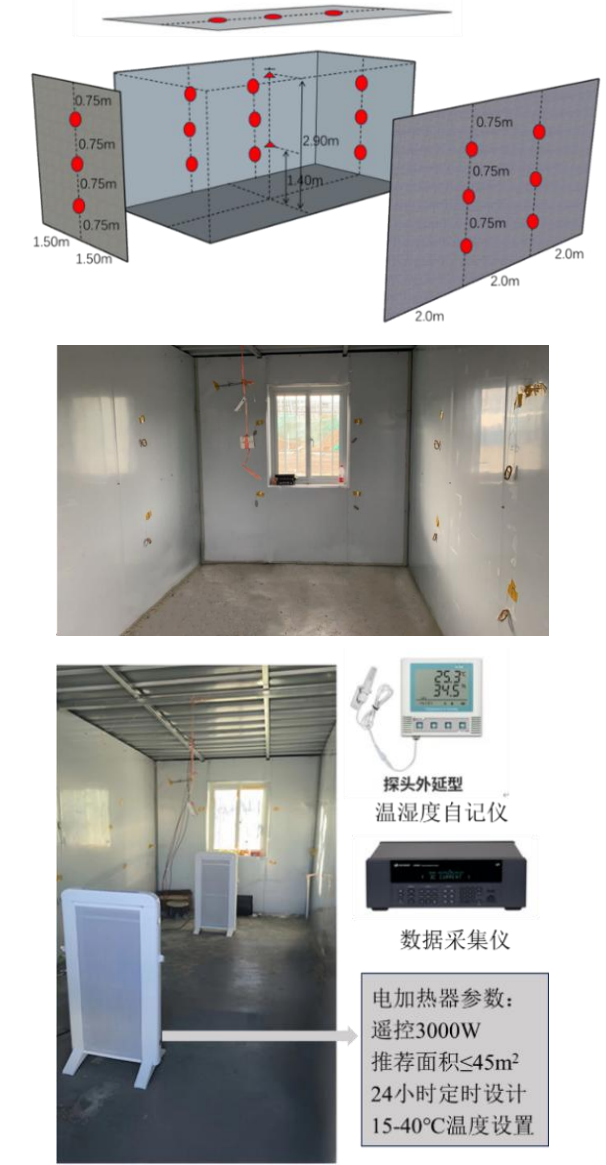


图 2 测点及仪器布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of measurement points and instrument layout

表 2 主要测试仪器

Table 2 Main test instruments

仪器名称	品牌型号	测量范围及精度	最大误差
Omega 球形自粘式热电偶	Omega SA3-K-120	-17℃~260℃, ±0.55℃	2.29%
温湿度自记仪	HIOKI 3641-20	温度: -20.0℃~70.0℃, ±0.5℃ 相对湿度: 0.0%~100.0%, ±5%	2.77%
数据采集仪	Agilent 34980A	±300V, 扫描速度 100ch/s	2.21%

3 测试结果分析

3.1 围护结构南向外墙内外壁面温度

新疆地区空气干燥, 云量少, 太阳能年总辐射量可达 5000~6400MJ/m², 即使是冬季辐照量有所下降, 其平均太阳能辐照量也能达到 3500~3600MJ/m²。

梁志滔等^[23]的研究结果表明活动板房的室内环境受室外环境的影响程度在太阳辐射强度高的时候最显著。因此对于强辐射地区, 直射辐射传热作用非常明显。尤其活动板房建筑等轻质围护结构建筑的热阻小, 对强太阳辐射的抵抗作用较低。为研究强辐射对活动板房南向外墙内外壁面温度的影响, 对方案 1 和方案 3 在冬季和过渡季两种工况下南向外墙内外壁面温度进行测试, 结果如图 3 所示。可以看出不论是冬季还是过渡季方案 1 和方案

3 中板房的南向外墙内外壁面温度值都较为接近, 变化趋势也基本一致。冬季方案 1 活动板房南向外墙外壁面温度最大值为 39.27℃, 内壁面温度在 15:14 达到最大值, 为 12.09℃; 方案 3 活动板房南向外墙外壁面温度最大值为 42.14℃, 而内壁面温度在 17:43 才达到最大值, 且最高温度仅为 8.28℃。过渡季方案 1 活动板房南向外墙外壁面温度最大值为 25.41℃, 内壁面温度在 16:32 达到最大值, 为 12.97℃; 方案 3 活动板房南向外墙外壁面温度最大值为 25.90℃, 而内壁面温度在 17:03 达到最大值, 且最高温度仅为 9.22℃。

可以看出方案 3 活动板房内壁面温度相较于方案 1 出现一定的衰减和延迟。这是由于方案 1 中活动板房未进行保温, 南向壁面的热阻较方案 3 较小, 传热较快。

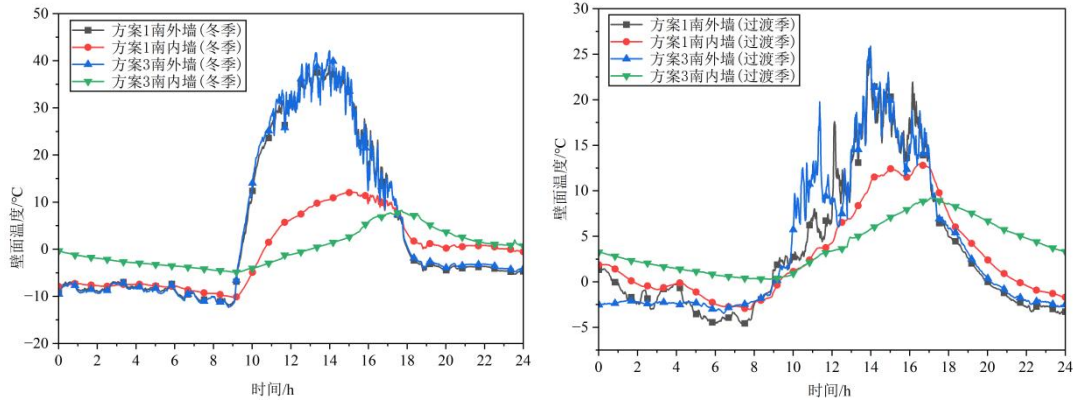


图 3 冬季和过渡季工况下方案 1 与方案 3 南向墙内外壁面温度对比

Fig.3 Comparison of the internal and external wall temperature of Scheme 1 and Scheme 3 under the conditions of winter and transition season

3.2 室内热环境

本研究分别选取冬季和过渡季中晴朗天气进行实验测试, 测试对象包括室外空气温度和自然室温, 测试结果如图 4 所示。由图 4 可知, 冬季和过渡季方案 1、方案 3 和室外气温均保持先降低后升高再降低的变化趋势。冬季工况下测试当天室外最

低温度出现在 8:51, 为-10.48℃, 同一时刻方案 1 和方案 3 室内温度分别为-9.9℃和-5.0℃, 方案 3 室内温度提高了 4.9℃; 过渡季工况下测试当天室外最低温度出现在 7:24, 为-2.5℃, 同一时刻方案 1 和方案 3 室内温度分别为-2.6℃和 0.9℃, 方案 3 室内温度提高了 3.5℃。同时冬季工况下方案 1 室

内最低温度出现在 9:06, 为 -10.0°C , 24h 平均室内温度为 -1.8°C , 方案 3 室内最低温度为 -5.1°C , 较方案 1 提高 4.9°C , 24h 平均室内温度为 -0.2°C , 较方案 1 提高 1.6°C ; 过渡季工况下方案 1 室内最低温度出现在 7:51, 为 -2.9°C , 24h 平均室内温度为 2.7°C , 方案 3 室内最低温度为 0.4°C , 较方案 1 提高 3.3°C , 24h 平均室内温度为 4.2°C , 较方案 1 提高 1.5°C 。这是由于方案 3 对活动板房围护结构进行保温后, 可以有效减缓热量通过围护结构传递的

速度, 同时能有效减少通过墙体的热量流失从而提高室内温度, 使其热工性能得到较大提升。综上所述可以发现方案 3 在冬季和过渡季工况下室外温度最低时室内温度均大幅提高, 同时方案 3 在两种工况下的室内最低温度和 24h 平均温度均有所提高, 表明围护结构改造对改善室内热环境有很大效果。进一步对比冬季工况和过渡季工况下的室内热环境可以发现冬季工况效果更好。

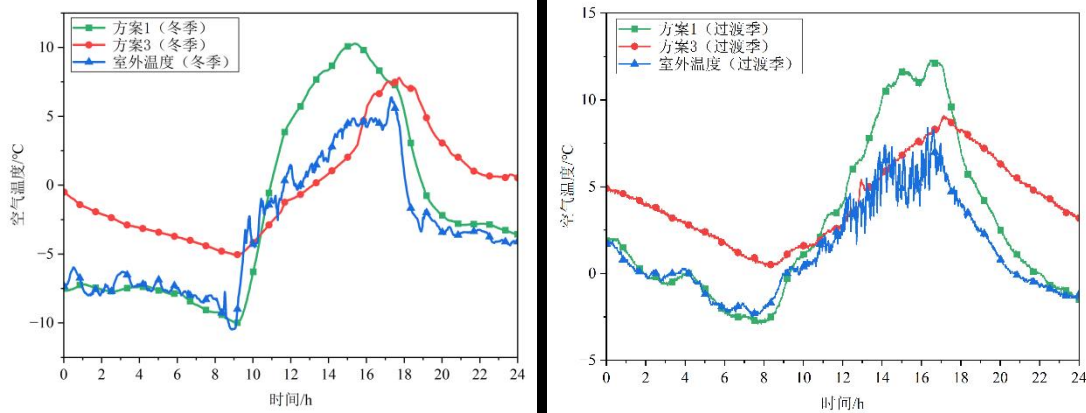


图 4 冬季和过渡季工况下方案 1 与方案 3 室内温度对比

Fig.4 Indoor temperature comparison between Scheme 1 and Scheme 3 in winter and transition season

3.3 围护结构温度的衰减和延迟

对围护结构进行改造后可以改善室内热环境, 是因为改造后围护结构热工性能有所提升, 体现在热惰性指标的变化。如图 4 所示, 冬季工况下方案 1 室内最低温度出现在 9:06 为 -10.02°C , 最高温度出现在 15:22 为 10.27°C ; 而方案 3 室内最低温度出现在 9:05 为 -5.08°C , 17:43 最高温度为 7.80°C 。过渡季工况下方案 1 室内最低温度出现在 7:41 为 -2.9°C , 最高温度出现在 16:26 为 12.3°C ; 而方案 3 在 8:04 最低温度为 0.4°C , 17:07 最高温度为 9.1°C 。通过对比冬季和过渡季方案 1 和方案 3 室内温度的峰值和谷值及出现时间, 可以发现冬季方案 3 较方案 1 峰值出现时间延迟了 2 小时 21 分钟, 过渡季峰值出现时间延迟了 41 分钟。这是因为建筑围护结构中的变化热作用带有一定的周期波动性, 如室外气温和太阳辐射的昼夜小时变化, 在一段时间内可近似地看作每天出现重复性的周期变化。

室外温度、壁面温度以及平壁内部任意截面的温度都是同一周期的谐波动, 都存在温度的衰减和延迟。本文旨在通过实验测试的方法研究采用冬季

和过渡季不同厚度保温下活动板房的蓄热特性, 而现有研究表明不同构造的墙体对室外温度波的衰减各有差异。不同保温厚度对温度波的衰减倍数有显著影响, 对延迟时间影响较小^[24,25]。因此, 本文的研究重点为围护结构保温对室外温度波的衰减, 衰减倍数 v_0 的计算方式如式 (1) 所示。

$$v_0 = \frac{A_e}{A_{if}} = \frac{(t_{e,\max} - t_{e,\min})}{(t_{if,\max} - t_{if,\min})} \quad (1)$$

式中: A_e 为室外温度波的振幅; A_{if} 为平壁内表面温度波的振幅; $t_{e,\max}$ 和 $t_{e,\min}$ 分别为室外温度波的峰值和谷值; $t_{if,\max}$ 和 $t_{if,\min}$ 分别为平壁内表面温度波的峰值和谷值。

本文以方案 1 常规活动板房为研究对象, 对其北向外墙进行不同厚度的保温, 其围护结构设计如表 1 所示。通过测试冬季和过渡季工况下两种方案的室外空气温度和内壁面温度, 对比两种方案温度波的振幅和衰减系数, 研究不同围护结构在谐波热作用下热惰性指标变化情况。

室外空气温度和内壁面温度测试结果如表 3 所示。

表3 室外空气温度和内壁面温度

Table 3 Outdoor air temperature and inner wall temperature

方案	室外温度/℃		北向外墙内壁面温度/℃	
	最大值	最小值	最大值	最小值
方案1(冬季)	4.99	-10.47	9.86	-10.16
方案2(冬季)	2.02	-16.74	7.05	-14.54
方案1(过渡季)	8.4	-2.5	12.19	-2.92
方案2(过渡季)	14.7	-4.1	17.66	-5.32

采用公式(1)计算2种方案对应北向外墙温度波的衰减如图5所示。

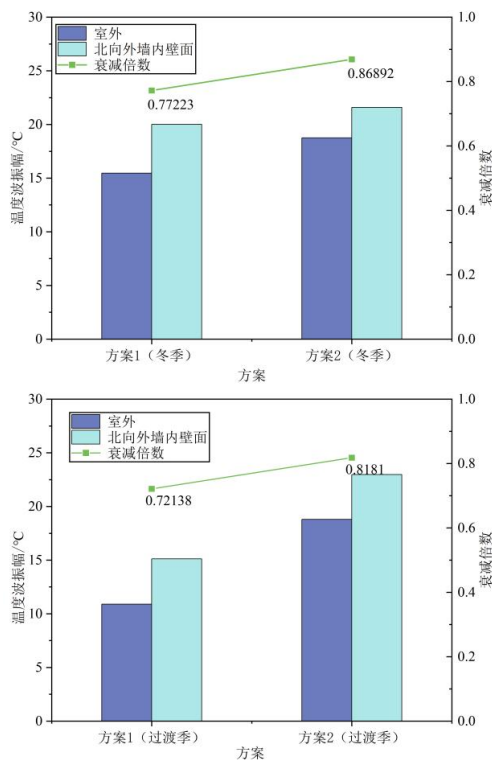


图5 冬季和过渡季工况下两种方案北向外墙温度波的衰减

Fig.5 Attenuation of temperature wave of north exterior wall of two schemes in winter and transition season

图5显示了2种方案下实测的室外空气温度和北向外墙内壁表面温度的振幅及衰减度。由于测试不同方案时的室外气象条件并不相同,所以室外空气温度波的振幅存在差异。冬季工况下两种方案北向外墙室内外温度波穿透衰减度分别为0.77223和0.86892,过渡季工况下分别为0.72138和0.8181,表现为随保温厚度增加而增大。

3.4 供暖能耗

三种围护结构设计方案冬季采用两台相同的电加热器供暖,过渡季采用一台电加热器供暖,并

对其供暖能耗进行测试。冬季供暖时间为18:00至次日16:00,过渡季供暖时间为21:00至次日21:00,供暖室内设计温度为20℃,能耗测试结果如图6所示。由图6可知,冬季工况方案1、方案2和方案3的能耗呈现依次降低的趋势,从大到小分别为:80.08kWh、57.93kWh和42.66kWh。方案1和方案2北向外墙厚度分别为75.8mm和151.6mm,方案2改造后的供暖能耗比方案1节省了27.66%,共节省能耗22.15kWh。方案3四个方向外墙与屋顶厚度均为227.4mm,其供暖能耗比方案1节省了46.73%,通过对比三种方案的供暖能耗可以看出进行围护结构改造可以有效降低供暖能耗。由于室外气象条件的影响,过渡季工况下方案2较方案1的供暖能耗有所增加,而方案1与方案3是同一天测试的,所以图7仅展示方案1和方案2测试当天的室外温度。然而对比方案3与方案1可以发现供暖能耗下降了28.95%,这是由于进行围护结构改造后,增加的保温板使得围护结构的热阻增加,导致整个结构的传热系数减小,从而减少室内热量向室外传递。

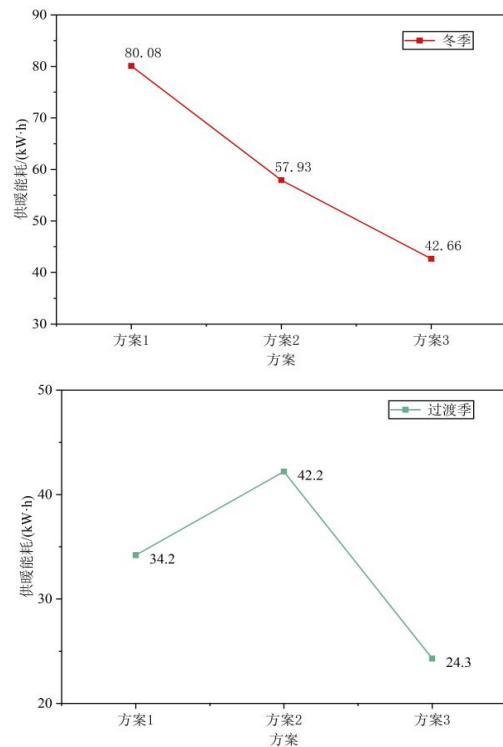


图6 冬季和过渡季3种围护结构设计方案供暖能耗对比

Fig.6 Comparison of heating energy consumption of three envelope design schemes in winter and transition season

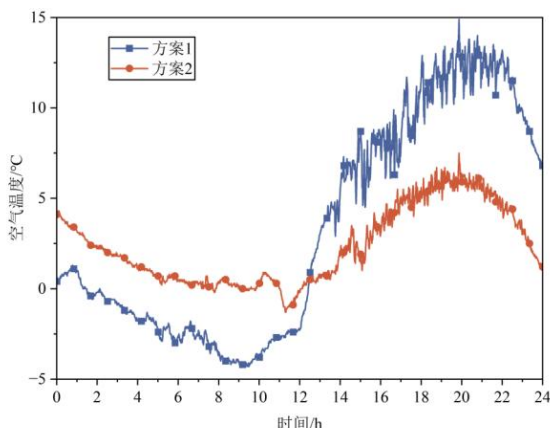


图7 过渡季方案1与方案2测试当天室外温度

Fig.7 Scheme 1 and Scheme 2 test the outdoor temperature of the day

综合以上分析,在对新疆等气候条件极其特殊的地区的活动板房建筑进行围护结构改造时要综合考虑当地寒冷的气候条件、强太阳辐射和天空背

表4 材料热工参数和价格

Table 4 Thermal parameters and prices of materials

类型	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	单价/(CNY·cm ⁻¹ ·m ⁻²)
玻璃棉毡	0.18	0.84	70	0.625
玄武岩棉	0.162	1.22	140	5

不同方案费用日值计算结果如表5所示。

表5 不同方案费用日值计算结果

Table 5 Calculation results of daily cost values for different schemes

方案	建筑增加成本 (元·日 ⁻¹)	冬季		过渡季	
		运行费用 (元·日 ⁻¹)	动态费用日值 (元·日 ⁻¹)	运行费用 (元·日 ⁻¹)	动态费用日值 (元·日 ⁻¹)
方案1	0	44.49	44.49	19	19
方案2	4.2	33.29	37.49	23.44	27.64
方案3	10.29	23.7	33.99	13.5	23.79

表5展示了不同方案的运行费用和动态费用日值,可以看出在冬季方案2和方案3动态费用日值逐渐减少,方案2动态费用日值较方案1节省了15.73%,方案3动态费用日值最低为33.99元/日,较方案1节省了23.60%;过渡季方案3动态费用日值比方案1高了25.21%,但是运行费用较方案1节省了28.95%。优先考虑冬季工况下对室内环境的改善情况同时结合经济性分析认为方案3是更优的选择。

4 结论

本文以新疆地区活动板房作为研究对象,围绕

景辐射强等因素。针对昼夜温差大的情况可以对不同朝向的外墙采用不同的保温措施,北外墙可以强化保温性能防止热量散失,南外墙可以适度弱化保温强度,同时适当加大窗墙比。

3.5 经济性分析

本研究在冬季和过渡季分别进行了日工况运行测试,所以综合考虑初投资和日运行费用确定活动板房动态费用日值为指标,对三种方案进行经济性分析,计算方法如公式(2)所示。

$$Z = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times M_i \times P_i + \frac{L}{0.9} \times P \quad (2)$$

式中: Z 为费用日值,元/日; i 为存款利率,%,取3.10%; n 为系统寿命,年,取15年; M_i 为围护结构夹心保温材料厚度; P_i 为保温材料的价格; L 为活动板房采暖负荷; P 为电价,取0.5CNY/kWh。保温材料热工参数和价格如表4所示。

围护结构节能改造对室内热环境的影响展开讨论,通过实验测试和数据分析,总体来看方案3具有显著的节能效果,具体结论如下:

(1) 围护结构进行保温改造后,室内热环境得到改善。冬季测试当天室外最低温度为-10.48℃,同一时刻方案1与方案3室内温度分别为-9.85℃和-4.96℃,方案3室内温度提高4.89℃;过渡季测试当天室外最低温度为-2.5℃,同一时刻方案1和方案3室内温度分别为-2.6℃和0.9℃,方案3室内温度提高3.5℃。冬季方案1室内最低温度为-10.02℃,24h室内平均温度为-1.79℃,方案3室内最低温度为-5.08℃,24h室内平均温度为

-0.17℃,较方案1分别提高4.94℃和1.62℃;过渡季方案1室内最低温度为-2.9℃,24h室内平均温度为2.72℃,方案3室内最低温度为0.4℃,24h室内平均温度为4.21℃,较方案1分别提高3.3℃和1.49℃。

(2)围护结构保温改造能有效降低供暖能耗,冬季3种方案的供暖能耗依次为80.08kWh、57.93kWh、42.66kWh,改造后的方案2、3分别比方案1节省了27.66%、46.7%;过渡季方案1与方案3供暖能耗分别为34.2kWh、24.3kWh,能耗降低28.95%。

(3)围护结构进行保温改造后可以降低运行费用,冬季方案3动态费用日值较方案1节省了23.60%,过渡季节方案3动态费用日值略有升高,但是运行费用较方案1节省了28.95%。

参考文献:

- [1] 傅楚昊.广州地区建筑工地内办公用活动板房室内热舒适研究[D].广州:广州大学,2020.
- [2] 赵伟.组合板房的热环境研究[D].西安:西安工程大学,2015.
- [3] 王曼,冯文谦,杨华,等.活动板房室内热环境实测评价与热工性能分析[J].河南科技,2018,(5):132-134.
- [4] 陈洪轻.板房室内热湿环境及改善措施的研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [5] Poschl R A. Modelling the thermal comfort performance of tents used in humanitarian relief[D]. Loughborough University, 2017.
- [6] Yu Y, Long E, Shen Y, et al. Assessing the thermal performance of temporary shelters[J]. Procedia engineering, 2016,159:174-178.
- [7] 刘盼盼,张占辉.寒冷地区临时建筑围护结构室内热环境研究[J].节能,2019,38(3):1-3.
- [8] 齐全,李元昊,殷结峰,等.回归反射材料对板房热性能影响研究[J].制冷与空调,2017,31(1):86-90.
- [9] Meng X, Wang C, Liang W, et al. Thermal performance improvement of prefab houses by covering retro-reflective materials[J]. Procedia Engineering, 2015, 121:1001-1007.
- [10] Wang C, Huang X, Deng S, et al. An experimental study on applying PCMs to disaster-relief prefabricated temporary houses for improving internal thermal environment in summer[J]. Energy and Buildings, 2018,179:301-310.
- [11] Moran F, Fosas D, Coley D, et al. Improving thermal comfort in refugee shelters in desert environments[J]. Energy for Sustainable Development, 2021,61:28-45.
- [12] 高亚茹.西安地区临时性活动板房的热环境研究[D].西安:西安工程大学,2023.
- [13] Dara C, Hachem-Vermette C, Assefa G. Life cycle assessment and life cycle costing of container-based single-family housing in Canada: A case study[J]. Building and Environment, 2019,163:106332.
- [14] Liu G, Jiang W, Ma L, et al. Change rates and weight values of energy consumption parameters for light steel buildings in severe cold region[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2022,44(3):8285-8298.
- [15] 王宏伟,于晨,靳悦,等.严寒地区农村住宅围护结构现状分析与优化研究[J].建筑技术,2024,55(1):82-87.
- [16] Song Y, Mithraratne N, Zhang H. Life-time performance of post-disaster temporary housing: A case study in Nanjing[J]. Energy and Buildings, 2016,128:394-404.
- [17] Atmaca A, Atmaca N. Comparative life cycle energy and cost analysis of post-disaster temporary housings[J]. Applied energy, 2016,171:429-443.
- [18] Jiang W, Zhang K, Ma L, et al. Energy-saving retrofits of prefabricated house roof in severe cold area[J]. Energy, 2022, 254: 124455.
- [19] Li C, Wu J, Shen S, et al. Sex differences in physiological responses and thermal perception during repeated extremely cold exposure (-15℃)[J]. Energy and Buildings, 2024, 324:114881.
- [20] Wang Z, Zhang Y, Xia Y, et al. Study on personal comfort heating system and human thermal comfort in extremely low-temperature building environments[J]. Building and Environment, 2024,259:111640.
- [21] Chen R, Yin P, Wang L, et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities[J]. Bmj, 2018,363.
- [22] 李洁,徐鑫,姚新强,等.新疆地区既有农宅被动式改造与供暖初期运行效果分析[J].科学技术与工程,2020, 20(13):5332-5337.

(下转第921页)