

储热储冷多场景应用专刊



基于相变墙体的严寒地区建筑清洁供能系统

杨立中^{1,2}, 程默楠¹, 高 龙¹, 白镜扬¹, 肖 飞²

(¹东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012; ²南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 250016)

摘要: 严寒地区建筑是能源消耗和温室气体排放的关键领域, 相变材料的应用对于严寒地区建筑节能具有重要意义。针对严寒地区气候特点, 本研究制备了适用于该环境的复合相变材料(CPCM), 并系统测试了其相变温度、相变潜热、热导率等关键物性参数。利用该CPCM的建筑与包含空气源热泵、储热装置、风力发电机及光伏的清洁供能系统相结合, 通过TRNSYS仿真平台分析了相变墙体建筑负荷与相变特性, 并对清洁供能系统开展了能耗、焓、经济、环境(4E)综合分析。结果表明, 与普通建筑相比, 相变墙体建筑的供热量减少410 MWh, 供冷量增加171 MWh, 供电量减少297 MWh; 系统焓效率降低8.4%, 产品成本水平(levelized cost of energy, LCOE)减少6.9%, CO₂排放量减少4.3%。为进一步优化配置, 采用响应面方法优化CPCM墙体厚度、风力发电机台数及蓄电池容量, 当风力发电机数量为9台、CPCM厚度为30 mm、电池容量为1300 kWh时, 系统能量COP达到最大值4.59。本研究为严寒地区近零能耗建筑的节能设计与优化提供了理论支撑和实践参考。

关键词: 相变墙体; 清洁供能系统; 动态仿真; 4E分析; 配置优化

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0138

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-993-11

A clean energy supply system for buildings in severe cold regions based on phase change walls

YANG Lizhong^{1,2}, CHENG Monan¹, GAO Long¹, BAI Jingyang¹, XIAO Fei²

(¹College of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China;

²College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Buildings in severe cold regions represent a critical sector for energy consumption and greenhouse gas emissions due to long heating seasons and high thermal demand. In this context, the application of phase change materials (PCMs) plays an important role in improving building energy efficiency and reducing environmental impacts. In this study, a composite phase change material (CPCM) suitable for severe cold climatic conditions was developed based on regional climate characteristics. The CPCM was experimentally prepared, and its key thermophysical properties, including phase change temperature, latent heat, and thermal conductivity, were systematically characterized to verify its applicability for building envelope integration. The CPCM was then incorporated into the building wall structure and coupled with a clean energy supply system composed of an air-source heat

收稿日期: 2026-02-05; 修改稿日期: 2026-02-23。

第一作者: 杨立中 (1989—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为热能储存, E-mail: lizhong.yang@nuee.edu.cn; 通信作者: 高龙, 副教授, 研究方向为低碳人工环境与储能技术, E-mail: gaolong@neepu.edu.cn。

引用本文: 杨立中, 程默楠, 高龙, 等. 基于相变墙体的严寒地区建筑清洁供能系统[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 993-1003.

Citation: YANG Lizhong, CHENG Monan, GAO Long, et al. A clean energy supply system for buildings in severe cold regions based on phase change walls[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 993-1003.

pump, thermal storage devices, wind turbines, and photovoltaic panels. A dynamic simulation model was established using the TRNSYS platform to analyze the building thermal loads and phase change behavior of the CPCM wall throughout the annual operation period. On this basis, a comprehensive evaluation of the integrated clean energy system was carried out using a 4E assessment framework, covering energy, exergy, economic, and environmental performance. The simulation results demonstrate that, compared with a conventional building, the phase change wall building shows a reduction of 410 MWh in annual heating supply, while the annual cooling supply increases by 171 MWh. In addition, the electricity supply demand of the system decreases by 297 MWh. From the exergy perspective, the overall system exergy efficiency decreases by 8.4%, indicating changes in energy quality utilization caused by the integration of phase change walls. From the economic perspective, the levelized cost of energy (LCOE) increases by 6.9%, reflecting the additional investment associated with CPCM application and system configuration. Despite this economic increase, the environmental analysis reveals that CO₂ emissions are reduced by 4.3%, highlighting the emission reduction potential of the proposed system. To further improve system performance, response surface methodology was employed to optimize three key design parameters: CPCM wall thickness, number of wind turbines, and battery capacity. The optimization results indicate that the optimal configuration is achieved when the number of wind turbines is 9, the CPCM thickness is 30 mm, and the battery capacity is 1300 kWh, under which the system energy COP reaches a maximum value of 4.59. Overall, this study provides a systematic framework for material development, system integration, performance evaluation, and parameter optimization, offering theoretical support and practical guidance for the design and optimization of near-zero energy buildings in severe cold regions.

Keywords: phase change walls; clean energy supply system; dynamic simulation; 4E analysis; configuration optimization

随着城市化进程的加快和舒适度需求的提高,在建筑负荷日益增加的同时,高标准实现建筑节能降耗是一个重大挑战^[1]。为实现“碳达峰、碳中和”目标,我国陆续出台建筑节能及绿色用能政策,并在部分地区鼓励绿电直联建设和新能源就地消纳,以提升可再生能源在建筑端的利用效率和供能可靠性^[2]。在建筑节能技术方面,相变材料(phase change material, PCM)因其高储能密度和显著吸放热特性,可嵌入墙体实现被动调温,缓解室内温度波动、降低峰值负荷,并与清洁能源供能系统耦合,可进一步提高系统能效和舒适性^[3]。然而,在严寒地区,PCM与清洁能源系统的协同运行机制、综合能效以及关键参数优化仍缺乏系统研究。

相变材料作为高效储能材料,因储能密度高、吸放热特性显著,在建筑节能领域应用广泛。针对PCM在建筑墙体中的应用, Li等^[4]引入动态PCM

移动策略并对比静态相变墙体与无相变墙体性能,证实动态相变墙体冬夏季均具优异节能效果,月增热量和散热量分别减少135.53%~535.73%和2.92%~58.76%; Fan等^[5]针对通风砌块墙的蓄热耐热需求,分析透气性非均质PCM墙性能,发现其冬夏季表现良好; Liu等^[6]针对传统龙贝墙体的热舒适性与能耗问题,引入辐射制冷和PCM,使室内温度标准差分别降低0.04℃和0.29℃,热增量分别降低26.5%和55.2%。在PCM应用参数优化方面, Wang等^[7]基于EnergyPlus建立寒冷地区住宅建筑PCM墙体模型,在不同相变温度和厚度参数下开展数值模拟,分析PCM对建筑冷负荷与过热的影 响,结果表明PCM节能效果对相变温度具有显著敏感性,合理匹配气候条件可显著提高节能率。 Dong等^[8]针对PCM在复合自保温砌块中的布置位置问题,通过数值模拟分析不同安装位置和

相变温度组合对围护结构热性能的影响, 结果表明 PCM 设置于靠近室内侧位置时对削减峰值温度和降低冷负荷效果更为显著。Refahi 等^[9]针对 PCM 在墙体中位置影响节能效果的问题, 通过实验确定了最佳位置; Moreles 等^[10]针对 PCM 相变过程与热舒适区的匹配问题, 采用有效比热法模拟传热过程, 提出相变过程应发生在热舒适区外的标准。在清洁能源与系统集成领域, Zhou 等^[11]建立了一个瞬态和动态的平台, 利用 TRNSYS 399 模块, 将 PCM 墙体和集成光伏系统相结合实现平台的多种功能, 集成光伏系统可以提供遮阳和热再生 PCM 以抵抗外部热通量, 最后得出 PCM 与集成系统耦合可达到节能效果。Zhang 等^[12]在中国西北地区采用热电联供系统, 研究了多能源互补的供暖、供电、沼气联合系统(CHPB)。结果表明, 与传统的热电联产系统相比, CHPB 系统的一次节能率在一年中的大部分时间都是负的, 可再生能源的最大增长率达到 600.46%。Jafarian 等^[13]针对传统系统用电量高的问题, 搭建 PV/T 集热器集成系统, 使总用电量较传统系统分别降低 72.3% 和 64.6%; Samiee 等^[14]针对冷热电联产系统效率提升问题, 结合光伏、风力发电机与其他设备, 有效提高系统能量和烟效率; Nikitin 等^[15]针对建筑供热制冷需求与经济性平衡问题, 搭建含 PCM 的集成系统, 使建筑年供热制冷需求减少 25.6%, 烟效率提高 13%, 产品成本降低 8.57%。

综上所述, 现有研究主要集中于: PCM 在不同气候条件下的建筑围护结构应用; PCM 与单一或局部能源系统的耦合分析; 侧重能耗或热舒适性的单维度评价。然而, 在严寒地区气候条件下, PCM 建筑与清洁供能系统的协同运行机理、综合能效及参数优化等问题, 相关研究仍较为有限。因此, 本研究聚焦严寒地区建筑负荷特性, 从材料-建筑-系统三个层面展开研究: 首先, 以吉林地区严寒气候条件为例, 制备并筛选适宜相变温区的复合相变材料(CPCM), 以匹配冬季供暖主导、夏季冷负荷敏感的建筑热需求特征; 其次, 基于 TRNSYS 平台, 构建包含 CPCM 墙体的建筑清洁供能系统模型, 对比分析相变建筑与普通建筑在全年动态运行过程中的能耗、负荷迁移及峰值变化规律; 再次, 从能量、烟、经济与环境四个维度评价系统综合性能, 并重点讨论 CPCM 引入后夏季冷负

荷增加所带来的性能权衡及其在严寒地区的合理性; 最后, 采用响应面方法优化系统关键配置参数, 为严寒地区近零能耗建筑的节能设计与系统配置提供定量依据和工程参考。

1 研究方法

针对严寒地区应用复合相变材料墙体建筑的清洁供能系统综合评估。首先, 实验制备基于 CPCM 的水泥砂浆, 表征其热物性参数。其次, 设计基于 CPCM 水泥砂浆的墙体结构, 建立建筑模型。最后, 对应用 CPCM 墙体建筑的清洁供能系统进行综合评估。

1.1 复合相变材料水泥砂浆制备与表征

为适配严寒地区建筑碳中和需求, 制备了一种基于水合盐的复合相变材料水泥砂浆(CPCM)。其中, 以热解生物炭作为多孔载体材料, 以 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 复合水合盐作为相变储能组分, 通过真空浸渍法将相变物质引入生物炭孔隙结构中, 制得稳定的复合相变材料。随后, 将制备得到的 CPCM 按一定质量掺量均匀掺入水泥基体中, 经搅拌、成型与标准养护后制备成相变水泥砂浆试样, 其制备流程如图 1 所示。采用差示扫描量热仪(DSC)测试 CPCM 的相变温度区间及相变潜热, 测试过程遵循相关热分析测试标准; 同时, 通过热导率测试仪测定材料的导热性能。所得热物性参数汇总见表 1。结果表明, 该 CPCM 在相变温度范围、相变潜热及导热性能方面均适用于严寒地区建筑围护结构的削峰填谷需求。

1.2 相变墙体建筑仿真模型

以吉林市某办公大楼为对象, 该建筑占地面积 5282 m², 楼高 4 m, 共 8 层, 总建筑面积 42300 m²; 建筑结构由 SketchUp 绘制, 如图 2 所示。建筑热负荷计算采用 TRNSYS Type1270a 模块进行逐时动态模拟, 时间步长为 1 h, 输入吉林市典型气象年逐时气象数据进行全年 8760 h 计算。冬季室内设定温度为 18℃, 夏季设定温度为 26℃。通过分别建立普通墙体建筑模型与 CPCM 墙体建筑模型, 计算全年冷、热负荷变化情况。在模型差异方面, 普通墙体模型仅考虑显热传递过程, 材料热物性参数为定值; CPCM 墙体在此基础上引入相变潜热效应, 在相变温度区间内采用等效比热法处理潜热吸收与释放过程, 使材料有效比热容在相变区间内提

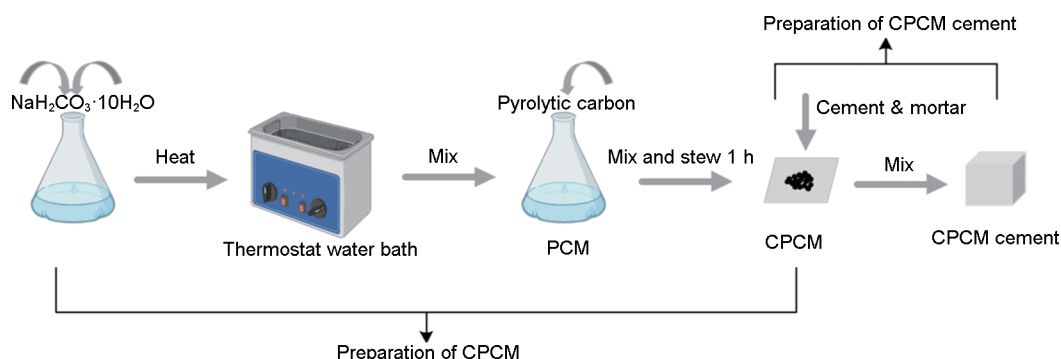


图1 CPCM水泥砂浆制备

Fig. 1 Preparation of CPCM cement mortar

表1 CPCM热参数

Table 1 Thermal parameters of CPCM

名称	数值	单位
熔化温度	22	℃
熔化焓	183	kJ/kg
凝固温度	-1.9	℃
凝固焓	120	kJ/kg
密度	1.80	g/cm ³
比热容	2.15	kJ/(kg·℃)
热导率	0.91	W/(m·K)

高,从而反映相变储能特性。两类模型在建筑几何结构、边界条件及运行参数设置上保持一致,仅墙体热物性参数不同,以确保对比分析的可比性。模型有效性通过与Tian等^[6]的研究结果对比验证,如图3所示。模拟结果与文献数据变化趋势一致。

1.3 建筑清洁供能系统

建筑清洁供能系统分为供电系统和供冷、热系

统。供电系统由电网、光伏、风力发电和蓄电池组成,为建筑全部的用电设备供给电能。供冷、热系统由空气源热泵(夏季供冷、冬季供热)、储热/冷水罐(夏季蓄冷、冬季储热)、水泵等设备组成,系统原理如图4所示。

如果光伏和风力发电电量高于电力需求,包括建筑负载和设备能耗,逆变器将剩余电力输送至蓄电池。当储电系统充电完全,且建筑电力需求为0时,剩余电力供应至电网。当储存在电池中的能量和产生的电力无法满足用户电力需求时,从电网中取电。系统供热的运行在供热时间段内,空气源热泵和水泵1启动产生热水流入蓄热水箱中,当水箱温度高于46℃时,水泵和空气源热泵停止工作,当水箱温度低于44℃时水泵和空气源热泵启动开始工作。建筑侧水泵在室内温度低于20℃时,水泵2启动工作,当高于20℃时,水泵2停止工作。

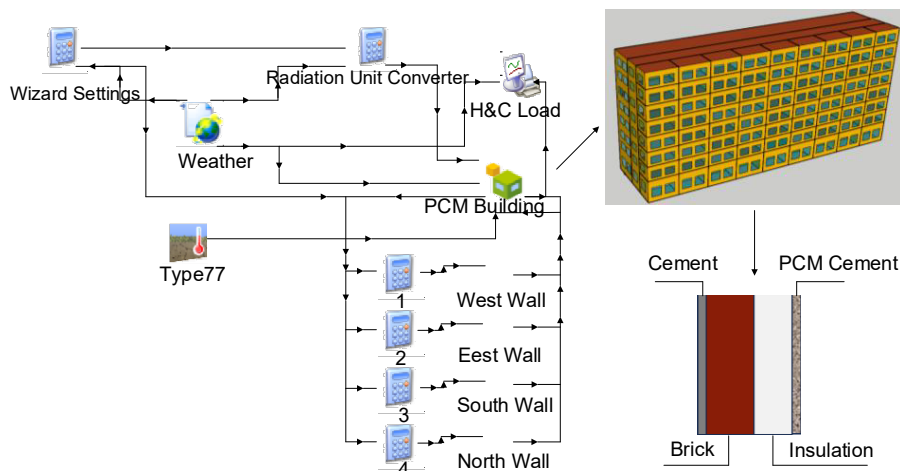


图2 相变墙体建筑仿真模型

Fig. 2 Simulation model of phase change wall building

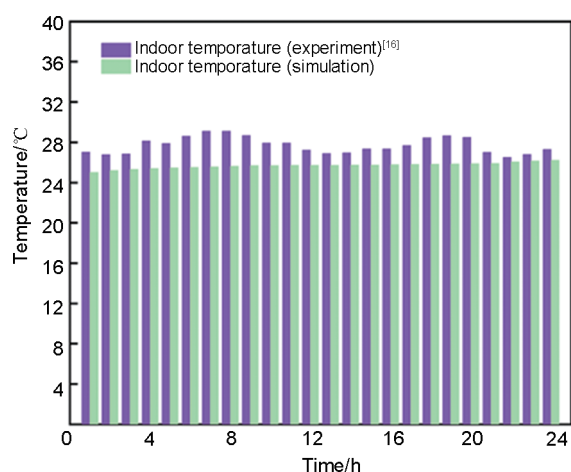


图3 模型验证

Fig. 3 Model validation comparison

在供冷时间段内系统开始供冷，空气源热泵和水泵1启动产生冷水流入蓄能水箱中，当水箱温度低于6℃时，水泵和空气源热泵停止工作，当水箱温度高于8℃时水泵和空气源热泵启动工作。建筑侧水泵在室内温度高于26℃时，水泵2启动工作，低于26℃时，水泵2停止工作。

本供能系统采用吉林市典型气象年逐时气象数据进行全年动态模拟(8760 h)。光伏出力通过TRNSYS中光伏组件模型计算，基于逐时太阳辐射强度与组件参数得到发电功率；风力发电出力根据逐时风速数据并结合风机功率曲线进行计算。系统仿真采用逐时动态耦合计算方式，实现建筑负荷与可再生能源出力的同步匹配。

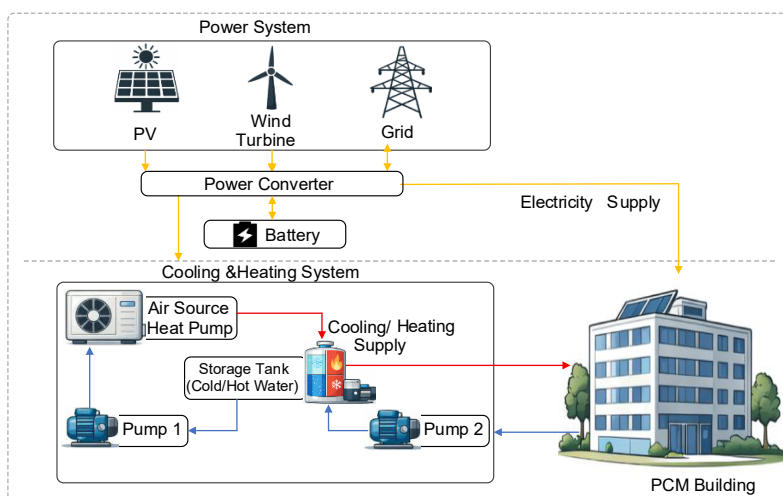


图4 清洁供能系统原理

Fig. 4 Schematic diagram of clean energy supply system

1.4 4E评价模型

1.4.1 能量分析

能量分析是为了评估系统平衡相互作用，质量和能量平衡应用于每一个组件^[17]。

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} \quad (1)$$

$$Q_{cv} + \sum m_{in} h_{in} = W_{cv} + \sum m_{out} h_{out} \quad (2)$$

系统各个部分能量平衡见表2。

通过能量分析，可以评估系统内各个组件的效率，充分解释系统能量效率。系统的能量COP如下^[18]：

$$\eta_e (COP_e) = \frac{E_{heating} + E_{cooling} + E_{electricity}}{E_{in}} \quad (3)$$

式中， $E_{heating}$ 、 $E_{cooling}$ 、 $E_{electricity}$ 和 E_{in} 分别表示系

表2 系统能量平衡方程

Table 2 System energy balance equations

名称	能量平衡方程
水泵1	$H_1 + W_{pump1} - H_2 = 0$
水泵2	$H_5 + W_{pump2} - H_6 = 0$
蒸发器	$H_{10} + H_{13} - H_7 - H_{14} = 0$
冷凝器	$H_8 + H_{12} - H_9 - H_{11} = 0$
压缩机	$H_7 + W_c - H_8 = 0$
储热水箱	$H_3 + H_6 - H_4 - H_1 = 0$

注： H_1-H_{14} 表示系统模型中各状态点工质的焓值，下标数字为状态点编号，用于区分工质在各部件进出口及连接位置处的热力学状态； W_{pump1} 、 W_{pump2} 和 W_c 分别表示水泵1、水泵2及压缩机的输入功。

统供应热量、冷量、电和系统投入总电量。

1.4.2 焓分析技术经济分析

在评价热力系统时，基于热力学第二定律的焓

分析比基于热力学第一定律的能量分析得到更合理的结果。焓分析通过计算消耗的潜在功的数量来确定能源系统中根本低效的程度和位置。为了进行焓分析,有必要构建关键设备的焓平衡方程。只要没有发生化学过程,且水蒸气的物理和动力学影响微乎其微,系统中各部分焓平衡方程见表3。

表3 系统焓平衡方程

Table 3 System exergy balance equations

名称	焓平衡方程
水泵1	$Ex_1 + W_{\text{pump1}} - Ex_2 = -Ex_{D,\text{pump1}}$
水泵2	$H_5 + W_{\text{pump2}} - H_6 = -Ex_{D,\text{pump1}}$
蒸发器	$Ex_{10} + Ex_{13} - Ex_7 - Ex_{14} = -Ex_{D,\text{eva}}$
冷凝器	$Ex_8 + Ex_{12} - Ex_9 - Ex_{11} = -Ex_{D,\text{cond}}$
压缩机	$Ex_7 + Ex_c - Ex_8 = -Ex_{D,\text{comp}}$
储热水箱	$Ex_3 + Ex_6 - Ex_4 - Ex_1 = -Ex_{D,\text{HST}}$

注: $Ex_1 \sim Ex_{14}$ 为系统模型中各状态点工质的焓值,下标数字表示不同状态点编号; $Ex_{D,\text{pump1}}$ 、 $Ex_{D,\text{pump2}}$ 、 $Ex_{D,\text{eva}}$ 、 $Ex_{D,\text{cond}}$ 、 $Ex_{D,\text{comp}}$ 和 $Ex_{D,\text{HST}}$ 分别为水泵1、水泵2、蒸发器、冷凝器、压缩机及储热水箱的焓损失。

根据系统运行策略,系统的焓效率可由下式表示。

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{Ex_{\text{heating}} + Ex_{\text{cooling}} + Ex_{\text{electricity}}}{Ex_{\text{in}}} \quad (4)$$

式中, Ex_{heating} 、 Ex_{cooling} 、 $Ex_{\text{electricity}}$ 和 Ex_{in} 分别表示系统供应热量焓、冷量焓、电焓和系统投入总焓。

1.4.3 经济分析

使用经济学方法分析清洁供能系统的经济性,可以有效确定整个系统的流动成本。在这一应用中,焓和经济概念同时联系在一起,以进行系统的经济评估。经济平衡方程如下^[19]:

在此 $\dot{Z}_k$ 表示资本投资和运行维护成本之和,计算公式为:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{\text{CI}} + \dot{Z}_k^{\text{OM}} = \text{CRF} \times \frac{\dot{Z}_k \cdot \phi}{H \times 3600} \quad (5)$$

$$\text{CRF} = \frac{i_r(1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1} \quad (6)$$

式中, H 为全年运行时间; ϕ 为运行维护指数,本研究中为 1.06。

LCOE 用来评估系统的经济绩效。它是确定盈利能力的常用指标,有助于工程中评估不同供能系统的设计成本。然而,由于本研究中构建的清洁供能系统是冷、热、电三联供,因此以下因素的定义与产品成本水平(LCOE)相同^[20]:

$$\text{LCOE} = \frac{\dot{C}_{\text{total}}}{H \times \dot{E}_{\text{product}}} \quad (7)$$

年度运行小时数由 H 表示,而总成本率由 $\dot{C}_{\text{total}}$ 表示,其计算公式为:

$$\dot{C}_{\text{total}} = \dot{C}_{\text{CI}} + \dot{C}_{\text{OM}} \quad (8)$$

系统各部分设备资金见表4。

表4 系统各部分设备资金

Table 4 Capital for equipment of each part of system

名称	资金方程	参考文献
冷凝器	$1397 \times A^{0.89} (\text{USD})$	[21]
蒸发器	$1397 \times A^{0.89} (\text{USD})$	[21]
膨胀阀	$114.5 \times m_f (\text{USD})$	[21]
水泵	$3500 \times (\text{kWh})^{0.4} (\text{USD})$	[22]
控制器	$305 (\text{USD})/\text{unit}$	[22]
储热水箱	$7615.11 (\text{USD})/\text{m}^3$	[22]
风力涡轮机	$1210334.5 (\text{USD})$	[23]
光伏电池板	$310 \times L \times b (\text{USD})$	[24]
铅酸蓄电池	$62.42 (\text{USD})/\text{Ah}$	—

注: CPCM 单位成本采用 4.17 USD/kg; 电网购电采用吉林 2025 年分时电价,基准 0.069 USD/kWh,峰 0.108 USD/kWh,谷 0.032 USD/kWh。

1.4.4 环境分析

系统中应用空气源热泵、光伏板和风力发电机等设备,无污染气体产生。但是该供电系统不能满足用户需求,需要从电网供电来满足用户。由于电网的电主要来自燃煤电站, CO_2 排放量计算如下^[25]:

$$M(\text{CO}_2) = \alpha(\text{CO}_2) \times W_{\text{net}} \quad (9)$$

式中, $\alpha(\text{CO}_2)$ 、 W_{net} 分别为 CO_2 排放系数 (0.785 kg/kWh)、电网供电量。

2 结果与讨论

2.1 建筑相变墙体分析

相变墙体建筑与普通墙体建筑的全年冷热负荷变化如图 5(a)、(b)所示。普通建筑的最大热负荷和冷负荷分别为 1670.76 kW 和 1040.57 kW,而相变墙体建筑对应值分别为 1580.61 kW 和 1295.78 kW。与普通建筑相比,相变墙体使建筑热负荷峰值降低 90.15 kW,降幅为 5.4%;同时,冷负荷峰值增加 255.21 kW,增幅为 24.5%。

从全年变化趋势来看,两类建筑冷热负荷变化规律总体一致,但在供热季差异更为显著。10 月至次年 4 月期间,相变墙体通过相变潜热的吸收与释放,有效削减了围护结构的瞬时传热强度,从而降低了建筑供热负荷峰值,其调节效果随室外温度

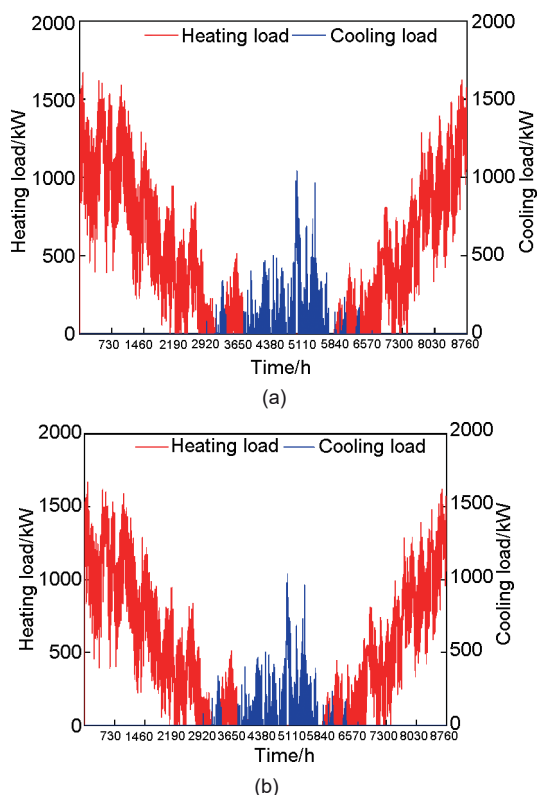


图5 (a) PCM建筑全年冷热负荷; (b) 普通建筑全年冷热负荷

Fig. 5 (a) Annual cooling and heating loads of PCM building; (b) Annual cooling and heating loads of conventional building

变化呈现阶段性特征。相比之下,在夏季工况下,相变材料表现出明显的蓄热特性,部分白天吸收的热量在夜间释放,导致建筑冷负荷在高温时段出现一定程度的叠加效应,从而使冷负荷峰值有所增加。需要指出的是,在严寒地区建筑全年能耗结构中,供热季能耗占主导地位,因此在获得供热季显著削峰效果的同时,夏季冷负荷峰值的小幅增加在综合能耗层面仍具有可接受性。

从运行策略角度看,该不利影响可通过优化相变参数配置及结合夜间通风等被动调控方式加以缓解,以进一步平衡供热季节能收益与供冷季负荷变化之间的关系。

2.2 建筑供能系统4E分析

2.2.1 建筑供能系统能耗分析

由图6可知,普通建筑供热能耗量要高于PCM建筑供热能耗量,在从1月到12月为期7个月的供热季中,1月、2月、3月、4月、10月、11月和12月供热能耗减少量分别为94.67 MWh、90.92

MWh、83.30 MWh、15.15 MWh、39.52 MWh、86.96 MWh、86.11 MWh。PCM建筑系统供冷量6月、7月、8月能耗增加量为44.9 MWh、64.80 MWh、61.53 MWh。普通建筑系统全年能耗量和PCM建筑系统能耗量分别为2817.13 MWh、2577.83 MWh,减少了8.49%。两种墙体供热能耗和供冷能耗变化趋势相同,在1月供热能耗量出现最大值,4月供热能耗出现最小值。供冷能耗在7月份出现最大值。供冷两种建筑能耗差比供热两种能耗大。

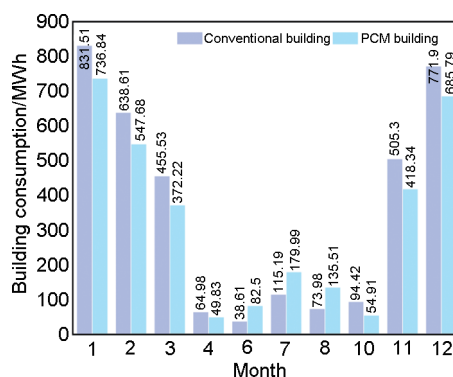


图6 供冷/热能耗对比

Fig. 6 Cooling/heating energy consumption comparison

2.2.2 建筑供能系统焓分析

如图7所示,对象为普通建筑的清洁供能系统焓效率最大值和最小值分别为283%、77%,对PCM建筑供能系统焓效率最大值和最小值分别为292%和113%。CPCM的应用使得系统焓效率最大值和最小值分别提高9%和36%。普通墙体与CPCM墙体系统平均焓效率分别为165.2%和171.5%。6月、7月CPCM建筑系统焓效率低于普通建筑系统效率,因此,在以吉林为代表的严寒气候条件下,CPCM在冬季对建筑节能的效果比夏季好。

2.2.3 建筑供能系统电负荷分析

图8(a)、(b)显示了PCM建筑和普通建筑供应分布情况。该地区光伏和风力发电机发电量不能满足供热供冷系统所需电量,需要从电网补给电量。因此,用户用电量等于电网与光伏供电量之和。吉林地区,全年室外气温较低,供热时间长,供热期用户需求电量大,需从电网补给电量值高。电网供电量所占百分比在供热期呈现递增后递减趋势。供

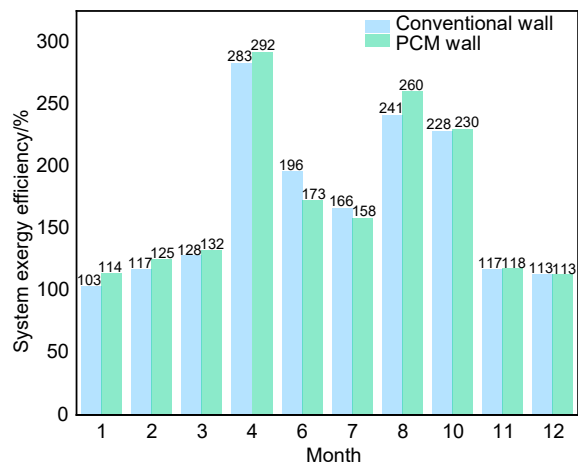


图7 系统炯效率对比

Fig. 7 System exergy efficiency comparison

热期间CPCM建筑所需供电量较普通建筑供电量少, 供热季月份分别减少了9.5%、4.8%、3.0%、8.8%、11.7%。由于CPCM的影响, 6、7、8月电量需求有所增加, 与能耗需求量一致。电能需求量越少, 设备产电量占比越高。

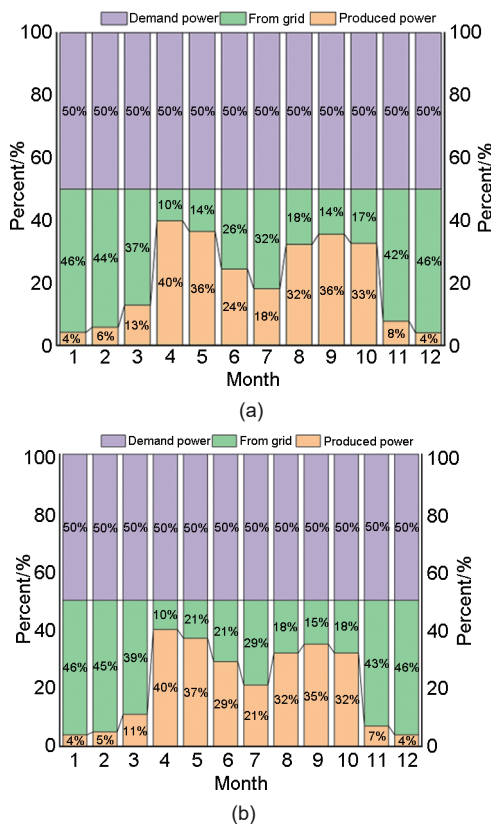


图8 (a) PCM建筑电量供应分布图; (b) 普通电量供应分布图

Fig. 8 (a) PCM power supply distribution; (b) Conventional power supply distribution

通过表2~表4中的公式进行计算, PCM建筑与普通建筑供热量减少410 MWh, 供冷量增加171 MWh, 供电量减少297 MWh。由于PCM的作用, 系统炯效率降低8.4%, LCOE减少了6.9%, CO₂排放量减少了4.3%, 系统有无CPCM的各项4E指标具体对比数据详见表5, 整体来看系统能耗与排放均实现有效下降。

表5 系统有无CPCM 4E对比分析

Table 5 4E comparative analysis of systems with and without CPCM

项目	PCM建筑	普通建筑
系统供热量/MWh	2180	2590
系统供冷量/MWh	398	227
系统供电量/MWh	1498	1795
系统炯效率	129.2%	120.8%
系统LCOE/(USD/kWh)	0.807	0.867
CO ₂ 排放量/t	942.9	986

2.3 系统容量配置优化

使用响应面方法生成实验设计方案, 通过Design Experts软件实现。选取相变墙体厚度 δ 、风力发电机台数 k 和蓄电池容量 Q_m 。CPCM建筑与传统供热冷系统 η 变量的范围见表6。基于响应面的设计数据集和仿真结果见表7。

表6 响应面分析因素及水平

Table 6 Factors and levels of response surface analysis for heating/cooling system

水平	CPCM墙体厚度/mm	风力发电机数量/台	蓄电池容量/kWh
-1	10	1	700
0	20	5	1000
1	30	9	1300

2.3.1 相变墙体厚度和风力发电机数量的影响

图9是风力发电机个数和相变墙体厚度对系统能量效率的影响分布。由图可知, 相变墙体厚度对系统能量效率影响不明显。相变墙体厚度从10 mm到30 mm, 系统能量效率仅提升0.05%。风力发电机的数量增加, 对系统能量效率增加有显著效果, 风力发电机数量的增加使系统能量效率增加66.4%。因此, 对于系统能效, 风力发电机数量为关键因素。

从图9可以看出, 风机数量对系统能量效率的影响显著高于CPCM厚度, 但这并不意味着相变材料在系统中可以被忽略。风机数量作为供能侧参

表7 系统基于BBD的设计数据及结果

Table 7 Design data and results of heating/cooling system based on BBD

序号	X1: δ	X2: k	X3: Q_m	Y: η
1	20	9	1300	4.59
2	10	1	1000	3.95
3	20	1	1300	3.95
4	30	9	1000	4.55
5	10	5	1300	4.31
6	20	9	700	4.50
7	20	1	700	3.93
8	10	9	1000	4.55
9	20	5	1000	4.28
10	10	5	700	4.25
11	30	5	1300	4.31
12	30	5	700	4.25
13	30	1	1000	3.95

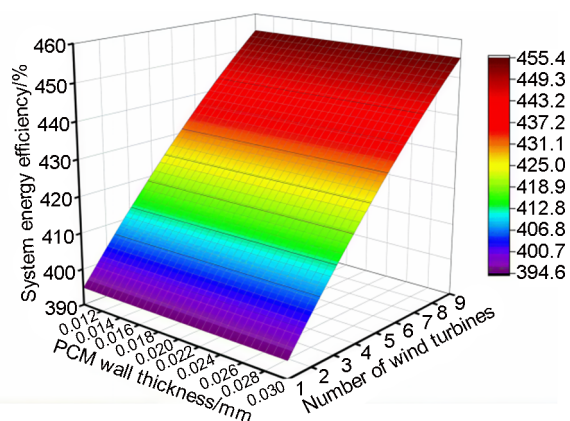


图9 相变墙体厚度与风力发电机数量对供热/冷系统的影响

Fig. 9 Effects of phase change wall thickness and wind turbine quantity on heating/cooling system

数,直接决定了系统可再生能源的输入规模,对系统能量效率具有主导性影响;然而,需要指出的是,本研究所设定的风机配置数量是在理想化空间条件与场地资源条件下进行的参数化分析结果。在实际工程应用中,风机布置往往受到场地面积、建筑密度、周边环境限制、风资源条件及政策规范等多重因素的约束,并非所有建筑项目均具备配置较大规模风电设备的现实条件。因此,风机数量对系统性能的显著影响更多反映的是供能规模扩展对系统效率的理论提升潜力,而不能简单泛化为所有建筑场景下的普遍规律。

2.3.2 蓄电池容量和风力发电机数量的影响

图10是蓄电池容量和风力发电机数量对系统

能量效率的影响分布。由图可知,风力发电机数量与蓄电池容量相比,风力发电机数量对系统能量效率有显著影响。风力发电机数量范围在1~7台之间,蓄电池容量的增加使系统能量效率呈线性增加。当风力发电机数量范围在7~9台之间,蓄电池容量的增加使系统能量效率增长速度先增大后减少,风力发电机数量为9,电池容量为1300 kWh时,系统能量效率取最大。因此,风力发电机数量对系统能量效率影响显著,电池容量在7~9之间效果好于少于7台,影响次于风力发电机数量,但高于CPCM厚度。根据响应面法建立的供热系统代理模型,优化供热系统各部件参数,得到系统最优配置。据此,当风力发电机数量为9,CPCM厚度为30 mm,电池容量为1300 kWh时,系统能量COP达到最大值4.59。

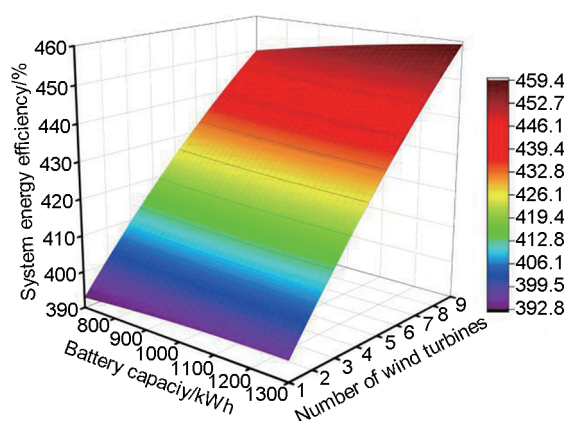


图10 蓄电池容量和风力发电机数量对系统的影响

Fig. 10 Effects of battery capacity and number of wind turbines on system

3 结 论

本研究制备了一种适合严寒气候环境的CPCM,测试其热物性参数。将CPCM应用于建筑墙体,构建建筑仿真模型。以PCM建筑为对象构建了清洁供能系统,主要装置包括空气源热泵、储热装置、光伏、风力发电机。从4E的角度综合评估设计方案。并优化特定条件下的系统容量配置。主要结论包括:

(1) 相变温度为22℃的CPCM相变砂浆对于严寒地区建筑墙体具有良好的适应性,对降低全年负荷具有显著效果。在供热季,PCM的应用使建筑最大热负荷减少了90.15 kW,降低5.4%。

(2) 清洁供能系统对PCM建筑供应冷、热、

电与普通建筑相比,供热量和供电量分别减少了 410 MWh、和 297 MWh,供冷量增加 171 MWh。系统炯效率降低 8.4%,LCOE 减少了 6.9%,CO₂ 排放量减少了 4.3%。

(3) 利用响应面分析方法对 CPCM 厚度、风力发电机数量和电池容量进行优化,当风力发电机数量为 9, CPCM 厚度为 30 mm, 电池容量为 1300 kWh 时,系统能量效率达到最大值为 4.59。

参 考 文 献

- [1] KAWAKUBO S, KAMATA T, ARATA S, et al. Item response theory in building environment engineering: A novel approach to identifying key residential environment items[J]. *Building and Environment*, 2024, 262: 111764. DOI: 10.1016/j. buildenv. 2024. 111764.
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于有序推动绿电直连发展有关事项的通知(发改能源〔2025〕650号)[EB/OL]. [2025-06-09]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202506/content_7026081.htm.
- [3] POUDHAR A, GHOSH A. Phase change materials for energy efficiency in photovoltaic systems and buildings: A review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 104: 112360. DOI: 10.1016/j.job.2025.112360.
- [4] LI W D, RAHIM M, WU D X, et al. Dynamic integration of phase change material in walls for enhancing building thermal performance-A novel self-adaptive method for moving PCM layer [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 308: 118401. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118401.
- [5] FAN M, FENG G Y, WANG L L, et al. Experimental study of breathable and heterogeneous phase change material (B&H-PCM) wall for all-season thermal performance enhancement[J]. *Energy*, 2024, 291: 130461. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130461.
- [6] LIU H F, TAN Q L, SHI Y, et al. Enhancing indoor thermal comfort and energy efficiency: A comparative study of RC-PCM Trombe wall performance[J]. *Renewable Energy*, 2024, 227: 120542. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120542.
- [7] WANG C, SHAO Y, ZHAO B L, et al. Study on the influence of the application of phase change material on residential energy consumption in cold regions of China[J]. *Energies*, 2024, 17(7): DOI: 10.3390/en17071527.
- [8] DONG X. Optimal design and simulation analysis of phase change material composite self-insulating block in a typical cold region city of China in summer[J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2025, 18(1): 41-56. DOI: 10.2174/0122127976280085240329184613.
- [9] REFAHI A, ROSTAMI A, AMANI M. Implementation of a double layer of PCM integrated into the building exterior walls for reducing annual energy consumption: Effect of PCM wallboards position[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 82: 110556. DOI: 10.1016/j.est.2024.110556.
- [10] MORELES E, HUELSZ G, BARRIOS G. Hysteresis effects on the thermal performance of building envelope PCM-walls[J]. *Building Simulation*, 2018, 11(3): 519-531. DOI: 10.1007/s12273-017-0426-4.
- [11] ZHOU Y K. Demand response flexibility with synergies on passive PCM walls, BIPVs, and active air-conditioning system in a subtropical climate[J]. *Renewable Energy*, 2022, 199: 204-225. DOI: 10.1016/j.renene.2022.08.128.
- [12] ZHANG D, ZHENG Y, WU J H, et al. Annual energy characteristics and thermodynamic evaluation of combined heating, power and biogas system in cold rural area of Northwest China[J]. *Energy*, 2020, 192: 116522. DOI: 10.1016/j. energy. 2019.116522.
- [13] JAFARIAN M, ASSAREH E, AGARWAL N, et al. Energy, economic, and environmental analysis of combined cooling, heat, power and water (CCHPW) system incorporated with photovoltaic/thermal collectors and reverse osmosis systems[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 75: 107059. DOI: 10.1016/j.job.2023.107059.
- [14] SAMIEE S, HAJIZADEH AGHDAM A. 4E analysis of a solar, wind and waste heat-driven CCHP system: A case study for a cruise ship[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 252: 123600. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123600.
- [15] NIKITIN A, DEYMI-DASHTEBAYAZ M, BARANOV I V, et al. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis using a renewable multi-generation system in a near-zero energy building with hot water and hydrogen storage systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106794. DOI: 10.1016/j.est.2023.106794.
- [16] TIAN G H, LÜ H L, HUANG J E, et al. Experimental study on the thermal performance of a wall coated with a phase-change, energy-storing mortar layer during summer[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124: 279-285. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.178.
- [17] FENG B W, ZHOU Q Z, XING J C, et al. Attention-empowered transfer learning method for HVAC sensor fault diagnosis in dynamic building environments[J]. *Building and Environment*, 2024, 250: 111148. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.111148.
- [18] SUN X Q, JOVANOVIĆ J, ZHANG Y, et al. Use of encapsulated phase change materials in lightweight building walls for annual thermal regulation[J]. *Energy*, 2019, 180: 858-872. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.112.
- [19] KARIM S H T, TOFIQ T A, SHARIATI M, et al. 4E analyses and multi-objective optimization of a solar-based combined cooling, heating, and power system for residential applications[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 1780-1797. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.03.020.
- [20] OLIVIERI L, TENORIO J A, REVUELTA D, et al. Developing a PCM-enhanced mortar for thermally active precast walls[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 181: 638-649. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.013.
- [21] SHARSHIR S W, JOSEPH A, ELSHARKAWY M, et al. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development[J]. *Energy and*

- Buildings, 2023, 285: 112908. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023. 112908.
- [22] QIN D, LIU Z X, ZHOU Y K, et al. Dynamic performance of a novel air-soil heat exchanger coupling with diversified energy storage components—Modelling development, experimental verification, parametrical design and robust operation[J]. Renewable Energy, 2021, 167: 542-557. DOI: 10.1016/j.renene. 2020.11.113.
- [23] RATHORE P K S, GUPTA N K, YADAV D, et al. Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: An updated review [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 79: 103690. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103690.
- [24] GAO Y C, LIU Z J, GAO Y N, et al. Employing the double-PCM (phase-change material) layer to improve the seasonal adaption of building walls: A comparative studies[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 66: 107404. DOI: 10.1016/j.est.2023.107404.
- [25] JIN X, YANG J C, LI M, et al. Experimental and numerical study on the thermal energy storage performance of a novel phase-change material for radiant floor heating systems[J]. Building and Environment, 2022, 223: 109491. DOI: 10.1016/j. buildenv. 2022. 109491.