

# 太阳能空气源热泵耦合相变蓄热器 供热系统模拟研究

尚少文<sup>1</sup>,梁振鹏<sup>1</sup>,钱浩<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳有色冶金设计研究院有限公司,  
辽宁 沈阳 110055)

**摘要** 为提高可再生能源利用率,研究太阳能空气源热泵耦合相变蓄热器供热系统实际性能,建立适合夏热冬冷地区民用住宅的节能供热系统。**方法** 利用 TRNSYS 软件建立太阳能空气源热泵耦合相变蓄热器供热系统模型,并与太阳能空气源热泵供热系统进行对比分析,对两个系统从制热量、耗电量、能效比以及室内人体热舒适度四个方面进行模拟分析,使用 PMV-PPD 评价方法对两个系统的室内热舒适度进行评价。**结果** 耦合相变蓄热器的供热系统耗电量低于无相变供热系统,节能率提高了 13.29%;耦合相变蓄热器的供热系统平均能效比为 3.5,太阳能空气源热泵供热系统的平均能效比为 3.32,提高了 5.14%;耦合供热系统可以为人体提供 I 级室内热环境水平的热舒适度,无相变供热系统只能为人体提供 II 级。**结论** 太阳能空气源热泵耦合相变蓄热器供热系统节能性更好,系统能效更高,提高了可再生能源利用率,并且耦合供热系统在热舒适性方面优于无相变供热系统。

**关键词** TRNSYS;空气源热泵;相变储能;热舒适

中图分类号 TU834

文献标志码 A

**引用格式:**尚少文,梁振鹏,钱浩. 太阳能空气源热泵耦合相变蓄热器供热系统模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(4):714-722. (SHANG Shaowen, LIANG Zhenpeng, QIAN Hao. Simulation study of solar air source heat pump coupled phase change accumulator heating system[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(4):714-722.)

## Simulation Study of Solar Air Source Heat Pump Coupled Phase Change Accumulator Heating System

SHANG Shaowen<sup>1</sup>, LIANG Zhenpeng<sup>1</sup>, QIAN Hao<sup>2</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Shenyang Nonferrous Metallurgical Design and Research Institute Co. Ltd., Shenyang, China, 110055)

**Abstract:** In order to improve the utilization rate of renewable energy and establish an energy-

收稿日期:2023-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52078308)

作者简介:尚少文(1970—),男,副教授,主要从事建筑节能和室内环境保障技术等方面研究。

saving heating system suitable for civil dwellings in hot summer and cold winter areas, the actual performance of solar airsource heat pump coupled phase change accumulator heating system is studied. A model of solar airsource heat pump coupled phase change accumulator heating system is established by TRNSYS software, and a solar air-source heat pump heating system set up as comparative object. The simulation results of the above two systems' four aspects-the heat production, power consumption, energy efficiency ratio, and indoor human body thermal comfort are analyzed. And the indoor thermal comfort of the above two systems is evaluated by the PMV-PPD evaluation method. The power consumption of the heating system with coupled phase change accumulator is lower than that of the heating system without phase change, and the energy saving ratio is 13.29%. And the average energy efficiency ratio of the former system is 3.5, and the latter system 3.32, which is an improvement of 5.14%. The former heating system can provide a class I level of indoor thermal environment for the human body, and the latter heating system can provide a class II level. So the solar air source heat pump coupled phase change accumulator heating system has better energy conservation, higher system energy efficiency, better comfort than that of the phase change free heating system, and improved renewable energy utilization.

**Key words:** TRNSYS; air source heat pump; phase change energy storage; thermal comfort

基于我国夏热冬冷地区气候和建筑围护结构的特殊性,诸多学者探究了该类地区建筑的供热方式,结果显示,应根据我国冬季热区能源结构型式和清洁能源利用技术选择合适的供热方式<sup>[1-4]</sup>。太阳能的间歇性与气象条件导致太阳能收集不稳定,如何储存太阳能并在需要时释放将是研究的重点内容<sup>[5]</sup>。空气源热泵受室外低温环境影响严重,而太阳能技术与空气源热泵结合可以互相弥补缺点<sup>[6-8]</sup>。相变储能技术是通过材料在相变过程中吸放热而实现能量的储存与释放<sup>[9]</sup>。蒋永明等<sup>[10]</sup>研制了相变蓄热空气源热泵样机并进行了试验研究和性能分析,结果表明,在-30℃超低温环境下运行时,系统COP可以达到1.94。韩玮等<sup>[13]</sup>将太阳能光热技术、空气源热泵技术以及相变蓄能技术结合起来,研制了一套复合型热水制取系统,为建筑热水供给的节能降耗提出一种新思路。H. F. Chen等<sup>[14]</sup>研究了一种太阳能相变储能空气源热泵系统,提高了热泵在极端天气条件下的COP,可达1.79。W. L. Heng等<sup>[15]</sup>研究了相变地板的蓄热和放热性能,对室内温度、测点温度、PCM温度和热泵COP的变化进行了分析和讨论。Z. W. Han等<sup>[16]</sup>提出

了一种适用于农村住宅的太阳能辅助相变储能跨临界CO<sub>2</sub>热泵系统,系统季节能效比为2.56,与沈阳农村地区传统的分散式燃煤供热方案相比系统节能率为43.55%。基于此,笔者将空气源热泵、相变蓄热技术以及太阳能利用技术相结合,建立适合夏热冬冷地区民用住宅的太阳能空气源热泵耦合相变蓄热器供热系统,利用TRNSYS软件进行仿真模拟,结果显示,耦合供热系统相比无相变供热系统的太阳能利用率更高,节能性提高了13.29%,系统能效比提高了5.14%,耦合供热系统的舒适性也比无相变供热系统表现更佳。

## 1 模型的建立

### 1.1 物理模型

选取南京市某民用建筑作为模拟研究对象,该建筑共3层、层高3m,总面积为315.78m<sup>2</sup>。建筑的立体模型如图1所示。根据《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ134—2010)<sup>[17]</sup>设置各围护结构的参数,因为整幢建筑全部供热,所以内墙均设置为绝热边界;外墙传热系数为0.71W/(m<sup>2</sup>·K);屋顶传热系数为0.63W/(m<sup>2</sup>·K);外窗传热

系数为  $2.80\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ;外窗太阳得热系数为  $0.42\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

作为隔热层。

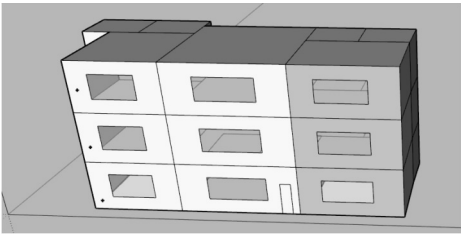


图1 建筑三维模型图

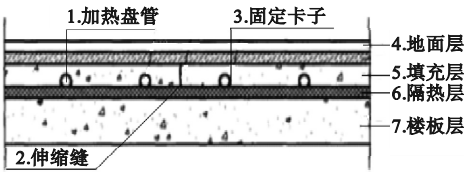


图2 地板构造层示意图

Fig. 2 Schematic diagram of floor construction layer

1.2 TRNSYS 模型

图2为模型中采用的低温热水地板辐射供热系统结构示意图。其中填充层材料不是采用常规的混凝土,而是选用具有蓄热和放热功能的相变材料。为了阻止热量向下扩散,造成热量损失,采用聚苯乙烯泡沫塑料板

使用 TRNSYS 软件建立太阳能空气源热泵耦合相变蓄热器供热系统(简称耦合供热系统)仿真模型,如图3所示。模型搭建与文献[18-20]基本一致。作为对比,同时建立太阳能空气源热泵供热系统(简称无相变供热系统)仿真模型,如图4所示。

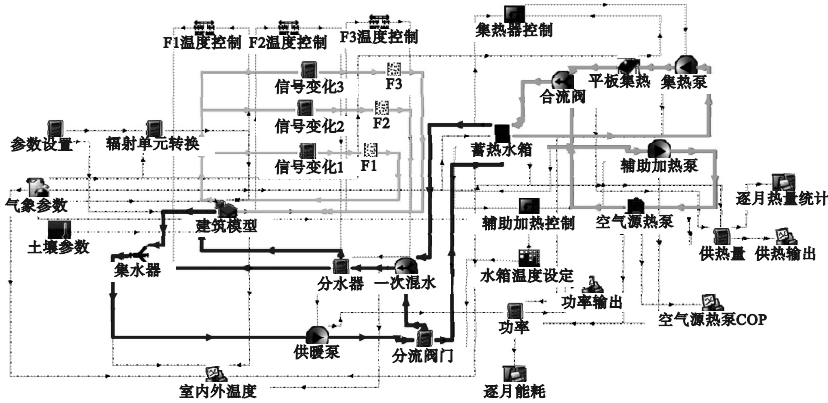


图3 太阳能空气源热泵耦合相变蓄热器供热系统模拟图

Fig. 3 Simulation diagram of solar air source heat pump coupled phase change accumulator heating system

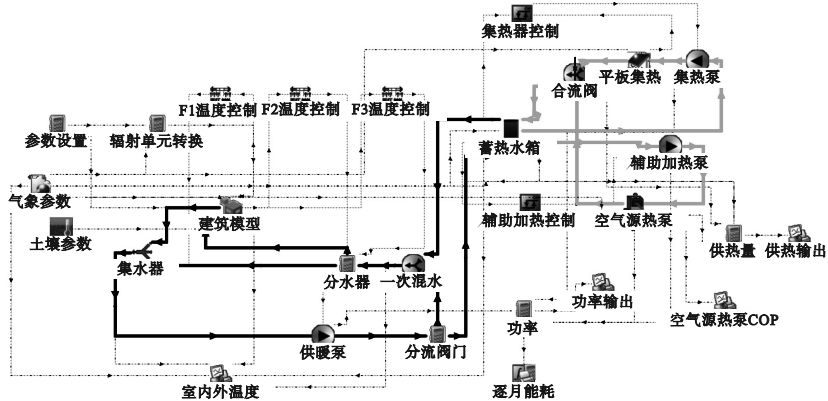


图4 太阳能空气源热泵系统模拟图

Fig. 4 Simulation diagram of solar air source heat pump system

太阳能集热器选用 Type71,空气源热泵机组选用 Type941,采用 Type15 模块读取 Meteonorm 软件中的气象文件作为气象参数。通过控制器 Type165 控制集热泵与辅助加热泵 Type114 的开闭,同时设置房间温度控制器 Type108,房间温度控制在 18℃。选用 Type1270a 模块作为相变模块,输入量为相变层上、下两表面传热量,输出量为相变层温度。

耦合供热系统由几个子系统构成,形式较为复杂。在满足精度要求的前提下,进行合理简化,做如下假设:

- ①忽略太阳能集热器外表面灰尘对太阳能辐射率的影响;
- ②忽略系统管路中的热损失和层间楼板热损失;
- ③忽略水箱功能退化而导致的参数变化;
- ④各截面处流体速度与温度均匀分布;
- ⑤假定房间内的温度均匀一致;
- ⑥忽略相变材料性能下降带来的影响。

2 仿真模拟结果分析

2.1 耦合供热系统制热量分析

南京市供暖期从 11 月 24 日至 3 月 12 日,共 109 天。最冷月为 1 月,平均室内热负荷为 21.40 kW。最冷日为 1 月 4 日,当日室内热负荷为 28.44 kW,最暖日为 3 月 8 日,当日室内热负荷为 8.27kW。在南京市典型气象条件下,耦合供热系统总供热量为 1 865.69 kW,室内总热负荷为 1 745.90 kW,满足室内供热需求。建筑模型逐日热负荷与耦合供热系统制热量如图 5 所示。

图 6 为供热季耦合供热系统和无相变供热系统的逐时动态制热量。两种系统的制热量均与典型气象年天气温度密切相关,制热量变化趋势与之相似。在满足室内供热条件下,耦合供热系统供热量低于无相变供热系统,太阳辐射强度较好时更为明显。这是由于两系统中的空气源热泵部分参数设置相同,耦合供热系统可以有效收集太阳能并储

存起来,需要热量时再进行释放,从而提高能源利用率。

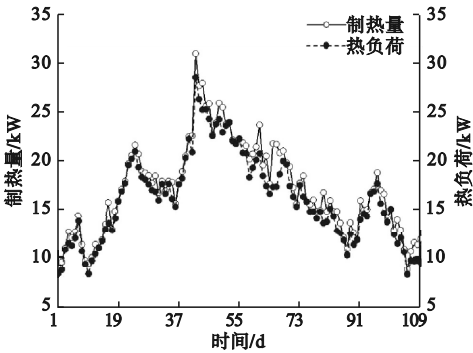
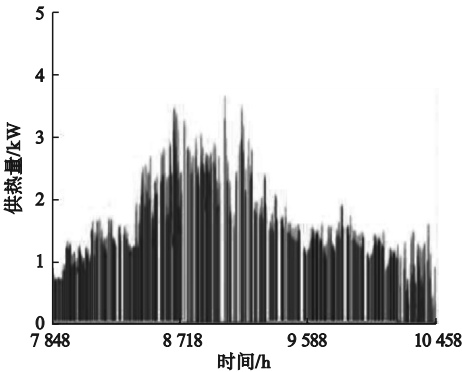
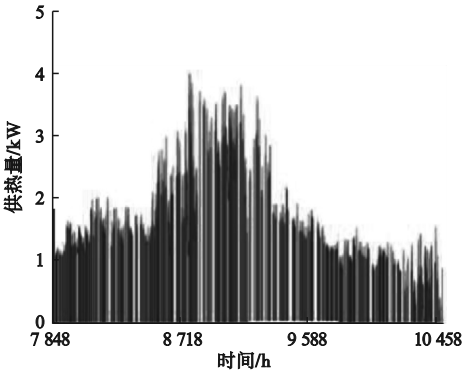


图 5 逐日热负荷与耦合供热系统逐日制热量  
Fig. 5 Daily heat load and daily heat production by coupled heating system



(a)耦合供热系统



(b)无相变供热系统

图 6 两系统动态制热量对比

Fig. 6 Comparison of dynamic heat production between the two systems

2.1.1 能源利用率对比分析

表 1 和表 2 分别为两系统的能源利用参数计算结果,图 7 为耦合供热系统与无相变供热系统逐月能源利用率对比。

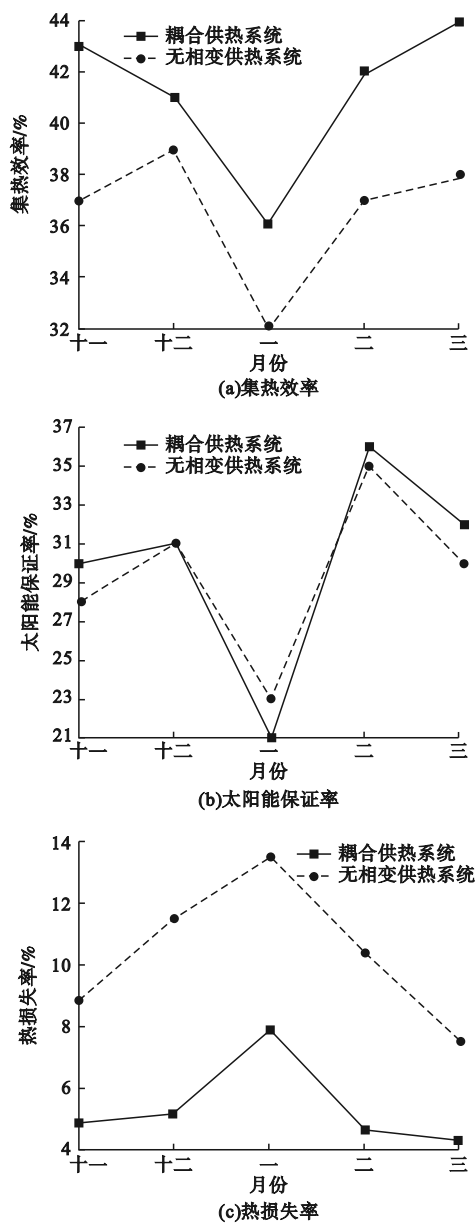


图7 两系统能源利用率对比

Fig. 7 Comparison of energy efficiency between the two systems

太阳能集热效率为太阳有效辐射与当月太阳辐射量的比值。从图7(a)中可以看出,耦合供热系统的集热效率略高于无相变供热系统,保持在0.30~0.45。从图7(b)看出,由于气候变化原因,导致最冷月1月的太阳能保证率较低,其余月份太阳能保证率保持在0.28~0.36,总体来看,耦合供热系统的太阳能保证率高于无相变供热系统。从图7

(c)看出,耦合供热系统和无相变供热系统在1月热损失最大,分别为7.82%和13.48%,其余月份耦合供热系统热损失较低,保持在4%~5.5%。可见,耦合供热系统能源利用率要高于无相变供热系统。

表1 耦合供热系统能源利用参数

Table 1 Energy utilization parameters of coupled heating system					
月份	$Q_s/\text{kW}$	$Q_c/\text{kW}$	$\eta_s/\%$	$f/\%$	$\eta_{cd}/\%$
十一	24.71	56.52	43	30	4.88
十二	143.69	352.56	41	31	5.41
一	162.02	544.79	36	21	7.82
二	125.76	305.38	42	36	4.84
三	41.58	108.69	44	32	4.16

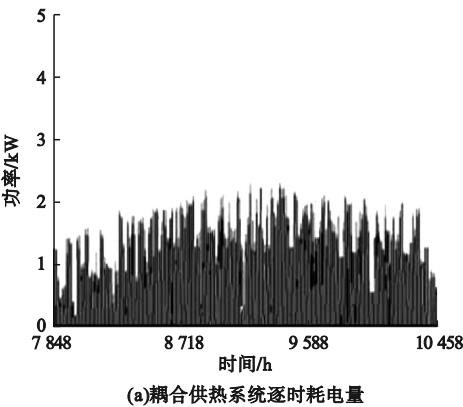
注: $Q_s$ 为太阳能集热器集热量, $Q_c$ 为热泵制热量; $\eta_s$ 为太阳能集热器效率, $f$ 为太阳能保证率; $\eta_{cd}$ 为热损失率。

表2 无相变供热系统能源利用参数

Table 2 Energy utilization parameters of heat supply system without phase change					
月份	$Q_s/\text{kW}$	$Q_c/\text{kW}$	$\eta_s/\%$	$f/\%$	$\eta_{cd}/\%$
十一	22.64	66.79	37	28	9.84
十二	103.30	394.25	39	31	11.85
一	135.95	584.61	32	23	13.48
二	101.25	343.43	37	35	10.30
三	37.50	121.76	38	30	7.59

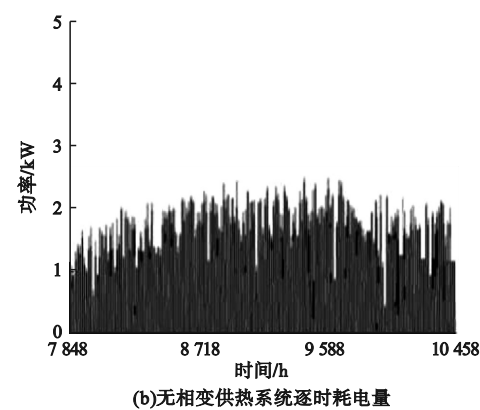
2.2 耗电量分析

图8为耦合供热系统和无相变供热系统的逐时耗电量。



(a)耦合供热系统逐时耗电量





(b)无相变供热系统逐时耗电量

系统耗电量为 2.35 kW·h,无相变供热系统耗电量为2.67 kW·h,耗电量减少了 11.98%。

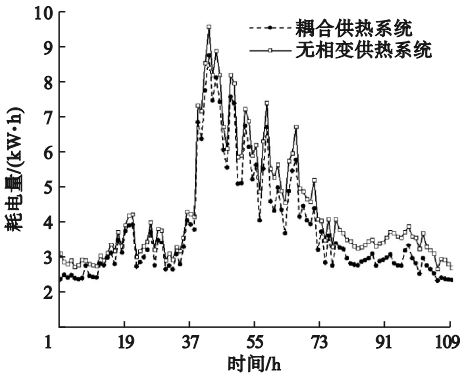


图9 两系统逐日耗电量对比

Fig.9 Comparison of daily power consumption between the two systems

耦合供热系统机组整体耗电量略低于无相变供热系统,这是由于相变地板储存了太阳能,减少了电能的消耗。

图9为两系统逐日耗电量对比,从图9可以看出,1月4日单日耗电量最高,耦合供热系统耗电量为8.78 kW·h,无相变供热系统耗电量为9.59 kW·h,耦合供热系统的耗电量减少了8.45%。在3月8日,耦合供热

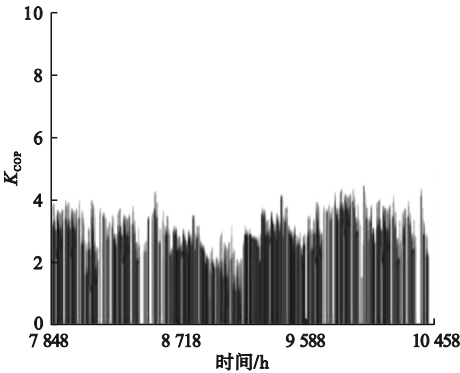
表3为两系统的逐月耗电量数据对比。可以看出,耦合供热系统各月的耗电量均低于无相变供热系统。耦合供热系统总耗电量为442.64 kW·h,无相变供热系统的总耗电量为510.51 kW·h,耦合供热系统较无相变供热系统节电13.29%。

表3 两系统逐月耗电量对比

Table 3 Comparison of the monthly power consumption between the two systems							kW·h
月份	水泵耗电量		热泵耗电量		总耗电量		
	耦合供热系统	无相变供热系统	耦合供热系统	无相变供热系统	耦合供热系统	无相变供热系统	
十一	2.56	3.30	15.66	19.53	18.22	22.83	
十二	9.76	10.74	98.48	113.95	108.24	124.69	
一	19.06	19.89	165.08	189.19	184.14	209.08	
二	9.80	10.85	87.50	101.31	97.30	112.16	
三	3.86	4.05	30.88	37.70	34.74	41.75	
总和	45.04	48.83	397.60	461.68	442.64	510.51	

2.3 系统能效比分析

图10为耦合供热系统和无相变供热系统的逐时COP。在最冷日,耦合供热系统COP为3.01,无相变供热系统COP为2.89,相比之下,耦合供热系统COP提高了3.98%。在最暖日,耦合供热系统COP为3.76,无相变供热系统COP为3.43。可见,耦合供热系统COP值整体高于无相变供热系统,提高了8.78%。



(a)耦合供热系统逐时COP

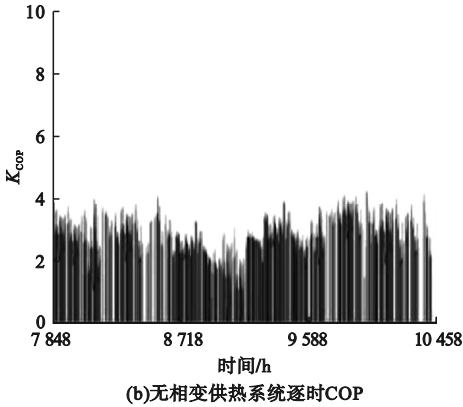


图 10 两系统的逐时 COP 对比

Fig. 10 Comparison of hourly dynamic COP between the two systems

图 11 为耦合供热系统与无相变供热系统月 COP 平均值对比。两系统的变化规律基本相同,耦合供热系统各月 COP 均高于无相变供热系统。从 11 月到 3 月,耦合供热系统较无相变供热系统的 COP 分别提升了 5.26%、3.35%、6.36%、2.87%、8.24%,平均提升了 5.14%。由此可见,耦合相变蓄热器供热系统 COP 平均值高于无相变供热系统。

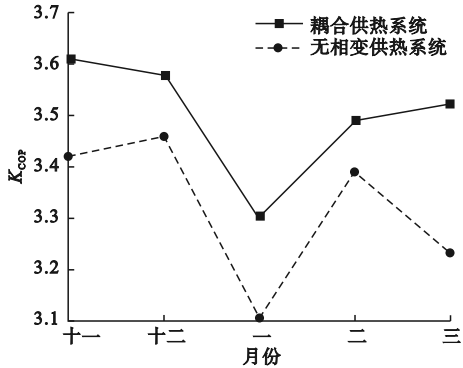


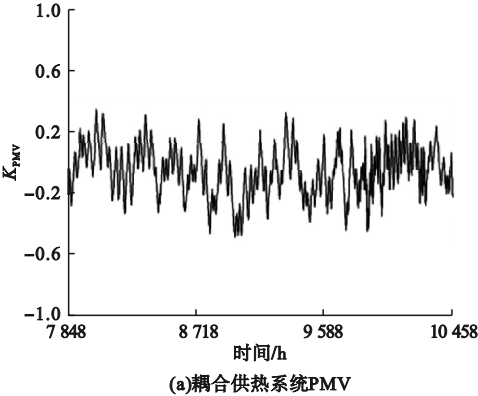
图 11 两系统月平均 COP 对比

Fig. 11 Comparison of monthly mean COP between the two systems

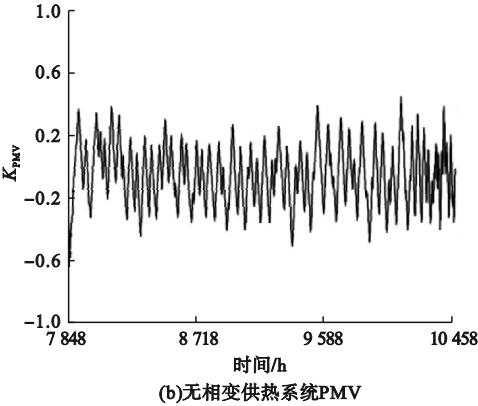
2.4 室内环境舒适性分析

图 12 为耦合供热系统与无相变供热系统 PMV 对比。从图 12 中可以看出,耦合供热系统使建筑室内 PMV 值始终保持在  $-0.5 \sim 0.5$ ,热舒适度为 I 级水平,满足现行标准要求<sup>[21]</sup>。无相变供热系统 PMV 值虽大

多数在  $-0.5 \sim 0.5$ ,但在最冷月 1 月会出现低于  $-0.5$  和高于  $0.5$  的情况,热舒适度只能满足 II 级水平要求。由此可见,耦合供热系统提高了人体热舒适度。



(a)耦合供热系统PMV

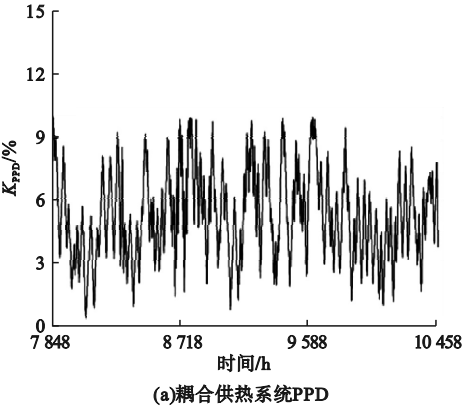


(b)无相变供热系统PMV

图 12 两系统 PMV 对比

Fig. 12 PMV comparison between the two systems

图 13 为耦合供热系统与无相变供热系统 PPD 对比。耦合供热系统的 PPD 值始终保持在 10% 内,热舒适度满足 I 级水平要求。无相变供热系统在最冷月会出现 PPD



(a)耦合供热系统PPD

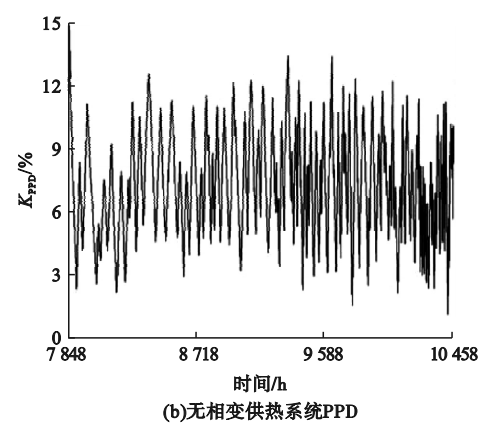


图 13 两系统 PPD 对比

Fig. 13 PPD comparison between the two systems  
值大于 10% 的情况,热舒适度为 II 级水平。耦合供热系统较无相变供热系统表现出更好的室内热环境水平,体现了耦合供热系统的优势。

3 结 论

(1)与无相变供热系统相比,耦合供热系统集热效率提高了 4.6%,热损失率降低了 5.36%,说明相变蓄热器的存在提高了能源利用率。

(2)耦合供热系统总耗电量为 442.64 kW·h,无相变供热系统总耗电量为 510.51 kW·h,节省电能达 13.29%,说明相变蓄热器可以降低系统运行费用,耦合供热系统更节能。

(3)耦合供热系统平均能效比为 3.5,无相变供热系统平均能效比为 3.32,耦合供热系统的平均能效比提高了 5.14%,耦合相变蓄热器的供热系统有更好的应用前景。

(4)两种系统的室内热舒适度对比结果显示,耦合供热系统可以为人体提供 I 级水平的热舒适度,而无相变供热系统只能提供 II 级,耦合供热系统可以提供更舒适的热环境。

参考文献

[1] 龚延风. 夏热冬冷地区居住建筑供暖问题的探讨[J]. 暖通空调,2014,44(11):39-42.

( GONG Yanfeng. Discussion on residential building heating in hot summer and cold winter zone [J]. Heating ventilating & air conditioning,2014,44(11):39-42. )

[2] 张东凯,郑洁,黄锋. 夏热冬冷地区供暖调研分析[J]. 暖通空调,2014,44(6):21-24. ( ZHANG Dongkai, ZHENG Jie, HUANG Feng. Investigation and analysis of heating in hot summer and cold winter zone [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2014, 44 ( 6 ) : 21 - 24. )

[3] 文佳岚,刘东,田亚斌,等. 夏热冬冷地区空气源热泵供暖特性实测与分析[J]. 热科学与技术,2020,19(4):358-364. ( WEN Jialan, LIU Dong, TIAN Yabin, et al. Measurement and analysis of heat characteristics of air source heat pump in hot summer and cold winter area [J]. Journal of thermal science and technology,2020,19(4):358-364. )

[4] 余凯,薛寒东,傅英胜,等. 夏热冬冷地区空气源热泵关键技术研究 and 应用[J]. 制冷与空调,2020,20(5):1-5. ( YU Kai, XUE Handong, FU Yingsheng, et al. Research and application of key technologies of air source heat pump in hot summer and cold winter areas [J]. Refrigeration and air-conditioning,2020,20(5):1-5. )

[5] 陈淑琴,虞昂,明焱,等. 夏热冬冷地区近零能耗住宅可再生能源设计[J]. 浙江大学学报(工学版),2023,57(4):795-804. ( CHEN Shuqin, YU Ang, MING Yan, et al. Design of renewable energy systems for near-zero energy residence in hot summer and cold winter zone [J]. Journal of Zhejiang university ( engineering science ), 2023, 57 ( 4 ) : 795 - 804. )

[6] 孙先鹏,郭康权,邹志荣,等. 太阳能联合空气源热泵系统温室供热实验研究[J]. 太阳能学报,2016,37(3):658-665. ( SUN Xianpeng, GUO Kangquan, ZOU Zhirong, et al. System investigation of a solar combined with air-source heat pump system for greenhouse heating [J]. Acta energiae solaris sinica,2016,37(3):658-665. )

[7] 李祖强,黄兴华,刘茂玲. 太阳能和空气源复合热泵的最优模式切换分析[J]. 太阳能学报,2023,44(2):30-36. ( LI Zuqiang, HUANG Xinghua, LIU Maoling. Optimal mode switching analysis of solar energy and air source hybrid heat pump [J]. Acta energiae solaris sinica,2023,44(2):30-36. )

[8] 傅杰,蒋绿林,卢涛,等. 相变储能太阳能热泵系统的试验研究[J]. 可再生能源,2018,36(1):22-26. ( FU Jie, JIANG Lulin, LU Tao, et al. The study of phase change energy storage solar



- energy heat pump in the heating system [J]. Renewable energy resources, 2018, 36 (1): 22–26. )
- [9] 黄港,邱玮,黄伟颖,等. 相变储能材料的研究与发展[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30 (3): 80–96.  
(HUANG Gang, QIU Wei, HUANG Weiying, et al. Research and development of phase change energy storage materials [J]. Materials science and technology, 2022, 30 (3): 80–96. )
- [10] 于静梅,赵广,常云,等. 相变储能箱耦合太阳能空气源热泵供热系统参数优化[J]. 热能动力工程, 2023, 38(8): 141–150.  
(YU Jingmei, ZHAO Guang, CHANG Yun, et al. Parameter optimization of heating system of phase change energy storage tank coupled with solar air source heat pump [J]. Journal of engineering for thermal energy and power, 2023, 38(8): 141–150. )
- [11] 李阳,余萌,沈俊,等. 基于相变蓄热的空气源热泵系统蓄放热性能实验研究[J]. 制冷技术, 2023, 43(3): 8–15.  
(LI Yang, YU Meng, SHEN Jun, et al. Experimental study on heat storage and release performance of air-source heat pump system based on phase change heat storage [J]. Chinese journal of refrigeration technology, 2023, 43(3): 8–15. )
- [12] 蒋永明,马素霞,文博,等. 蓄热蒸发型空气源热泵实验研究[J]. 暖通空调, 2014, 44 (2): 114–118.  
(JIANG Yongming, MA Suxia, WEN Bo, et al. Experimental study on heat storage-evaporator air-source heat pump in low temperature environment [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2014, 44 (2): 114–118. )
- [13] 韩玮,王芳,花王,等. 相变蓄能太阳能热泵系统的蓄热特性研究[J]. 能源工程, 2019(6): 54–60.  
(HAN Wei, WANG Fang, HUA Wang, et al. Study on heat storage characteristics of phase change energy storage solar heat pump system [J]. Energy engineering, 2019(6): 54–60. )
- [14] CHEN H F, WANG Y J, LI J, et al. Experimental research on a solar air-source heat pump system with phase change energy storage [J]. Energy and buildings, 2020, 228: 110451.
- [15] HENG W L, WANG Z Y, WU T L. Experimental study on phase change heat storage floor coupled with air source heat pump heating system in a classroom [J]. Energy and buildings, 2021, 251: 111352.
- [16] HAN Z W, BAI C G, MA X, et al. Study on the performance of solar-assisted transcritical CO<sub>2</sub> heat pump system with phase change energy storage suitable for rural houses [J]. Solar energy, 2018, 174: 45–54.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ134—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer and cold winter zone: JGJ134—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. )
- [18] 刘奕. 相变蓄热供暖装置开发及运行优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.  
(LIU Yi. Development and operation optimization research of phase change heat storage heating device [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. )
- [19] 曾乃晖,袁艳平,孙亮亮,等. 基于 TRNSYS 的空气源热泵辅助太阳能热水系统优化研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1245–1254.  
(ZENG Naihui, YUAN Yanping, SUN Liangliang, et al. Optimization on air source heat pump assisted solar water heating system based on trnsys [J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(5): 1245–1254. )
- [20] 张高玮. 太阳能-空气源热泵复合供热系统优化设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.  
(ZHANG Gaowei. Research on the optimal design of solar energy-air source heat pump combined heating system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. )
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB50736—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. )  
(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)