

文章编号: 1671-6612 (2024) 04-465-07

东北寒冷地区装配式农房热性能实测研究

吴敏 赵金玲

(大连理工大学建设工程学院 大连 116024)

【摘要】 双碳背景下, 装配式轻钢结构建筑因其高效、经济、低碳的优势, 成为当代乡村住宅建设发展的首要选择。以大连市复州城镇农房为例, 通过对比分析装配式轻钢结构农房与当地传统青石砌筑结构农房的围护结构热工性能, 从节能、环保效益角度分析装配式钢结构农房应用东北寒冷地区的适宜性。此外, 实测结果表明装配式轻钢结构农房存在热稳定性差的问题, 基于热稳定性影响因素分析发现提高外围护结构蓄热性能可有效提高轻质建筑的热稳定性和热舒适性。

【关键词】 装配式钢结构; 农房; 热工性能; 节能

中图分类号 TU832 文献标志码 A

Experimental Study on Thermal Performance of Prefabricated Farmhouses in Cold Regions of Northeast

Wu Min Zhao Jinling

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024)

【Abstract】 Under the dual carbon background, prefabricated light steel structure buildings have become the primary choice for the development of contemporary rural residential construction due to their advantages of high efficiency, economy, and low-carbon. This article takes the rural houses in Fuzhou Town, Dalian City as an example to compare and analyze the thermal performance of the enclosure structure between prefabricated light steel structure rural houses and local traditional bluestone masonry structure rural houses. From the perspective of energy conservation and environmental protection benefits, the suitability of prefabricated steel structure rural houses for use in cold regions of Northeast China is analyzed. In addition, the actual test results indicate that prefabricated light steel structure rural houses have poor thermal stability. Based on the analysis of factors affecting thermal stability, it is found that improving the thermal storage performance of the outer enclosure structure can effectively improve the thermal stability and thermal comfort of lightweight buildings.

【Keywords】 Prefabricated steel structure; Rural houses; Thermal performance; Energy conservation

0 引言

在“双碳”目标的背景下, 推进绿色低碳农房建设是我国城乡建设领域碳达峰实施方案的重点任务之一^[1], 节能低碳、质量安全、现代宜居成为农房建设的重要指标^[2]。作为我国乡村振兴战略的重点实施对象, 东北地区农房绿色低碳设计建造水平的提升、农房能效水平的提高尤为关键。目前, 我国积极鼓励和引导装配式钢结构新型建造方式

结合建筑节能技术在新建农房中应用, 东北地区采用装配式钢结构新建农房的数量逐年增加, 装配式农房在节能、舒适、环保等方面的实际运行性能越来越受到关注。

装配式钢结构体系农房以模块化钢构件为主承重骨架, 并配合新型墙体材料作为外围护结构, 具有布局灵活、重量轻、施工效率高等特点^[3]。近年来, 装配式钢结构住宅试点在青海、四川、浙江

作者简介: 吴敏 (2000-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: minwu_dut@163.com

通讯作者: 赵金玲 (1974-), 女, 博士, 副教授, E-mail: zhaojinling@dlut.edu.cn

收稿日期: 2024-04-14

等地得到推进^[4]。四川省庐山县^[5]和广东省东莞市^[6]两地对装配式轻钢结构建筑的室内热环境实验研究都表明,装配式钢结构建筑围护结构采用的高保温性能材料密度低、热阻大,能够维持更高的室内温度,减少散热损失;对北京市某装配式钢结构住宅的建筑资源节约评估结果也表明,其在土地、绿色建材、能源利用等方面都可达到绿色建筑评价标准,具有良好的综合效益^[7];吉林市装配式钢结构住宅工程也初步展现了装配式钢结构建筑的绿色、抗震的特点^[8,9]。然而,针对东北地区装配式钢结构农房的热性能尚缺乏科学可靠的实测数据^[10]。相关研究表明,季节和气候区等条件对建筑的热性能存在影响,同一建筑在严寒 B 区和寒冷 B 区的气候条件下供暖能耗差值可达 51%^[11]。因此有必要通过现场测试考察东北地区装配式钢结构农房的热性能。

为探究装配式钢结构体系农房在东北寒冷地区的实际应用效果,本文对辽宁省大连市复州城镇的新建装配式钢结构农房进行热工性能实测研究,并通过与当地传统青石砌筑结构农房的对比,基于实测结果分析装配式钢结构农房的节能率、热稳定性以及碳减排效益,为进一步提高装配式钢结构农房的性能提供科学依据。

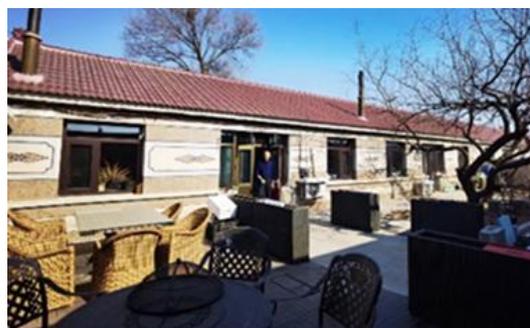
1 实测农房信息与测试方法

1.1 实测农房信息

本文的研究对象位于大连市复州城镇,属于建筑热工设计气候分区中的寒冷地区。该农户居住者为一对老年夫妇,年龄为七十岁以上。该农户原有一座居住了四十余年的采用当地传统青石材料的砌筑结构住宅,于 2019 年在庭院南侧新建了一座装配式钢结构住宅,并对青石砌筑老宅进行了门窗和采暖系统改造,农房外观如图 1 所示。



(a) 新建装配式钢结构农房南立面



(b) 传统青石砌筑结构农房南立面

图 1 实测农房建筑外观

Fig.1 Actual measurement of the appearance of rural housing buildings

为了对比分析装配式钢结构农房的节能率和热稳定性等热性能,本研究对新建装配式农房和传统青石砌筑农房均进行实测,农房平面布局以及实测房间的分布如图 2 所示。

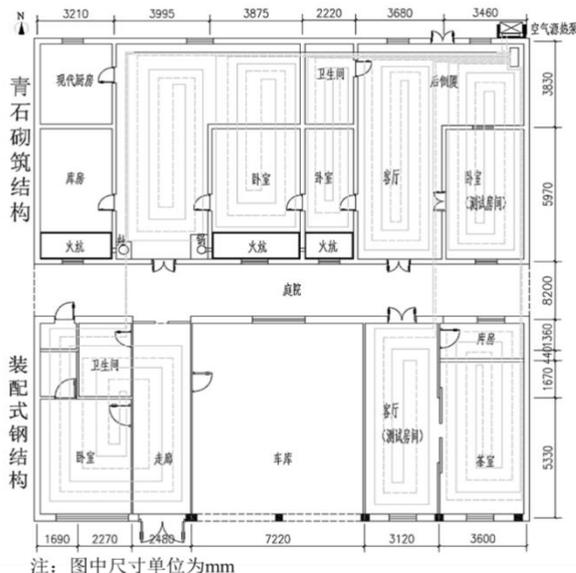


图 2 实测农房建筑平面布局与测试房间分布

Fig.2 Actual measurement of the layout of rural housing buildings and the distribution of testing rooms

所测试的房间的采暖系统均采用空气源热泵作为热源,末端为低温热水地板辐射采暖系统。空气源热泵室外机设置在青石砌筑农房外东北角。装配式钢结构农房与青石砌筑农房的围护结构主要构造及热工性能参数列于表 1。由表 1 可知,传统青石砌筑结构农房的外墙和屋面传热系数分别超过《农村居住建筑节能设计标准》^[12]所规定限值的 2.6 倍和 4 倍,而装配式钢结构农房的围护结构传热系数均满足农村居住建筑传热系数限值的要求。

表 1 实测对象建筑热工信息

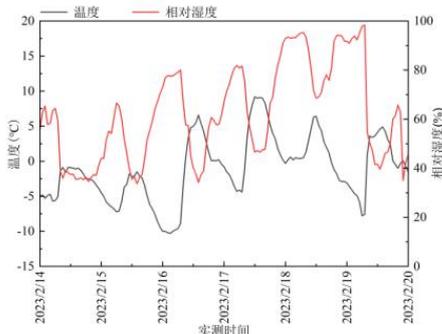
Table 1 Thermal information of the measured object building

围护结构构件	围护结构主要构造		传热系数 W/(m ² ·K)		传热系数限值 W/(m ² ·K)
	装配式钢结构农房	青石砌筑结构农房	装配式钢结构农房	青石砌筑结构农房	
外墙	300mm 钢网模泡粒混凝土外墙板	450mm 青石砖外墙	0.33	2.36	0.65
内墙	120mm 钢网模泡粒混凝土内墙板	120mm 红砖内墙	0.72	2.03	-
屋面	200mm 钢网模泡粒混凝土屋面板+150mm 石膏板	10mm 石膏板+50mm 粘土层陶瓷瓦屋面	0.39	2.48	0.50
地面	10mm 地砖+100mm 泡粒混凝土	10mm 地砖+100mm 泡粒混凝土	0.88	0.88	-
外窗	断桥铝三玻窗	断桥铝双玻窗	2.3	2.5	2.5

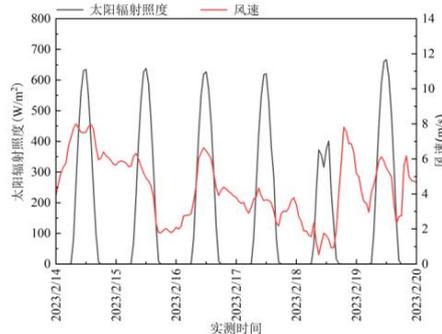
1.2 测试方法

在 2023 年 2 月 14 日~19 日对装配式钢结构农房与青石砌筑结构农房进行连续 6 天的实测。空气温度测量采用 Testo 175-H1 温湿度自记仪, 测试精度为 0.1℃。墙体壁面温度测量采用 JTNT-A/C 多通道温度热流计, 测量精度为 0.1℃。热电偶用锡箔纸覆盖, 以减少外部辐射影响。各测试仪器自动记录时间间隔设置为 10min。测点布置参照标准《建筑热环境测试方法标准》JGJ/T 347-2014^[13]。为更好地评判该农房在冬季的热湿环境是否满足人体舒适度要求, 本研究还对居住者进行了居住舒适度的访问调查。

实测期间室外逐时气象参数如图 3 所示。由图 3 可知, 测试期间, 复州城镇地区室外气温在 -10.3~9.6℃ 范围内波动; 室外空气相对湿度在 34% 以上; 平均太阳辐射照度为 156W/m²; 地面风速在 0.5~8.0m/s 范围内变化。



(a) 温湿度变化



(b) 太阳辐射照度及风速变化

图 3 实测期间复州城镇气象参数变化

Fig.3 Changes in meteorological parameters in urban areas of Fuzhou during the actual measurement period

2 测试结果

2.1 农房室内空气温度

图 4 为实测期间装配式钢结构农房和青石砌筑结构农房室内外逐时温度变化曲线。由图 4 可知, 测试期间, 两种结构农房的室内空气温度都在不断变化。室外气温在 -10.3~9.6℃ 范围内波动; 装配式钢结构农房室内空气温度波动范围在 17.05~24.05℃, 平均温度为 21.47℃; 青石砌筑结构农房的室温波动范围为 20.15~23.15℃, 平均温度为 21℃。

根据《农村居住建筑节能设计标准》^[12], 80% 的农户认为 13~16℃ 是冬季较为舒适的采暖室内温度, 寒冷地区农宅室内计算温度应取 14℃。因此,

本研究装配式钢结构农房和青石砌筑结构农房的室内温度均满足舒适要求，但是平均室温比农宅室内计算温度高约 7℃。居住者为七十岁以上老年人，现场访问调查表明，居住者认为室内空气温度较舒适。

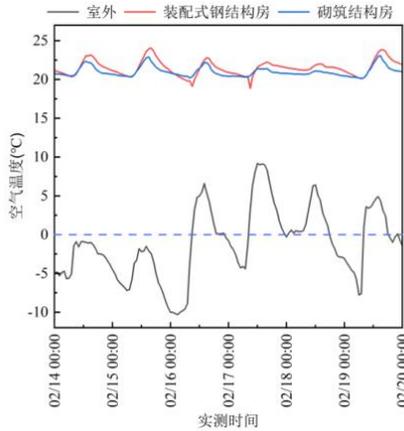


图 4 实测农房逐时室内外空气温度变化

Fig.4 Actual measurement of hourly indoor and outdoor air temperature changes in rural houses

2.2 农房墙体内部温度

图 5 为实测期间装配式钢结构农房和青石砌筑结构农房的墙体内部逐时温度变化曲线。在实测期间，青石砌筑结构农房的外墙内壁面平均温度为 16℃，内墙内壁面平均温度为 18℃。相较于青石砌筑结构农房，装配式钢结构农房的外墙和内墙内表面平均温度分别达到 17.1℃和 20.5℃，提升了 1.1℃和 2.5℃。说明由于装配式钢结构农房的墙体保温性能的提高，使围护结构内壁面温度得到了有效提升，改善了墙体内部与人体之间的辐射换热。同时，在测试期间，装配式钢结构农房的外墙内壁面温度平均日较差为 3.6℃，最大为 5.8℃；青石砌筑结构农房的外墙内壁面温度平均日较差为 1.7℃，最大为 2.9℃。说明钢结构农房的外墙内壁面温度波动程度更大。

观察图 5 所呈现的两种农房墙体内部温度的变化情况，可见 2 月 16 日两种农房的外墙内壁面温度波动均十分剧烈，因此以该日为例具体分析农房外墙内壁面的温度变化速率，可得装配式钢结构农房的外墙内壁面降温速率平均为 0.16℃/h，升温速率平均为 0.35℃/h；而青石砌筑农房的外墙内壁面降温速率平均为 0.07℃/h，升温速率平均为 0.06℃/h。可见装配式钢结构农房的外墙内壁面温度的变化速率更迅速，在受到同样的热扰动时，其

更容易产生温度波动。

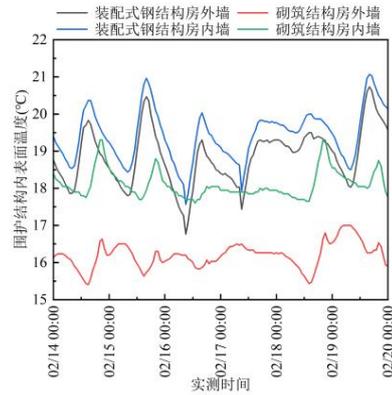


图 5 实测农房墙体内部温度变化

Fig.5 Actual measurement of surface temperature changes inside the walls of rural houses

2.3 空气源热泵辐射采暖地板表面温度

该农户采用空气源热泵作为采暖热源，由同一台主机为装配式钢结构农房和青石砌筑结构农房的低温热水辐射地板供暖系统提供热水。测试期间，装配式钢结构农房和青石砌筑结构农房的辐射采暖地板表面逐时温度变化曲线如图 6 所示。可以看出，供暖过程中装配式钢结构农房和青石砌筑结构农房地面平均温度变化规律基本相同，但装配式钢结构农房地面平均温度为 25℃，青石砌筑结构农房地面平均温度为 27℃。可见，青石砌筑结构农房的地面温度高于装配式钢结构农房，但是墙体内部温度及室温均低于后者，说明在相同的室外气温条件下，青石砌筑结构农房的散热损失大于装配式钢结构农房，需要消耗更多能源来维持较适宜的室内温度。

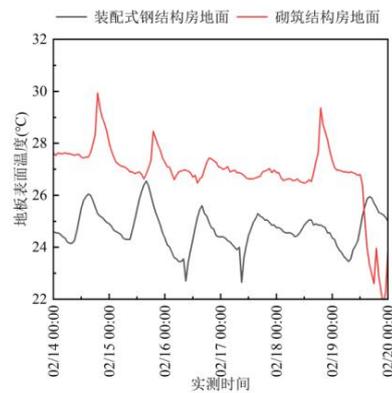


图 6 实测农房地面表面温度变化

Fig.6 Actual measurement of temperature changes on the surface of rural house floors

3 装配式钢结构农房热性能分析

3.1 节能率分析

目前,我国东北寒冷地区的农房以自建为主,多为砌筑和砖混结构^[14],农房的门窗气密性与围护结构的保温性能较差,从而造成建筑能耗高、热舒适性不足等问题。装配式钢结构农房不仅是一种安全高效的新型建造方式,而且可以结合高保温墙体材料和高性能门窗提高农房的节能水平。

利用式(1)计算装配式钢结构农房的节能率 η :

$$\eta = \frac{Q_q - Q_z}{Q_q} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Q_q 为青石砌筑结构农房的单位面积供暖热负荷, W/m^2 ; Q_z 为装配式钢结构农房的单位面积供暖热负荷, W/m^2 。

根据实测农房围护结构的热工参数,可以计算装配式钢结构农房和青石砌筑结构农房的供暖热负荷以及各个围护结构的传热损失,计算结果列于表 2。

表 2 实测农房的平均供暖能耗及各围护构件热流密度

Table 2 Actual measurement of average heating energy consumption and heat transfer of various enclosure components in rural houses

农房类型	外墙热流密度 W/m^2	屋面热流密度 W/m^2	地面热流密度 W/m^2	单位面积供暖热负荷 W/m^2
装配式钢结构农房	6.85	18.75	11.48	49.3
青石砌筑结构农房	12.57	67.01	4.20	131.7

注:农房室内供暖计算温度取为 $14^\circ C$ 。

当按《农村居住建筑节能设计标准》取农房室内计算温度为 $14^\circ C$ 时,青石砌筑结构农房的供暖热负荷达到 $131.7W/m^2$,而装配式钢结构农房的单位面积供暖热负荷为 $49.3W/m^2$ 。相对于当地传统青石砌筑结构农房,装配式钢结构农房的节能率为 63%。

供暖热负荷不仅与围护结构热工参数有关,而且受到室内计算温度的影响。当实测农房的室内供暖计算温度为 $20^\circ C$ 时,装配式钢结构农房的单位面积供暖热负荷达到 $61.3W/m^2$,相对于青石砌筑结构农房的节能率为 58%。可见,不论在供暖设计工况还是在实际运行工况,装配式钢结构农房相对于当地传统青石结构农房都呈现出明显的节能效果。

3.2 热稳定性分析

3.2.1 农房热稳定性对比

建筑热稳定性是指在室内外热波动作用下室温和围护结构温度保持相对稳定的能力,因此,室温和围护结构内表面温度的波动幅度以及延迟时间是非常重要的热稳定性表征参数。

根据图 4 所显示的实测结果,实测期间装配式钢结构农房的室内温度平均日较差为 $3.6^\circ C$,日较差最大可达 $6^\circ C$,砌筑结构农房的室内温度平均日较差为 $1.7^\circ C$,因此,钢结构农房的室内温度波动更为剧烈。同时,由图 5 可见,装配式钢结构农房的外墙内表面温度日较差最大可达青石砌筑结构农房的 2 倍。

另外,结合图 4 和图 5 的温度变化速率可知,装配式钢结构农房的外墙内壁面温度变化速率显著大于砌筑农房的外墙内壁面温度变化速率,且装配式钢结构农房的围护结构内表面温度和室内空气温度呈现出同步变化的特点,外墙内表面温度峰值相对于室内温度峰值平均滞后 $0.5h$,而青石砌筑结构农房的外墙内表面温度相对于室内温度峰值时间延迟 $2\sim 8h$ 。

上述分析表明:相比于当地传统青石砌筑结构农房,装配式钢结构农房的热稳定性较弱,对室外太阳辐射热量和室内供暖热量变化具有更高的敏感性,因此,为了维持设定的室内温度范围,会造成装配式钢结构农房的空气源热泵供暖系统更为频繁地启停。

3.2.2 农房围护结构蓄热性能分析

依据《民用建筑热工设计规范》^[15],室温和围护结构内表面温度的波动幅度以及延迟时间这些参数主要由围护结构蓄热性能决定,而蓄热性能的优劣可用热惰性指标 D 和内表面蓄热系数 Y_i 评价。

热惰性指标 D 的计算为:

$$D = RS \quad (2)$$

式中: R 为围护结构热阻, $m^2 \cdot ^\circ C/W$; S 为材料的蓄热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

墙体内部蓄热系数 Y_i 的计算方法则根据围护结构中温度剧烈波动层位置的不同而变化^[16],计算式见表 3。

表 3 内表面蓄热系数 Y_i 计算方法

Table 3 Calculation method for internal surface heat storage coefficient Y_i

物理意义	温度剧烈波动层位置确定方法	计算方法
通过围护结构内表面的热流波幅与内表面温度波幅的比值, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	$D_1 \geq 1$ $D_1 + D_2 + \dots + D_{n-1} < 1$ $D_1 + D_2 + \dots + D_n \geq 1$ $\sum D < 1$	$Y_i = S_1$ $Y_{n-1} = \frac{R_{n-1} S_{n-1}^2 + S_n}{1 + R_{n-1} S_n}$ $Y_i = Y_1 = \frac{R_1 S_1^2 + \alpha_e}{1 + R_n \alpha_e}$ $Y_n = \frac{R_n S_n^2 + \alpha_e}{1 + R_n \alpha_e}$

注: 表中 D_n 为围护结构第 n 层的热惰性指标; R_n 为围护结构第 n 层材料的热阻, $m^2 \cdot ^\circ C/W$; S_n 为第 n 层材料的蓄热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; α_e 为围护结构外表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

经计算得到, 本实测装配式钢结构农房外墙热惰性指标为 5.11, 内表面蓄热系数为 $2.03W/(m^2 \cdot K)$, 而青石砌筑结构农房外墙热惰性指标为 18.18, 内表面蓄热系数为 $30.45W/(m^2 \cdot K)$ 。可见, 装配式钢结构农房的外墙热惰性指标和内表面蓄热系数均明显低于青石砌筑结构农房, 因此呈现出建筑热稳定性弱的现象, 这也是轻质高保温低蓄热装配式建筑的普遍特点, 可以通过优化围护结构的蓄热性能来提升装配式钢结构农房的热稳定性。

3.3 碳减排效益分析

由前文分析可知, 相较于当地传统青石砌筑结构农房, 装配式钢结构农房具有明显的供暖节能率, 因此, 会使供暖系统运行阶段的碳排放量降低。

为量化分析装配式钢结构建筑的环保效益, 将装配式钢结构农房和青石砌筑结构农房的热泵供暖耗电量分别折算成耗煤量, 从而进行碳排放量分析。在当地供暖期为 11 月 5 日~次年 4 月 5 日, 室内设计温度 $14 \sim 20^\circ C$ 的条件下, 假设热泵供暖期用电均来自火发电机组发电, 根据机组平均供电煤耗为 $0.3kg$ 标准煤/ $kWh^{[17]}$, 计算农房的供暖所需煤耗量, 可以得出在一个供暖周期内, 装配式钢结构农房的单位面积每小时供暖煤耗量为 $0.0021 \sim 0.0022kg$, 青石砌筑结构农房的单位面积每小时供暖煤耗量为 $0.014 \sim 0.018kg$, 根据煤耗量计算可得装配式钢结构农房相较青石砌筑结构农房可降低

碳排放量 $85\% \sim 88\%$, 使环保效益大幅提升。

4 结论

基于大连市复州城镇装配式钢结构农房和青石砌筑结构农房热性能的实测分析, 得到以下结论:

(1) 装配式钢结构农房相较当地传统青石砌筑结构农房的热工性能有明显提升, 围护结构传热系数满足寒冷气候区农宅节能设计标准限值, 外墙和内墙内表面平均温度分别达到 $17.1^\circ C$ 和 $20.5^\circ C$, 提升了 $1.1^\circ C$ 和 $2.5^\circ C$ 。

(2) 装配式钢结构农房具有良好的节能效益和环保效益。当室内计算温度为 $14^\circ C$ 时, 相较于当地传统青石砌筑结构农房, 装配式钢结构农房的供暖节能率为 63% , 供暖周期内相对降低碳排放量 88% 。

(3) 实测表明装配式钢结构农房的热稳定性低于当地传统青石砌筑结构农房, 最大室温日较差可达 $6^\circ C$, 平均室温日较差比青石砌筑结构农房高 $2^\circ C$, 围护结构内表面温度日较差可达砌筑结构农房 2 倍以上, 会造成采暖系统的启停更为频繁。优化围护结构蓄热性能是提升装配式钢结构建筑热稳定性的关键。

综上, 本研究以位于东北寒冷地区的大连市复州城镇某装配式钢结构农房为例, 通过实测对比分析其与当地传统青石砌筑结构农房的节能性、热稳定性和环保效益差异, 不仅获得了东北地区装配式钢结构农房的实际热性能数据, 并得出钢结构轻质建筑热稳定性不足, 可通过提升围护结构蓄热性能改善热稳定性的结论, 为装配式钢结构建筑热性能进一步提升提供了科学的参考。在此基础上, 今后将进一步进行钢结构装配式农房热稳定性优化设计的研究。同时, 不同气象条件、农房空间组织和用户居住行为具有较大差异, 对装配式钢结构农房的热性能也存在耦合影响, 东北地区装配式钢结构农房的节能低碳技术还有待深入研究。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡建设领域碳达峰实施方案 [EB/OL]. <https://www.mohurd.gov.cn/file/2022/20220713/1320235c-7c7e-48a1-98f0-74493b907b8d.pdf>, 2024-01-15.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.关于加快农房和村庄建设现代化的指导意见[EB/OL]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202106/20210621_250525.html, 2024-01-16.
- [3] 袁洪振,周婷,刘红波,等.村镇装配式建筑研究进展[C].第二十二届全国现代结构工程学术研讨会论文集,2022:448-449.
- [4] 中国建设新闻网.推进钢结构装配式住宅建设.打造中国建造品牌的重要切口[EB/OL]. <http://www.chinajsb.cn/html/202106/16/20920.html>, 2021-06-16.
- [5] Qiong Shen, Yan Yu, Jiawen Hou, et al. The Testing Research on Prefabricated Building Indoor Thermal Environment of Earthquake Disaster Region[J]. *Procedia Engineering*, 2017,(205):453-460.
- [6] 张金花,任静,王长军,等.装配式钢结构建筑热工性能测试研究[J].*建筑技术*,2021,52(07):840-843.
- [7] 薛荣荣,钟春玲,张广达.装配式钢结构建筑资源节约性能评价——以北京市某装配式钢结构住宅为例[J].*吉林建筑大学学报*,2023,40(1):41-48.
- [8] 赵宏宇,李介鹏,张成龙.“低技术”装配式东北满族民居建造技艺——以吉林省吉林市“王府民居”为例[J].*吉林建筑大学学报*,2017,34(4):61-66.
- [9] 杭萧钢构.吉林松原飞达城 A6#、A16#、A17#钢结构装配式住宅项目顺利通过省住建厅“装配式建筑示范项目评审会”评审[EB/OL]. http://www.precast.com.cn/index.php/subject_detail-id-13220.html, 2024-02-25.
- [10] 张莉.装配式钢结构在严寒地区农村住宅应用的研究[D].大连:大连理工大学,2017.
- [11] 王玉娇,刘鸣.新疆办公建筑能耗及其影响因素分析[J].*暖通空调*,2018,48(6):13-16.
- [12] GB/T 50824-2013,农村居住建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [13] JGJ/T 347-2014,建筑热环境测试方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [14] 唐君言,孙学良,王鹏苏.不同气候区农宅供暖能耗分析[J].*暖通空调*,2022,52(S1):37-41.
- [15] GB 50176-2016,民用建筑热工设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016:25-27.
- [16] 赵金玲,李杰,党伟康.热惰性指标对围护结构热稳定性量化作用机制[J].*哈尔滨工业大学学报*,2018,50(10):182-188.
- [17] 刘志强,潘荔,赵毅,等.“十四五”时期我国火电行业节能潜力分析与建议[J].*中国能源*,2021,43(4):12-18.

(上接第458页)

- [7] 宋婧,曾令可,任雪潭,等.蓄热材料的研究现状及展望[J].*陶瓷*,2007,(1):5-10.
- [8] 左远志,丁静,杨晓西.中温相变蓄热材料研究进展[J].*现代化工*,2005,25(12):15-19.
- [9] Navarro M, Diarce G, Lázaro A, et al. Comparative study on bubbling and shearing techniques for the crystallization of xylitol in TES systems[J]. *Results in Engineering*, 2023,17:100909.
- [10] Piquard L, Gagnière E, Largiller G, et al. Xylitol used as phase change material: Nucleation mechanisms of the supercooling rupture by stirring[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022,48:103922.
- [11] Piquard L, Gagnière E, Largiller G, et al. Triggering Xylitol crystallization in a 42 kWh shell and tubes latent heat thermal energy storage system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023,221:119802.
- [12] Choi S H, Sohn D K, Ko H S. Performance enhancement of latent heat thermal energy storage by bubble-driven flow[J]. *Applied Energy*, 2021,302:117520.
- [13] 王领华,刘欣,王海英,等.高效相变蓄热装置结构设计及试验研究[J].*航天器环境工程*,2017,34(6):667-671.
- [14] Tong B, Tan Z, Shi Q, et al. Thermodynamic investigation of several natural polyols (I): Heat capacities and thermodynamic properties of xylitol[J]. *Thermochimica Acta*, 2007,457(1):20-26.
- [15] Agyenim F, Eames P, Smyth M. Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array[J]. *Renewable Energy*, 2010,35(1):198-207.