

蓄能供热型太阳能集热器结构优化

李文正, 吴 薇, 夏 曼, 陆恩豪, 赵宇琪, 李苏仟, 陈 阳

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 提出一种蓄能供热型太阳能集热器, 将太阳能真空集热管、重力热管蒸发段、热泵蒸发器和相变材料集于一体, 可有效克服太阳辐射波动性影响, 结构紧凑, 集热效率高. 利用 FLUENT 软件模拟研究蓄能供热型太阳能集热器内相变材料的蓄放热特性. 对比分析集热器内不同结构: 重力热管蒸发段和蒸发器管路采用并排布置或三角布置时相变材料的温度场和速度场, 结果表明, 并排布置方式优于三角布置方式, 相变材料完全熔化时间可缩短 22.6%, 完全熔化时相变材料储存的热量更多. 研究集热器倾斜角度对相变材料蓄热/释热过程的影响, 结果表明, 蓄热过程倾斜放置比竖直放置时相变材料的完全熔化时间缩短了约 28%, 而释热过程完全熔化时间不受倾斜角度的影响. 最后研究了相变材料的相变温度和相变潜热对相变过程的影响, 结果表明, 在能够满足相变材料蓄热所需的相变温度范围内, 应选取相变温度较低、相变潜热较大的相变材料.

[关键词] 蓄能供热型太阳能集热器, 布置方式, 倾斜角度, 相变温度, 相变潜热, 数值模拟

[中图分类号] TK519 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2022)03-0001-08

Structural Optimization of Energy Storage and Heating Solar Collectors

Li Wenzheng, Wu Wei, Xia Man, Lu Enhao, Zhao Yuqi, Li Suqian, Chen Yang

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

Abstract: An energy storage and heating type solar collector is proposed, which integrates a solar vacuum heat collector tube, a gravity heat tube evaporation section, a heat pump evaporator and a phase change material. The collector can effectively overcome the fluctuation effect of solar radiation, and has a compact structure and high heat collection efficiency. The FLUENT software is used to simulate and study the heat storage and release characteristics of the phase change material in the energy storage and heating solar collector. The different structures in the collector, which are the temperature field and velocity field of the phase change material, are compared and analyzed when the evaporation section of the gravity heat pipe and the evaporator pipeline are arranged side by side or in a triangle. The results show that the side-by-side arrangement is better than the triangle arrangement, that the complete melting time of the phase change material can be shortened by 22.6%, and that the phase change material stores more heat during complete melting. The effect of the inclination angle of the collector on the heat storage/heat release process of the phase change material is studied. The results show that the complete melting time of the phase change material is shortened by about 28% when the heat storage process is inclined and placed vertically, and that the melting time is not affected by the tilt angle. Finally, the effects of the phase change temperature and the latent heat of phase change on the phase change process of the phase change material are studied. The results show that in the phase change temperature range that can meet the heat storage requirements of the phase change material, the phase change materials with large latent heat of change with lower phase change temperature and larger latent heat of change should be used.

Key words: energy storage and heating solar collector, arrangement, tilt angle, phase transition temperature, latent heat of phase transition, numerical simulation

我国作为世界最大的碳排放国,应对气候变化提出 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和目标^[1]. 能源绿色化对碳排放强度及总量下降具有重要的作用. 太阳能是地球上最丰富的能源,具有广泛、清洁、巨大、长久等特点,是目前开发绿色能源的不二之选^[2]. 热泵技术因其突出的节能优势被广泛应用于太阳能领

域^[3], 可以将从太阳能集热器中提取的较低等级的热能提升至更高的温度以用于加热^[4]. 但太阳能热泵系统容易受到外界气候温度和太阳辐射强度影响, 寒冷季节及阴雨时期效率较低, 无法满足全天候高效、稳定运行^[5]. 而蓄能技术可以实现“移峰填谷”, 将太阳能热泵和蓄能技术结合起来可以有效克服太阳辐射波动性的影响, 提高能源利用率^[6].

为解决太阳辐射波动性对系统性能的影响, Wu 等^[7]对添加相变材料的新型太阳能热水系统进行了实验研究, 结果表明在白天工况下, 添加相变材料的集热效率波动比未添加相变材料的集热效率波动小 30% 以上. 方桂花等^[8]研究了相变材料的加入对传统太阳能供暖系统的热影响, 结果表明该系统与传统系统相比具有太阳能利用率高、供暖温度波动小、供暖时间延长等优点. Youssef 等^[9]对太阳能热泵系统中添加相变材料和未添加相变材料进行了实验研究, 得到添加相变材料的系统在晴天和阴天的平均 COP 分别增加了 6.1% 和 14.0%. 吴薇等^[10]对比了冬季工况下蓄能型内插热管式太阳能热泵系统的性能, 结果表明充灌相变材料系统性能系数提高到 2 倍, 且在更短时间内达到供水水温. 有机类相变材料因具有较低的过冷度、无析出现象, 性能稳定, 无毒、无腐蚀性, 价格便宜等优点而备受关注^[11]. 其中, 癸酸是常用的相变材料之一. 它具有高潜热、良好的热稳定性、过冷度较小、体积膨胀率小、有可逆的熔化和凝固性能等特性, 广泛应用于太阳能热储存领域^[12].

本文提出了一种蓄能型太阳能热泵供热水系统, 夏季直接通过热管供热水, 冬季通过集热器中蒸发器吸热并启动热泵系统实现供热水. 集热器是蓄能型太阳能热泵供热水系统的关键部件^[13], 为了实现蓄能型太阳能热泵供热水系统 2 种蓄能供热模式, 蓄能供热型太阳能集热器由太阳能真空集热管、重力热管蒸发段、热泵蒸发器管路和相变材料组成. 本文利用 FLUENT 软件建立集热器内相变材料蓄放热过程的数学模型, 对集热器内不同结构——重力热管蒸发段和蒸发器管路采用并排布置或三角布置、集热器不同倾斜角度以及相变材料的不同物性下集热器内温度场和速度场进行研究, 探索不同布置方式、不同倾斜角、相变材料的相变温度和相变潜热对相变材料蓄放热特性的影响规律.

1 蓄能型太阳能热泵供热水系统及集热器结构原理

蓄能型太阳能热泵供热水系统由蓄能供热型太阳能集热器、重力热管、水箱以及热泵循环系统等组成, 如图 1(a) 所示, 热泵冷凝器以环绕的方式布置于水箱内, 重力热管的冷凝段插入水箱下端, 水箱布置在太阳能集热器上方. 蓄能型太阳能热泵供热水系统的运行模式有以下 2 种: 夏天太阳辐射强度强时, 白天集热器内相变材料一边蓄热一边通过热管传热给热水, 夜间相变材料发生液固相变释放的热量通过热管直接加热水箱中热水; 冬天太阳辐射强度弱时, 白天集热器内相变材料蓄热, 夜间相变材料发生相变释放的热量被热泵蒸发器管路中的制冷剂吸收, 经热泵系统后在冷凝器端释放热量加热水箱中热水.

蓄能供热型太阳能集热器作为蓄能型太阳能热泵供热水系统的核心组成部件, 主要由太阳能真空集热管、重力热管蒸发段、热泵蒸发器管路和相变材料构成, 如图 1(b) 所示. 热泵蒸发器管路以 U 型布置在太阳能真空集热管内, 重力热管蒸发段和热泵蒸发器管路呈三角或者并排布置, 如图 2 所示.

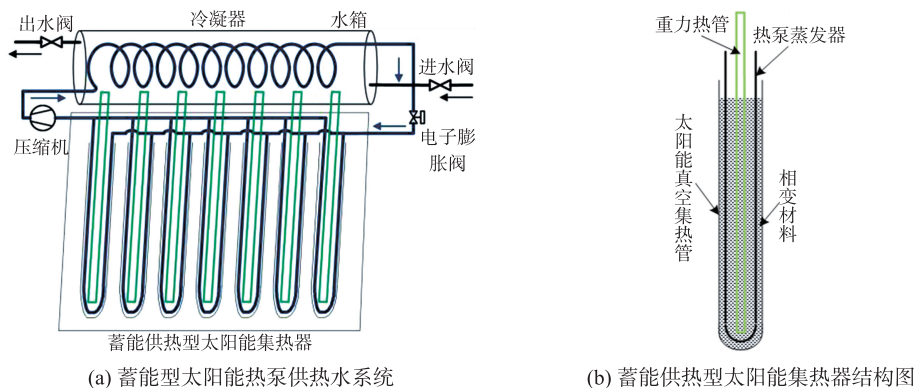


图 1 系统原理图

Fig. 1 System schematic diagram

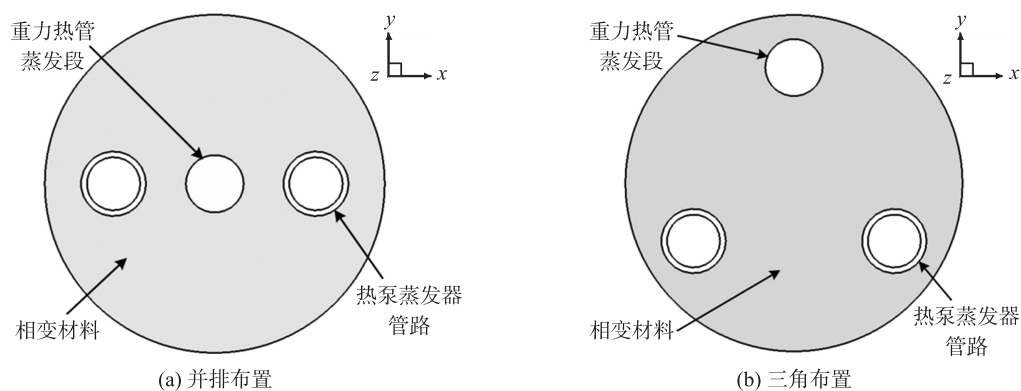


图2 蓄能供热型太阳能集热器布置方式

Fig. 2 Layout of energy storage and heating solar collectors

2 数值模拟

2.1 物理模型

蓄能供热型太阳能集热器以重力热管蒸发段、热泵蒸发器和太阳能真空集热管之间的相变材料为研究对象,通过 Gambit 软件建立三维模型,并进行网格划分. 太阳能真空集热管的外管直径为 58 mm,内管直径为 47 mm,管长为 1.8 m. 重力热管蒸发段内管直径为 8 mm,热泵蒸发器管路内管直径为 8 mm,管壁的厚度为 1 mm. 真空集热管为硼硅玻璃,密度为 $2\,719\text{ kg/m}^3$,比热为 $871\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,导热系数为 $1.2\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,所建立的物理网格模型如图 3 所示.

2.2 数学模型

本文利用 FLUENT 软件对蓄能供热型太阳能集热器中重力热管蒸发段与热泵蒸发器管路之间相变材料的蓄能过程进行数值模拟,模拟中做出以下假设^[14]:

- (1) 相变材料固、液两相的热物性为常数,且为各项同性.
- (2) 相变材料为纯物质,忽略过冷和性能衰减的现象.
- (3) 液相区的流动为层流、牛顿流体、不可压缩,且由 Navier-Stokes 方程描述流体的运动,考虑自然对流的作用时使用 Boussinesq 近似法.
- (4) 仅在考虑自然对流的作用时涉及密度的变化.
- (5) 忽略相变过程中的体积变化,以及相变时速度和表面张力对流动的影响.

因此考虑自然对流时,其控制方程如下:

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:

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

动量方程:

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

液相率:

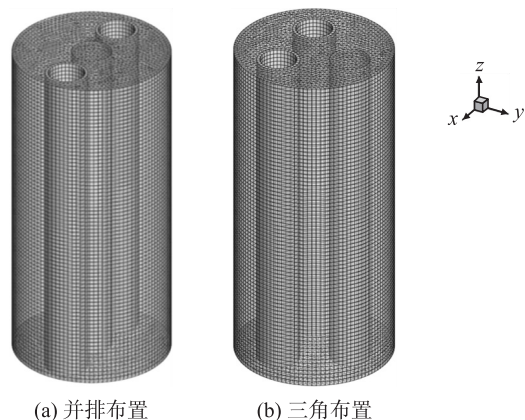


图3 蓄能供热型太阳能集热器物理模型网格图

Fig. 3 Grid diagram of the physical model of the energy storage and heating solar collector

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s, \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s < T < T_l, \\ 1, & T > T_l. \end{cases} \quad (4)$$

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

2.3 参数设置及独立性验证

基于焓法模型建立能量方程、连续性方程和动量方程. 定义求解器为 3D 非稳态求解器, 压力基求解, 选择 Solidification/Melting 模型模拟相变过程. 设置材料物性参数, 相变材料的密度选择 Boussinesq 假设. 设置蓄能过程的向阳面为恒热流加热. 设置重力热管和热泵蒸发器铜管外壁面为耦合壁面, 背阴面及其它面为绝热边界. 压力速度耦合使用 SIMPLE 算法, 设置压力项为 Standard 格式. 设置动量和能量方程为 Second-order upwind 格式. 操作环境设置为 $x = -6.4 \text{ m}/\text{s}^2, y = 0, z = -7.39 \text{ m}/\text{s}^2$.

本文选用混合型网格进行划分, 选取网格数量分别为 5.3 万、13.1 万、20.8 万和 28.6 万, 通过模拟不同网格数量对相变材料液相率变化误差的影响作为对比基准. 当 20.8 万增加至 28.6 万时, 误差为 0.41%, 且再进一步增加网格数量时对相变材料液相率的影响已经小到在可允许的范围内, 相变材料液相率基本已与网格数量无关. 考虑到考虑到计算时长, 最终选取网格数量为 20.8 万的模型.

3 数值模拟结果与分析

3.1 重力热管和热泵蒸发器布置方式对相变材料蓄热性能的影响

图 4 分别为重力热管和热泵蒸发器不同布置下的液相分布(左)和温度分布云图(右). 模拟中条件设置为: 真空集热器向阳面为恒热流加热, 热流密度为 $800 \text{ W}/\text{m}^2$; 蓄热初始温度为南京夏季的平均环境温度 298 K ; 三角布置时重力热管靠近向阳面的一侧, 重力热管蒸发段为恒温, 此时热泵系统不工作.

由图 4 可知, 在 $\tau = 1000 \text{ s}$ 时, 两种布置方式的最高温度相差较小, 但温度分布却发生明显的不同. 因为三角布置方式下的相界面与热管的距离更近, 热量源源不断地通过热管传递出去对温度分布产生影响. 且不同的温度差会引起不同布置方式下液相区厚度的不同, 使并排布置方式下中间的液相区厚度大于三角布置下中间的液相区厚度. 在 $\tau = 4000 \text{ s}$ 时, 并排布置的最高温度约为 360 K , 三角布置的最高温度约为 348 K , 两者相差 12 K . 并排布置下铜管附近的固-液相界面已移动至铜管后方, 且与管壁平行远大于三角布置下的液相区厚度, 这是由于铜管的导热系数比相变材料导热系数更大, 使靠近铜管处的温度梯度较大, 相变材料的熔化速率更快. 当 $\tau = 12000 \text{ s}$ 时, 并排布置的最高温度约为 375 K , 三角布置的最高温度约为 350 K , 两者相差 25 K . 并排布置下的相变材料已经完全熔化, 三角布置下的相变材料还未完全熔化. 由于铜管的影响, 三角布置下未熔化的相变材料在下部形成了中间较厚、两侧较薄的固相区.

图 5 为同一个横截面($z = -25 \text{ mm}$)在不同时刻、不同布置下的速度分布云图(左)和流线图(右). 随着液相区厚度的增加, 自然对流的作用加强, 热流体上浮, 靠近向阳面侧的流体流动速度加快, 并在加热壁面和固-液相界面中间形成涡旋, 如图 5(a)所示. 随着相界面的移动, 液相区加厚, 涡旋中心开始逐渐向背阴面方向移动, 这主要是因为真空管单元上部的温度逐渐趋于一致, 自然对流逐渐往下发展^[15]. 不同的布置方式不仅会影响固-液相界面分布的形状, 还会对液相区的涡旋造成影响, 如图 5(b)所示. 此时并排布置下的涡旋消失了. 随着熔化的进行, 相界面继续向背阴面移动, 逐渐与热管分离, 如图 5(c)所示. 而随着时间的推移, 从横截面的视角上来看, 并排布置下涡旋的影响范围更大, 三角布置下涡旋中心始终集中在靠近向阳面一侧的上部, 移动幅度较小, 尤其后期涡旋中心几乎没有发生移动, 导致上部与下部之间的速度分布非常不均匀, 流动和热交换不充分.

图 6 和图 7 分别对比了不同布置下平均温度、液相率和重力热管表面的热流密度随时间变化的曲线. 从图 6 中可以看出: 在前 1000 s 时, 不同布置方式下的平均温度和液相率的变化规律是一致的, 因为这个阶段没有形成较厚的液相层, 热量传递以导热为主^[16]. 之后三角布置下平均温度和液相率的增速开

始明显减慢,这是因为三角布置下热管的位置更靠近向阳面,通过热管和向外传热的热流密度要远大于并排布置,如图 7 所示. 三角布置下热管向外传递的热量较多,而用以相变材料自身吸收储存的热量较

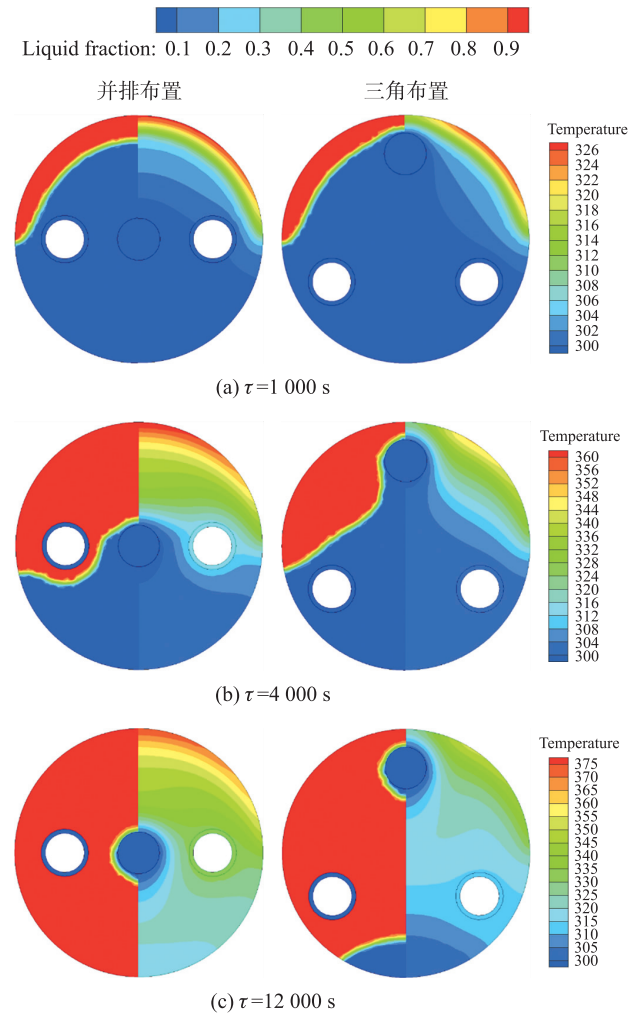


图 4 不同时刻、不同布置方式下横截面的液相分布(左)和温度分布云图(右)

Fig. 4 Liquid phase distribution(left) and temperature distribution cloud map(right) of cross-section at different times and different arrangements

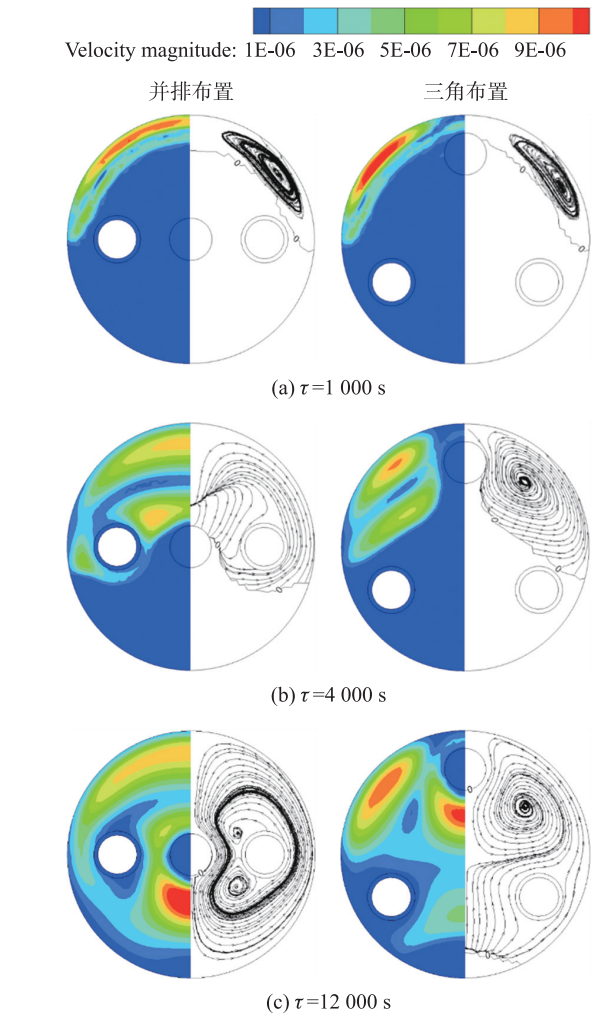


图 5 不同时刻、不同布置方式下横截面的速度分布云图(左)和流线图(右)

Fig. 5 Cloud map(left) and streamline diagram(right) of cross-section velocity distribution at different times and different arrangements

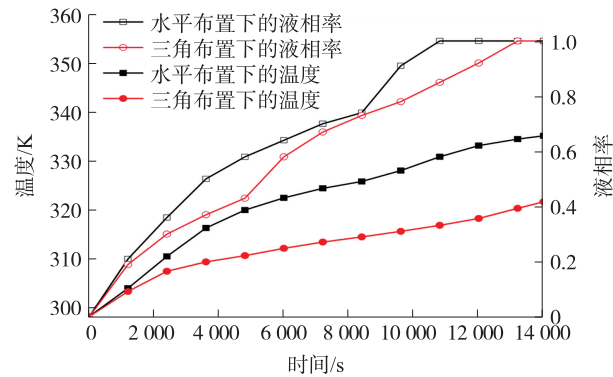


图 6 不同布置方式下平均温度和平均液相率随时间的变化

Fig. 6 Average temperature and average liquid phase ratio under different arrangements change over time

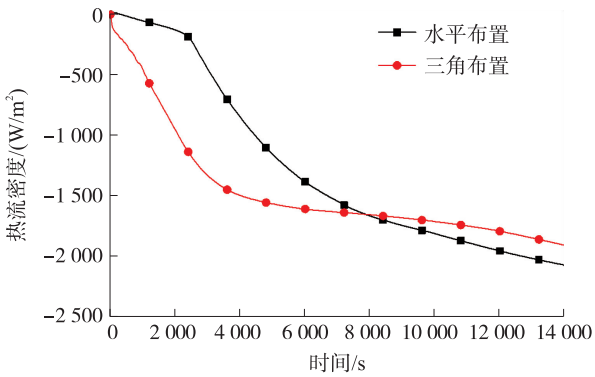


图 7 不同布置方式下热管表面的热流密度随时间的变化

Fig. 7 Heat flux density on the surface of heat pipe under different arrangements change over time

少. 在 4 000 s 时, 并排布置下平均温度和液相率的增速突然开始减缓, 因为此时热管的位置阻碍了液相区中涡旋的形成, 传热受到了限制. 另外, 并排布置和三角布置下相变材料的液相率分别在约 5 000 s 和 9 000 s 时明显增长, 因为此时固-液相界面与热管分离, 在这之后相变材料主要是通过液相显热将部分的瞬时太阳能通过重力热管传递出去, 向外传递的热流密度开始趋于稳定, 而其余大部分的太阳能则被相变材料吸收, 加快了液化过程.

此外, 并排布置下的完全熔化时间为 10 830 s, 比三角布置的熔化时间减少了约 22.6%, 在完全熔化的同一时刻, 并排布置下的平均温度比三角布置高出了 4.2%, 并且并排布置下完全熔化时刻 ($\tau = 10\,830\text{ s}$) 的平均温度比三角布置下完全熔化时刻 ($\tau = 14\,000\text{ s}$) 的温度高出 9.17 K. 可知并排布置方式不仅具有较短的熔化时间, 而且在经历同样的熔化进程之后, 并排布置下相变材料储存的热量更多. 因此蓄能供热型太阳能集热器及蓄能型太阳能热泵供热水系统中的重力热管与热泵蒸发器均应选用并排布置方式.

3.2 集热器倾斜角对相变材料蓄释热性能的影响

根据倾斜角的不同集热器有竖直放置和倾斜放置, 在南京地区维度, 集热器倾斜放置时倾斜角取 41° ^[17]. 模拟中条件设置为: 真空集热管向阳面为恒热流加热, 热流密度为 800 W/m^2 ; 蓄热过程的初始温度为 298 K, 释热过程的初始温度为 330 K.

图 8(a) 对比了蓄热过程中集热器竖直放置和倾斜放置时相变材料的体积液相率随时间的变化状况. 可知, 在 0~3 000 s 时, 竖直放置和倾斜放置下两者的熔化曲线基本一致, 因为这个阶段的传热是以导热为主体. 这之后倾斜放置下的集热器内相变材料的熔化速度更快, 完全熔化时间为 12 780 s, 而竖直放置下的集热器内相变材料则在 17 750 s 时才完全熔化, 倾斜放置比竖直放置完全熔化时间缩短了约 28%, 这是因为倾斜放置比竖直放置的太阳入射角大, 使倾斜放置集热器表面的得热面积更大, 太阳能热利用效率高. 图 8(b) 对比了释热过程中集热器竖直放置和倾斜放置时相变材料的体积液相率随时间的变化状况. 可知竖直放置和倾斜放置的释热曲线几乎是一致的, 这表明集热器释热过程完全不受倾斜角的影响. 本系统是利用相变材料对白天的太阳能进行蓄能, 夜间释放热量加热水, 考虑到白天蓄热时间足够长, 释热过程不受倾斜角的影响, 因此本系统可以采用集热器与墙体结合的方式实现建筑一体化, 节省占地面积.

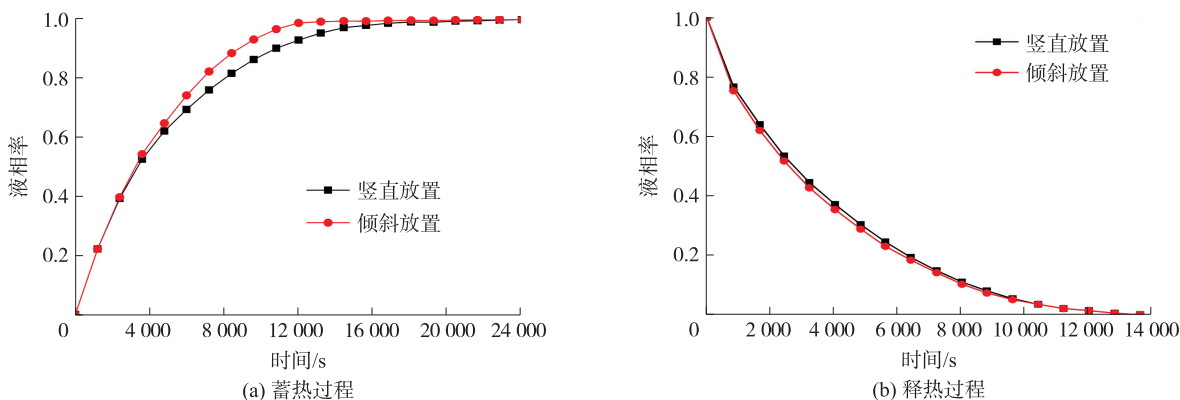


图 8 不同放置方式下的液相率随时间的变化

Fig. 8 Variation of liquid phase rate with time under different placement methods

3.3 相变温度和相变潜热对相变材料蓄释热性能的影响

相变温度和相变潜热是相变材料最重要的两个热物性, 会对蓄能供热型太阳能集热器的蓄释热过程产生较大的影响. 模拟不同相变温度、不同相变潜热的相变材料在真空管单元内的蓄释热过程, 对比相变材料的液相率随时间的变化规律, 研究不同相变材料热物性参数对相变过程的影响. 此时模拟条件设置为: 相变材料的不同热物性参数如表 1 所示. 真空管倾斜放置, 真空集热管向阳面为恒热流加热, 热流密度为 800 W/m^2 . 蓄热过程的初始温度为 298 K, 释热过程的初始温度为 330 K.

表 1 相变材料的不同热物性参数

Table 1 Different thermophysical parameters of phase change materials

编号	相变温度/K	相变潜热/(J·g ⁻¹)
A0	305	158
A1	315	158
A2	325	158
B1	305	208
B2	305	258

图9对比了不同热物性参数的相变材料在集热器内的液相率随时间的变化状况。由图可知,蓄热过程相变材料的相变潜热相同时,随着相变温度的增加,A0的液相率曲线斜率最大,完全熔化时间最短,A2的液相率曲线斜率最小,完全熔化时间最长。这是因为相变温度越高,相变材料达到相变所需的热量越多,全部融化所需的时间越长。当相变材料相变温度相同时,随着相变潜热的增加,A0的液相率曲线斜率最大,完全熔化时间最短,B2的液相率曲线斜率最小,完全熔化时间最长,这是因为相变潜热越大,所需吸热储存的热量越多,相变材料完全熔化时间越长。释热过程当相变材料的相变潜热相同时,随着相变温度的增加,A0、A1、A2的释热时间越来越短,这是因为相变温度越低,相变材料达到相变温度释放的热量越多,需要带走的热量越大,相变材料全部凝固所需时间越长,释热时间越长。相变温度相同时,随着相变潜热的增加,B1、B2的释热时间越来越长,因为相变潜热越大,储存的热量越多,释热所需时间越长。

从图9(a)蓄热过程可知,相变温度越低,相变潜热越小,蓄热时间越短。从图9(b)释热过程可知,相变温度越低,相变潜热越大,释热时间越长。而相变潜热大的相变材料夜间降低到相同温度时释放出来的热量也更多。鉴于本系统白天有足够长的时间通过相变材料蓄热,夜间释热来加热生活用水,所以,选用的相变材料在满足蓄热温度的条件下,相变温度越低相变潜热越大越好。

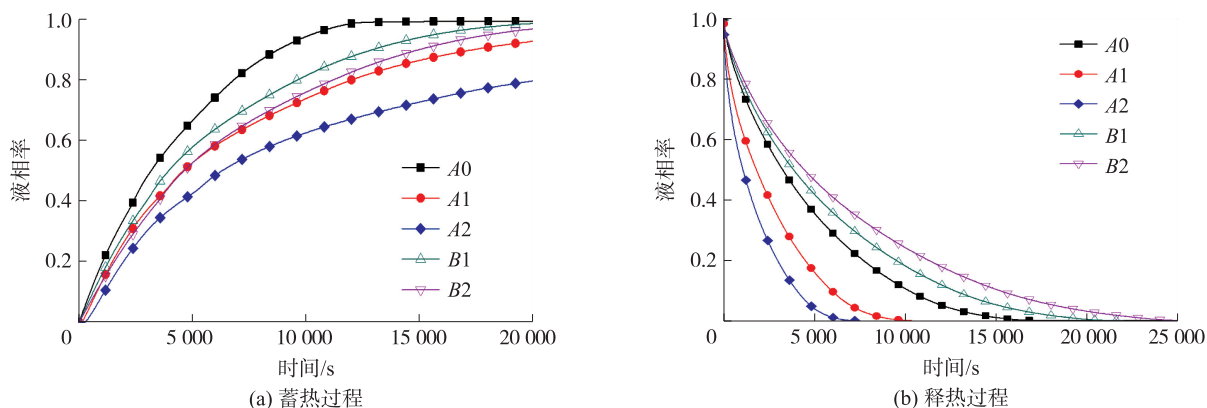


图9 不同热物性参数的液相率随时间的变化

Fig. 9 Variation of liquid phase ratio with time for different thermophysical parameters

选取相变材料为十四醇、硬脂酸进行模拟验证,十四醇和硬脂酸的相变温度和相变潜热分别为:310 K和 $225 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 、343 K和 $203.5 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。对比分析蓄/释热过程中两种不同相变材料的液化率随时间的变化规律。由图10(a)可知,在蓄热过程中采用十四醇相变材料的起始融化时间为350 s,完全融化时间为11 550 s。用硬脂酸相变材料的起始融化时间为1 400 s,完全融化时间为10 900 s。这表明蓄热过程中相变材料完全融化时间相差不大。从图10(b)中可知,在释热过程中采用十四醇相变材料的起始凝固时间为50 s,完全凝固时间为11 850 s。用硬脂酸相变材料的起始凝固时间为50 s,完全凝固时间为4 750 s。可知硬脂酸所需的凝固时间比十四醇的融化时间缩短了59.9%。因此对比图9和图10的模拟结果,可知该模拟在仅改变相变温度和相变潜热单一物性参数时结果是准确的。

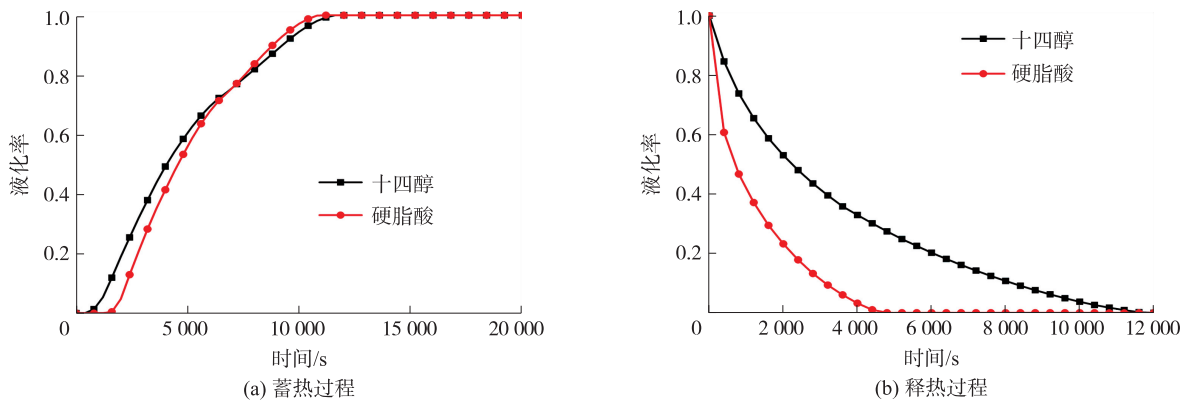


图10 模拟验证

Fig. 10 Simulation verification

4 结论

本文利用 FLUENT 软件对集热器内部换热管不同布置方式、集热器的倾斜角不同时相变材料蓄放热过程特性进行了模拟研究,并讨论了相变温度和相变潜热对蓄放热过程的影响,得出以下结论:

(1)集热器内部换热管并排布置比三角布置时熔化时间减少了约 22.6%,而且在经历同样的熔化进程之后并排布置下相变材料储存的热量更多.因此,蓄能供热型太阳能集热器内热管和蒸发管路将选择并排布置方式.

(2)释热时集热器内相变材料的完全熔化时间不受放置倾斜角的影响,鉴于蓄能供热型太阳能集热器白天蓄能夜间工作,可将其与墙体进行结合,实现建筑一体化,节省占地面积.

(3)利用相变材料液固相变释热来实现供热时,当相变温度满足系统蓄热温度要求后,应选用相变温度越低相变潜热越大的材料.

[参考文献] (References)

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 葛俊鹏. 太阳能作为绿色能源在建筑中的应用研究[J]. 大众标准化, 2021(7): 58-60.
- [3] BADIEI A, AKHLAGHI Y G, ZHAO X, et al. A chronological review of advances in solar assisted heat pump technology in 21st century[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 132: 110132.
- [4] LU J, TANG Y T, LI Z Y, et al. Solar heat pump configurations for water heating system in China[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 187: 116570.
- [5] PINEL P, CRUICKSHANK C A, BEAUSOLEIL-MORRISON I, et al. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(7): 3341-3359.
- [6] 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.
- [7] WU W, DAI S Z, LIU Z, et al. Experimental study on the performance of a novel solar water heating system with and without PCM[J]. Solar Energy, 2018, 171: 604-612.
- [8] 方桂花, 刘殿贺, 虞启辉, 等. 相变材料应用于太阳能供暖系统的可行性分析[J]. 机械设计与制造, 2021(10): 4.
- [9] YOUSSEF W, GE Y T, TASSOU S A. Effects of latent heat storage and controls on stability and performance of a solar assisted heat pump system for domestic hot water production[J]. Solar Energy, 2017, 150: 394-407.
- [10] 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): 234-240.
- [11] 苏庆宗, 段建国, 许立鹏, 等. 有机相变储能材料及强化传热研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(4): 21-25.
- [12] YADAV C, SAHOO R R. Experimental analysis for optimum thermal performance and thermophysical parameters of MWCNT based capric acid PCM by using T-history method[J]. Powder Technology, 2020, 364: 392-403.
- [13] 刘剑桥, 刘泽华, 朱辉, 等. 太阳能热水器研究近况与展望[J]. 建筑节能, 2018, 46(11): 80-85.
- [14] 夏曼, 王晓宇, 吴薇, 等. 内插热管式太阳能集热器内相变材料的蓄热/释热特性研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2020, 20(3): 1-8.
- [15] 孙晨, 邱燕. 石蜡在椭圆套管单元内的蓄热特性研究[J]. 节能, 2020, 39(8): 47-52.
- [16] WU W, WANG X Y, XIA M, et al. A novel composite PCM for seasonal thermal energy storage of solar water heating system[J]. Renewable Energy, 2020, 161: 457-469.
- [17] 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.

[责任编辑: 陈 庆]