

蓄能型太阳能热泵系统中复合材料蓄热过程研究

黄金燕¹, 吴 薇^{1,2}, 王晓宇¹, 夏 曼¹, 秦芷萱¹, 廖扬颖¹, 杨 晨¹

(1.南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 设计了一种分季节蓄能型太阳能热泵热水系统, 集太阳能集热容器、相变储能容器、热管于一体, 利用 Fluent 软件对蓄能型太阳能集热器开展了数值模拟, 使用 Solidification/Melting 和 VOF 模型模拟癸酸/62#石蜡复合相变材料蓄热过程, 并采用 Boussinesq 近似法考虑了自然对流的影响。结果表明, 在集热器内只充灌单一相变材料不能满足不同季节蓄能型热泵系统的供热水需求。由癸酸和 62#石蜡组成的复合相变材料在蓄能过程中出现了两个相变温度, 分别在 32.66 °C 和 59.45 °C, 可以满足本系统不同季节的蓄热需求。蓄热过程中, 由于癸酸和 62#石蜡本身密度差以及浮升力的影响, 真空管纵向截面出现了温度分层现象。结果可为复合相变储能材料的推广应用提供可靠的理论依据。

[关键词] 蓄能, 太阳能热泵, 真空集热器, 复合相变材料, Fluent 模拟

[中图分类号] TK519 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)04-0001-09

Study on Thermal Storage Process of Composite Material in Solar Energy Storage Heat Pump System

Huang Jinyan¹, Wu Wei^{1,2}, Wang Xiaoyu¹, Xia Man¹, Qin Zhixuan¹, Liao Yangsang¹, Yang Chen¹

(1.School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Engineering Laboratory of Energy System Conversion and Emission Reduction of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this study, a seasonal energy storage solar heat pump hot water system is designed, which integrates solar energy heat collector, phase-change energy storage container and heat pipe. It uses composite phase change material to store energy, heat pipe to conduct efficient heat transfer, and energy-saving heat supply of heat pump system. The maximum utilization of solar energy is realized by switching working mode in different seasons. The numerical simulation of the solar collector with inserted heat pipe is carried out by Fluent software. Based on Solidification/Melting and VOF model, the thermal storage process of CA/62# paraffin composite phase change material is simulated. The influence of natural convection is considered by Boussinesq approximation. The results show that the heat supply water demand of energy storage heat pump system in different seasons can not be satisfied by filling a single phase change material in the collector. The composite phase changed material composed of CA and 62# paraffin has two phase change temperatures during the energy storage process, respectively at 32.66 °C and 59.45 °C, which can meet the heat storage requirements of the system in different seasons. In the process of heat storage, due to the density difference between CA and 62#paraffin and the effect of buoyancy, the phenomenon of temperature stratification appears in the longitudinal section of vacuum tube. The results can provide a reliable theoretical basis for the popularization and application of composite phase change energy storage materials.

Key words: energy storage, solar heat pump, vacuum tube collector, composite material, Fluent simulation

太阳能作为可再生清洁能源的一种, 具有热流密度低、间歇性、不稳定性和分布不均匀等特点。热泵节能优势明显, 以太阳能作为热泵系统的低温热源, 可以提高系统冬季的供热性能。研究表明, 太阳能与热泵联合运行可同时提高太阳能集热效率和热泵的性能系数^[1-2]。但当太阳辐射强度低时, 太阳能集热侧

收稿日期: 2020-07-05.

基金项目: 江苏省自然科学基金面上研究项目(BK20151549)、江苏省太阳能技术重点实验室开放课题(KLSST201903)。

通讯作者: 吴薇, 副教授, 研究方向: 制冷与节能技术研究. E-mail: wuwei@njnu.edu.cn

温度比外界环境温度低,热泵蒸发器侧得不到足够的热量,系统则无法运行^[3]. 相变蓄能技术因其能实现能量的“移峰填谷”,在太阳能利用、余热回收等领域具有广泛的应用前景^[4-5]. 贺秀芬等^[6]以改性石蜡为相变储能材料,开发设计了一体化新型玻璃真空集热管相变储能单元装置. 实验研究表明,太阳能真空集热管内加入储能材料后储能单元太阳能的总利用效率高达 69%.

一些学者选用 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ^[7]、石蜡^[8]、癸酸^[9]等作为相变蓄能材料,结果表明加入蓄能装置后都能提高其相应系统的集热效率和热泵的性能系数. 但由于单一相变材料普遍存在热导率低^[10]、稳定性差^[11]、储热性能差^[12]等缺点,诸多学者展开了对复合相变材料的制备与研究. 于文艳等^[13]制备了石蜡—硬脂酸/石墨复合相变材料,通过热性能测试表明该复合相变材料储热性能好,导热性能强. 杨致远等^[14]制备了癸酸—月桂酸复合相变材料,并通过热循环测试表明该复合相变材料热稳定性较好. 目前关于复合相变材料的研究只具有相变温度,且是在特定的实验室条件下关于导热性、储热性等性能的研究,并未考虑到实际应用中全年气候条件的变化. Ayompe 等^[15]由于冬夏两季太阳辐射强度和环境温度的不同,太阳能集热器内的夏季温度明显高于冬季温度. Zhu 等^[16]通过实验发现,若双层相变墙板内外层分别具有不同的相变温度,则在全年都能保持建筑室内的热舒适性.

许多学者对相变材料传热过程及机理展开了研究. 田松峰等^[17]通过 Fluent 软件对相变蓄热系统蓄热器内的相变材料在自然对流影响下蓄放热过程进行模拟,使用凝固/熔化模型求解得到了蓄热器内部温度场、液相体积比例随时间的变化规律. Liu 等^[18]采用 Boussinesq 近似法研究了石蜡蓄热单元内自然对流的作用,结果表明在石蜡的熔融行为中自然对流起着重要作用. Yadav 等^[19]采用焓值法对便携式蓄能系统中石蜡的熔化进行模拟,在模拟过程中考虑重力效应以及热传导和对流,得到了热传导和热对流控制石蜡熔融过程的变化规律. 因此,众多学者在进行蓄热模拟时,都会考虑重力和浮升力的作用.

本文设计了一种蓄能型太阳能热泵热水系统,通过具有双相变温度的复合相变材料储存太阳能至夜间或连续阴雨天使用,根据太阳辐射强度切换运行模式,利用热管将相变材料储存的太阳能稳定、高效地传递给热泵系统制取热水或者直接供热水,以实现太阳能分季节、全天候利用,大大提高太阳能的热利用率. 利用 Fluent 软件建立了数学模型,研究了集热真空管内复合相变材料蓄热过程的传热特性^[20]. 在南京地区搭建了太阳能集热器热性能试验台,研究真空管内复合相变材料温度随太阳辐射强度变化的规律,验证模拟的正确性.

1 系统原理

蓄能型太阳能热泵热水系统由蓄能型内插热管式太阳能集热器、三股流复合换热器、压缩机、冷凝器、水箱等组成^[21],如图 1 所示,太阳能集热器由太阳能真空管、热管换热器和复合相变材料组成,热管的蒸发段以 U 形管形式布置在太阳能真空管内,相变材料填充在热管蒸发段与太阳能真空管之间^[22]. 本系统有冬夏两种运行模式.

夏季不开启热泵系统,夜间时复合相变材料在高相变温度释热,热量从热管的蒸发段传递到置于三股

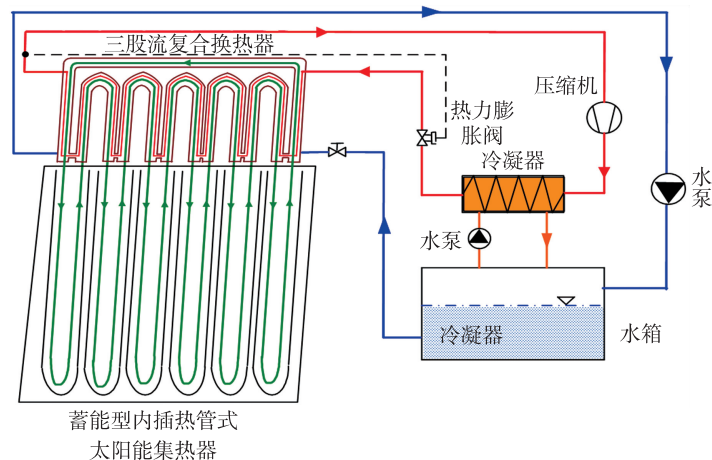


图 1 系统原理图

Fig. 1 System principle diagram

流复合换热器内的冷凝段,直接加热水箱中的水至所需温度. 冬季开启热泵系统,夜间时复合相变材料在低相变温度释热,热量通过热管传递给三股流复合换热器中的热泵系统蒸发器管路,通过热泵循环,加热冷凝器侧热水至所需温度.

本系统利用复合相变材料蓄热,结合不同的工作模式,可以分季节最大化利用太阳能. 夏季直接利用热管小温差无动力高效供热,不需补充额外能量;冬季时启动热泵节能供热,热泵蒸发器侧温度升高,系统整体性能提升,系统全年能效比更高. 热泵蒸发器和热管的冷凝段布置在三股流复合换热器内,系统结构紧凑,减少中间换热环节.

2 模型建立

2.1 物理模型

本文采用 Gambit 2.4.6 作为前处理软件构建模型,以本系统中的太阳能集热器作为研究对象建立三维模型来进行相变传热分析. 真空管外径 58 mm,内径 47 mm,长 1.6 m,外管透射率 0.91,吸收率 0.93,发射率 0.06. 真空管由硼硅玻璃材质组成,密度为 2719 kg/m^3 ,比热为 $871 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,导热系数为 $202.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ^[23]. 集热器中的热管长度 1.2 m,管径 4 mm,U 型热管两管中心距 17 mm. 对热管所占空间节点分布设置时,选定节点间距为 1,其余区域选定节点间距为 3,选择 TGrid 生成体网格,生成的模型网格如图 2 所示.

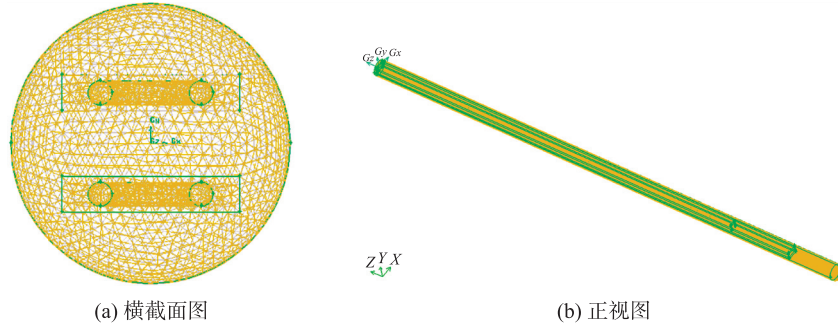


图 2 真空管集热器物理模型网格图

Fig. 2 Grid diagram of physical model of vacuum tube solar collector

2.2 数学模型

本文利用 Fluent 软件对内插热管式太阳能真空管集热器进行数值分析,并作出以下假设^[18-19].

- (1) 相变材料的热物性各向同性.
- (2) 忽略相变材料在蓄热过程中的体积变化.
- (3) 液相区的自然对流是层流,且可以由 Navier-Stokes 方程控制.
- (4) 相变过程中不考虑相变材料的过冷度.
- (5) 相变材料为常物性,只有在考虑浮升力作用时才考虑密度变化,密度的变化满足 Boussinesq 近似. 基于考虑浮升力的焓法模型,控制方程如下^[24].

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho c t)}{\partial \tau} + u \frac{\partial(\rho c t)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho c t)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho c t)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial t}{\partial z} \right). \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \nu)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \nu_i \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \nu_i) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + S_i. \quad (3)$$

式中: ρ 为传热流体密度, kg/m^3 ; u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度, m/s ; c 为流体比热, $\text{J/(kg}\cdot\text{°C)}$; t 为温度, °C ; k 为导热系数, $\text{W/(m}\cdot\text{°C)}$; ν 为运动粘度, m^2/s ; τ 为凝固时间, s ; μ 为动力粘度, $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$; S_i 为动量修正项,用以修正密度变化产生的流动, $\text{kg}\cdot\text{m/s}$.

2.3 参数设定

定义求解器为 3D 非稳态求解器,选用 Solidification/Melting 模型和 VOF 模型模拟复合相变材料的相变过程,并基于焓法模型建立了考虑自然对流的动量方程、能量方程和连续性方程^[23]. 压力和速度耦合项采用 SIMPLE 计算方法,梯度采用 Green-Gauss Cell Based 算法、压力采用 PRESTO! 算法、动量方程和能量方程均设置为 First Order Upwind 算法. 本文选用均匀网格和 1 s 时间步长的计算方法,当网格尺寸和时间步长分别减小到 0.1 mm 和 0.1 s 时,连续两次迭代的相对误差可以小于 0.1%,但计算时间会增加至 10 倍以上. 根据南京地区的纬度,增加 10°作为真空管的最佳倾斜角^[25]. 经计算设置重力方向为 $x=0\text{ m/s}^2$ 、 $y=-6.4\text{ m/s}^2$ 、 $z=-7.39\text{ m/s}^2$. 并在真空管轴向布置了均匀的 5 个监测点,其中轴向方向上每两点之间的间距为 266 mm.

石蜡作为一种常见的有机相变材料,具有过冷度低、没有相分离和多次循环后仍能保持良好性能等优点^[26],广泛应用于太阳能储能等领域^[27-28]. 癩酸作为脂肪酸的一种,具有高热容量、热稳定性、无毒无腐蚀性、不可燃性、相变过程中体积变化小等许多优良性能^[29]. 被广泛应用于低温太阳能热储存领域^[30]. 考虑到所需生活热水的国标要求为 55 ℃^[31]以及本系统冬夏两季不同储能需求,本文选用质量比为 1:1 的癩酸和 62#石蜡组成癩酸/62#石蜡复合相变材料,并对组成癩酸/62#石蜡复合相变材料的两个单一相变材料物性参数分别进行设置,其参数值见表 1,其中相变起始温度、相变温度和相变终止温度由 DSC 试验测得^[21].

表 1 单一相变材料物性参数
Table 1 Physical parameters of single phase change material

相变材料	相变起始温度/ ℃	相变温度/ ℃	相变终止温度/ ℃	相变焓值/ (J/g)	比热/ (J/(g·K))	密度/ (kg/m ³)	导热系数/ (W/(m·K))
62#石蜡	52.89	59.45	64.07	195.12	2.1	820	0.24
癩酸	31.02	32.66	33.79	153.67	2.1	890	0.149

2.4 实验设定

为验证模拟的准确性,在南京师范大学能源与机械工程学院(北纬 N32°7'4" 东经 E118°54'14")搭建了太阳能真空管集热器实验台,实验台倾角与文中一致. 并在真空管轴向用 OMEGA-K 型热电偶均匀地布置 5 个测温点,采用 34972A 安捷伦数据采集仪每隔 10 s 采集一次数据,如图 3 所示.

3 结果与分析

3.1 单一相变材料蓄热性能分析

冬夏两季,充灌单一相变材料的真空管内加权平均温度分别如图 4 所示. 其中加权平均温度由 5 个监测点平均温度获得. 按照江苏省冬夏两季平均总辐射量分别为 765 MJ/m²、1 559 MJ/m²^[32],考虑到真空管的吸收率以及热损失后,计算得到冬夏两季等效蓄热时间分别为 12 466 s、9 320 s.

由图 4 可知,冬夏两季癩酸和 62#石蜡温度曲线均出现了一个恒温平台,分别对应癩酸的相变温度 32.66 ℃和 62#石蜡的相变温度 59.45 ℃.

由图 4(a)夏季工况图可看出,62#石蜡达到相变起始温度(52.89 ℃)的时间为 4 360 s,达到相变终止

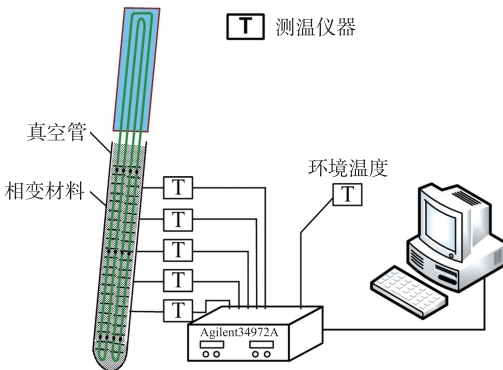


图 3 测点示意图
Fig. 3 Measuring point layout

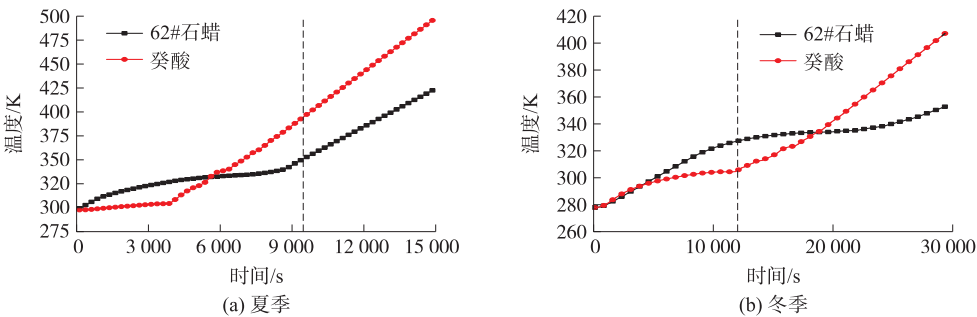


图 4 癩酸和 62#石蜡冬夏两季加权平均温度图
Fig. 4 Weighted average temperature time curves of CA and 62# paraffin

温度(64.07℃)的时间为7 160 s. 癸酸达到相变起始温度(31.02℃)的时间为3 230 s,达到相变终止温度(33.79℃)的时间为4 060 s. 夏季时,虽然癸酸和62#石蜡均能发生相变,但是癸酸相变温度仅为32.66℃,因此充灌癸酸相变材料的系统无法将热水加热到所需的供水温度. 而当真空管内充灌62#石蜡时,其温度能稳定在62#石蜡的相变温度,则可以满足夏季系统供热水需求.

由图4(b)冬季工况图可知,62#石蜡达到相变起始温度的时间为11 390 s,达到相变终止温度的时间为23 220 s,癸酸达到相变起始温度的时间为9 800 s,达到相变终止温度的时间为12 260 s. 在等效蓄热时间内,癸酸已完成相变,真空管内温度将稳定在癸酸的相变温度(32.66℃). 由于冬季系统开启热泵循环,因此癸酸释放的潜热能够满足系统供热水需求. 而62#石蜡在等效蓄热时间内刚开始相变,此时是利用固态显热蓄热,因此仅在真空管内充灌62#石蜡,即使开启热泵循环,也不能满足系统冬季持续供热水需求. 由此看出,若只在真空管内充灌单一相变材料,则无法满足系统全年正常供热水需求.

3.2 癸酸/62#石蜡复合相变材料蓄热性能分析

3.2.1 夏季工况下的复合相变材料蓄热性能分析

真空管内充灌配比为1:1的癸酸/62#石蜡复合相变材料,并设置向阳面为恒热流,热流密度为800 W/m²,热管边界设置为耦合边界,真空管内相变材料初始温度为25℃. 真空管 $z=-785.488\ 5\text{ mm}$ (最中间的横截面)以及 $y=0$ (最中间的纵截面)上的温度场分布如图5所示.

由图5(a)、图5(b)可知,在蓄热过程的初始阶段,横截面上等温线沿着向阳面半圆的弧线方向分布,

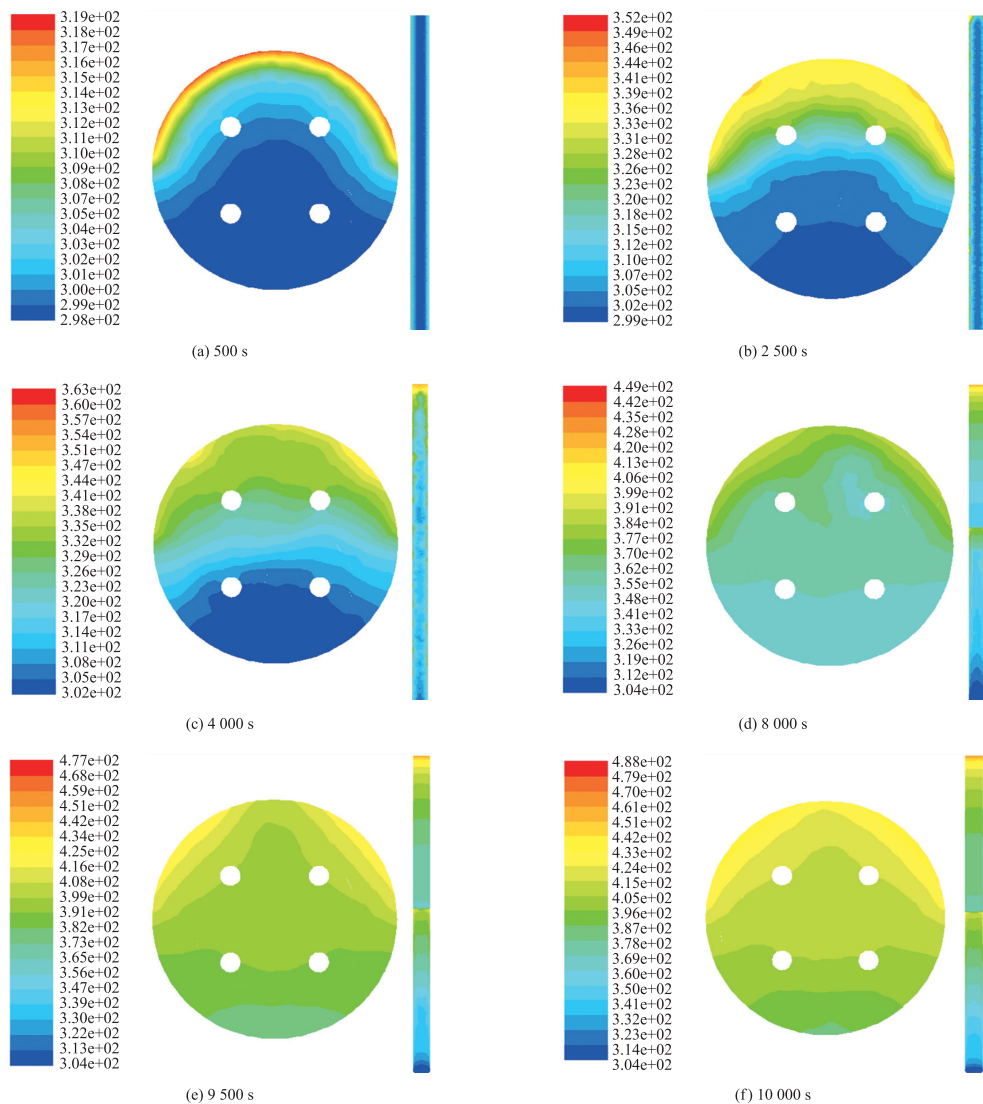


图5 夏季工况下横截面与纵截面温度场分布

Fig. 5 Temperature field of cross and longitudinal section in summer

此时导热起主要作用,紧靠壁面处少量的相变材料达到了癸酸的相变温度.当蓄热时间从 500 s 增加到 2 500 s 时,从横截面上可见,等温线逐渐向背阴面移动,而纵截面上保持温度均匀.随着时间的推移,当时间到 4 000 s 时,如图 5(c)所示,真空管内大约有 1/2 区域温度已经达到癸酸的相变温度,此时浮升力的作用开始体现,加速了真空管内部相变材料的熔化,使靠近管壁的相变材料与集热管内部相变材料之间的温度差变小,纵向上一部分已经熔化的液态相变材料在浮升力的作用下开始上浮,使得真空管上部的温度高于下部温度.随着时间的继续推移,当时间为 8 000 s 时,横截面上的相变材料温度均已高于 62#石蜡的相变温度,此时集热管内相变材料均已液化,开始以液态显热蓄热(如图 5(d)所示).纵截面上的温度分布出现明显上下两层.由图 5(e)可知,当时间为 9 500 s 时,横截面上等温线位置不再变化,仅仅温度不断升高.而纵截面上在上下两层中呈现温度分层现象,这是由于癸酸和 62#石蜡之间存在密度差,所以密度较大的癸酸在熔化之后会下沉.虽然石蜡层和癸酸层存在温度差,理论上已经熔化下沉的癸酸在浮升力作用下会上浮,但是由于温度差引起的密度差不能和癸酸与石蜡材料本身的密度差相抵消,所以癸酸层所产生的浮升力并不能影响石蜡层,从而出现了真空管上部 1/2 区域和下部 1/2 区域的两个单独的温度分层现象.由图 5(f)可以看出,当时间为 10 000 s 时,温度分层现象更为明显稳定.

3.2.2 冬季工况下的复合相变材料蓄热性能分析

真空管内充灌配比为 1:1 的癸酸/62#石蜡复合相变材料,并设置向阳面为恒热流,热流密度为 300 W/m^2 ,热管边界设置为耦合边界,真空管内相变材料初始温度为 5°C .真空管 $z = -785.488 \text{ mm}$ (最中间的横截面)以及 $y = 0$ (最中间的纵截面)上的温度场分布如图 6 所示.

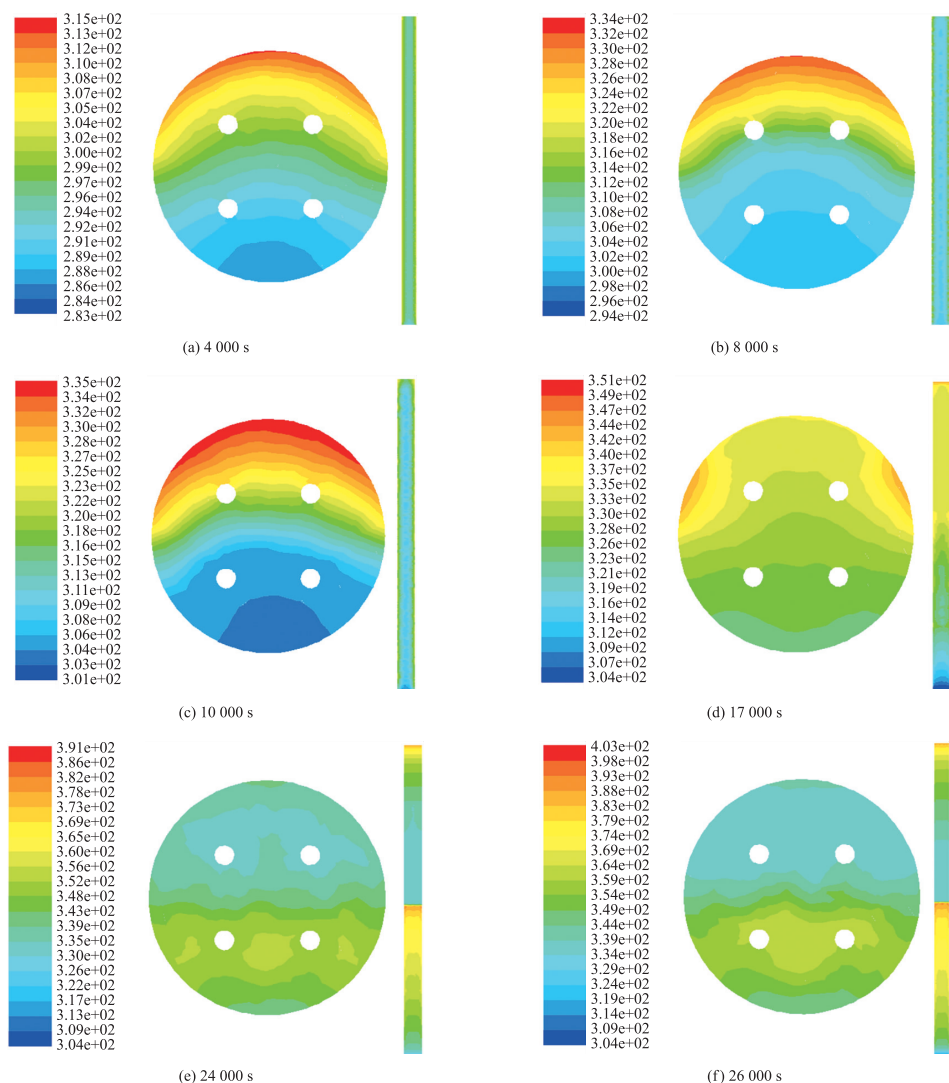


图 6 冬季工况下横截面与纵截面温度场分布

Fig. 6 Temperature field of cross and longitudinal section in winter

由图 6(a)可知,在蓄热过程的初始阶段,时间为 4 000 s 时,横截面上等温线沿着向阳面半圆的弧线方向分布,导热起主导作用,紧靠壁面处少量的相变材料达到了癸酸的相变温度,由于只有少量癸酸开始熔化,真空管纵截面温度均匀。当蓄热时间达到 8 000 s 时,真空管内大约有 1/2 区域温度已经达到癸酸的相变温度,此时由于浮升力的作用,加速了真空管内部相变材料的熔化,使得靠近管壁的相变材料与集热管内部相变材料之间的温度差变小(如图 6(b)所示)。当蓄热时间由 8 000 s 增加至 10 000 s 时,集热管内温度继续升高,靠近向阳面的区域已达到 62#石蜡的相变温度,使一部分已经熔化的相变材料在浮升力的作用下上浮,从纵截面可以明显看出真空管上部的温度高于下部温度(如图 6(c)所示)。当蓄热时间为 17 000 s 时,此时真空管横截面上相变材料温度均已高于 62#石蜡的相变温度,开始以液态显热蓄热(如图 6(d)所示)。纵截面上的温度分布出现明显上下两层。随着时间的继续推移,当时间为 24 000 s 时,横截面上等温线位置不再变化,仅仅温度不断地升高(如图 6(e)所示)。而纵截面上出现了与夏季工况相同的上下两个温度分层现象。当到 26 000 s 时,温度分层现象更为明显稳定(如图 6(f)所示)。

3.2.3 热管内充灌复合相变材料的加权平均温度分析

冬夏两季,充灌癸酸/62#石蜡复合相变材料的真空管内加权平均温度如图 7 所示。其中加权平均温度由 5 个监测点的平均温度获得。

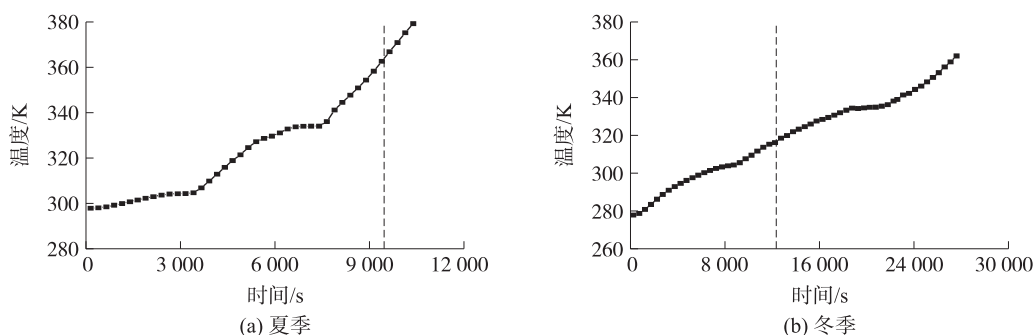


图 7 癸酸/62#石蜡复合相变材料冬夏两季加权平均温度图

Fig. 7 Weighted average temperature time curves of CA/62# paraffin

由图 7 可知,从温度曲线斜率的变化可以看出,由于相变材料一开始处于固态显热蓄热阶段,因此曲线斜率较大,随着真空管内温度达到癸酸的相变起始温度,曲线斜率降低并出现一个恒温平台,此温度对应癸酸的相变温度。当癸酸全部熔化后曲线斜率增加,此时相变材料以癸酸的液态显热蓄热和 62#石蜡的固态显热蓄热为主。当温度达到 62#石蜡的相变起始温度时,曲线斜率降低并又出现一个恒温平台,此温度正好对应 62#石蜡的相变温度。当 62#石蜡全部熔化后,曲线斜率增加,此时相变材料均以液态显热蓄热为主。

结合本系统运行特点,夏季时,癸酸/62#石蜡复合相变材料在等效蓄热时间 9 320 s 内,温度曲线出现了两个恒温平台并且真空管内温度稳定在高温相变材料(62#石蜡)的相变温度,能够满足加热热水需求(如图 7(a)所示)。冬季时,癸酸/62#石蜡复合相变材料在等效蓄热时间 12 466 s 内,只有癸酸能够达到相变温度并且真空管内温度稳定在低温相变材料(癸酸)的相变温度,开启热泵循环可达到加热热水需求(如图 7(b)所示)。因此蓄能型太阳能热泵热水系统可采用癸酸/62#石蜡复合相变材料实现分季节蓄能,从而实现对太阳能的最大化利用。

3.3 实验验证

制备质量比为 1:1 的癸酸/62#石蜡复合相变材料,充灌于真空管内,在南京地区典型工况下开展真空管内复合相变材料性能实验,将沿真空管垂直方向布置的 5 个测点的温度平均后得到的温度分布及当天太阳辐射强度分布如图 8 所示,由图 8(a)可以看出,当平均太阳辐射强度为 478 W/m^2 、环境温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,复合相变材料可以达到两个恒温阶段,分别对应癸酸和 62#石蜡的相变过程,之后相变材料温度继续上升至 $109.46 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当平均太阳辐射强度为 295 W/m^2 、环境温度为 $17 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,由于前一天的储能,相变材料温度从 $27.12 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始,经过 3 h 后,达到癸酸的相变温度,之后温度逐渐上升至 $48.49 \text{ }^\circ\text{C}$,但未达到 62#石蜡的相变温度。实验曲线的趋势与模拟结果一致,数据上的差异是由于实验过程的热损失以及实际太阳辐射的波动性引起的,实验结果验证了模拟的正确性。

图8(b)为平均太阳辐射强度 399 W/m^2 , 环境温度 19°C 时真空管上半部分和下半部分测点的平均温度图。由图可看出在 10:30 之前, 真空管内上半部分的平均温度与下半部分的平均温度基本一致, 在 10:30 之后, 真空管内上半部分的平均温度开始慢慢高于下半部分的平均温度, 在下午 15:20 时, 出现最大温差 5.37°C 。温度分层现象对于复合相变材料应用的影响以及如何克服, 后期将在复合相变材料的热性能方面做进一步深入研究。

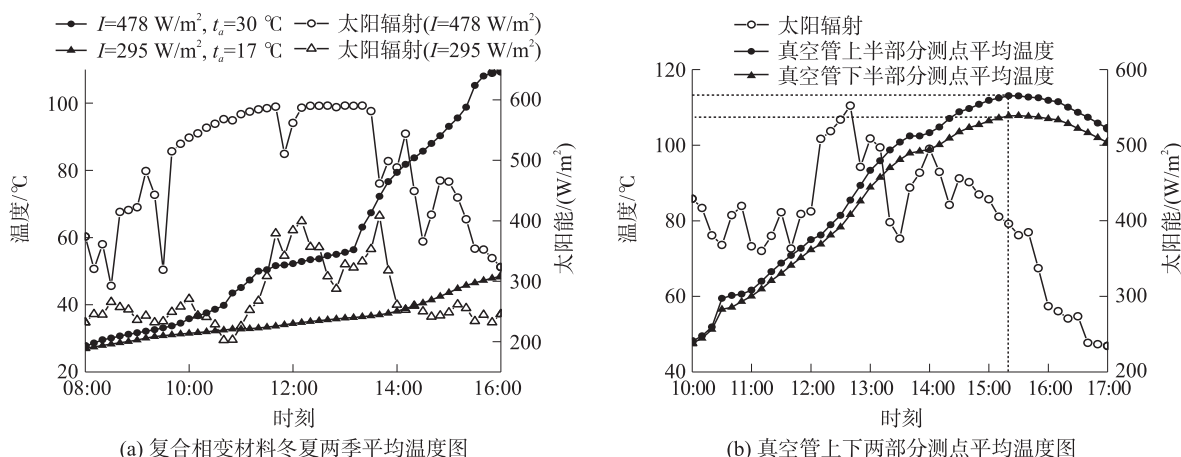


图8 癸酸/62#石蜡复合相变材料平均温度图

Fig. 8 Average temperature time curves of CA/62# paraffin

4 结论

本文提出一种蓄能型太阳能热泵热水系统, 可实现太阳能分季节全天候利用。利用 Fluent 软件对系统集热器中充灌的复合相变材料蓄热性能进行模拟, 并进行实验验证, 得出如下结论:

- (1) 在集热器内只充灌单一相变材料不能满足不同季节蓄能型热泵太阳能热水系统的蓄热需求。
- (2) 模拟和实验结果均说明, 由癸酸和 62#石蜡组成的复合相变材料在蓄能过程中出现了两个相变温度, 分别在 32.66°C 和 59.45°C , 可以满足本系统不同季节的蓄热需求。
- (3) 在复合相变材料蓄热过程中, 由于癸酸和 62#石蜡本身密度差以及浮升力的影响, 真空管纵向截面出现了温度分层现象, 真空管上下两部分的温度最大温差达到 5.37°C 。

[参考文献] (References)

- [1] 陈学锋, 何钦波, 徐言生, 等. 热泵辅助型太阳能热水系统动态性能评价研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2): 478-483.
- [2] 颜慧磊, 张华, 邵秋萍, 等. 一种太阳能与空气源双热源热泵系统的性能研究[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(2): 177-180.
- [3] SUN X L, WU J Y, DAI Y J, et al. Experimental study on roll-bond collector/evaporator with optimized-channel used in direct expansion solar assisted heat pump water heating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(1/2): 571-579.
- [4] HE Z B, WAN Q, WANG Z Y, et al. The numerical simulation and experimental study of heat release in a heat storage system with various diameters of aluminum tubes[J]. Heliyon, 2019, 5(10): e02651.
- [5] KHAIRELDIN F, MAHMOUD K, JALAL F, et al. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109579.
- [6] 贺秀芬, 白宇辰, 刘洋, 等. 玻璃真空集热管相变储能单元特性实验测试[J]. 太阳能学报, 2020, 41(5): 40-47.
- [7] 曲世琳, 彭莉, 吴晓琼, 等. 太阳能热利用中相变蓄热装置优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1705-1709.
- [8] BAZRI S, SHAHAB B, IRFAN A B, et al. An analytical and comparative study of the charging and discharging processes in a latent heat thermal storage tank for solar water heater system[J]. Solar Energy, 2019, 185: 424-438.
- [9] 晁岳鹏. 相变材料耦合太阳能在冬季建筑采暖中的应用[J]. 建筑节能, 2020, 48(4): 48-51.
- [10] 陈之帆, 孙志高, 汤小蒙, 等. 硬脂酸/十八醇/乙酸钠复合相变材料蓄/放热性能[J]. 化工进展, 2019, 38(4): 1833-1838.

- [11] 王博,朱孝钦,胡劲,等. 利用纳米石墨强化正癸酸-十四醇复合相变材料的导热性能[J]. 材料导报,2019,33(22):3815-3819.
- [12] 孙晓璐,苏婧,宋肖飞,等. 月桂酸-棕榈酸/ Al_2O_3 复合定形相变材料的制备与热性能研究[J]. 化工新型材料,2019,47(6):171-175.
- [13] 于文艳,王慧娟,田瑞. 石蜡-硬脂酸/石墨复合相变材料的储热性能研究[J]. 功能材料,2019,50(4):4104-4107.
- [14] 杨致远,董建锴,姜益强,等. 癸酸-月桂酸二元复合相变储能材料循环热稳定性[J]. 建筑科学,2015,31(2):60-64.
- [15] AYOMPE L M, DUFFY A. Thermal performance analysis of a solar water heating system with heat pipe evacuated tube collector using data from a field trial[J]. Solar Energy,2013,90:17-28.
- [16] ZHU N, HU N, HU P, et al. Experiment study on thermal performance of building integrated with double layers shape-stabilized phase change material wallboard[J]. Energy,2019,167(15):1164-1180.
- [17] 田松峰,刘丹娜,牛腾赞,等. 移动式相变蓄热系统数值模拟与优化[J]. 太阳能学报,2019,40(6):1511-1518.
- [18] LIU F H, XU J X, WANG H T, et al. Numerical method and model for calculating thermal storage time for an annular tube with phase change material[J]. Journal of Central South University,2017,24(1):217-226.
- [19] YADAV A, SAMIR S. Experimental and numerical investigation of spatiotemporal characteristics of thermal energy storage system in a rectangular enclosure[J]. Journal of Energy Storage,2019,21:405-417.
- [20] 高旭娜,吴薇,孟志军,等. 蓄能型振荡热管太阳能集热器热性能[J]. 农业工程学报,2017,33(16):234-240.
- [21] 吴薇,陈黎,王晓宇,等. 蓄能型太阳能热泵用复合相变材料热性能分析[J]. 农业工程学报,2017,33(13):206-212.
- [22] 吴薇,夏曼,尹正宇,等. 蓄能材料对内插热管式太阳能热泵系统冬季性能的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(5):226-232.
- [23] 高旭娜,吴薇,戴苏洲,等. 蓄能型振荡热管太阳能集热器性能研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2017,17(1):48-57.
- [24] 唐晓磊. 相变蓄热型地板辐射采暖系统性能研究[D]. 天津:天津大学,2018.
- [25] SHAMSUNDAR N, SPARROW E M. Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model[J]. Asme Transactions Journal of Heat Transfer,1975,97(3):333-340.
- [26] 刘正浩,张小松,王昌领,等. 石蜡与石蜡/膨胀石墨熔化性能的实验研究[J]. 化工学报,2020,71(7):3362-3371.
- [27] 刘丽辉,莫雅菁,孙小琴,等. 纳米增强型复合相变材料的传热特性[J]. 储能科学与技术,2020,9(4):1105-1112.
- [28] FELINSKI P, SEKRET R. Effect of a low cost parabolic reflector on the charging efficiency of an evacuated tube collector/storage system with a PCM[J]. Solar Energy,2017,144:758-766.
- [29] 费华,顾庆军,王林雅,等. 癸酸-棕榈酸二元复合相变材料的相变特性研究[J]. 太阳能学报,2020,41(1):80-85.
- [30] MA L Y, WANG Q W, LI L P. Delignified wood/capric acid-palmitic acid mixture stable-form phase change material for thermal storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2019,194:215-221.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑给水排水设计标准:GB50015—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [32] 曾燕,王珂清,谢志清,等. 江苏省太阳能资源评估[J]. 大气科学学报,2012,34(6):658-663.

[责任编辑:陈 庆]